



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA COMPOSTAGEM  
MESOFÍLICA E TERMOFÍLICA**

**FRANCIMARA COSTA DE SOUZA**

**CAMPINA GRANDE**

**2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CAMPUS II**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA COMPOSTAGEM**  
**MESOFÍLICA E TERMOFÍLICA**

**FRANCIMARA COSTA DE SOUZA**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2002**

5275 a  
2002

Souza, Francimara Costa de  
Avaliação da eficiência da compostagem  
mesofílica e termofílica/ Francimara Costa de  
Souza – Campina Grande: UFCG, 2004.  
64p.:il.  
Inclui bibliografia  
Dissertação (Mestrado em Eng. Civil)  
UFCG/CCT/DEC  
1. Resíduos Sólidos – Saneamento  
Ambiental 2 – Compostagem – Resíduos  
Sólidos.

CDU: 628.544

---

FRANCIMARA COSTA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA COMPOSTAGEM  
MESOFÍLICA E TERMOFÍLICA**

Dissertação apresentada ao Curso de  
Mestrado em Engenharia Civil da  
Universidade Federal da Paraíba, em  
cumprimento às exigências para  
obtenção do grau de Mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS**

**SUB-ÁREA: ENGENHARIA SANITÁRIA**

**ORIENTADORES: Prof<sup>o</sup> João Tinoco Pereira Neto - PhD**

**Prof<sup>a</sup> Beatriz S. O. de Ceballos – DSc**

Campina Grande – PB

2002

FRANCIMARA COSTA DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA COMPOSTAGEM  
MESOFÍLICA E TERMOFÍLICA**

COMISSÃO EXAMINADORA



---

Prof<sup>o</sup> João Tinoco Pereira Neto /UFV-PhD

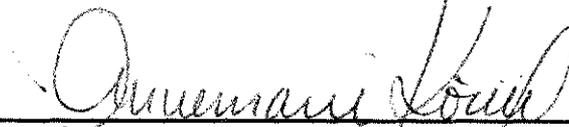
Orientador



---

Prof<sup>a</sup> Beatriz S.O. de Ceballos/ UFPB -DSc

Orientadora



---

Prof<sup>a</sup> Annemarie König/UFPB- PhD

Examinadora Interna



---

Prof<sup>o</sup> Valderi Duarte Leite/ UEPB -DSc

Examinador Externo

Campina Grande-Pb

2002

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais amados, Souza e Oneide,  
que me deram a vida e me ensinaram a  
vivê-la com dignidade, que se doaram  
inteiros e renunciaram seus sonhos em  
favor dos meus, por natureza, por amor.  
Dedico meu amor eternamente.

**“Por isso vos digo: todas as coisas que vós pedirdes orando, crê-de que as haveis de ter, e que assim vos sucederão”.**

**(Marcos XI :24)**

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família, Souza, Oneide, Mara, Regi, André Fagundes, André Fernando, Tatiana, Jana, Rufino, Rosi, Rafael, Andréa, Fernanda, Renan, Adriana, Vitor, e Neném (em memória), por confiarem em mim e pelo amor que me deram para superar essa árdua distância.

Ao meu amigo e orientador Tinôco, por todos os ensinamentos, científicos e religiosos e pelo apoio emocional.

À amiga, orientadora e mãezona, professora Beatriz, que superou a distância, para me orientar e me conduzir com disciplina em todos os momentos do mestrado, de uma de forma linda.

À Universidade Federal da Paraíba (AES/A), funcionários e professores em especial aos Professores Rui de Oliveira e Annemarie Konig, pelos ensinamentos e amizade.

À Universidade Federal de Viçosa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

A todos meus amigos, em especial Drica, Déa, Flá, Maga, Milla e Cá, que me ensinaram como o verdadeiro companheiro torna nossa vida mais feliz.

A você Ju, por sua amizade e por compartilhar uma história, em Viçosa, de trabalho e respeito mútuo.

A todos os companheiros do mestrado, Paulinho, Fredson, Alessandra, Luciana, Helene, Ricardo, Josué, Dantas e Eugêni.

Aos funcionários e estagiários do LESA/UFV, Augustinho “Linhares”, Adriano, Capelão “Capela”, Éder, Fabiana “Fabi”, Herbet, Julio’s, Lu “Moscovisc”, Marcos, Marcelo “Minhon”, Patrícia, Pierre “Cardin”, por toda a amizade e respeito que dedicaram a mim e ao meu trabalho.

À família Rodrigues Marota, pelo apoio e carinho.

Aos amigos Bárbara e Jean pelo apoio, acolhida e incentivo para começar.

A todos que contribuíram para a realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES	IV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Conceitos de Compostagem	5
3.2. Classificação de sistemas de compostagem	6
3.2.1. Quanto ao uso de oxigênio	7
3.2.2. Quanto à temperatura	7
3.2.3. Quanto à tecnologia empregada	9
1.2.2.1. Abertos	9
1.2.2.2. Fechados	9
3.3. Fatores que afetam o processo da compostagem	10
3.3.1 Aspectos microbiológicos	10
3.3.2. Aeração	14
3.3.3. Temperatura	16
3.3.4. Teor de umidade	21

3.3.5. Relação C/N	22
3.3.6. Granulometria do material	23
3.3.7. Potencial Hidrogênionico (pH)	24
3.4. Operação do processo e fases da compostagem	25
3.5. Vantagens e limitações da compostagem	27
3.6. Condições de utilização do composto	28
4. MATERIAS E MÉTODOS	29
4.1. Matéria Prima	32
4.2. Método de compostagem utilizado	32
4.3 Monitoramento Técnicas de amostragem	34
4.4. Determinação de Temperatura	36
4.5. Determinação de Densidade	36
4.6. Determinação do pH	36
4.7. Determinação do Teor de Umidade	37
4.8. Determinação do Teor de Sólidos Totais Voláteis	37
4.9. Determinação do Teor de Sólidos Totais Fixos	38
4.10. Análises Químicas	38
4.11. Determinação da Relação C/N	38
4.12. Determinação de <i>Streptococcus Fecalis</i>	39
5. APRESENTAÇÃO E ANALISES DOS RESULTADOS	40
5.1 Introdução	40
5.2 Temperatura	40
5.3. Densidade	45
5.4. Potencial Hidrogeniônico (pH)	46
5.5. Teor de Umidade	47
5.6. Teor de Sólidos Totais Voláteis	48
5.7. Carbono Orgânico Total	49

5.8. Nitrogênio Total	50
5.9. Fósforo Total	51
5.10. Potássio	52
5.11. Ácidos Húmicos	53
5.12. Relação C/N	54
5.13. <i>Streptococcus Fecalis</i>	54
5.14. Observações Gerais	56
6. CONCLUSÕES	57
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	59

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1. Classificação dos processos de compostagem em função da temperatura.	8
TABELA 3.2. Valores ótimos e limites de pH e de temperatura de fungos filamentosos	13
TABELA 3.3. Tempo e temperatura de exposição para a destruição de ovos de helmintos ( <i>Ascaris Lumbricoides</i> ), nos resíduos sólidos.	19
TABELA 3.4. Relação de C/N ótimas para a compostagem.	22
TABELA 4.1. Características físicas das pilhas de compostagem	30
TABELA 4.2. Parâmetros analisados, métodos utilizados e frequência nas amostras da pilhas de compostagem.	35
TABELA 5.1. Decréscimo de EF em função do tempo de compostagem.	55

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1. Perfil da temperatura na leira de compostagem	18
FIGURA 3.2. Curva padrão de temperatura durante o processo de compostagem	20
FIGURA 4.1. Forma física da pilha PT	31
FIGURA 4.2. Forma física da pilha PM1	31
FIGURA 4.3. Forma física da pilha PMS	31
FIGURA 4.4. Disposição das sondas da pilha termofílica (PT)	33
FIGURA 4.5. Disposição das sondas da pilha mesofílica 2 (PM2)	33
FIGURA 4.6. Disposição das sondas da pilha mesofílica do solo (PMS)	33
FIGURA 5.1. Temperaturas no topo, centro e base da Pilha termofílica (PT) ao longo do tempo.	41
FIGURA 5.2. Corte no topo da Pilha termofílica (PT)	42
FIGURA 5.3. Pilha mesofílica 2 (PM2) disposta na forma trapezoidal	42
FIGURA 5.4. Pilha Mesofílica 2 (PM2) em processo de rebaixamento de altura	43
FIGURA 5.5. Variação da temperatura ao longo do tempo na Pilha mesofílica (PM2)	43
FIGURA 5.6. Disposição da sonda de temperatura na pilha mesofílica do solo (PMS)	44
FIGURA 5.7. Variações da temperatura na pilha PMS e no ambiente	45

FIGURA 5.8. Variações de densidade nas pilhas de compostagem	46
FIGURA 5.9. Variações de pH nas pilhas de compostagem	47
FIGURA 5.10. Variações de Umidade nas pilhas de compostagem	48
FIGURA 5.11. Variações de Sólidos Totais Voláteis nas Pilhas de compostagem	49
FIGURA 5.12. Variações de Carbono Total nas pilhas de compostagem	50
FIGURA 5.13. Variações de Nitrogênio Total nas pilhas de compostagem	51
FIGURA 5.14. Variações de Fósforo Total nas pilhas de compostagem	52
FIGURA 5.15. Variações de Potássio nas pilhas de compostagem	52
FIGURA 5.16. Variações de Ácidos Húmicos	53
FIGURA 5.17. Variações da relação C/N.	54
FIGURA 5.18. Volume das Pilhas PMS, PM2 e PT no final da compostagem	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

EUA – Estados Unidos da América

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

OMS – Organização Mundial da Saúde

APHA – American Public Health Association

PMi – Pilha mesofílica inicial

PM1 – Pilha mesofílica 1

PM2 – Pilha mesofílica 2

PT – Pilha termofílica

PMS – Pilha mesofílica do solo

LESA – Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental

UFV – Universidade Federal de Viçosa

UFC – Unidade Formadora de Colônia

SV – Sólidos Voláteis

SF – Sólidos Fixos

COT – Carbono Orgânico Total

C/N – Relação Carbono e Nitrogênio

pH – Potencial Hidrogênionico

$^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius

hab – Habitante

m – Metros

% - Porcentual

g – grama

mm – milímetros.

Km – Kilometros

N- Nitrogênio

P – Fósforo

K – Potássio

C – Carbono

cm – centímetro

l – litro

meqv – miliequivalente

$\mu\text{m}$ - micrometro

ml - mililitro

Kg – Quilo

## RESUMO

A compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos, produzidos em múltiplas atividades humanas, constitui uma forma de tratamento de crescente importância nas políticas de gestão integrada de resíduos sólidos com benefícios econômicos e ambientais. Especialmente pelo fato de produzir um produto estabilizado e seguro, rico em húmus, que misturado ao solo enriquece a sua qualidade, possibilitando melhor crescimento de culturas e combate à erosão de solos degradados, e conseqüentemente aos processos de desertificação.

Nessa perspectiva apresenta-se um estudo avaliando, em laboratório, o efeito das temperaturas mesofílica e termofílica, desenvolvido no laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), no período de Março a Junho de 2001. Analisou-se também um experimento mantido sob temperatura mesofílica em pátio não pavimentado.

Para a realização do estudo foram montados três experimentos com pilhas de compostagem utilizando-se resíduo sólido orgânico proveniente da cidade de Coimbra-MG.

Os resultados mostraram que os experimentos mantidos com temperaturas termofílicas apresentaram resultados compatíveis para a formação de um composto aceitável. Os dois experimentos, mantidos sob temperaturas mesofílicas, não obtiveram muitas vezes comportamentos aceitáveis, apresentando problemas operacionais, requerendo maiores áreas e inviabilizando a obtenção de um bom composto orgânico.

## ABSTRACT

The composting of the solid waste organic fraction, produced in several humans activity, compose a way of valorization of the crescent importance in the integrate management politics of solid waste with economics and environmental benefits. Specially by the fact of the chance to produce a stabilized and safe product, rich in humus, that when mixed with the soil enrich your quality, making possible better growth of the culture and combat erosion in degrade soils.

In this perspective presents a study evaluating the effect of mesophilic and termophilic temperatures in the LESA composting process, that was developed in the period of march to june of 2001. Was also evaluated a experiment maintained under mesophilic temperature in a no pavement patio.

To the accomplishment of this study was mounted composting piles with the same material for the tree experiments, solid waste organic fraction deriving from Coimbra – MG.

The results showed that the experiments maintained under termophilics temperatures presents compatible results for the formation of acceptable compost, but the two others experiments maintained under mesophilic temperatures did not have a lot of acceptable conducts, presenting operating problems, requesting bigger areas and making impossible to obtain a god organic compost.

## 1. INTRODUÇÃO

O precário tratamento e a destinação final inadequada dos resíduos sólidos urbanos, produzidos nas diversas atividades humanas e indústrias, é um dos principais responsáveis por danos ambientais e pela degradação da saúde pública. Esses problemas vêm se agravando, principalmente em países em desenvolvimento, devido ao crescimento acentuado da produção e a mudança nas características desses resíduos.

Nos Estados Unidos, o total de resíduos sólidos recolhidos por ano foi em 1996 de 209 milhões de toneladas e 217 milhões de toneladas em 1997. Do total desse lixo, 55% teve destino em aterros sanitários, enquanto 17% em incineradores (WASTE AGE, 1999).

No Brasil, o crescente aumento da população nos grandes centros urbanos e o avanço tecnológico estimula o consumo e conseqüentemente a grande produção de resíduos, favorecendo a falta de estruturas para a destinação adequada desses resíduos.

Segundo pesquisa do IBGE, o total de resíduos sólidos produzidos diariamente no Brasil em 1990 atingia 241.614 toneladas, sendo 130.000 toneladas de resíduos domiciliares e 111.000 toneladas de resíduos indústrias, de saúde, comerciais e públicos. Desse total, cerca de 74% eram destinados a céu aberto e apenas 24% recebiam algum tratamento, como compostagem e reciclagem, aterros sanitários e controlados e incineração. Em geral, o nível de atendimento dos serviços de coleta nos municípios brasileiros varia de 60% a 80% dos domicílios, tendo um pequeno percentual uma adequada destinação, o que gera emissões poluentes características dos RSU em aterros e lixeiras, como os lixiviados e o biogás.

Dentre os resíduos comumente produzidos pelo homem têm-se, como os mais expressivos, os lodos de esgoto e a fração orgânica do lixo urbano, sendo esta última a maior, com valores entre 55% a 65% (IPT, 2000).

Essa grande produção de matéria orgânica, seu desperdício e abandono a céu aberto, ocasionam gravíssimos danos ao meio ambiente. A fração orgânica constitui o maior problema dos RSU brasileiro, visto que pode abrigar microrganismos patogênicos, e no seu processo de biodegradação liberar gases mal cheirosos e até tóxicos, além do chorume, de alta carga poluidora. Sugere-se um tratamento adequado que passa pela valorização deste

material como nutrientes que podem ser retornados ao solo e com diversidade biológica que contribui, melhorando suas propriedades de aeração, de formação de agregados, etc. Com essa perspectiva, a compostagem constitui uma solução bastante apropriada por permitir redução de custos, bem como por produzir um composto condicionador e fertilizante com valor na recuperação de solos. O processo de tratamento da fração orgânica dos resíduos através da compostagem, reduz a quantidade de resíduos a serem depositados em aterros, sendo esta uma outra vantagem adicional.

## 2.OBJETIVOS

Neste trabalho objetivou-se:

- 1- Avaliar a eficiência do processo LESA de compostagem quando conduzido sob temperaturas termofílicas e mesofílicas.
- 2- Estudar a evolução temporal da temperatura em leiras de compostagem de resíduos sólidos orgânicos, com duas formas geométricas diferentes: cônica e trapezoidal.
- 3- Avaliar as variações de temperatura, umidade, pH, SV, SF, N, P, K, Ácido húmico e *estreptococos fecais* em leiras mantidas sob temperaturas mesofílica e termofílica.
- 4- Avaliar a influência do tipo de piso do pátio nas leiras de compostagem na evolução da temperatura.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A taxa de produção diária de lixo por habitante tem aumentado gradualmente em todo o mundo. Em meados da década de 50, o Brasil, apresentava um per capita médio da ordem de 0,4 Kg/ hab.dia, crescendo para a década de 90 para valores próximos de 0,6 Kg/hab.dia (AZEVEDO, 1993). Já cidades como São Paulo produzem aproximadamente 1 Kg/hab.dia (LIMA, 1995). Essas quantidades comparadas com as taxas encontradas em países como EUA, de aproximadamente 2,6 Kg/ hab.dia, mostra a elevada produção de resíduos nos países desenvolvidos e nas regiões industrializadas do terceiro mundo (Waste Age, 1999).

O lixo urbano é “uma massa heterogênea de resíduos sólidos resultantes das diversas atividades humanas, a qual pode ser reciclada e parcialmente utilizada, gerando entre outros benefícios, proteção a saúde pública e economia de energia e de recursos naturais”(PEREIRA NETO, 1996). Uma outra definição dada segundo a NBR-10.004-87, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, diz que “resíduos sólidos são resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade, de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição”.

Muitos dos resíduos produzidos nas diferentes atividades são ricos em matéria orgânica, a qual devidamente separada e preparada deve passar por um processo de degradação biológica chamado de compostagem. A degradação biológica da matéria orgânica sempre ocorreu na natureza, envolvendo vegetação e animais mortos, por um processo natural e espontâneo (KIEHL, 1985). Foi da observação deste processo natural de decomposição que o homem tentou reproduzi-lo, visando entre outros objetivos, o melhoramento de solos pobres ou intensamente utilizados.

A compostagem moderna surge apenas na década de 20, do século XX, em Indore na Índia. Este processo ficou conhecido como processo Indore ou método Howard e era aplicado em pequenas comunidades, utilizando restos de vegetais e fezes de gado, os quais eram colocados em leiras durante seis meses e revolvidos duas vezes neste período, permitindo que as pilhas atingissem temperaturas elevadas e sem controle (KIEHL, 1985). Diversos melhoramentos foram introduzidos a este processo original de compostagem,

controlando parâmetros como temperatura e umidade e conseqüentemente estimulando a aceleração do processo (GOTAAS 1956, *apud* PEREIRA NETO, 1987).

Essas melhoras no processo tiveram como causa o crescimento das zonas urbanas nas cidades, em particular na década de 30, como conseqüência da necessidade de dar um destino mais adequado à produção de resíduos de natureza orgânica doméstica e industrial. Desta forma foram introduzidos equipamentos para reduzir o excesso de mão de obra e acelerar o tempo de compostagem (KIEHL, 1985).

A investigação de técnicas de compostagem tem em geral como alvo de estudos os principais parâmetros que afetam o processo bem como a atividade microbiana existente na massa. Desses parâmetros podem se destacar: temperatura, teor de umidade, relação C/N, oxigenação, tamanho das partículas e pH (PALMISANO e BARLAZ, 1996).

### **3.1. Conceitos de compostagem**

A compostagem é considerada “um processo aeróbio que se desenvolve segundo determinados parâmetros de controle”. Considera-se, porém que a compostagem pode ser aeróbia ou anaeróbia, pois ainda não há um conceito universalizado. Algumas vezes só a temperatura é referida como um parâmetro auto-suficiente no arranque e aquecimento das leiras ou pilhas e em certas circunstâncias, autolimitante (FINSTEIN, et al., 1983). A compostagem é normalmente realizada em pátios, nos quais o material é disposto em montes de forma cônica, conhecidas como pilhas, ou montes de forma prismática, denominados leiras (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Segundo HAUG (1993), a compostagem é a decomposição e estabilização biológica da matéria orgânica sob condições que permitam o desenvolvimento de temperaturas termofílicas, originadas pelo calor produzido durante a atividade biológica, e cujo produto final é suficientemente estável para armazenamento e aplicação no solo sem quaisquer efeitos ambientais adversos. Ou seja, a compostagem é uma forma de estabilização de resíduos que exige condições especiais de decomposição e oxigenação para permitir o desenvolvimento de temperaturas elevadas.

PEREIRA NETO (1987), considera a compostagem “como um processo aeróbio controlado, desenvolvido por uma população de microrganismos que se realiza em duas fases: na primeira, a fase ativa, ocorrem reações bioquímicas de degradação

predominantemente termofílicas e na segunda ou de maturação, ocorre a humificação”. Outros autores indicam que há quatro fases da compostagem baseados na temperatura: a mesofílica (I), a termofílica (II), a fria (III) e a de maturação (IV) (GAY et al, 1971 *apud* PALMISANO E BARLAZ, 1996; FINSTEIN e MILLER, 1985).

O resultado final do processo de compostagem é o composto humificado que possui cheiro de terra e é facilmente manuseado e estocado. Quando aplicado ao solo contribui significativamente para a fertilidade e a estrutura deste (KIEHL, 1998). Segundo o mesmo autor a palavra “composto” é originária do vocábulo inglês “compost”, sendo utilizada para indicar o fertilizante, obtido de resíduos orgânicos variados, como lodos de esgoto, poda, serragem, resíduos orgânicos de feira, resíduos orgânicos domiciliares, lã de carneiro, esterco bovino, entre outros que estão a cada ano sendo pesquisados e muitas vezes incorporados entre si. As palavras compostar e compostagem são usadas para indicar a ação ou o ato de preparar o adubo, e não estão descritas no dicionário de língua portuguesa.

### **3.2. Classificação dos sistemas de compostagem**

DE BERTOLDI et al. (1991) consideram a disponibilidade de oxigênio como o principal fator que influencia na tecnologia da compostagem. Estes autores classificam os sistemas de compostagem quanto ao ambiente, em sistemas abertos e fechados. No primeiro a compostagem é realizada ao ar livre, em pátios de maturação, em pilhas revolvidas ou pilhas estáticas arejadas. No segundo, a compostagem é realizada em dispositivos especiais, designados como bioestabilizadores, digestores, torres e células de fermentação.

GOLUEKE (1977), descreve que os sistemas de compostagem estão classificados em função de: 1) disponibilidade de oxigênio (aeróbio ou anaeróbio); 2) a faixa de temperatura predominante (mesófila ou termófila); 3) a tecnologia empregada (sistemas abertos e fechados). Já HAUG (1993), classifica em sistemas não reatores (pilhas reviradas e pilhas estáticas) e sistemas reatores (reatores verticais e horizontais ou inclinados). Segundo KIEHL (1985), os sistemas estão classificados: 1) quanto à aeração (aeróbio e anaeróbio); 2) quanto à temperatura (criófila, mesófila e termófila); 3) quanto ao ambiente (abertos e fechados); 4) quanto ao tempo (lentos e acelerados).

A classificação dos sistemas de compostagem empregada no presente trabalho seguem PEREIRA NETO (1996), que os classifica quanto a temperatura (mesófila e termófila), quanto a tecnologia empregada (abertos e fechados) e quanto ao uso de oxigênio (aeróbios e anaeróbios).

### **3.2.1. Quanto ao uso de oxigênio**

O autor supracitado, em uma versão moderna conceitua a compostagem como um processo aeróbio, devido os inconvenientes dos processos anaeróbios (baixos valores de temperatura, emanção de odores desagradáveis e maior intervalo de tempo para a decomposição da matéria orgânica). Por esse motivo não será considerada na presente revisão a compostagem anaeróbia.

Segundo DE BERTOLDI e MANZONO (1988), o suprimento de oxigênio constitui-se em um dos fatores mais influenciados pela tecnologia em torno da qual os processos são desenvolvidos, os métodos que promovem a aeração variam desde equipamentos simples, até os mais complexos, como aqueles existentes nos reatores dos processos fechados.

O sistema aeróbio procura garantir a presença do oxigênio atmosférico evitando-se a compactação da massa e o encharcamento. A decomposição aeróbia é caracterizada pela elevação da temperatura acima da reinante no ambiente e pelos tipos de gases que se desprendem; nesse sistema a matéria orgânica pode atingir a completa estabilização (KIEHL 1985).

### **3.2.2. Quanto à temperatura**

Em relação à temperatura de crescimento dos microrganismos, a compostagem pode ser mesófila ou termófila e estas designam a faixa ótima de temperatura para a atividade dos diversos microrganismos que atuam no processo (LELIS, 1998).

Para GOLUEKE (1977), o termo mesófilo é utilizado para identificar os organismos com faixa ótima de crescimento e multiplicação, entre 8/10<sup>0</sup>C a 45<sup>0</sup>C. Aqueles organismos cuja temperatura ótima situa-se acima de 45<sup>0</sup>C são designados de termófilos. O autor classifica como compostagem mesófilica o processo no qual a temperatura situa-se

entre 15 e 25<sup>o</sup>C, e como compostagem termófila aquela que apresenta temperatura na faixa de 45 a 65<sup>o</sup>C.

Para a WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF, 1985), a atividade microbiana que ocorre durante a compostagem pode ser classificada em três estágios em função da temperatura predominante: 1) estágio mesófilo, quando a temperatura da massa de compostagem sobe até 40<sup>o</sup>C; 2) estágio termófilo quando a temperatura varia de 40 a 70<sup>o</sup>C; 3) período de resfriamento associado à diminuição da atividade microbiológica, quando a temperatura fica em torno dos 28-37<sup>o</sup>C.

Não há coincidência entre os valores das faixas de temperaturas que caracterizam os processos. A Tabela 3.1 apresenta as faixas de temperaturas definidas por diferentes autores.

Tabela 3.1: Classificação dos processos de compostagem em função da temperatura de acordo com vários autores.

Temperatura de Início (°C)	Temperatura de Fim (°C)	Autor
25 a 43	45 -85	WPCF (1970)
25 – 40	> 45	Brock (1970)
20 – 45	> 55	Stainer et al.(1976)
15 – 45	45 - 65	Alexander (1977)
8 – 50	> 50	Golueke (1977a)
15 – 25	45 - 65	Golueke (1977b)
10 – 40	40 - 70	Cardenas e Wang (1980)
20 – 40	> 40	Biddlestone et al. (1981)
45 a 55	>55	Kiehl (1985)
< 40	>40	Palmisano e Barlaz (1996)

Fonte: Adaptado de Russo, (1998).

### **3.2.2. Quanto à tecnologia empregada**

#### **3.2.2.1. Sistemas Abertos**

São processos realizados inteiramente em ambientes abertos (pátios de compostagem) e apresentam-se como os processos mais comuns usados atualmente na compostagem municipal. Nestes casos, a fração orgânica, após separação de materiais inertes e trituração, é colocada em pilhas ou leiras de seção transversal geralmente triangular de altura entre 1,5 a 1,8 m (CARDENAS e WANG, 1980; KIEHL, 1985).

Basicamente, os sistemas abertos apresentam as seguintes formas de aeração: a) reviramento das pilhas; b) aeração forçada mecanicamente através da injeção ou sucção de ar, em leiras estáticas. Estes processos são também chamados de compostagem natural e são indicados para cidades com populações menores que 200.000 habitantes (PEREIRA NETO, 1987).

#### **3.2.2.2. Sistemas Fechados**

Nestes sistemas, a compostagem é realizada no interior de reatores diversos, como silos, cilindros, torres e células de fermentação (KIEHL, 1985).

Em razão de ser um processo de controle operacional elevado, a decomposição dos resíduos ocorre em velocidades bem maiores que na compostagem natural e o tempo de detenção do material no biodigestor em geral é bastante curto, podendo ser apenas de seis dias para a fase ativa (KIEHL, 1985; PEREIRA NETO, 1987; RESENDE, 1991).

Deve-se lembrar, entretanto, baseando-se nos princípios de degradação biológica dos quais depende a sucessão das diferentes espécies de microrganismos, que para obter-se um produto final com um grau de estabilização e maturação aceitáveis, deve-se respeitar um período mínimo de degradação de um mês (DE BERTOLDI, 1988).

A compostagem com digestor é geralmente indicada para cidades com uma população maior que 200.000 habitantes e caracteriza-se pelo uso de equipamentos. Para ser considerada ideal, essa usina deve ter fosso com ponte rolante e pólipó (garra ou "grob"), separador eletromagnético, separador pneumático, separador balístico que projeta o lixo em tratamento na usina (LIMA, 1991).

Os sistemas fechados de compostagem apresentam as seguintes vantagens: 1) rápida decomposição microbiológica, com baixa produção de odores; 2) destruição de microrganismos patogênicos pelas altas temperaturas alcançadas; 3) grande flexibilidade operacional; 4) baixo consumo de energia externa (GOTAAS, 1956; SHUVAL et al., 1981 *apud* PEREIRA NETO, 1987).

As desvantagens para esses sistemas é que em geral requerem maiores áreas e necessitam de mão-de-obra mais especializada (PEREIRA NETO, 1987).

### **3.3. Fatores que afetam o processo da compostagem**

#### **3.3.1. Aspectos microbiológicos**

A decomposição ou estabilização da matéria orgânica, ocorrida durante o período de compostagem, se deve a atividade de vários grupos de microrganismos (PALMISANO e BARLAZ, 1996). A WPCF (1985), relata que estes microrganismos são principalmente bactérias, como eubactérias e os actinomicetos, além de numerosos fungos.

GOLUEKE (1991), relata que inicialmente encontram-se na massa de compostagem grupos diversificados de microrganismos como vírus, protozoários e vermes. Somente com o decorrer do processo, as bactérias e os actinomicetos tornam-se predominantes. Esse processo ocorre devido à sucessão microbiana que se dá dentro da massa de resíduo (NAKASAKI, et al., 1985).

De acordo com PELCZAR et al. (1996), as bactérias e os microrganismos em geral precisam de condições físicas ambientais adequadas ao seu crescimento, por isso as variações térmicas também influenciam os processos metabólicos celulares e assim são classificados como:

-psicrófilos: capazes de crescer em temperaturas menores que 10<sup>0</sup>C e até a 0<sup>0</sup>C ou menor, porém sua temperatura ótima geralmente está entre 10 e 15<sup>0</sup>C.

- mesófilos: faixa de temperatura de crescimento é entre 25 a 40<sup>0</sup>C

- termófilos: crescem melhor entre 45 a 70<sup>0</sup>C ou superior. O limite inferior de crescimento de algumas bactérias termófilas se estende para a zona mesófila. Estas espécies recebem a designação de termófilas facultativas. Outras espécies do grupo termófilo se desenvolvem melhor em temperaturas acima de 70<sup>0</sup>C e até em temperaturas de

vulcões (850<sup>o</sup>C), não se desenvolvendo na faixa mesófila; são chamadas de bactéria termófilas verdadeiras, termófilas obrigatórias ou esternotermófila.

A sucessão microbiana que ocorre nas leiras de compostagem deve-se as variações das condições físicas do ambiente das leiras, que condicionam os tipos de microrganismos predominantes em cada uma das etapas do processo. Assim, inicia-se a compostagem com temperaturas mesofílicas que rapidamente entram na faixa termofílica, provocando a seleção das bactérias termófilas para a continuação do processo (MILLER, 1996).

PALMISANO e BARLAZ (1996), destacam a presença nos sistemas de compostagem, de um considerável percentual de bactérias termofílicas no controle do processo. Estas se multiplicam rapidamente, pela disponibilidade de substratos e pela temperatura adequada e por isso são encontradas ao longo de todo o processo (MILLER, 1996).

A maior parte das bactérias desempenham seu principal papel na fase termofílica, decompondo açúcares, amidos, proteínas e outros compostos orgânicos de fácil digestão. A função das bactérias pode ser resumida nas seguintes atividades: decomposição da matéria orgânica seja ela animal ou vegetal; aumentar a disponibilidade de nutrientes; agregar partículas no solo e fixar o nitrogênio (BIDONE e POVINELLI, 1999).

A presença excessiva ou ausência de oxigênio afeta com igual intensidade a temperatura de crescimento microbiano (PELCZAR et al., 1996). Desta forma, as bactérias são classificadas em vários grupos segundo as suas necessidades de oxigênio. Estes mesmos autores consideram apenas três grupos: aeróbios, anaeróbios e anaeróbios facultativos.

Entretanto, outros autores distribuem as bactérias em cinco grupos (BARBOSA e TORRES, 1999):

- aeróbias estritas: têm necessidade absoluta de oxigênio livre;
- anaeróbias estritas: para as quais o oxigênio livre é letal;
- anaeróbias aerotolerantes: não utilizam o oxigênio, mas são capazes de neutralizar os seus efeitos tóxicos;
- anaeróbias facultativas: crescem tanto na presença como na ausência do oxigênio livre;

- bactérias microaerófilas: crescem na presença de concentrações baixas de oxigênio, mas não o toleram em altas concentrações.

Outra variável ambiental de grande influência no metabolismo microbiano é o pH. BLACK (1996) e PELCZAR et al. (1996) consideram quatro grupos de bactérias segundo sua afinidade por ambientes mais ácidos ou básicos:

- acidófilas: entre 1,8 e 5;
- neutrófilas: entre 5 e 9, que compreendem a maior parte das espécies conhecidas;
- alcalófilas: entre 9 e 11.

Na compostagem, os valores de pH variam entre 6 (início do processo) até aproximadamente 8,5 (na fase final), determinando então a predominância de populações microbianas neutrófilas e alcalófilas (MILLER, 1996).

As bactérias necessitam de condições úmidas para o crescimento, variável este definido como atividade da água e medido no processo de compostagem como umidade.

MERCEDES (1993), relata que a eliminação de patógenos em áreas específicas dentro da massa de compostagem está diretamente relacionada às temperaturas nelas desenvolvidas e quanto maior a temperatura, maior será a eliminação de patógenos, assim como dos microrganismos em geral. Portanto a homogeneização da distribuição das temperaturas no interior das pilhas tende a otimizar este desempenho. Segundo MILLER (1996), em temperaturas acima de 65<sup>o</sup>C a população tende a ficar menos diversificada e a se reduzir, ficando apenas as termotolerantes e termófilas verdadeiras. O autor exemplifica com resultados obtidos de sistemas abertos, onde foi observado que temperaturas maiores que 80<sup>o</sup>C reduziram em três semanas 10% dos Sólidos Voláteis enquanto que temperaturas entre 50 e 60<sup>o</sup>C provocaram reduções de 40% em 7 dias.

Os fungos são organismos aeróbios, não fotossintéticos, heterotróficos, com grande capacidade de degradar matéria orgânica complexa como a celulose, hemicelulose e lignina. Alguns podem se reproduzir a altas temperaturas, como as que se verificam na fase termófila da compostagem, entre 40<sup>o</sup>C e 65<sup>o</sup>C (MILLER, 1996). Os fungos são encontrados na parte externa da massa de compostagem, próximo à superfície (GOLUEKE 1977).

A Tabela 3.2 mostra os valores ótimos e limites e as faixa de pH e de temperatura de crescimento de bolores (fungos filamentosos), segundo BARBOSA e TORRES, (1999).

Tabela 3.2 – Valores ótimos e limites de pH e de temperatura de fungos filamentosos.

pH	2-9	5 e 6
Temperatura (°C)	0-62	22-30

Fonte: BARBOSA e TORRES, (1999).

Numerosos fungos são produtores de antibióticos e estes funcionam como mecanismos competitivos auxiliando na eliminação de outros microrganismos que competem pelos mesmos substratos. No geral os fungos crescem e seus antibióticos são produzidos na fase de maturação, quando a competição com as bactérias está bastante reduzida. Nesta fase, permanecem moléculas orgânicas complexas como lignina, quitina e celulose que as exoenzimas fúngicas podem biodegradar (BOLLEN, 1984).

A diversidade de fungos na compostagem foi estudada por ARAGÃO et al. (2000), na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em leiras de compostagem montados com resíduos de frutas e verduras e outras montadas com bagaço de cana e resíduos de poda. Entre os gêneros isolados destacaram-se *Aspergillus*, *Penicillium* e *Rhizopus*, embora em menores concentrações que as bactérias heterótrofas totais e actinomicetos. Os autores mediram concentrações de  $1 \times 10^6$  UFC/g, para os fungos,  $10^7$  a  $7,5 \times 10^8$  UFC/g para actinomicetos e  $2 \times 10^3$  a  $3 \times 10^6$  UFC/100g para bactérias heterótrofas.

Os actinomicetos são um grupo de bactérias filamentosas de crescimento lento muito freqüentes na compostagem (MILLER, 1996).

Para a WPCF (1985), a função dos actinomicetos na compostagem ainda não está bem definida. Estes organismos degradam as hemiceluloses e metabolizam uma grande variedade de compostos orgânicos como açúcares, amido, lignina, proteínas, ácidos orgânicos e polipeptídeos. Compostos orgânicos que desenvolvem actinomicetos específicos com produção de antibióticos podem ser usados para tratar ou evitar doenças de plantas além de outras aplicações que o composto apresenta como fornecedores de nutrientes e melhoramentos de solos (ARAGÃO, 2000).

Segundo MILLER (1996), os actinomicetos termofílicos como *Streptomyces sp*, *Thermomonospora sp* e *Thermoactinomyces vulgaris* toleram temperaturas maiores que  $60^\circ\text{C}$ . O mesmo autor destaca que estas bactérias têm preferência por condições aeróbias e

pH neutro tendendo a alcalinos. DE BERTOLDI et al. (1988), observam que os actinomicetos crescem melhor com redução da temperatura para a faixa mesófila (menores que 45 °C) e com a redução de umidade (em uma faixa de 30%).

A atividade metabólica dos actinomicetos é fundamental para a humificação da matéria orgânica e a produção de compostos aromáticos. Isso faz com que esses organismos sejam essenciais para a fase de maturação, estágio final do processo. Entretanto eles também participam da fase de degradação ativa, em menores concentrações (NAKASAKI et al, 1985).

### 3.3.2. Aeração

Segundo alguns autores a compostagem deve ser feita em ambiente aeróbio, para que a decomposição seja mais rápida e não sejam gerados maus odores (KIEHL, 1985; PEREIRA NETO, 1987; BIDDLESTONE, 1981; GOLUEKE, 1991).

Segundo PEREIRA NETO (1996), a aeração da massa em compostagem deve ter uma periodicidade certa para que não altere as atividades metabólicas dos microrganismos e para que o processo de degradação seja mais rápido por via da oxidação das moléculas orgânicas presentes na massa de resíduos. A aeração é o fator mais importante para o controle dos diversos parâmetros da compostagem, considerando a necessidade de suprir a demanda de oxigênio para os microrganismos. Segundo KIEHL (1998), o consumo de oxigênio pelos microrganismos aeróbios em uma leira de compostagem depende da temperatura, da granulometria dos resíduos, da composição da matéria-prima, do teor de umidade e do fornecimento de oxigênio pelos revolvimentos ou pela aeração forçada. O mesmo autor cita que o consumo máximo de oxigênio ocorre quando a temperatura da leira está em torno de 55°C, fase em que se torna necessário encontrar um mecanismo de aeração capaz de satisfazer a tal demanda (KIEHL, 1985).

Uma leira que fica muito tempo sem ser revolvida gera altas temperaturas, provocando um lento metabolismo da população microbiana, retirando também umidade da massa em compostagem (FINSTEIN, 1980 e STENTIFORD, 1991).

Segundo KIEHL (1998), o revolvimento do composto, no pátio ao mesmo tempo em que introduz ar novo rico em oxigênio, libera o ar contido na leira, saturado de gás carbônico gerado pela respiração dos organismos. BRADY (1989) e KIEHL (1998),

comentam que se o teor de oxigênio baixar durante o processo, implicará na morte de microrganismos aeróbios, os quais serão substituídos pelos anaeróbios resultando numa decomposição mais lenta da fração orgânica que é caracterizada por baixas temperaturas, pela produção de maus odores, pelo maior tempo de cura em relação ao processo aeróbio e pela tendência do composto em se tornar ácido.

Segundo KIEHL (1998), o revolvimento tem por finalidade:

- remover o excesso de gás carbônico da leira, introduzindo ar atmosférico rico em oxigênio, o qual é consumido rapidamente no metabolismo microbiano;
- homogeneizar a massa em compostagem, para uniformizar a umidade e a comunidade de microrganismos; desfazer as diferentes camadas estratificadas de temperatura, geradas na leira. Deve-se lembrar que permanecendo muito tempo sem ser revolvida a leira gera pelo menos duas principais camadas diferenciadas: uma superior que a reveste, mais seca e menos densa onde a decomposição aeróbia é mais ativa, por efetuar mais facilmente trocas de gases com a atmosfera; outra inferior interna, mais úmida, mais densa, onde a decomposição, por excesso de umidade e baixa porosidade causada pela compressão da camada superior, pode se tornar anaeróbia. Conseqüentemente o revolvimento ideal é aquele que realiza a inversão dessas duas camadas;
- efetuar o controle sanitário da leira, uma vez que a fina camada de cobertura mais externa, com espessura de uns 10cm, é ressecada e não se aquece, portanto pode não eliminar os organismos patogênicos. Para que isso aconteça, é necessário que essa camada de cobertura seja incorporada à massa aquecida por ocasião do revolvimento da leira.

Um processo de compostagem com uma frequência de aeração a cada 3 dias durante a fase de degradação ativa, foi desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) e vem apresentando excelentes resultados, suprimindo as necessidades de oxigênio dos microrganismos, ao mesmo tempo em que permite a manutenção de temperaturas adequadas e ótimos teores de umidade na compostagem de resíduos sólidos urbanos (PEREIRA NETO, 1985).

Saber atender as necessidades de aeração da massa de compostagem (independente do material e do processo utilizado) é fator imprescindível para definir criteriosamente o ciclo de aeração a ser fornecido durante o processo (GOLUEKE, 1991).

### 3.3.3. Temperatura

Segundo DIAZ et al, (1993) e PEREIRA NETO (1996) a temperatura revela mais sobre o processo de compostagem do que qualquer outra variável. Para OBENG e WRIGHT (1987) a temperatura é o fator mais confiável para ser utilizado como indicador da eficiência da compostagem.

Segundo PEREIRA NETO (1985), os processos de compostagem modernos estão cada vez mais associados às temperaturas das fases termofílicas, controladas em torno de 55°C. As temperaturas mesofílicas ocorrem mais no início do processo (primeiros três dias) e no final (fase de maturação), existindo ainda temperaturas mesofílicas nas zonas periféricas das pilhas de compostagem, nos cantos e na base das pilhas, mesmo durante a fase de degradação ativa que se apresenta, predominantemente, termofílica. ARAGÃO et al (2000), observaram que a temperatura eleva-se rapidamente nos primeiros dias de monitoramento, chegando até a ultrapassar 60°C, em leiras de frutas e verduras misturadas com bagaço de cana e poda, por isso sugerem um exaustivo controle deste parâmetro, efetuando diversos reviramentos para que essa temperatura se mantenha na faixa dos 55°C. STENTIFORD (1991) considera que nesse valor de temperatura ocorre a maior sanitização do material, garantindo a eliminação da maioria dos microrganismos patogênicos. Porém, um valor de temperatura exato é poucas vezes conseguido, então valores entre 45 e 59°C são descritos por alguns autores como a faixa de temperatura ideal. Entretanto essa faixa de temperatura é muito relativa e não obedece a uma regra, pois a temperatura na massa de compostagem atrela-se a fatores como tipos de resíduos, formato da pilha, dimensões das partículas e da própria pilha (MILLER, 1996).

REIS et al. (2000), trabalhando com resíduos de podas urbanas picadas, resíduos orgânicos de feiras e lodos de esgoto observaram que o processo de compostagem é afetado pelas condições climáticas (precipitação e temperaturas ambientes) e pela configuração geométrica da leira.

As temperaturas termofílicas são uma consequência natural da atividade microbiológica aeróbia, que gera calor resultante das reações de decomposição. Temperaturas de 80°C são atingidas facilmente em processos de compostagem em condições favoráveis de umidade (55%), oxigenação (15 a 20%) e C/N (25/1) (DE BERTOLDI et al., 1991; PEREIRA NETO, 1989b). Períodos longos com esses valores de

temperatura não são sugeridos, pois aumentam o tempo do processo pela própria seleção de bactérias no meio (KINLEY E VESTAL, 1984 *apud* MILLER, 1996). Segundo BIDDLESTONE et al. (1981) essas temperaturas extremas são prejudiciais porque ocorre uma considerável redução da biodiversidade. WAKSMAN (1983), comenta que a temperatura ao atingir a faixa de 80 a 85<sup>o</sup>C elimina quase que completamente a atividade microbiana predominando então reações químicas.

A temperatura por si só seria capaz de provocar sucessões de populações em um ecossistema, favorecendo as atividades metabólicas de um grupo e gerando calor com novo incremento da temperatura e modificando esse grupo e assim por diante, em um processo cíclico, até a inviabilização do sistema com eliminação dos microrganismos (FINSTEIN et al.,1980).

Influencia também no desenvolvimento da temperatura a quantidade de material compostado e o tamanho da leira. Segundo FERNANDES (1999), quando pequenos volumes de matéria orgânica são decompostos, o calor gerado pelo metabolismo microbiano se dissipa e o material não se aquece; no entanto, quando se processa a compostagem de resíduos orgânicos em montes, trabalhando-se com grandes massas, por serem tais materiais bons isolantes térmicos pode ocorrer que o calor desenvolvido se acumule e a temperatura alcance valores elevados (cerca de 80<sup>o</sup>C).

A Figura 3.1 mostra o perfil de temperatura observada na compostagem por FERNANDES (1999), em leiras de formato cônico, monitoradas em pátio de compostagem coberto e pavimentado.



Figura 3.1: Perfil da temperatura na leira de compostagem (Fonte: Fernandes, 1999)

Observa-se que a temperatura decresce desde a superfície até a zona central com valores que variam de 30<sup>0</sup>C nas zonas mais externas até 60<sup>0</sup>C no interior, ou seja, ocorre uma variação de até 30<sup>0</sup>C entre o interior e o exterior, em uma distância de aproximadamente 0,5 m.

No centro da pilha ocorrem processos ativos de decomposição devido aos fenômenos de convecção do ar. Esse fenômeno aumenta a pressão do ar dentro da pilha à medida que a temperatura se eleva através da intensa atividade microbiana, aliada ao fluxo de saída que tende a deixar o interior da pilha indo em direção ao topo. Este que está em constante troca de calor com a atmosfera tende a desenvolver temperaturas menores. A temperatura ambiente não tem grandes influências sobre a temperatura da pilha, embora pode influenciar pelas dimensões dessas pilhas já que algumas dimensões favorecem a troca de calor com o meio (KIEHL, 1985; MILLER, 1996).

A maioria dos autores, concordam que pilhas de formato cônico, com alturas entre 1,5 e 1,8 m, favorecem o processo (KIEHL, 1985; PEREIRA NETO, 1996; RUSSO, 1998).

FERNANDES (1999), cita varias razões pelas quais é importante se manter temperaturas termofílicas, na faixa de 55<sup>0</sup>C durante a fase de degradação ativa do processo:

- permite o crescimento de uma população microbiana mais diversificada, para que aumente a degradação ativa, pois como foi citado, esses microrganismos são de importância fundamental na compostagem.
- aumenta a taxa de decomposição da matéria orgânica, pois aumenta a população dos microrganismos no processo;
- atua como o mais importante mecanismo de inativação de microrganismos patogênicos. A temperatura/tempo aumenta a eliminação de patógenos quando controlada em torno de 65<sup>0</sup>C, pois as variações para mais ou para menos podem provocar alguma perda no sistema, a manutenção de temperaturas acima de 50<sup>0</sup>C durante 40 minutos a 1 hora provoca a destruição da maioria dos patógenos, assegurando-se que *Salmonella typhy*, *Salmonella spp*, *Shigella spp*, *Escherichia coli*, entre outras bactérias sejam destruídas assim como os vírus (MERCEDES, 1993; KIEHL, 1985);

- permite a eliminação de sementes, ovos de helmintos, larvas de insetos. GOLUEKE (1990) afirma que os ovos de helmintos como *Ascaris lumbricoides* podem permanecer viáveis no solo por 2 anos. Esse helminto é de distribuição universal, com elevados índices de infestações. Calcula-se que uma entre 4 pessoas teve ascaridíase na América Latina (PESSÔA e MARTINS 1982). O ovo desse helminto foi escolhido como indicador parasitológico em águas residuárias e lodos destinados a reuso (OMS, 1995). A Tabela 3.3 apresenta valores do binômio tempo/temperatura citado por vários autores para a destruição dos ovos de *Ascaris lumbricoides*.

Tabela 3.3 – Tempo e temperatura de exposição para a destruição de ovos de helmintos (*Ascaris lumbricoides*), nos resíduos sólidos segundo vários autores.

55 <sup>0</sup> C	2 horas	Keller (1951)
50 <sup>0</sup> C	1 hora	Roediger (1967)
60 <sup>0</sup> C	1 hora	Ward, et al. (1977)
60 a 70 <sup>0</sup> C	43 minutos	Wiley, et al (1969)
103 <sup>0</sup> C	3 minutos	Shuval, et al (1981)

Fonte: Russo, (1998).

A evolução da temperatura na compostagem, como já foi citado, apresenta várias fases. A Figura 3.2 mostra uma curva típica da variação da temperatura ao longo do processo.

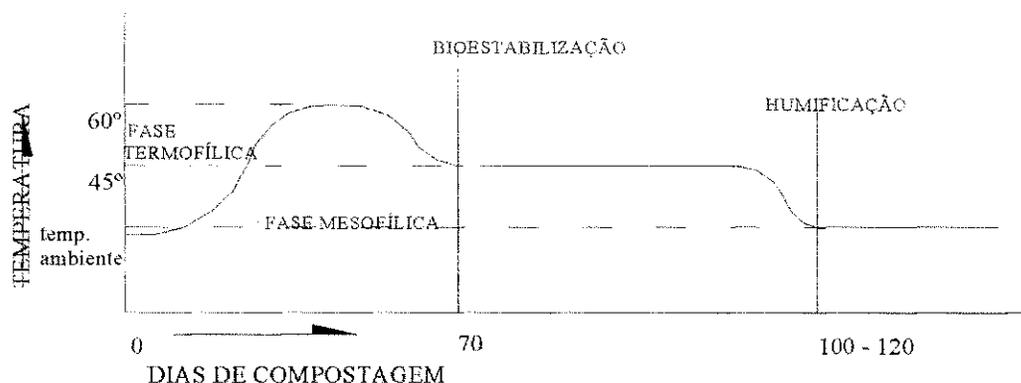


Figura 3.2: Curva padrão de temperatura durante o processo de compostagem (Fonte: KIEHL, 1985).

Observa-se que no início do processo para a curva padrão após a montagem da leira, ou seja, no dia 0, desenvolvem-se temperaturas entre 25 e 45<sup>o</sup>C. Estas são conseqüências do metabolismo dos microrganismos mesofílicos que iniciam sua atividade metabólica imediatamente após a montagem, pois a temperatura da maioria do material bruto encontra-se nessa faixa. As reações iniciais de quebra de ligações químicas das moléculas orgânicas, liberando energia em forma de calor, são responsáveis pelo aumento da temperatura da massa de lixo, e após aproximadamente 72 horas haverá a passagem para a fase termofílica. Nesta faixa aumenta a taxa metabólica e, portanto, aumenta a degradação. Com a entrada na faixa termofílica de temperatura (> 45<sup>o</sup>C) a população microbiana mesofílica é substituída pela termofílica, mais apta a essa nova temperatura (MC KINLEY e VESTAL, 1985 *apud* REMIGIO, 2001).

Segundo FINSTEIN et al. (1980), a tendência natural do processo seria o estabelecimento de ciclos sucessivos de temperatura com a eliminação dos microrganismos menos adaptados, até entrar em colapso, por altas temperaturas, porém controles da aeração e da umidade, podem estabelecer uma temperatura bastante constante que durará até o final da primeira fase do processo (degradação ativa). O esgotamento do material carbonáceo faz com que a temperatura decaia novamente para a faixa mesofílica, ao redor do 40<sup>o</sup> dia, quando a massa de compostagem é recolonizada por fungos e actinomicetos que completarão a humificação durante a fase de cura ou maturação (MULLINS, 1973 *apud* PEREIRA NETO, 1987).

#### **3.3.4. Teor de umidade**

KIEHL (1998), observa que sendo a compostagem um processo biológico de decomposição da matéria orgânica, a presença de água é imprescindível para as atividades metabólicas dos organismos. Isso, porque segundo BRADY (1989), dentre outros fatores, a própria estrutura dos microrganismos consiste de aproximadamente 90% de água. No caso da massa de compostagem, a produção de novas células é dependente da água que deve ser obtida do meio. A vida e as reações químicas das células bacterianas estão restritas ao meio aquoso e às propriedades desse solvente; por outro lado em muitas reações químicas à água participa efetivamente, como substrato ou como produto (BARBOSA e TORRES, 1999).

Segundo HUGHES (1980), o teor de umidade teórico ótimo para a atividade microbiana seria de 100% em uma leira de compostagem. Entretanto, algumas considerações como estrutura e porosidade do material, aeração da massa de compostagem altera este valor (GOLUEKE, 1977). O teor de umidade deve ser controlado em função da natureza do substrato, da capacidade de aeração do sistema (manual ou mecânica), das características físicas do material a se compostar (estrutura e porosidade) além de satisfazer as necessidades da biomassa dos microrganismos (PEREIRA NETO, 1989a). Altos teores de umidade (acima de 65%), fazem com que a água ocupe os espaços vazios da massa sob compostagem, impedindo a livre passagem do oxigênio necessário para os organismos. Este fato pode provocar condições anaeróbias na massa, o que se torna inconveniente por causar problemas associados a esta modalidade de decomposição da matéria orgânica, tais como geração de odor, chorume e aumento no tempo de decomposição (GOLUEKE, 1990).

Por sua vez, baixos teores de umidade inibem a atividade microbiana, diminuindo a taxa de estabilização da matéria orgânica. Nos processos desenvolvidos sem controle, o teor de umidade geralmente atinge valores baixos, reduzindo a velocidade de estabilização, com conseqüente queda de temperatura. Esta diminuição é interpretada como fim do processo, em função da exaustão do carbono disponível (PEREIRA NETO, 1989a).

Com o objetivo de maximizar as atividades microbianas, aumentando assim a velocidade de degradação da matéria orgânica, alguns pesquisadores (GOLUEKE, 1977; SINGLEY et al. 1982; FINSTEIN e MILLER, 1985; PEREIRA NETO, 1996), consideram que o teor de umidade ideal deve situar-se em torno de 55%. Avaliando a compostagem através de quatro diferentes modos de aeração forçada, AZEVEDO (1993) concluiu que a faixa de 55% de umidade proporciona uma maior redução dos sólidos voláteis. Porém, a redução no teor de sólidos voláteis ocorre em pequenas quantidades, mesmo quando a massa orgânica em compostagem é mantida sob teores extremos de baixa umidade (<20%). Entretanto, a queda de temperatura, ocasionada pela redução na atividade microbiológica, e associada à manutenção de baixos teores de umidade, além de tornar deficitária a eliminação de patógenos, pode ocasionar a interpretação errônea de que o material se encontra devidamente estabilizado (LELIS, 1998). Este mesmo autor considera que pilhas com teores de umidade inferiores a 30% têm o inconveniente de liberar sólidos particulados durante o reviramento.

### 3.3.5 Relação C/N

A relação C/N é uma importante variável na compostagem por fornecer uma indicação útil da provável taxa de decomposição da matéria orgânica (OBENG e WRIGHT, 1987). Há consenso entre vários pesquisadores que a taxa ótima para a relação C/N no início da compostagem é de 30/1 a 40/1, o que influenciará a boa atividade biológica, diminuindo o período total do processo (GOLUEKE, 1977; CARDENAS, et al.; 1980; PEREIRA NETO, 1987).

A Tabela 3.4 apresenta valores da relação C/N de acordo com alguns autores.

Tabela 3.4: Relações de C/N ótimas para a compostagem segundo diversos autores.

Relação C/N	Autor
30-35/1	Gotaas, (1959).
30/1	Haug, (1980).
<20/1	Cardenas <i>et al.</i> (1980).
20-30/1	Golueke, (1981).
5 e 20/1	Chanyasak, <i>et al.</i> (1981).
25/1	Bertoldi <i>et al.</i> (1983).
30-40/1	Pereira Neto, (1989).
25/1 a 40/1	Richard, (1992)

Fonte: RUSSO, (1998).

A concentração de carbono e nitrogênio torna-se fator crítico na compostagem (PEREIRA NETO, 1990), porém apesar dos valores sugeridos por vários pesquisadores como ótimos, constata-se que não poderá haver um valor absoluto, mas sim variável com as características do material a compostar (RUSSO, 1998).

O equilíbrio da relação C/N é um fator de fundamental importância na compostagem, cujo objetivo principal é criar condições para fixar os nutrientes na massa de compostagem de forma que possam ser posteriormente liberados para o solo.

### 3.3.6. Granulometria do material

PEREIRA NETO, (1987) e KIEHL (1998), destacam que o tamanho das partículas do material a ser compostado é importante: quanto mais fragmentado, maior será a área superficial sujeita ao ataque e a digestão microbiana, diminuindo o período de compostagem. Essa rapidez é função da relação entre a superfície de exposição e a massa da partícula. Teoricamente, quanto menor o tamanho da partícula, melhor é a degradação biológica. KIEHL (1998) observa que na prática da compostagem, uma granulometria muito fina pode causar problemas de aeração, pode facilitar a compactação e o encharcamento entre outros inconvenientes.

Para se obter um melhor rendimento no processo de compostagem, vários autores recomendam que a fração orgânica seja particulada no tamanho entre 20 a 50mm. Isto facilita a oxigenação ao formar uma massa porosa por onde passa o ar, rico em oxigênio (PEREIRA NETO, 1989a; GOLUEKE, 1991; FINSTEIN, 1980). A redução do tamanho das partículas deve ser efetuada através de trituração ou corte, produzindo um material orgânico mais homogêneo na sua composição (GOLUEKE, 1977). Por sua vez, ao aumentar a porosidade do material se facilita a aeração: quanto mais grosseira é a granulometria mais intensas serão as trocas do ar saturado com gás carbônico nos vazios existentes no material em compostagem como ar atmosférico, rico em oxigênio. Essas trocas são efetuadas pelos fenômenos físicos de difusão e convecção.

Porém, as características estruturais devem ser mantidas para a formação da pilha de compostagem. Se encharcado, o composto de granulometria fina, tem alta capacidade de retenção de água e por isso compacta-se, favorecendo a anaerobiose com desprendimento de gás sulfídrico, mercaptanas e outros gases tóxicos e de forte mau cheiro. Com granulometria grosseira, o material resseca-se mais facilmente, e desta forma a aeração é facilitada, não havendo tendência para a compactação, a decomposição aeróbia é teoricamente garantida.

A altura da pilha é definida com base na granulometria, tentando evitar a compactação excessiva que leva a condições anaeróbias durante a compostagem (PEREIRA NETO, 1987).

### 3.3.7. Potencial hidrogênionico (pH)

Segundo RUSSO (1998), matéria orgânica com pH entre 3 a 11 pode ser compostada, apesar de que valores próximos da neutralidade (5,5 a 8) são considerados os melhores. Nesta faixa de pH os microrganismos típicos da compostagem se adaptam melhor.

O pH varia nas quatro etapas da compostagem: na primeira ou início do processo este é levemente ácido para em uma segunda fase (termofílica) aumentar e decaindo novamente na terceira fase e ficando na faixa alcalina (8,0), no final da compostagem (MILLER, 1996).

Para a região Nordeste do Brasil estudos de ARAGÃO et al. (2000), obtiveram valores finais de pH entre 7,5 e 8, sendo este último considerado ótimo e que foi atingido a partir do 30<sup>o</sup> dia, permanecendo estável até o final do processo, aos 90 dias.

O pH segundo OBENG e WRIGHT (1987), pode ainda refletir as condições de mau funcionamento do processo de compostagem pois quando a massa de compostagem se torna anaeróbia, o pH tende a cair para valores próximos de 4,5, devido à acumulação de ácidos. Desta forma, o monitoramento sistemático do pH é importante no controle da compostagem.

### 3.4. Operação do processo e fases da compostagem

Segundo PEREIRA NETO (1987), do ponto de vista da engenharia sanitária, a operação dos processos de compostagem compreende todas as medidas destinadas a propiciar o maior rendimento. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas buscando maior eficiência, e ocasionando modificações em alguns processos para criar novas concepções de operação devido a vários fatores e entre eles as diferentes matérias primas utilizadas.

De modo geral qualquer processo de compostagem consiste em quatro operações básicas:

- 1) preparação de matéria prima: a ordem e o tipo de pré-tratamento variam de acordo com a natureza do material e com o processo de compostagem utilizado, com a necessidade da separação dos constituintes inertes, trituração e verificação da umidade para posterior correção;

- 2) preparação da pilhas: segundo PEREIRA NETO (1995), o formato das pilhas pode ser cônico ou alongado, e pode variar de trapezoidal a triangular. A área da secção transversal deve ser tal que a largura da base seja duas vezes igual à altura, enquanto o comprimento pode variar tanto quanto for necessário. KIEHL (1985) relata que as pilhas altas aquecem-se mais, podendo alcançar temperaturas indesejáveis, por outro lado pilhas baixas, perdem calor mais facilmente ou nem aquecem o suficiente para destruir patógenos. Se as pilhas forem estreitas e baixas, poderá haver maior perda de umidade;
- 3) o pátio de compostagem: preferencialmente pavimentado, com declive de dois a três por cento para remoção de água da chuva. As leiras devem ser dispostas de maneira a deixar um corredor entre elas para facilitar o escoamento que deverá ser feito durante o período de cura do composto, o que dependerá do equipamento de reviramento (PEREIRA NETO, 1995);
- 4) estabilização do material: os principais objetivos a serem alcançados nesta fase são maximizar a atividade termofílica, afim de que seja obtida alta taxa de biodegradação da matéria orgânica e a eliminação dos organismos patogênicos presentes (PEREIRA NETO, 1988; ZUCCONI e DE BERTOLDI 1987; GOLUEKE, 1977). O tempo médio de duração é de 30 a 60 dias, dependendo de fatores que tornam a decomposição mais rápida, como: granulometria do material, teor inicial de umidade, número de revolvimentos da leira, tipo de equipamentos utilizados no revolvimento, relação C/N inicial, dimensões da pilha, coberturas das mesmas com lona plástica (PEREIRA NETO, 1987; KIEHL, 1985);
- 5) maturação: após a fase ativa, o material é posto para maturar, permanecendo durante 60 a 120 dias, embora este tempo depende da matéria prima utilizada, das características do processo empregado e das condições climáticas locais (PEREIRA NETO, 1988). A coloração do composto torna-se mais escura com certo brilho, quando úmido perde o forte cheiro acre inicial para dar lugar ao de terra mofada; seu aspecto é de massa amorfa, tendo seus constituintes perdido a identidade, não mais se podendo distinguir o que antes era papel, verduras ou restos de alimentos.

GOLUEKE (1977) relata que, durante a fase de maturação, ocorrerá a estabilização do composto, ou seja, nesta fase ocorrerá a humificação da matéria orgânica pré-decomposta além da eliminação de alguns microrganismos patogênicos remanescente produzindo um produto final de boa qualidade.

Para a matéria prima ser denominada composto e ser utilizada como fertilizante orgânico, a matéria orgânica ali presente deve ser estabilizada até atingir a humificação, daí a importância desta fase no processo de compostagem (PEREIRA NETO 1989b). Segundo o mesmo autor, quando se utiliza um composto não maturado, podem ocorrer vários efeitos nocivos ao plantio, tais como:

- ✓ danificar as raízes das culturas se houver liberação de amônia;
- ✓ alta relação C/N, características dos produtos não maturados, que ocasionará redução bioquímica do nitrogênio do solo em consequência do uso de carbono residual;
- ✓ ocorrência de produção de toxinas inibidoras do metabolismo das plantas e da germinação de sementes.

O grau de maturação é determinado pela medida da fitotoxicidade com testes biológicos de germinação de sementes. Esses autores relatam que a produção metabólica de fitotoxina caracteriza o estágio inicial da decomposição da matéria orgânica, tendendo a diminuir durante o estágio de estabilização (GARCIA et al., 1990).

A medida do pH fornece boa informação sobre o estado de decomposição do composto, sendo uma medida simples e rápida de acompanhamento. Quando estabilizado na forma de húmus, o composto apresenta pH na faixa de 8,5 a 9,0 e no início da compostagem, geralmente o pH apresenta-se na faixa de 4,0 a 6,0 (KIEHL, 1985).

Segundo STEVENSON (1982), a separação química clássica do húmus distingue ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina. O mesmo autor relata que os ácidos fúlvicos e húmicos, resultante da extração alcalina, formam o grupo mais ativo desta fração. A combinação dos ácidos fúlvicos e húmicos com cátions inorgânicos, principalmente cálcio e magnésio em meio neutro, ferro e alumínio em meio ácido resulta na formação de humatos altamente insolúveis, os quais são classificados como complexo organominerais, isto é, quando o metal encontra-se em parte com a fração de argila do solo; a humina pode ser considerada a fração mais inativa e insolúvel das frações do húmus.

### 3.5. Vantagens e limitações da compostagem

Segundo GOLUEKE (1977), a compostagem é um método de tratamento de resíduo sólidos muito econômico, concordando com outros investigadores que demonstraram que a compostagem é o único processo que permite uma boa destruição de microrganismos patogênicos e uma boa estabilização da matéria orgânica de uma forma técnica e economicamente viável (HAUG, 1980; EPSTEIN, 1982; PEREIRA NETO, 1987; STENTIFORD, 1991).

Segundo EPSTEIN et al. (1982), as principais desvantagens ou limitações do processo são: a necessidade de maiores superfícies de terreno, a exigência de mais tempo para a obtenção de um produto final adequado e o fato de ser um processo que exige mais trabalho e mão-de-obra do que os outros métodos de tratamento. Este último aspecto, quando devidamente explorado, pode revertê-se numa vantagem ao permitir a ocupação de mão de obra, pouco ou nada especializada.

Segundo PEREIRA NETO (1987), os sistemas de compostagem, especialmente os que não utilizam reatores apresentam as seguintes vantagens:

- ✓ uma rápida decomposição e oxidação da matéria orgânica para um estado estável, produção de odores mínima ou insignificante;
- ✓ produção de calor durante a decomposição que permite uma correta higienização, com conseqüente destruição de microrganismos patogênicos;
- ✓ utilização de pouca ou nenhuma energia exterior;
- ✓ uso de equipamentos simples;
- ✓ grande flexibilidade de operação;
- ✓ obtenção de um produto passível de ser utilizado na agricultura como fertilizante natural, que não apresenta impactos ambientais nos solos, nas águas subterrâneas e superficiais, ao contrário dos fertilizantes químicos.

### 3.6. Condições de utilização do composto

O composto orgânico tem vários usos na agricultura: reflorestamento, horticultura, combate à erosão e na recuperação de solos degradados; também é usado como corretivo de solos pobres, na recuperação de taludes degradados de estradas (PEREIRA NETO, 1987).

A utilização de composto na atividade agrônômica depende principalmente da qualidade do composto, da concentração em nutrientes e da presença ou ausência de substâncias potencialmente perigosas e indesejáveis ao ambiente agrário (ZUCCONI et al, 1987).

MAYS e GIORDANO (1989), utilizando composto orgânico de RSU, concluíram que a aplicação é benéfica para sustentar elevada produtividade vegetal e fornecimento de nutrientes às plantas.

A aplicação do composto orgânico no solo deve ser feita considerando às características do composto, solo, cultura e do clima, entre outros fatores. Destaca-se a importância de investigar as quantidades de composto a ser aplicado na agricultura para aumentar a produtividade vegetal (BRITO, 1997).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Descrição do sistema experimental

O sistema experimental desta pesquisa foi montado no pátio de compostagem do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental – LESA, da Universidade Federal de Viçosa –UFV, na cidade de Viçosa em Minas Gerais.

Inicialmente foram desenvolvidos e monitorados dois experimentos, em pátio coberto e pavimentado, para se avaliar o desenvolvimento dos sistemas sob temperaturas mesofílicas: a chamada pilha mesofílica inicial de formato cônico (PMi), entre 25 e 45°C, e outra sob temperatura termofílica chamada pilha termofílica (PT), entre 45° a 65°C, (Figura 4.1).



Figura 4.1- Forma física da pilha PT (Pilha Termofílica).

Após 10 horas de funcionamento o formato da pilha PMi foi mudado para trapezoidal originando a pilha mesofílica 1 (PM1), este procedimento ocorreu devido a temperaturas, maiores de 60°C, que a PMi desenvolveu, esse fato não poderia ter ocorrido devido a pilha ter a finalidade de manter temperaturas menores que 40°C (Figura 4.2.).



Figura 4.2 – Forma física da pilha PM1 (Pilha Mesofílica).

Após 24 horas de funcionamento desta pilha ela foi desmembrada, originando a PM2 (pilha mesofílica 2) e a PMS (pilha mesofílica no solo), (Figura 4.3.).

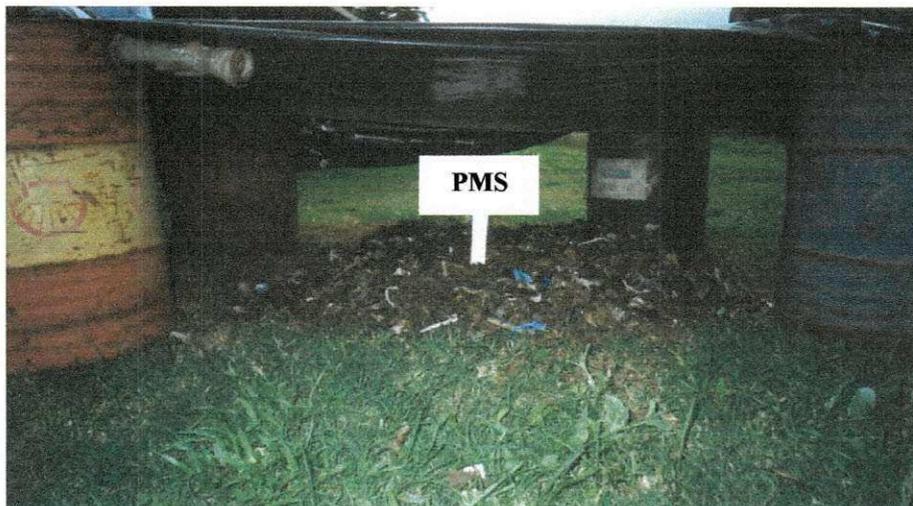


Figura 4.3 – Forma física na pilha PMS (Pilha Mesofílica do Solo).

A pilha PM2 foi disposta em pátio pavimentado e a PMS em pátio sem pavimento com a finalidade de avaliar a influência da troca de calor entre a massa de compostagem e o solo, e a conseqüente variação da temperatura na mesma. O período total de monitoramento foi de quatro meses, estendendo-se entre Março a Junho de 2001. A Tabela 4.1 mostra as características físicas das pilhas montadas durante a fase de monitoramento.

Tabela 4.1 – Características físicas das pilhas de compostagem.

Identificação da pilha	Características físicas	Observações
PT (Pilha Termofílica)	Peso: 910 kg Formato: cônico Altura: 0,9m Raio da base: 2,3m	No 14 <sup>o</sup> dia foi cortada no topo e no 15 <sup>o</sup> dia foi recondicionada, devido a altas temperaturas (maiores de 65 °C) que desenvolveu.
PMi (Pilha Mesofílica inicial)	Peso: 600 kg Formato: cônico Altura: 0,2m Raio da base: 2,9m	Após 10 horas de atividade, o formato foi mudado para trapezoidal (PM1), nesta pilha a temperatura deveria ser mantida até 45 <sup>o</sup> C.
PM1 (Pilha Mesofílica 1)	Peso: 600 kg Formato: trapezoidal Altura: 0,16m Comprimento: 3,2m	Após 24 horas foi subdividida em PM2 e PMS. Pelo fato de ainda manter temperatura acima do esperado.
PM2 (Pilha Mesofílica 2)	Peso: 300 kg Formato: trapezoidal Altura: 0,15m Comprimento: 3,2m	Está pilha foi disposta no pátio pavimentado, para verificar a troca de calor com o pavimento.
PMS (pilha mesofílica no solo)	Peso: 300 kg Formato: trapezoidal Altura: 0,5 m	Está pilha foi disposta no pátio sem pavimento, para verificar a troca de calor como solo.

## 4.2. Matéria prima

A matéria prima foi a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, separados na unidade de triagem e compostagem do município de Coimbra, localizado na Zona da Mata do estado de Minas Gerais, distante 13 km do LESA / UFV e 240km de Belo Horizonte. Esta região faz parte da Microrregião Mata de Viçosa e possui 6.443 habitantes, segundo o censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 1996.

## 4.3. Método de compostagem utilizado

Foi usado o processo de compostagem LESA, desenvolvido no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa. Este processo é uma versão modificada do processo "windrow", com a frequência de reviramento a cada três dias (PEREIRA NETO, 1987). A matéria prima utilizada foi de resíduo sólido urbano e não necessitou da correção de umidade, estando a mesma em torno de 55%.

O reviramento foi feito de forma manual, com o auxílio de uma pá, fazendo-se com que as camadas externas passassem a ocupar as partes internas. Esses reviramentos foram executados a cada três dias durante os 30 dias iniciais do processo e nos 15 dias finais, o intervalo foi de cinco dias. As observações da temperatura foram feitas diariamente, para que esta não excedesse os limites do projeto de 65°C para a PT e 45°C para a PM2 e PMS. Após o início da fase de maturação, perto do 45<sup>o</sup> dia, os reviramentos cessaram.

As pilhas PT e PM2 ficaram em pátio pavimentado com cobertura para evitar a interferência da chuva, enquanto a PMS ficou em pátio não pavimentado, porém a leira foi coberta com lona plástica pelas mesmas razões.

Após a montagem das pilhas, na PT foram colocados 3 sondas de temperatura localizadas uma na parte superior em uma profundidade aproximada de 7cm; a segunda na zona central da leira equidistante do topo e da base e a terceira próxima à base (Figura 4.4). Para a PM2, as sondas foram colocadas na esquerda, direita e centro da pilha, como mostra a Figura 4.5; na PMS, se usou somente uma sonda colocada no centro da pilha devido à pequena altura desta, como mostra a Figura 4.6.

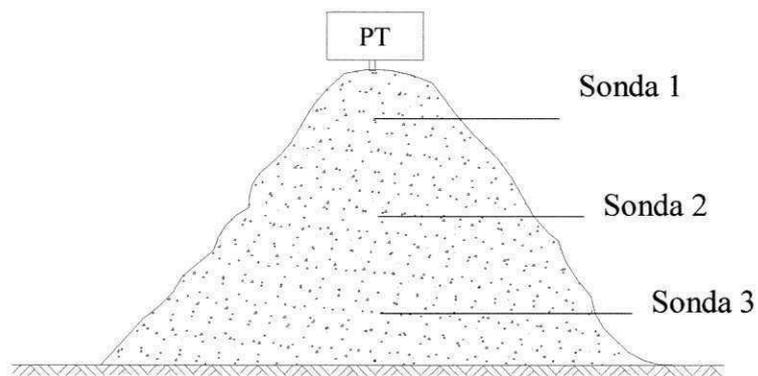


Figura 4.4 – Disposição das sondas da pilha termofílica (PT).

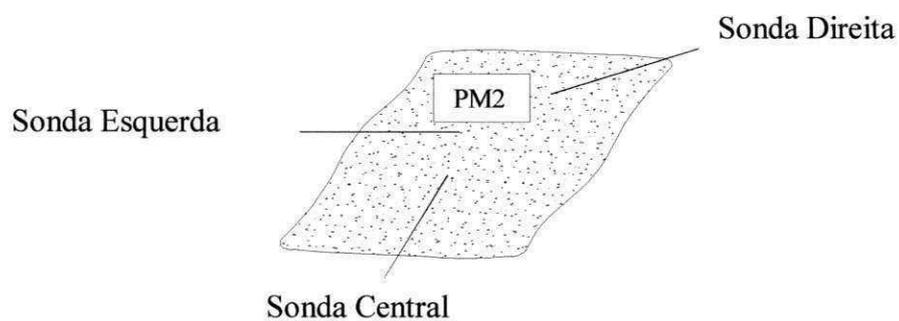


Figura 4.5 – Disposição das sondas da pilha mesofílica 2 (PM2).

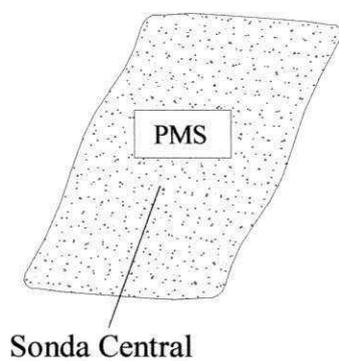


Figura 4.6 – Disposição das sondas na pilha mesofílica do solo (PMS).

#### 4.4. Monitoramento e técnicas de amostragem.

O monitoramento foi feito através da medição de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos (Tabela 4.2.). A frequência de medição desses parâmetros foi variável e está especificada na mesma Tabela.

A coleta de amostra na pilha PT foi feita através de cortes, com pá no topo, no centro e na base. Em cada um desses locais coletou-se uma quantidade aproximada de material (100g) que era colocado junto, em uma bandeja. Desta forma obtinha-se aproximadamente 300g de uma amostra composta e se procedia à separação manual mais cuidadosa dos materiais que ainda permaneciam na pilha, como vidro, metais, pedras, plásticos e outros inertes. Nas outras duas pilhas (PM2 e PMS), devido a sua pequena altura, a coleta era feita de forma semelhante embora fosse feita, no lado esquerdo, direito e centro. Esse material proveniente de todas as pilhas, catado e homogeneizado, era transportado para o laboratório onde se denominava de “amostra estoque”. A partir dessa amostra estoque se tirava a quantidade necessária para as análises físicas e químicas tais como: umidade, pH, sólidos voláteis e sólidos fixos. Para as análises de N, P, K, C, ácido húmico, parte da amostra estoque era levada para a estufa a  $65 \pm 5$  °C, durante 36 horas para a secagem e posterior ensacamento.

As amostras para as análises bacteriológicas eram coletadas separadamente utilizando uma pá de jardinagem estéril. O procedimento foi sugerido por PEREIRA NETO (1996), e consistia em remover a camada superficial a uma profundidade de aproximadamente 10 a 15cm, abrir a pilha e coletar em locais próximos aos pontos previamente definidos para as análises físicas e químicas. Em cada um desses pontos coletava-se aproximadamente 100g de material que eram homogeneizados em um béquer estéril. Esse material era levado ao laboratório de análises microbiológicas e sob condições de assepsia se selecionavam os materiais inertes, utilizando uma pinça (“dente de rato”) estéril.

Tabela 4.2 – Parâmetros analisados, métodos utilizados e frequência nas amostras das pilhas em processo de compostagem.

Parâmetros /unidades	Métodos analíticos	Frequência de análises
Temperatura (°C)	Termômetro digital RS modelo 206-3722, acoplado aos terminais dos termopares.	Diária
Densidade (g/l)	Peso/volume.	Semanal
pH	Potenciométrico (APHA, 1995).	Semanal
Umidade (%)	Estufa por 24 horas, $75 \pm 5$ °C (APHA, 1985, adaptado por PEREIRA NETO, 1987).	Semanal
Sólidos Totais Voláteis SV(%)	Mufla a $550 \pm 5$ °C por 2 horas (APHA, 1985).	Semanal
Sólidos Totais Fixos SF(%)	Diferença entre sólidos totais e sólidos totais voláteis.	Semanal
Nitrogênio Total (%)	Método micro-Kjeldahl (APHA, 1995).	Mensal
Carbono Total (%)	WALKLEY – BLACK, 1944, conforme Yomans & Bremner (1988).	Mensal
Ácidos húmicos (meqv/g)	International Humic Substance Society -IHSS, (1996).	Mensal
Fósforo Total (%)	Extrato nitro – perclórico (EMBRAPA, 1995).	Mensal
Potássio (%)	Extrato nitro – perclórico (EMBRAPA, 1995).	Mensal
Estreptococos fecais (UFC/g)	Membrana filtrante (APHA, 1995)	Semanal

#### 4.5. Determinação de Temperatura

Diariamente foram feitas leituras da temperatura de cada uma das pilhas em três pontos diferentes: topo, centro e base, para PT; na esquerda, direita e centro para a PM2 e no centro para a PMS. Para isso utilizou-se sondas, dentro de hastes de bambu ou de tubos de aço de 15mm de diâmetro. As leituras das temperaturas foram feitas com um termômetro digital RS modelo 206-3722, acoplado aos terminais dos termopares (cobre/níquel). As leituras eram obtidas imediatamente após a conexão dos terminais das sondas ao termômetro.

#### 4.6. Determinação de Densidade

A determinação da densidade foi efetuada utilizando-se um recipiente com capacidade de 16 litros, pesado previamente, completando - se todo seu volume com o material coletado, e posteriormente pesado em balança da marca São Sebastião, modelo SR15/1987, com capacidade para 15Kg. Esse procedimento foi repetido por três vezes para cada amostra e efetuada a média aritmética para obtenção do resultado final.

O valor da densidade foi calculado utilizando a razão entre o peso do material determinado e o volume conhecido, através da equação 4.1:

$$\text{Densidade (g/l)} = \frac{Pa - T}{V} \quad (4.1)$$

Sendo que:

Pa: Peso da amostra

T: Tara do recipiente

V: Volume da amostra

#### 4.7. Determinação do pH

Foi usada a metodologia de APHA (1985), adaptada por PEREIRA NETO (1987): adicionou-se 250ml de água destilada em um béquer com 10g da amostra, pesada em balança (Precision, modelo PR500); após agitação manual com um auxílio

de bastão de vidro por 3 minutos, foi deixada em repouso por aproximadamente 5 minutos. Após esse período determinou-se o pH do sobrenadante, usando-se um pHmetro digital marca Quimis, modelo Q400A - equipado com eletrodo combinado com referência interna de Ag/ AgCl.

#### 4.8. Determinação do Teor de Umidade

A técnica foi descrita por APHA (1985), e adaptada por PEREIRA NETO (1987). A determinação do teor de umidade foi feita através da pesagem de 30g da “amostra estoque” que foi colocado em cápsulas de porcelana previamente secas por calor e resfriadas em dessecador e pré-pesadas. A seguir foram colocadas em estufa (Gallenkamp, modelo 2381) à temperatura de  $75 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas, para sua desidratação. Posteriormente, foram colocadas em dessecador de vidro por aproximadamente 15 minutos até o seu completo resfriamento e pesadas novamente. O teor de umidade foi obtido através da equação 4.2:

$$U(\%) = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100 \quad (4.2)$$

Sendo que:

U: Umidade

P1: Peso inicial da amostra

P2: Peso final da amostra

#### 4.10. Determinação do Teor de Sólidos Totais Voláteis

Os sólidos voláteis foram determinados pela metodologia de APHA (1985) e adaptada por PEREIRA NETO (1987). Para isso foram pesados dois gramas da amostra seca em estufa por 24 horas, triturada e peneirada em malha de 18mm. Em seguida, foram colocadas em cadinhos de porcelana previamente pesados e levados a uma mufla a  $550 \pm 50^\circ\text{C}$  por 2 horas, para completa calcinação. Em seguida foram retiradas da mufla e colocadas em um dessecador por aproximadamente 40 minutos para completo resfriamento e posterior pesagem. O teor de sólidos voláteis foi obtido pela diferença em peso, conforme, a equação 4.3:

$$SV (\%) = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100 \quad (4.3)$$

Sendo que:

SV: Sólidos Voláteis

P1: Peso inicial da amostra

P2: Peso final da amostra

#### 4.11. Determinação do Teor de Sólidos Totais Fixos

Os sólidos totais correspondem à soma do teor de sólidos voláteis com o teor de sólidos fixos, portanto a equação 3.4 expressa o teor de sólidos fixos.

$$SF (\%) = 100 (\%) - SV \quad (4.4)$$

Sendo que:

SF: Sólidos Fixos

SV: Sólidos Voláteis.

#### 4.12. Análises Químicas

Para as análises químicas as amostras foram ensacadas e encaminhadas devidamente vedadas e etiquetadas ao Laboratório de Solos do departamento de solos da Universidade Federal de Viçosa - UFV.

#### 4.13. Determinação da Relação C/N

A relação C/N foi obtida dividindo-se o teor de carbono orgânico total (COT) pelo teor de nitrogênio total a partir dos dados analíticos, obtidos em laboratório. A equação 4.5, mostra essa relação, descrita por WALKLEY – BLACK, (1944) .

$$C/N = COT / N_{total} \quad (4.5)$$

Sendo que:

COT: Carbono Orgânico Total

N<sub>total</sub>: Nitrogênio total

#### 4.14 Determinação de *Streptococcus Fecais*

Para avaliação do nível de contaminação fecal do composto, optou-se pela determinação de estreptococos fecais como organismos indicadores, por apresentarem características de maior tolerância a condições extremas: crescem em presença de sais biliares a temperaturas de 10 a 45<sup>0</sup>C, se desenvolvem em concentrações de 6,5% de NaCl e em pH até próximo de 9,0 (APHA, 1995).

O método utilizado para quantificação foi da membrana filtrante descrito em APHA (1995): para isso, em 1g de amostra “in natura”, adicionaram-se 99ml de solução de Ringer, a mistura foi agitada por 3 minutos, deixando-se em repouso outros 5 minutos.

Após a homogeneização da amostra, preparou-se uma série de diluições decimais sucessivas a partir dessa amostra inicial e que corresponde a diluição de 10<sup>-1</sup>, através da transferência de 1ml dessa primeira diluição para vidros universais contendo 9ml de solução de Ringer cada um, dessa forma se obtiveram diluições com concentrações desde 10<sup>-1</sup> até 10<sup>-7</sup>g/ml da amostra original.

O método da membrana filtrante consiste em passar um volume conhecido da amostra, através de uma membrana de filtração de poros de 0,45µm de diâmetro, suficientes para reter as bactérias. Posteriormente, a membrana é colocada em uma placa de Petri contendo o meio de cultura apropriado para o crescimento da bactéria. Nesta pesquisa foi usado o meio de cultura KF *Streptococcus* Agar. A incubação foi feita a uma temperatura de 37,0 ± 2 °C durante 48 horas, em incubadora Gallenkamp 2380. As bactérias retidas na membrana se desenvolvem localmente ao redor dos poros e formam pequenas colônias de coloração vermelha escuro, que podem ser facilmente contadas.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados da investigação efetuada com pilhas construídas a partir da matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos, destacando a evolução de vários parâmetros de controle e a sua influência nos processos de compostagem mantidos em duas faixas temperaturas.

### 5.2. Temperatura

No dia de montagem das pilhas (dia 0), as temperaturas apresentaram valores de aproximadamente 20<sup>o</sup>C; esses valores foram menores que a temperatura ambiente de 27<sup>o</sup>C, as atividades biológicas nesse momento provavelmente não haviam se iniciado.

A Figura 5.1 mostra que a pilha termofílica (PT), rapidamente atingiu temperaturas em torno de 55<sup>o</sup>C, tanto no topo como no centro e base, embora neste último ponto essa temperatura ocorreu no oitavo dia, enquanto nos outros dois foi nas primeiras 48 horas depois de iniciado o processo. Entretanto LELIS (1998), observa que há exceções, visto que pilhas com teores de umidade baixos (entre 20% e 30%), podem atingir temperaturas de 40<sup>o</sup>C em intervalo muito curto, de 3 a 6 horas após a montagem.

A pilha PT atingiu valores de temperatura de 60 a 70<sup>o</sup>C, entre o 7<sup>o</sup> e o 15<sup>o</sup> dia, no topo e centro da mesma. Na base, as temperaturas alcançaram esse valor no 10<sup>o</sup> dia, evidenciando que os reviramentos não estavam sendo suficientes para manter a temperatura no intervalo ideal (55 e 60<sup>o</sup>C), nesta fase do processo. Esses valores, quando mantidos por longos períodos, podem inativar as enzimas microbianas responsáveis pela digestão da matéria orgânica e pela assimilação de nutrientes, acarretando o retardo do processo de degradação ativa e portanto afetando toda a compostagem (GOLUEKE, 1991). Por esse motivo, no 15<sup>o</sup> dia de compostagem a forma geométrica da PT foi alterada, como se mostra na Figura 5.2, com um corte no topo para facilitar a liberação de calor por 24 horas.

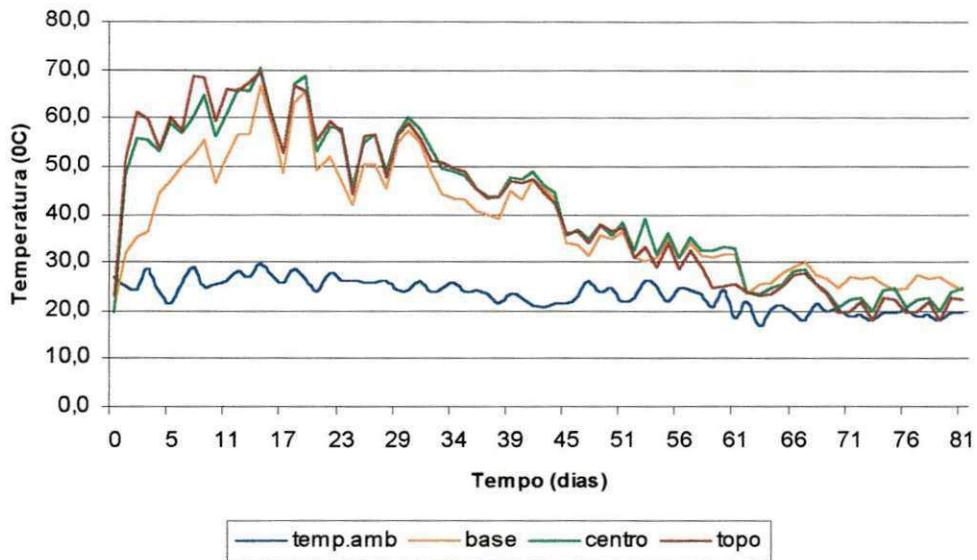


Figura 5.1- Variações das temperaturas no topo, centro e base da pilha termofílica (PT) e ambiente ao longo do tempo de compostagem.



Figura 5.2- Corte no topo da pilha termofílica (PT), no 15º de compostagem.

Esse procedimento acarretou quedas na temperatura, para valores aproximados de 50<sup>o</sup>C, voltando a aumentar no 18<sup>o</sup> e no 19<sup>o</sup> dia, para temperaturas maiores que 60<sup>o</sup>C, porém nesse caso, os reviramentos foram suficientes para que houvesse dissipação de calor na massa de compostagem e a curva de temperatura se mantivesse entre 40 e 60<sup>o</sup>C até próximo do 45<sup>o</sup> dia, quando as temperaturas nos três níveis avaliados (topo, centro e base) caíram para valores na faixa de 40 a 20<sup>o</sup>C, até o final do processo. Portanto o comportamento da temperatura na pilha PT seguiu uma curva típica de acordo com KIEHL (1998).

Segundo a literatura especializada (PEREIRA NETO, 1996; KIEHL, 1998), os valores de temperatura decaem para menores que 40<sup>o</sup>C, na fase final do processo termofílico, dando início então à fase mesofílica, em geral em uma faixa de 30 a 60 dias.

As temperaturas ambientes estiveram em torno de 20 e 30<sup>o</sup>C, aproximadamente até o dia 69, quando essa temperatura baixou para valores menores que 20<sup>o</sup>C até o final do processo. Não houve portanto influência da temperatura ambiente nas temperaturas desenvolvidas na pilha de compostagem.

A PM2, como mostra a Figura 5.4, foi resultado do desmembramento da PM1. Nesta leira foi observada uma elevação da temperatura para 42<sup>o</sup>C, em torno de 48 horas do início do experimento e procedeu-se então um rebaixamento da altura com aumento da área da base, como mostra a Figura 5.3. Com isto esperava-se que a temperatura não se elevasse novamente, visto que se estava favorecendo a dissipação de calor ao aumentar a área.

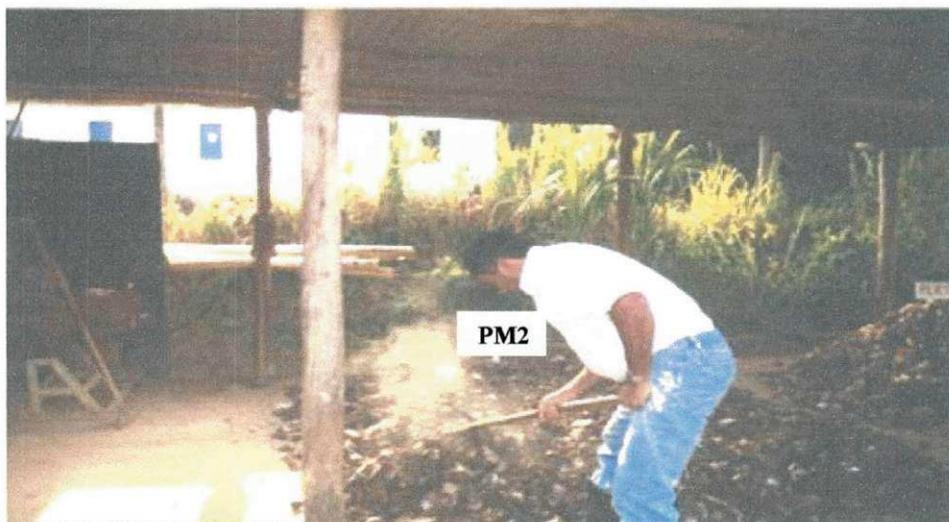


Figura 5.3 – Pilha mesofílica 2 (PM2) em processo de rebaixamento da altura.

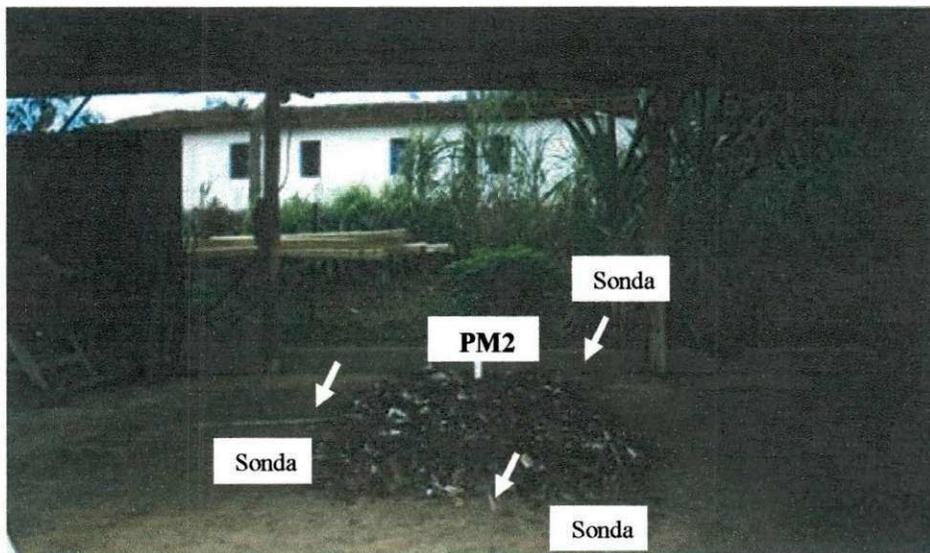


Figura 5.4 – Pilha mesofílica 2 (PM2) disposta na forma trapezoidal.

A Figura 5.5 mostra a variação da temperatura em função do tempo, na pilha PM2, a qual a partir do 35<sup>o</sup> dia apresentou temperaturas inferiores a 30<sup>o</sup>C, oscilando até valores menores que 25<sup>o</sup>C. A partir do dia 53, houve um ligeiro aumento da temperatura para valores maiores que 30<sup>o</sup>C, caindo novamente por volta do dia 60 a valores menores que 25<sup>o</sup>C, mantendo-se assim até o final do processo.

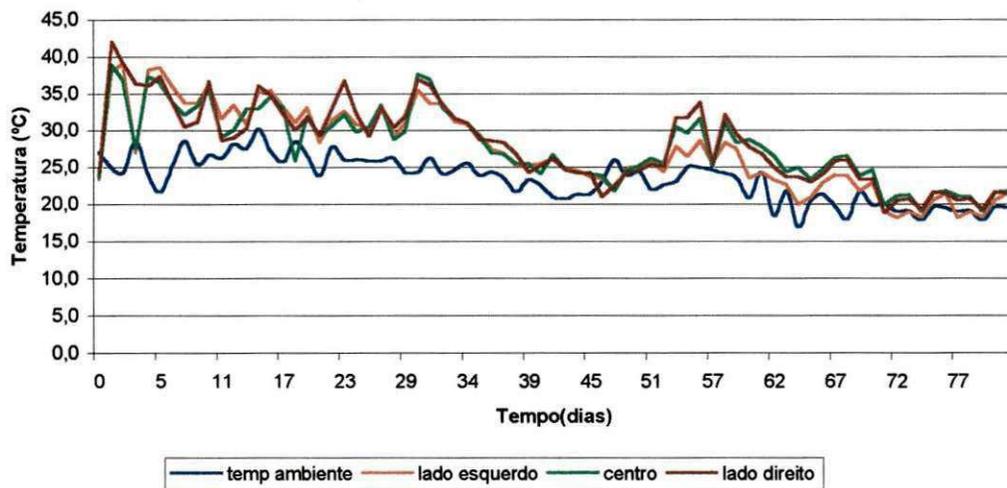


Figura 5.5 – Variações das temperaturas ao longo do tempo, no lado esquerdo, no lado direito e no centro na pilha mesofílica 2 (PM2) e ambiente.

Tornou-se necessário o rígido controle da temperatura para manter o experimento em condições mesofílicas, através de rebaixamentos e mudanças da configuração geométrica para dissipar o calor produzido naturalmente, pela imediata decomposição da matéria orgânica, efetuada pelos microrganismos que liberam energia em forma de calor na massa de compostagem, a qual apresenta características isolantes térmicas e por isso retém essa temperatura (DE BERTOLDI *et al.*, 1988; REIS, 2000).

A PMS foi formada a partir do desmembramento da PM1, visto que esta havia atingido elevações extremas de temperatura. A PMS foi monitorada com uma sonda, como mostra a Figura 5.6 a partir do segundo dia de montada a PT.

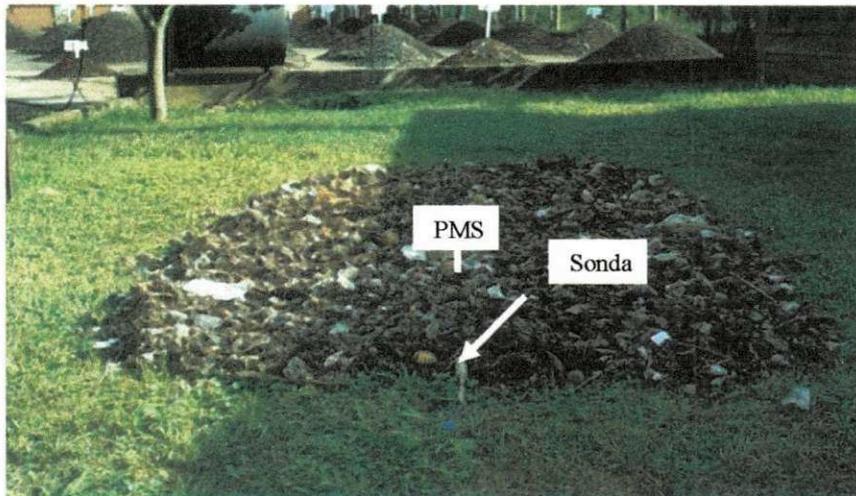


Figura 5.6 – Disposição da sonda de temperatura na pilha mesofílica do solo (PMS)

A Figura 5.7 mostra a variação da temperatura na PMS, que no início do processo apresentou valores entre 30 e 35<sup>o</sup>C, chegando próximo ao 9<sup>o</sup> dia com temperaturas em torno de 37<sup>o</sup>C, para novamente decair por volta do dia 16, a 22<sup>o</sup> C, registrando valores menores que a temperatura ambiente, o que pode ter ocorrido devido a sua pequena espessura, que provocava a troca de calor com a atmosfera e também por ser mantida no solo, favorecendo a troca de calor com o mesmo.

A PMS manteve sua temperatura durante os dias 18 e 36, entre 35 a 25<sup>o</sup>C. A partir do dia 37 manteve temperaturas abaixo de 25<sup>o</sup>C, oscilando com temperaturas iguais à do ambiente, até o final do experimento.

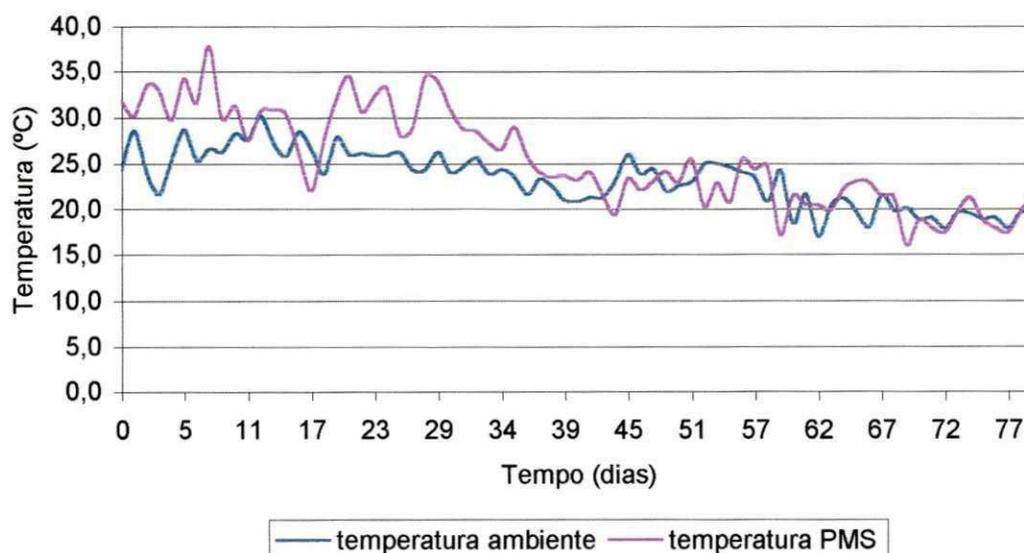


Figura 5.7 – Variações da temperatura no centro da Pilha PMS e a variação da temperatura ambiente.

### 5.3. Densidade

A Figura 5.8, mostra a variação mensal da densidade nas pilhas PT, PM2 e PMS. A pilha PT, teve um aumento de cerca de 43,2% ao longo dos 90 dias, enquanto que a PM2 apresentou decréscimo em torno de 2,22% e PMS de 11%. A PT, teve no final do processo densidade de 516,67g/l, enquanto a PM2 teve um valor de 463,00g/l e a PMS de 421, 5g/l.

Segundo LELIS (1998), o acréscimo da densidade deve-se a mineralização e umificação da matéria orgânica, característica peculiar dos processos de compostagem.

Os valores de densidade mostram que as pilhas mantidas sob temperaturas mesofílicas não apresentaram aumento da relação massa/volume característica peculiar da compostagem.

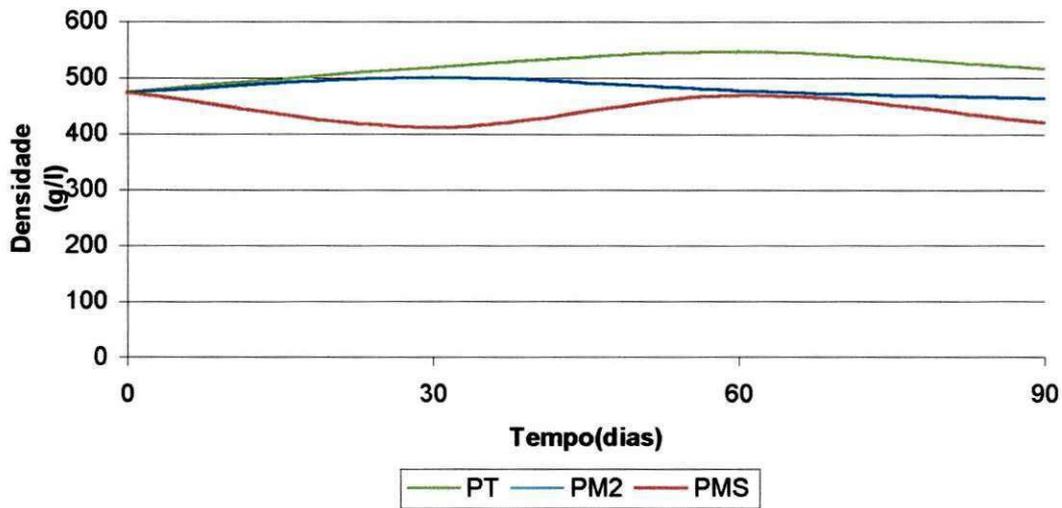


Figura 5.8 – Variações de densidade nas pilhas de compostagem.

#### 5.4. Potencial Hidrogeniônico (pH)

A Figura 5.9 mostra a variação do pH ao longo de compostagem. O valor inicial do pH das leiras foi de 6,3. Segundo LIMA (1991) o valor médio do pH do lixo brasileiro está em torno de 6,0.

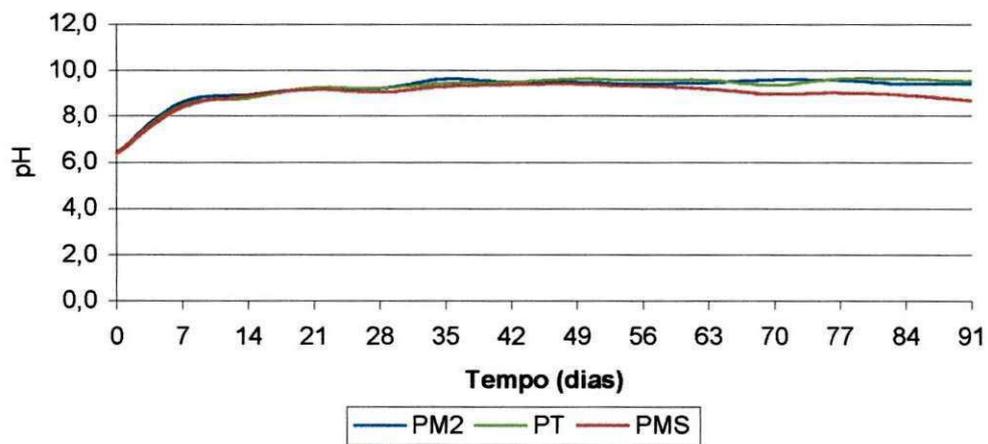


Figura 5.9 – Variações de pH nas pilhas de compostagem

Durante o processo, o pH teve aumentou gradativamente até aproximadamente o dia 21, a partir daí atingiu um valor praticamente estável em torno de 9,0.

O pH não foi influenciado pelos diferentes níveis de temperatura (mesofílica e termofílica) mantidas nas pilhas PT, PM2 e PMS, apresentando comportamento típico dos processos de compostagem, com tendência crescente à estabilização na faixa alcalina.

A matéria orgânica decomposta em condições aeróbias apresenta pH neutro ou alcalino, devido aos humatos alcalinos que formam (EGREJA FILHO, 1993).

Os resultados sugerem que a temperatura não exerce influência na variação de pH, o que foi também observado nos estudos de KIEHL (1985) e PEREIRA NETO (1989b).

### 5.5. Teor de Umidade

A Figura 5.10, mostra a variação de umidade ao longo da compostagem. No início do processo (dia 0) a matéria prima apresentou um teor de umidade de aproximadamente 60%, valor coerente para o início do processo (PEREIRA NETO, 1996).

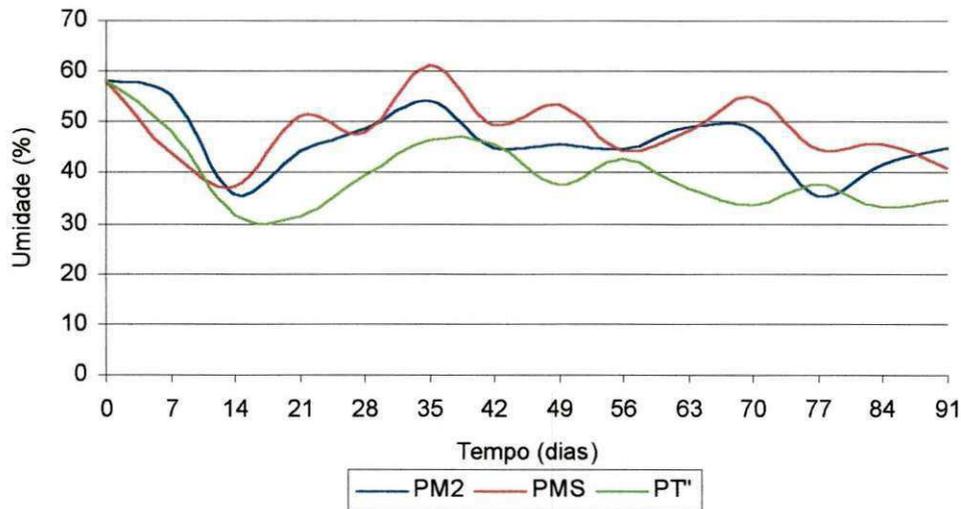


Figura 5.10– Variação de Umidade nas pilhas de compostagem.

Ocorreu um decréscimo para valores entre 40% e 30% entre os dias 13 e 16 o que houve em todos os experimentos. Nas pilhas PMS e PM2, o teor de umidade cresceu por volta do 15<sup>o</sup> dia, oscilando entre 40% e 60% até o final da compostagem. A PT teve valores de umidade entre 50 e 30% em todo o experimento, porém nesta pilha foi verificado o menor teor de umidade, chegando a 30% no início do processo. Este fato pode ter ocorrido pois a temperatura se elevou rapidamente nesta pilha para aproximadamente 70°C, assim perdendo sua umidade.

O teor de umidade ideal durante a compostagem deve situar-se na faixa de 45% a 55% (FINSTEIN e MILLER, 1985), apresentando reduções de sólidos voláteis em torno de 50% (PEREIRA NETO, 1996). LELIS (1998), porém, afirma que valores na faixa de 30 a 40%, atendem uma redução de sólidos voláteis na ordem de 41%, o que caracteriza a formação de húmus.

#### **5.6. Teor de Sólidos Totais Voláteis.**

A Figura 5.11 apresenta a variação no teor de SV das pilhas PT, PM e PMS ao longo da compostagem.

A PT, teve uma redução de aproximadamente 50%. A PM2, sofreu uma redução muito aproximada à encontrada na PT, com valor de 39% no final do processo.

O comportamento da PMS teve uma irregularidade, mostrando logo na primeira semana um acréscimo, provavelmente devido a umidade do solo, contribuindo para a umidade do composto, entretanto chegou ao final do processo com redução de aproximadamente 37%.

Segundo PEREIRA NETO (1987), um processo de compostagem eficiente deve reduzir o teor de SV para cerca da metade de seu valor inicial. As reduções observadas nos experimentos mostram que a PT teve a maior redução. Por esse motivo é coerente dizer que a fase termofílica na compostagem foi de extrema importância para tornar a atividade microbiana mais intensa e acelerar o processo de degradação da massa.

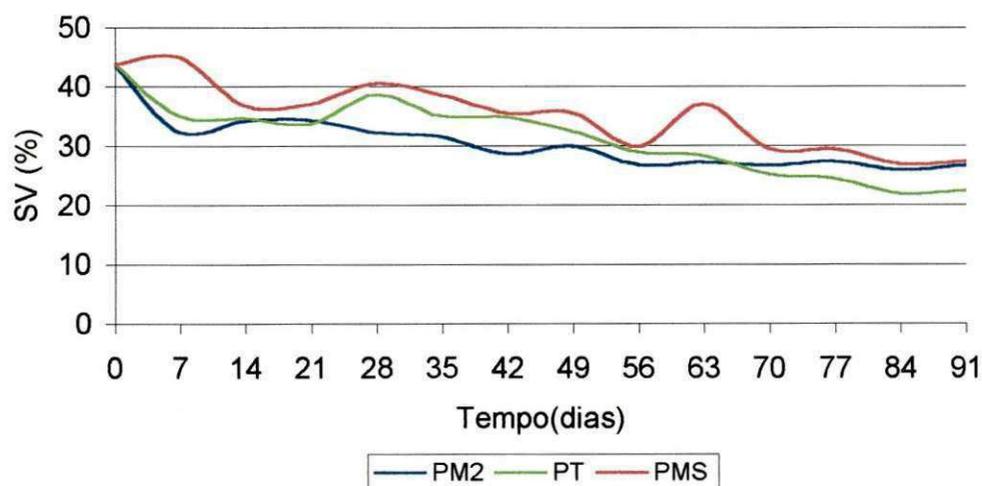


Figura 5.11 – Variações de Sólidos Totais Voláteis nas pilhas de compostagem.

### 5.7. Carbono Orgânico Total

Os resultados apresentados na Figura 5.11 mostram a variação do COT em função dos dias de compostagem.

Os valores de COT para a PT foram decrescendo, chegando no final em aproximadamente 16%. Para a PM2, a redução foi praticamente paralela a PT até o dia 30, quando houve um pequeno acréscimo até o dia 60, voltando a cair no final atingindo valores em torno de 14%. A PMS apresentou uma redução lenta, com um valor de aproximadamente 20% no final do processo.

De acordo com KIEHL (1985), as reduções nas concentrações de carbono na compostagem, devem-se à diminuição do conteúdo de matéria orgânica.

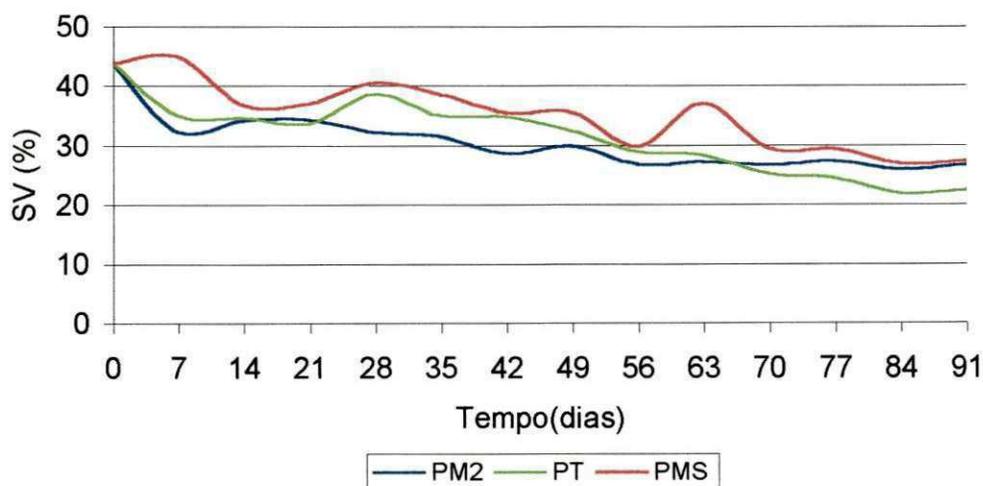


Figura 5.11 – Variações de Sólidos Totais Voláteis nas pilhas de compostagem.

### 5.7. Carbono Orgânico Total

Os resultados apresentados na Figura 5.11 mostram a variação do COT em função dos dias de compostagem.

Os valores de COT para a PT foram decrescendo, chegando no final em aproximadamente 16%. Para a PM2, a redução foi praticamente paralela a PT até o dia 30, quando houve um pequeno acréscimo até o dia 60, voltando a cair no final atingindo valores em torno de 14%. A PMS apresentou uma redução lenta, com um valor de aproximadamente 20% no final do processo.

De acordo com KIEHL (1985), as reduções nas concentrações de carbono na compostagem, devem-se à diminuição do conteúdo de matéria orgânica.

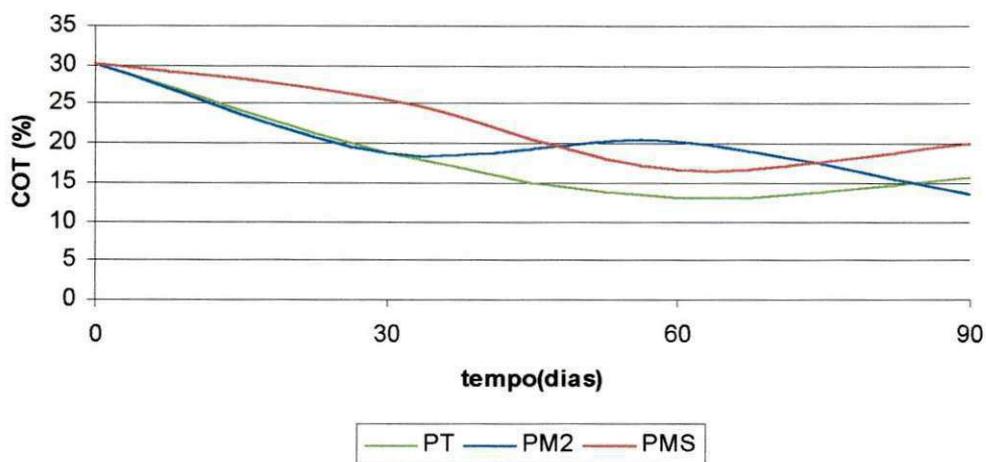


Figura 5.12 – Variações de Carbono Total nas pilhas de compostagem

### 5.8. Nitrogênio Total

A Figura 5.13 mostra as variações ao longo do tempo do Nitrogênio Total. A PT teve uma redução de aproximadamente 26%, o que pode ter sido ocasionado pelas elevadas temperaturas, proporcionando a volatilização da amônia e conseqüente perda de nitrogênio, causando uma queda significativa até valores próximos a 1%, no final do processo. A PM2 teve um acréscimo na análise do dia 30, para aproximadamente 2,7%, e terminando o processo com 1,06%.

Na PMS, as concentrações de nitrogênio total mantiveram-se constantes, ocorrendo um acréscimo nos dias finais até valores por volta de 1,7%. Segundo KIEHL (1985), a presença de umidade favorece a retenção da amônia no composto e a PMS teve maior valor de umidade (48%), o qual pode justificar o acréscimo no teor de nitrogênio.

As especificações da Portaria nº 1 de 4 de março do Ministério da Agricultura admitem para compostos orgânicos, um valor mínimo de 1,0% de nitrogênio total. Os valores apresentados nestes experimentos estão em concordância com a referida portaria, não alterando significativamente os valores iniciais, próximos a 1,5%.

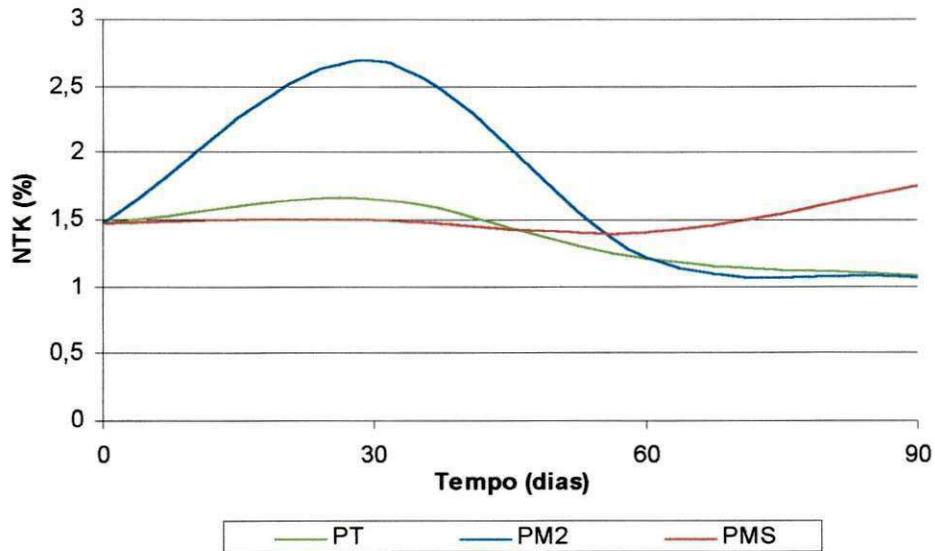


Figura 5.13 - Variação de Nitrogênio Total nas pilhas de compostagem.

### 5.9. Fósforo Total

A Figura 5.14 mostra a variação de fósforo total em função do tempo, nas pilhas PT, PM2 e PMS.

As pilhas PM2 e PMS iniciaram o processo com 0,43% e terminaram com 0,39 e 0,37 % respectivamente. A PT, apresentou um valor mais constante, com valores finais da compostagem valores próximos de 0,38%.

Segundo KIEHL (1985), teores de fósforo abaixo de 0,5% indicam baixas concentrações deste elemento no composto. GONÇALVES (1997), considera que o teor mínimo de fósforo para que um composto possa ser utilizado na agricultura é de 0,7%.

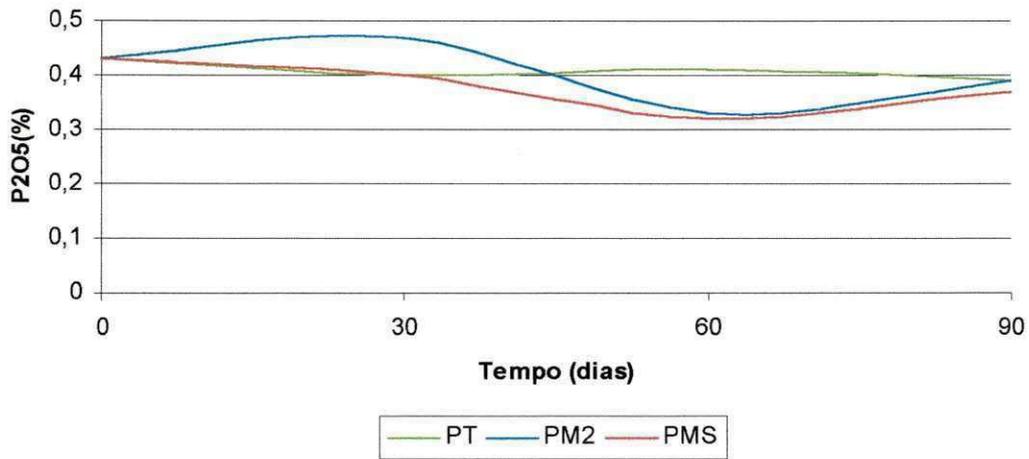


Figura 5.14: Variações de Fósforo Total nas pilhas de compostagem.

### 5.10. Potássio

A Figura 5.15 mostra a variação de potássio em função do tempo. As pilhas tiveram valores iniciais de 0,87%. Os valores encontrados no final do processo foram de 1,35%, para PT, de 1,2%, para a PM2 e 0,9% para a PMS. Deve-se observar que o maior acréscimo ocorreu na PT. Segundo KIEHL (1985), valores entre 0,5 e 1,5%, estão em uma faixa média, para um composto aceitável na agricultura.

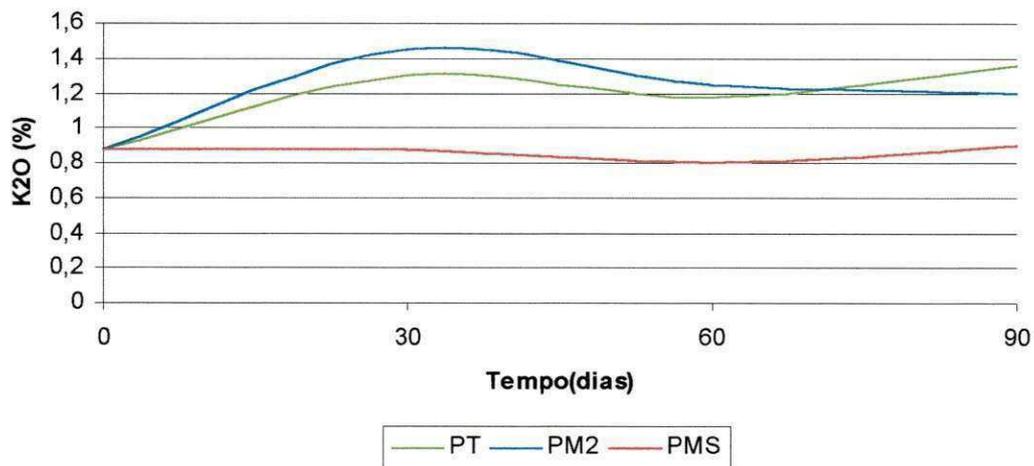


Figura 5.15 - Variações de Potássio nas pilhas de compostagem.

### 5.11. Ácidos Húmicos

A Figura 5.16 mostra a variação dos ácidos húmicos em função do tempo, indicando que o teor dos mesmos aumentou no decorrer do processo.

O valor inicial na pilha de compostagem foi de 0,38%, considerado um valor alto para a matéria orgânica que geralmente apresenta valores nulos (RUSSO, 1998). Esse valor se deve provavelmente aos resíduos sólidos provenientes de jardins.

O acréscimo para a PT foi de 63% e para PM2 de 24%. A queda no teor de ácidos húmicos na PMS pode ser interpretada por alguns inconvenientes nas análises laboratoriais, visto que no início do processo houve um aumento desse teor só ocorrendo um decréscimo nas análises do último mês, seria necessário outras análises com critério do caso.

Um expressivo aumento nesse parâmetro para a PT, revela que houve humificação da massa em compostagem e melhor eficiência desse processo.

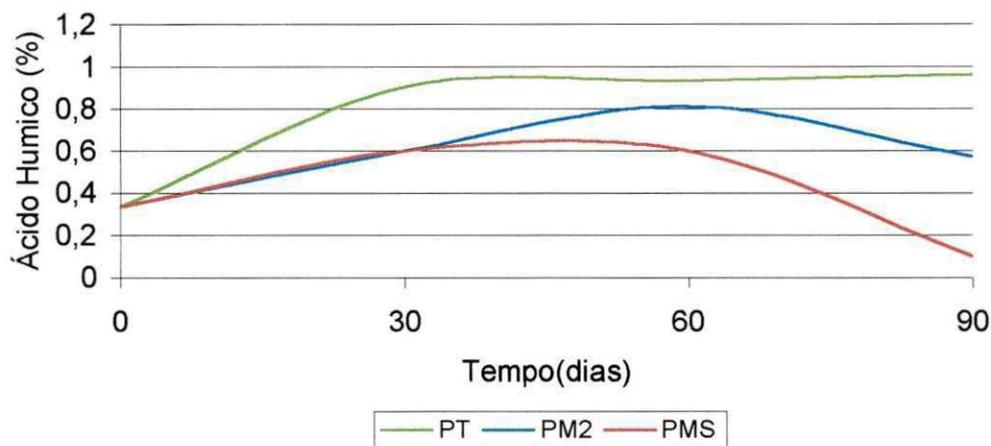


Figura 5.16- Variações de Ácidos Húmicos nas pilhas de compostagem

### 5.12. Relação C/N.

Nas pilhas os valores da relação C/N para o dia 0 foram de 20/1. A Figura 5.17 mostra que as pilhas apresentaram um comportamento um pouco irregular na redução da relação C/N ao longo do processo. A pilha PT obteve, no final da compostagem, valores de C/N de 14/1, a PM2 de 13/1 e a PMS, 11/1.

Os valores finais da relação C/N são característicos de um composto corretamente formado, muito próximos do húmus, que segundo KIEHL (1985), apresenta relações C/N de 10/1. O mesmo autor afirma que valores menores que 15/1 para a relação C/N podem indicar que o material se encontra maturado.

A relação C/N, com valores menores que 15/1, atendem a demanda para um composto com grau adequado de estabilização da matéria orgânica.

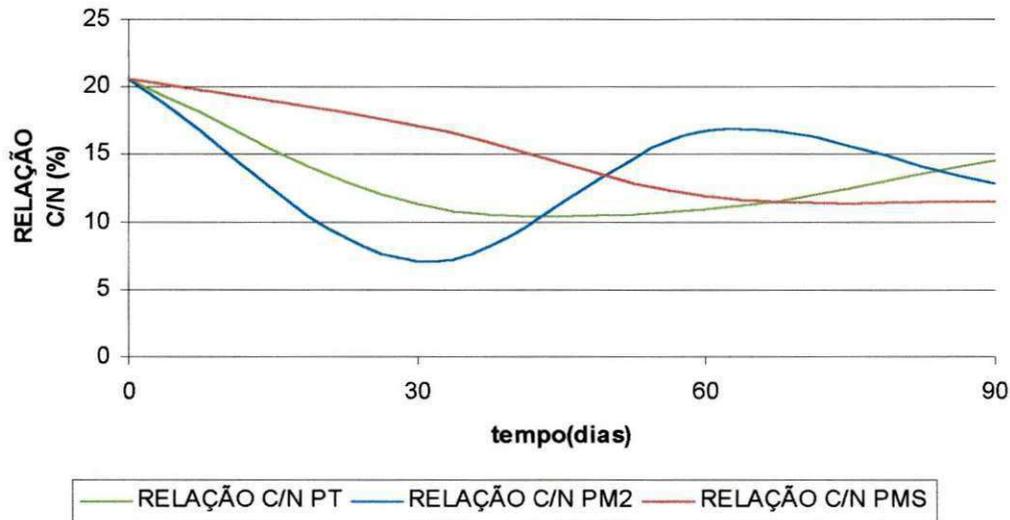


Figura 5.17: Variação da relação C/N na compostagem

### 5.13. *Streptococos fecais*.

A análise microbiológica foi utilizada com objetivo de verificar a qualidade sanitária no processo de compostagem, e verificar a qualidade do produto final em termos de microrganismos indicadores.

A pilha PT iniciou o processo com valor de  $1,4 \times 10^8$  UFC/g de *streptococos fecais*. A partir do 44<sup>o</sup> dia as temperaturas das pilhas começaram a cair com maior velocidade e verifica-se que o decréscimo foi mais lento. As bactérias na PT tiveram uma maior redução, mostrando que ocorreu mais rápida higienização quando a pilha atingiu temperaturas termofílicas de até 60<sup>o</sup>C. Esses valores mostram também a importância da fase de maturação, com um valor final na PT menor que  $10^2$  UFC/g.

A pilha PM2, iniciou o processo com  $9 \times 10^7$  UFC/g e terminou seu processo com  $4 \times 10^2$  UFC/g. Para a PMS, no início do processo havia  $10 \times 10^7$  UFC/g, essas elevadas concentrações devem-se a grande quantidade de resíduos provenientes de banheiro, seu término ocorreu com  $4 \times 10^2$  UFC/g, ou seja igualmente o que ocorreu na pilha PM2.

Os valores apresentados na Tabela 5.1 mostram os valores até o 93<sup>o</sup> dia do processo, evidenciando uma a melhor redução de *Estreptococos* fecais na pilha PT.

Concentrações de *Estreptococos* fecais menores que  $10^2$  UFC/g são considerados satisfatórios para o composto de boa qualidade para uso seguro (PEREIRA NETO,1987, LELIS 1998).

Tabela 5.1- Decréscimo de EF em função dos dias de compostagem.

Fases	DIA	PT	PM2	PMS
<b>Degradação ativa</b>	0	$1,4 \times 10^8$	$9 \times 10^7$	$1 \times 10^8$
	10	$1,1 \times 10^7$	$7 \times 10^6$	$1 \times 10^7$
	16	$9 \times 10^5$	$1,2 \times 10^7$	$1,6 \times 10^7$
	23	$7 \times 10^4$	$1 \times 10^6$	$1,1 \times 10^7$
	32	$4 \times 10^4$	$3 \times 10^6$	$1 \times 10^7$
	37	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$6 \times 10^5$
	44	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^5$	$2 \times 10^5$
<b>Maturação</b>	51	$1,7 \times 10^4$	$9 \times 10^4$	$1 \times 10^6$
	58	$7 \times 10^3$	$4 \times 10^4$	$1 \times 10^4$
	65	$3 \times 10^3$	$3 \times 10^3$	$4 \times 10^3$
	72	$7 \times 10^3$	$3 \times 10^3$	$3 \times 10^2$
	79	$1,3 \times 10^3$	$2 \times 10^2$	$4 \times 10^2$
	93	$< 10^2$	$4 \times 10^2$	$4 \times 10^2$

#### 5.14. Observações Gerais.

As pilhas de compostagem não apresentaram nenhuma diferença de coloração no final do processo. Não apresentaram produção de chorume, não se detectou odor desagradável e não houve atração de vetores.

A Figura 5.18, mostra que não houve diferenças perceptíveis de volume entre as pilhas no final no final do processo.



Figura 5.18- Volumes das pilhas PMS, PM2 e PT, no final do período de compostagem.

## 6. CONCLUSÕES

A pilha termofílica (PT), teve um comportamento ideal com fase termofílica (degradação ativa) no início do processo e mesofílica após 45 dias.

As pilhas com temperaturas mesofílicas (PM2 e PMS) apresentaram dificuldades operacionais, pois não conseguiram manter temperaturas nas leiras de formatos cônicos no início do processo onde a temperatura aumentou rapidamente. Portanto leiras de formato trapezoidal iram requerer grandes áreas de pátio, e menor volume de resíduos sólidos a se compostar.

A diferença entre as temperaturas das pilhas PM2 e PMS, foi devida essa última obter menores temperaturas, registrando valores próximos às temperaturas ambientes.

Os experimentos sob diferentes temperaturas, permitiram concluir que pilhas mantidas em valores termofílicos, podem maximizar a velocidade de degradação, reduzindo pela metade o teor de sólidos voláteis, em relação às pilhas mantidas em temperaturas mesofílicas (39% e 37% de redução).

A pilha PT apresentou menores teores de umidade enquanto que a pilha PMS obteve maiores valores de umidade, influenciado pela umidade do solo.

O pH, não se mostrou um parâmetro influenciado pela temperatura e formato das leiras, pois se manteve praticamente nos mesmos nas três pilhas.

Quanto aos nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) apresentaram valores para as três pilhas coerentes para o composto orgânico aceito na agricultura, e não tiveram significativas variações no decorrer do processo

Os teores de ácidos húmicos comprovam que foi necessária a fase termofílica, pois só apresentaram aumento na pilha mantida com temperaturas termofílicas, na fase de degradação ativa. Os experimentos PMS e PM2, tiveram um decréscimo nesse valor.

As reduções de C/N foram significativas nos três experimentos, não havendo influência da temperatura nesse parâmetro.

Houve mais rápida sanitização na PT, em relação à lenta redução de EF nas pilhas PMS e PM2, mostrando a importância da temperatura termofílica na sanitização do material.

A pilha mantida no pátio sem pavimento, apresentou algumas dificuldades nos reviramentos, por ocorrer mistura de pequenos volumes do solo, podendo influenciar na compostagem.

Para que se obtivesse temperaturas mesofílicas ( $< 40^{\circ}\text{C}$ ) no processo, objetivo da pesquisa foi necessário que as pilhas PM e PMS ficassem com a seção reta trapezoidal com altura reduzida, aproximadamente 30cm. Esse fato acarretou em uma maior ocupação de área por pilha o que resulta um pátio muito maior para a compostagem em escala real do que o requerido pelo sistema termofílico. A título de ilustração, ao considerar os resultados encontrados nessa pesquisa, tem-se que para uma população de 10.000 habitantes a área do pátio de compostagem seria: para os sistemas termofílicos de  $3000\text{m}^2$  e para o sistema mesofílico de  $5000\text{m}^2$ , isto prova uma desvantagem desse processo em termos de escala real.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, AWWA, WPCF- **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health 18<sup>a</sup> Edition, Washington D.C.,1985.

APHA, AWWA, WPCF- **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health 19<sup>a</sup> Edition, Washington D.C.,1995.

ARAGÃO, J.M.S; SANTOS, S. M.; ARAGÃO, J.M. – **Ocorrência de actinomicetos com atividade antifúngica em compostagem de resíduos sólidos**. Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre/ RS – Brasil, 2000.

**As perguntas mais frequentes sobre compostagem em larga escala** - <http://www.resol.com.br/textos/Compostagem.htm>, 2001.

AZEVEDO, M.A. - **Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras**. Belo Horizonte 230p.[Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais], 1993.

BARBOSA, H.R., e TORRES, B.B – **Microbiologia Básica**. Ed Atheneu. São Paulo, 1<sup>a</sup> Edição, 1998.

BIDDLESTONE, A.J., BALL, D.,GRAY, K.R.– **Composting and Urban Waste Recycling, Advances in Food Producing System for Arid and Semiarid Lands [S.I.]**, Academic Press, p191-224, 1981.

BIDONE, F.R.A. e POVINELLI, J. – **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 120p, 1999.

BLACK.J.G., - **Microbiology Principles and Applications**, Prentice Hall, 3<sup>a</sup>-Ed. 820p, 1996.

BOLLER, G.J. – **The Fate of Plant Pathogen During Composting of Crop Residues**. Seminar on Composting Agricultural and Other Wastes . Oxford, 11p, 1984.

BRADY, N. C. – **Natureza e Propriedades dos Solos**. 7<sup>a</sup> edição. Freitas Bastos, Rio de Janeiro: 1989.

BRITO, L.M.C.M.– **Taxa de Mineralização da Matéria Orgânica nos RSU: efeitos agronômicos e ambientais**. Seminário sobre Produção de corretivos Orgânicos a partir dos RSU, LIPOR, Porto, 1997.

CARDENAS J R, R.R., WANG, L.K - **Composting process**. In: Handbook of Environmental Engineering. Clifton: Human Press, p. 269 – 327, 1980.

**Consumo de lixo nos Estados Unidos da América** - [http:// www.resol.com.br](http://www.resol.com.br), 2001.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Legislação de Conservação da natureza, 4<sup>o</sup> edição, São Paulo, FBCN/ CESP, 1996.

DE BERTOLDI, M & MANZONO, M. - **Modern system for composting waste**. Seminário de energia de biomassa e resíduos, In: Brasil – Europa, Belo Horizonte, 1988.

DE BERTOLDI, M. , ZUCCONI, F. e CIVILINI, M. – **Temperature, pathogen control and product quality**. Biocycle, Emmaus, v.1, n.1, p.195 – 199, jan, 1991.

DIAZ, L. F., SAVAGE, G.M., EGGERTH, L.L., GOLUEKE, C.G. – **Composting and recycling municipal solid waste**. Lewis Pub. 296 pp, 1993.

EGREJA FILHO, F.B.– **Avaliação da Ocorrência e Distribuição Química de Metais Pesados na Compostagem do Lixo Domiciliar Urbano**. [Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais - Brasil], 1993.

EPSTEIN, E., PARR, J.F., SIKORA, L.J.ET AL. – **The aerated methods of sludge composting**. In: COMPOSTING: theory and practice for city, industry and farm. Emmaus: J.G. Press, 1982. p: 120 – 126.

FERNANDES. P.A.L.– **Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos**. [Dissertação de Mestrado da Universidade de Coimbra – Portugal], 1999.

FINSTEIN, M.S.- **Composting microbial ecosystem: implications for desing and control**. Biocycle, v.21, n.4, p.25-27, 1980.

FINSTEIN, M. S., MILLER, F. C., STROM, P. F.– **Evaluation of composting process performances**, In: Proceedings of the International Conference on Composting and Solid Wastes and Slurries. Dep. Of Civil Engineering, The University of Leeds, UK. Pp 23-34., 1983.

FINSTEIN, M. S. and MILLER, F. C.– **Principles of composting leading to maximization of decomposition rate, odour control and cost effectiveness**. In Composting of Agricultural and Other Wastes, Ed. Gasser, J. K. R., Elsevier Applied Sc. Pub., London, pp13-26, 1985.

GARCIA, C., HERNANDEZ, T., COSTA, F. – **The influence of composting and maturation processes on the heavy metal extractability from some organic waste**. Biological Waste . [s.l.], n.31, p. 291 – 301, 1990.

GOLUEKE C. G. - **Biological processing: composting and hydrolysis**. In: Handbook of solid waste management. New York: Van Nostrand Reinholds, p 197 – 225, 1977.

GOLUEKE C. G., DIAZ, L.F. - **Understanding the basics of composting**. Biocycle, Emmaus, v.31, n.4, p. 56, 1990.

GOLUEKE C. G.- **Principles of composting**. Biocycle guide to the art and science of composting. Emmaus: J.G. Press, p.14 -37, 1991.

GONÇALVES, M.J.S., -**Composto de resíduos sólidos urbanos: qualidade e utilização**. In: Seminário Produção de Correctivos orgânicos a partir de resíduos sólidos urbanos: sua importância para a agricultura nacional e ambiente, 1, 1997, Matosinhos. [anais...].Porto: Lipor, 1997. Paginação irregular.

GÔNDOLA M.- **A Gestão dos Resíduos: Alguns Conceitos Básicos Aplicados na Europa**. IV Seminário Nacional Sobre Resíduos Sólidos, Gestão Integrada. Anais. 2000.

HAUG. R.T.- **The practical hand book of composting engeneering**. Lewis Publishers, Florida. USA, 1993.

HUGHES, E.G.- **The composting of municipal waste**, In: Handbook of Organic Waste Conversation, edit Michael WM Bewick, Van Nostrand Reinhold, Env. Engrs. pp.108-134, 1980.

IBGE- **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. Anuário Estatístico do Brasil, Brasília, 1996.

IPT - **INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/ CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2ª edição, São Paulo, 278p., 2000.

KIEHL. E.J.- **Fertizantes Orgânicos**. Piracicaba, Ed Agronômica Ceres. 492p., 1985.

KIEHL. E.J.- **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba. 492p.,1998.

LELIS, M.P.N.- **Estudo e Avaliação do Balanço de Umidade na Compostagem: Determinação dos Limites Toleráveis em Função da Velocidade de Degradação e controle de impactos ambientais (produção de odor e chorume)**. [Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais], 1998.

LIMA, L.M.Q- **Tratamento de lixo**. 2ª edição, Editora Hemus, São Paulo. 240p., 1991.

LIMA, L.M.Q – **Tratamento e Biorremediação**. 3ª edição. Editora Hemus, São Paulo, 265p., 1995.

MAYS, D. A. AND GIODANO, P.M.– **Landspreading municipal waste compost.** *Biocycle* (4): 37-39, 1989.

**Mananciais no Brasil são poluídos por esgotos e lixo** - [http:// www.resol.com.br](http://www.resol.com.br), 2001.

MERCEDES, S. S. P. – **Contribuição ao Estudo da Eliminação de Organismos Patogênicos na Compostagem de Lixo Urbano.** [Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba – UFPB], 1993.

MILLER, F.C. – **Composting of Municipal Solid Waste and its Components.** In: *Microbiology of Solid Waste.* New York p: 115 – 149, 1996.

**Mitos y Realidades sobre los Residuos Sólidos** - [http:// www.resol.com.br](http://www.resol.com.br), 2001.

NAKASAKI, K.; SASAKI, M.; SHODA, M. e KUBOTA, H. – **Changes in Microbial Numbers During Termofilic Composting of Sewage Sludge with Reference to CO<sub>2</sub> Evaluation Rate.** *Applied and Environmental Microbiology*, 49 (1), p 37- 41, 1985.

OBENG, L.A, WRIGHT, F.W. (1987) - **The composting of Domestic Solid and Human Wastes.** World bank technical Paper Number 57, n101.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD – OPS. ORGANIZAACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD – OMS. **El manejo de residuos sólidos municipais em America Latina y el Caribe.** Washington de, 1995.68p (série ambiental 15)

**Para una gestión más sostenible de los residuos** <http://www.repamar.org/> article. 2001.

PALMISANO, A. C. e BARLAZ, M.A - **Introduction to Solid Waste Decomposition.** In: *Microbiology of Solid Waste.* Edited by; p: 2-30; 1996.

PELCZAR, M. J. JUNIOR; CHAN E. C.S; KRIEG N. R. – **Microbiologia, Conceitos e aplicações;** 2<sup>a</sup> edição. Makrom Books, 1996.

PEREIRA NETO, J. T., STETIFORD, E. I., MARA, D.D.- **Sistemas de compostagem por pilhas estáticas aeradas: uma proposição de tratamento de lixo urbano e lodos de esgotos.** *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Maceió, 26p. 1985.

PEREIRA NETO, J.T.– **On the treatment of municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting; a low cost technology approach.** Leeds: University of Leeds. 276p. [Tese de Doutorado], 1987.

PEREIRA NETO, J.T– **Monitoramento da eliminação de organismos patogênicos durante a compostagem do lixo urbano e lodo de esgoto pelo sistema de pilhas estáticas aeradas.** *Engenharia Sanitária*, Rio de Janeiro, n.2, p 148-152, 1988.

PEREIRA NETO, J.T. - **Conceitos modernos de compostagem**. Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, n.2, p.104- 109, 1989a

PEREIRA NETO, J.T., AZEVEDO, M.A., ARAÚJO, E.F - **Importância da fase de maturação nos processos de compostagem**. In: Reunião anual da SBPC, 41, 1989 Fortaleza. Anais...[S.I.:s.n], 1989b.35p.(Mimeogr),

PEREIRA NETO, J.T.– **A importância da temperatura nos sistemas de compostagem**. In: Simpósio Luso- Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 4, Belo Horizonte. Anais...[S.I.: s.n.],17p.(Mimeogr). 1990.

PEREIRA NETO, J.T. - **Reciclagem de resíduos orgânicos; compostagem**. In: Encontro nacional de reciclagem, agricultura e meio ambiente, 1, Campinas,Anais...Campinas [s.n.], p55-80, 1995.

PEREIRA NETO, J.T.– **Manual de compostagem**. UFV/SLU/ UNICEF Belo Horizonte, 56p, 1996.

PESSÔA, S.B. e MARTINS, A.V. – **Parasitologia Médica**. Editora Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, 1982.

RESENDE. A. A. P. – **Estudo e avaliação de um processo de reciclagem e compostagem dos resíduos sólidos urbanos** . [Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte] 151 p, 1991.

REIS.M.F.P; BIDONE F. R.A.; GEHLING, G.R.- **Efeitos, escala e clima no processo de compostagem em região subtropical**. Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre/ RS – Brasil, 2000.

REMIGIO, A. F. N. – **Estudo do processo de tratamento aeróbio conjugado de resíduos sólidos orgânicos**. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba , Campina Grande], 2001.

RIBEIRO, C.J.– **Estudo de um Sistema de Reciclagem e Tratamento de Lixo Domiciliar**. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte], 1997.

RIBEIRO, C.J. –**Quando o Lixo tem Valor**. Revista Ação Ambiental, Ano 1, nº 1, p33, Agosto/ Setembro, 1998.

RUSSO, M. A. T.– **Avaliação de Parâmetros que Influenciam a Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos e sua Importância na Qualidade do Composto: Aplicação a Casos de Estudo**. [Dissertação de mestrado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo], 1998.

SINGLEY, E.M.; HIGGINS, A.J., ROSENGAUS, F.M. (1982) – **Sludge composting and utilization: a design and operating manual**. New Jersey: NJAES Rutgers University, 295p.

STENTIFORD, E. I. - **Composting of Sewage Sludge and Solid Waste**. University of Leeds: 1991.

STEVENSON, F.J. – **Humus Chemistry**. New York: John Wiley e Sons, 443p, 1982.

WAKSMAN, S.A. - **Humus: origin, chemical composition and importance in nature**. Baltimore: Wiliams e Wilkins, 526p, 1983.

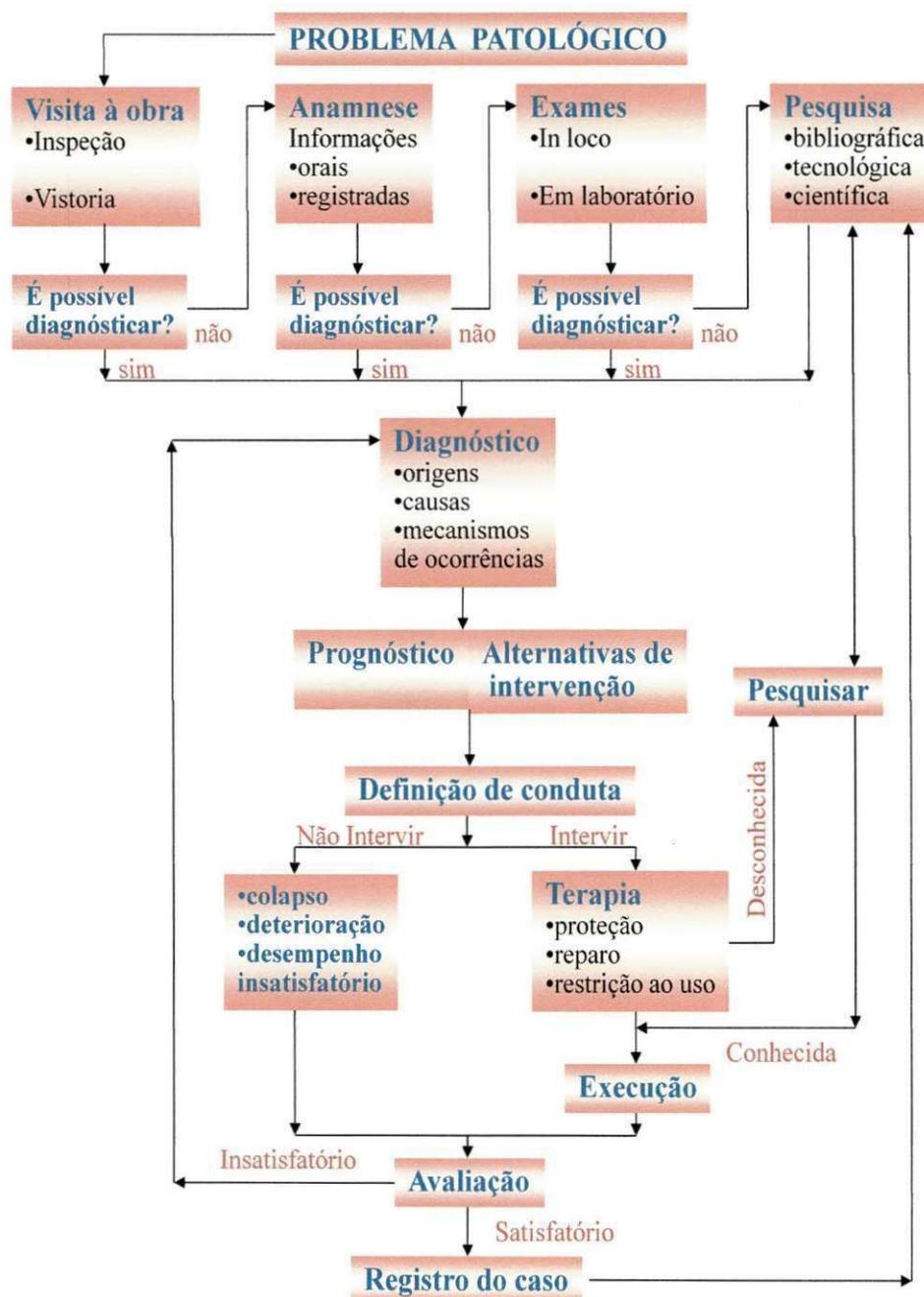
Waste Age - **Censo do lixo nos Estado Unidos**– [http:// www.resol.com.br](http://www.resol.com.br), 1999.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF). - **Sludge stabilities development**, 1985 (Mimeogr.).

ZUCCONI, F.DE BERTOLDI, M. – **Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste**. In: DE BERTOLDI, M., FERRANTI, M.P., HERMITE,P. (Ed.). **Compost: production, quality and use**. London: Elsevier Applied Science, 123p, 1987.

Para a resolução de problemas patológicos, deve-se seguir um método que vai primeiramente levantar subsídios, tais como: problema, vistoria do local, anamnese e ensaios de laboratório. Após essa etapa, visualizar o diagnóstico, definir a conduta a ser seguida, através de alternativas de intervenção (Prognóstico), decisão da terapia e finalmente a resolução do problema. O Quadro 2.3 ilustra o fluxograma de resolução de problemas patológicos.

QUADRO 2.3 - Fluxograma de atuação para a resolução de problemas patológicos



Fonte: Helene *et al.* (2004).

## 2.5 INJEÇÃO DE CALDA COLOIDAL DE MICROCIMENTO

Qualquer manutenção ou reparo em pavimentos deve ser realizada de maneira criteriosa, iniciando pela observância das condições de uso e vida útil estabelecidas no projeto deste pavimento. Dessa maneira, uma avaliação prévia das condições estruturais de um pavimento deve ser feita considerando os dados estabelecidos em projeto e as condições de execução do mesmo e, na falta destes dados, esta avaliação deve ser realizada com base em técnicas recomendadas para avaliação (ABREU, 2005).

A colmatação pelo processo de injeção é um método de recuperação de pavimento de concreto que proporciona tempo reduzido de retorno das condições de trafegabilidade e a praticidade na aplicação, através da utilização de microcimentos, levando em consideração o tipo de patologia (SISTEMA MICROINJET, 2008).

### 2.5.1 A Tecnologia de Injeção

A tecnologia de reabilitação de pavimentos com a utilização de microcimentos é relativamente nova no Brasil, mas muito utilizada no exterior com grande sucesso e custo altamente competitivo frente às tecnologias convencionais (ABREU, 2005).

Dentre as principais aplicações da tecnologia de injeção, devido a falhas construtivas, na construção civil, estão:

- fissuras em diversos tipos estruturais em concreto armado, tais como: barragens, túneis, vigas, pilares e fundações;
- instabilidade ou problemas com nivelamento de placas de pavimentos de concreto;

### 2.5.2 Microcimento

O microcimento é um material cimentício à base de clínquer finamente micropulverizado com diâmetro médio de partículas menor que 6  $\mu\text{m}$ , uma finura bem menor do que a de um cimento comum, o que lhe confere alta injetabilidade, excelente reologia de

calda quando em estado fresco, alta aderência química, maior formação de gel e cristais de hidratação. A Figura 2.7 mostra as características físico-químicas do microcimento.

CARACTERÍSTICAS FÍSICOS - QUÍMICAS		
ENSAIOS	NORMAS	MC 20
Finura - Mesh 400 (37 $\mu$ m)	-	0.00
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/01	2.96
Blaine (cm <sup>3</sup> /g)	NBR NM 76/98	9257
Cons. Normal (%)	NBR NM 43/03	36.0
Tempos de Pega (h:min)	Início	02:20
	Fim	03:10
Perda ao Fogo 950°C	NBR 5743/89	4.78
Óxido de Silica - SiO <sub>2</sub>	NBR 9203/85	24.31
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		7.72
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2.01
Óxido de Cálcio - CaO		52.68
Óxido de Magnésio - MgO		3.76
Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>	NBR 5745/89	3.68
Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	NBR 5747/89	0.30
Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O		0.68
Resíduo Insolúvel	NBR 5744/89	0.76
Cal Livre (%CaO)	NBR 7227/90	0.91

Figura 2.7 – Características físico-químicas do microcimento

Fonte: Abreu (2005).

### 2.5.3 A Reologia da Calda de Microcimento

As caldas produzidas com o microcimento devem ser preparadas obrigatoriamente com o auxílio de um misturador coloidal e aditivos especiais para microcimento, que auxiliam na total dispersão dos micro-grãos quando do preparo da calda. Este cuidado é necessário para conferir adequada propriedade reológica e ótima estabilidade da calda, já que propicia a flocculação das partículas ultrafinas do cimento, evitando-se assim a formação de grumos e conferindo excelente desempenho do produto nas injeções.

O microcimento tem propriedades muito particulares que lhe confere um excelente desempenho quanto à injetabilidade. Estas propriedades foram avaliadas submetendo o produto aos ensaios de calda de injeção preconizados pelas normas NBR 7681, NBR 7682, NBR 7683, NBR 7684 e, NBR 7685, no qual se constatou um desempenho adequado às suas aplicações (ABREU, 2005).

## 2.6 RECUPERAÇÃO DO PAVIMENTO RÍGIDO COM MICROCIMENTO

Quando um pavimento rígido necessita ser recuperado, para que suas condições estruturais e funcionais atinjam o objetivo para o qual foi construído, faz-se necessário um estudo prévio e detalhado da patologia que se quer tratar, para verificar a viabilidade do emprego do microcimento.

Segundo alguns fabricantes de microcimentos, o seu uso, apesar de atender a um grande número de tipos de defeitos em pavimentos de concreto, sofrem limitações que deverão ser avaliadas antes da aplicação. Dentre estas limitações está o caso em que as fissuras possuem características de atividade no qual, mesmo após a cura da calda de microcimento, o concreto continua a se deformar, pois o concreto recuperado tornou-se um sistema único e rígido.

A Figura 2.8 ilustra uma fissura sendo tratada através da injeção da calda coloidal de microcimento e a Figura 2.9 mostra uma extração de corpo de prova sobre esta mesma fissura, após 7 dias. Este corpo de prova, quando submetido em ensaio de compressão apresenta uma resistência mecânica equivalente a 99% do valor de referência do pavimento, ou seja, o valor de resistência à compressão do corpo de prova extraído do pavimento íntegro e o valor da resistência do corpo de prova extraído sobre a fissura tratada são praticamente os mesmos. Esta verificação ratifica a eficiência da injeção da calda coloidal de microcimento no tratamento de fissuras estáticas (ABREU, 2005).

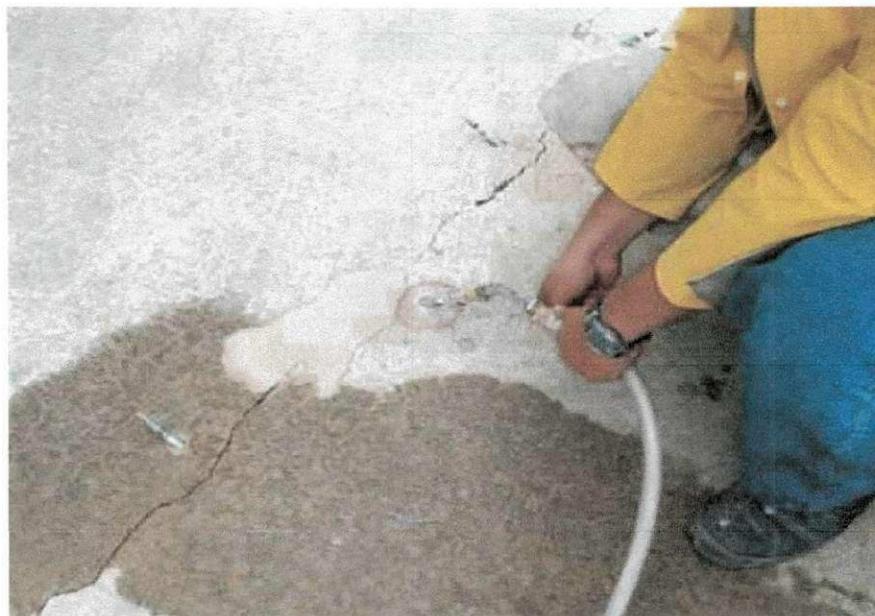


Figura 2.8 – Injeção de microcimento na fissura do pavimento.  
Fonte: Abreu, (2005).



Figura 2.9 – Extração de corpo de prova após injeção sobre fissura.  
Fonte: Abreu, (2005).

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1 RECUPERAÇÃO DO PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO *PORTLAND* DA OBRA DE DUPLICAÇÃO DA BR-101- LOTE 05, COM INJEÇÃO DE CALDA DE MICROcimento

##### 3.1.1 Metodologia para Identificação do Problema Patológico

###### 3.1.1.1 Vistoria

Iniciou-se com uma vistoria no segmento da obra de duplicação da BR-101, corredor Nordeste no Lote 05, pela equipe técnica de Engenheiros do Exército Brasileiro, da Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP) e da empresa (Holcim), que tinha como objetivo identificar e reconhecer as patologias e suas possíveis causas.

A vistoria procedeu-se a uma inspeção visual das condições apresentadas pelo pavimento, objetivando identificar e diagnosticar as patologias e suas possíveis causas.

###### 3.1.1.2 Diagnóstico

Através de inspeção visual foi possível, identificar fissuras de retração plástica no concreto (Figura 2.10) com características de inatividade.

Segundo Fortes (1999), o fenômeno de retração plástica está associado a deformações em pastas de cimento, argamassas e concretos, sem que haja carregamento. Os trechos identificados com essa patologia encontravam-se interditados a passagem do tráfego, ou seja, não haviam sido carregados.



Figura 2.10 – Fissuras na BR-101, corredor Nordeste no Lote 5.

A retração plástica depende dos parâmetros que afetam a evaporação da água; umidade, temperatura, velocidade do ar e volume da peça concretada. Como nessa fase a estrutura da pasta é mantida pelas tensões capilares, a retração pode determinar a fissuração. (PITTA, 1992).

Para identificar as variáveis atmosféricas foram coletados os dados de uma estação móvel, instalada no local onde estava sendo executado o pavimento. De posse desses dados, através do ábaco da Figura 2.4, foi avaliada a taxa de evaporação da água da superfície do concreto fresco (concreto com 1 hora de aplicado) e verificou-se valores superiores a  $0,5 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ .

Segundo a consultoria técnica do Exército Brasileiro e Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), parâmetros de taxas de evaporação superiores a estes apresentados nos locais do pavimento em questão aumentam muito a probabilidade de ocorrência de fenômenos patológicos de fissuras de retração plástica. Para identificação da inatividade das fissuras, utilizou-se uma pasta de gesso aplicando-a nas aberturas de placas de concreto e logo após o tráfego foi liberado. Após dois dias observou-se que as mesmas encontravam-se preenchidas sem aspectos de desprendimento entre a camada de gesso e o concreto do pavimento.

Além dos parâmetros visuais coletados em campo, foram analisados os métodos construtivos de execução do pavimento rígido em questão, através da norma DNIT-ES

049/2009 (DNIT, 2009), e o processo de fabricação do concreto, controle e recebimento através da norma NBR12655.

De acordo com Balbo (2005), há de reconhecer que no Brasil, devido ao pequeno montante de rodovias com pavimentos de concreto, pouco se fez até hoje em termos de normalização, seja para o inventário e cadastramento de defeitos, explicitando uma nomenclatura nacional, seja para estabelecer diretrizes de restauração, o que geralmente fica a critério do especialista que inspeciona a pista de rolamento, por observação visual ou remota.

Com essa preocupação, as equipes técnicas envolvidas no processo criaram uma planilha contendo, após a inspeção visual, o levantamento da situação e o cadastro com a localização das patologias, ao longo do trecho a ser tratado na BR 101- lote 05.

Alguma falha na cura inicial do concreto (produto de cura ineficaz, a falta de cura química ou taxa de produto de cura muito baixa) ou excesso de retardamento do início de pega do cimento, podem provocar fissuras de retração plástica (SILVA, 2008).

### 3.1.1.3 Prognóstico

Na busca de dar continuidade à execução do pavimento rígido e à intervenção do problema patológico, foi adotado um processo complementar na cura do concreto, o uso da manta geotêxtil úmida em toda extensão executada do pavimento, que até então era realizada apenas a cura química (Figura 2.11).



Figura 2.11 - Execução da cura química

Depois de adotada a intervenção no pavimento em execução, buscou-se uma alternativa de reparo que minimizasse, não somente no aspecto econômico, mas também torná-lo nas mesmas condições estruturais previstas no projeto original. Aliado a esses aspectos, levou-se em consideração, o atraso no cronograma-físico financeiro e o impacto visual da demolição do pavimento.

#### 3.1.1.4 Reparo e Restrição ao Uso

Nessa etapa foram realizados testes no pavimento rígido para verificar qual ou quais as melhores técnicas de injeção e qual o produto que atendesse as especificações das NBR 7681, NBR7682, NBR7683, NBR7684 e NBR7685 e que se adequariam ao comportamento das fissuras em termos de abertura, profundidade e comprimento.

Primeiramente utilizou-se uma resina epoxídica,, empregando a técnica de injeção pressurizada. Seu resultado foi considerado insatisfatório, pois não ocorreu o preenchimento total das fissuras (Figura 2.12), pois a resina após a aplicação retirava a aderência do pavimento, ou seja, a texturização, deixando o pavimento liso e com uma coloração diferente (Figura 2.13).



Figura 2.12 - Resultado da aplicação da resina epoxídica.

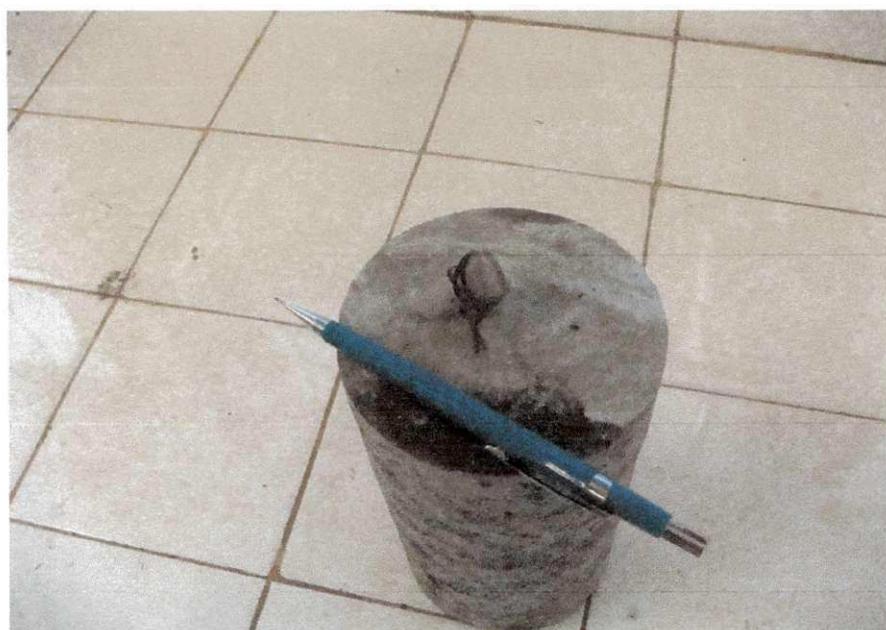


Figura 2.13 - Corpo de prova extraído do pavimento após a aplicação da resina epoxídica

Devido a esses problemas de aderência, coloração e principalmente o não preenchimento das fissuras, optou-se em utilizar outro produto que tivesse semelhança com o concreto, nestes aspectos físicos, e que garantisse a recuperação do pavimento. Tentou-se utilizar uma argamassa de água e cimento *Portland* comum, porém pelo comportamento das fissuras em termos de abertura e profundidade, a mistura não teve fluidez suficiente para penetrar e preencher os vazios.

Através de uma pesquisa de mercado, identificou-se o microcimento como um produto que possuía inúmeras aplicabilidades na injeção de fissuras. O microcimento era um produto que possuía propriedades semelhantes a do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. A única restrição de aplicabilidade quanto ao seu uso seria com fissuras que apresentassem atividade, o que não foi o caso.

Numa primeira etapa, cinco técnicas de injeção de calda coloidal de microcimento foram experimentalmente testadas no pavimento rígido, localizadas na placa 1976 LE e LD, no período de 01/11/08 a 03/12/08. Dentre elas estão:

1. Injeção pressurizada por obturador a vácuo (Figura 2.14);
2. Injeção pressurizada por obturador de inserção (Figura 2.15);
3. Injeção por gravidade através do uso de picetes (vaso de pressão manual) (Figura 2.16);
4. Injeção pressurizada por obturador de adesão superficial (Figura 2.17);
5. Injeção pressurizada por obturador de fenda (Figura 2.18);

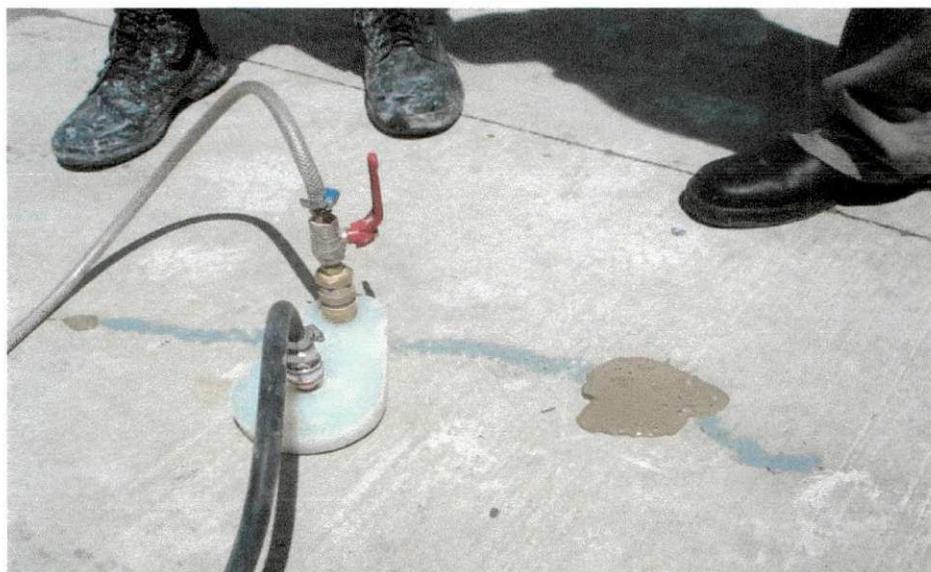


Figura 2.14 - Obturador a vácuo.



Figura 2.15 - Obturador de inserção.



Figura 2.16 – Vaso de pressão manual (picetes).



Figura 2.17 - Obturador de adesão superficial.



Figura 2.18 – Obturador de fenda.

Observou-se que, das cinco técnicas propostas, somente a 1 e a 3 apresentaram resultados satisfatórios quanto ao preenchimento total para aquele tipo de fissura em questão. Para isso foram extraídos corpos de prova, cada um identificado com a sua respectiva técnica e avaliado visualmente. Cerca de vinte dias após a primeira aplicação, uma nova aplicação foi

realizada no mesmo pavimento com as duas técnicas que atenderam ao objetivo quanto ao preenchimento. Dois dias após esta última aplicação, foram extraídos oito testemunhos e ensaiados à compressão, apresentando os seguintes resultados:

#### QUADRO 2.4

##### Identificação do corpo de prova

IDENTIFICAÇÃO DO CORPO DE PROVA	TENSÃO $f_{c_1}$ (MPa) COMPRESSÃO
1	41,2
2	37,5
3	47,9
4	34,7
5	41,9
6	36,9
7	32,5
8	39,6

Fonte: Laboratório de tecnologia do Exército Brasileiro

Aliado a esses resultados, as duas técnicas mostraram-se eficientes do ponto de vista de praticidade e rapidez, no momento da execução.

A metodologia foi previamente definida entre Exército Brasileiro e Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP), após análise detalhada dos resultados apresentados pela empresa responsável pela execução do trabalho de recuperação do trecho deteriorado. A definição da metodologia baseou-se na abertura das fissuras, sendo recomendado o seguinte:

- Fissuras de Retração Plástica com comprimento inferior a 0,60m, abertura inferior a 1,0mm, não interligada e com profundidade de até metade da espessura da placa, recomendação do uso injeção por gravidade de microcimento;
- Fissuras de Retração Plástica com comprimento superior a 0,60m a 1,0m, abertura superior a 1,0mm e com profundidade que pode atingir toda a espessura da placa, recomendação do uso de injeção pressurizada de microcimento;
- Fissura de Retração Plástica com comprimento superior a 1,0m, abertura superior a 1,0 mm e com profundidade que pode atingir toda a espessura da placa, com elevado grau de incidência por placa e interligadas, recomendação demolição total das placas.

### 3.1.1.5 Execução

De posse da planilha de localização das patologias e de acordo com a IT 004, foram realizados os seguintes procedimentos operacionais:

- Isolamento da área (Figura 2.19);
- Lavagem do pavimento e das fissuras com água pressurizada visando desobstrução das fissuras por partículas sólidas (Figura 2.20);
- Secagem e expulsão da água sobre as placas e no interior das fissuras por aplicação de ar comprimido seguido de evaporação natural ( Figura 2.21);
- Preparo da calda coloidal de microcimento com o emprego do misturador coloidal (Figura 2.22);
- Preenchimento das fissuras previamente limpas e secas por gravidade com auxílio de picetes de injeção e injeção pressurizada ( Figura 2.23);
- Remoção e limpeza do excesso de calda coloidal sobre a fissura (Figura 2.24).



Figura 2.19 - Isolamento da área.



Figura 2.20 - Lavagem do pavimento e das fissuras com água pressurizada visando a desobstrução das fissuras por partículas sólidas.



Figura 2.21 - Secagem e expulsão da água sobre as placas e no interior das fissuras por aplicação de ar comprimido seguido de evaporação natural.



Figura 2.22 - Preparo da calda coloidal de microcimento com o emprego do misturador coloidal.



Figura 2.23 – Preenchimento das fissuras através da injeção por gravidade (Picetes) utilizando calda coloidal de microcimento.



Figura 2.24 – Remoção e limpeza do excesso de calda coloidal sobre a fissura.

### 3.1.2 Materiais e Equipamentos Utilizados no Procedimento de Recuperação do Pavimento

#### 3.1.2.1 Cimento

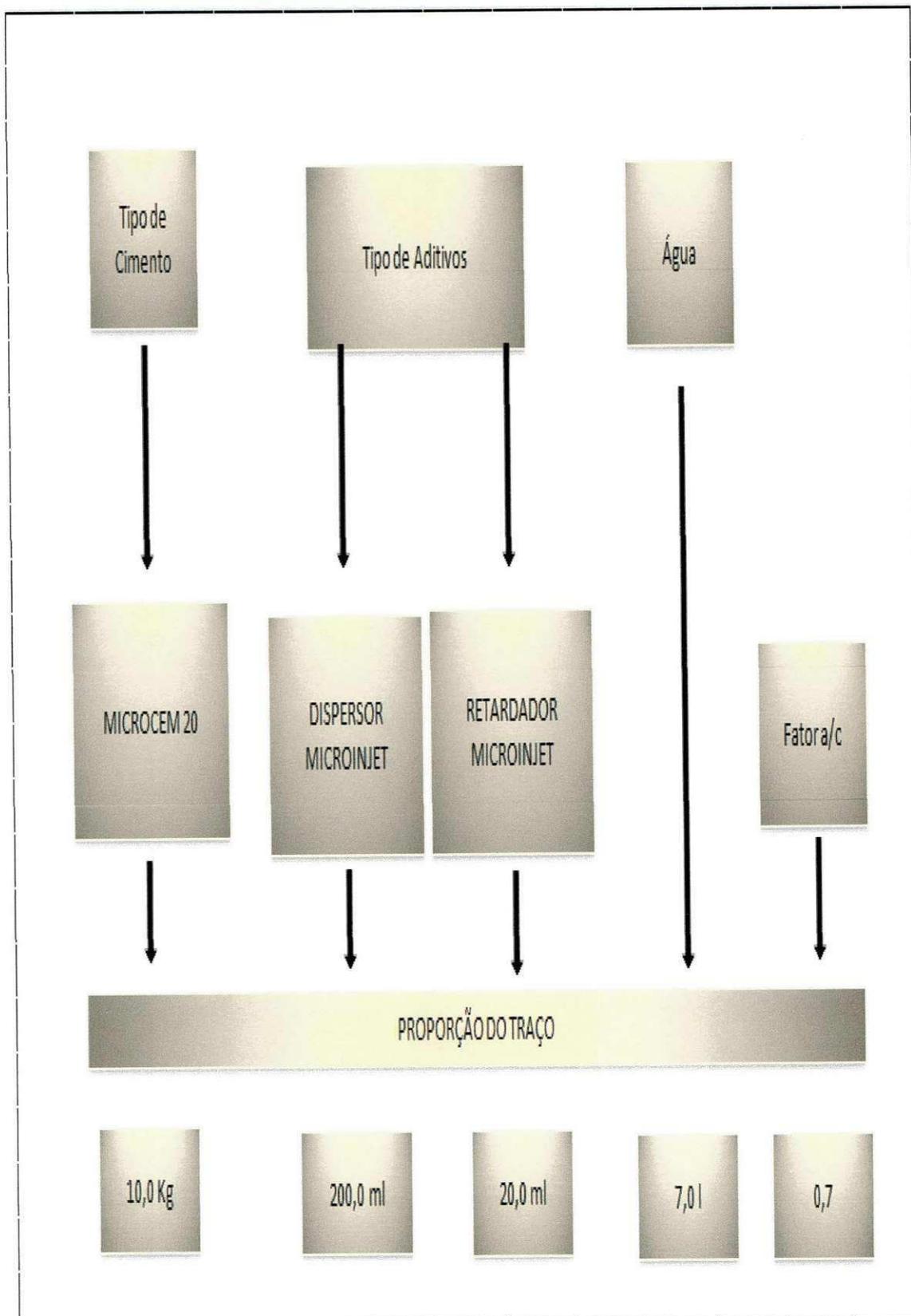
O cimento utilizado na aplicação de calda coloidal de microcimento foi Microcem 20, fabricado pela empresa Holcim, devido à facilidade no controle de fluidez e viscosidade durante o processo de fabricação dela e durante a aplicação, além de uma penetração e injetabilidade muito superior ao das caldas de cimento convencionais.

#### 3.1.2.2 Traço da Calda Coloidal de Microcimento

Na confecção do traço buscou-se atingir uma baixa pressão no momento da aplicação e, por isso, optou-se por uma maior fluidez e uma menor viscosidade. Essa fluidez gerou em torno de  $7,1\text{cm}^3/\text{s}$ .

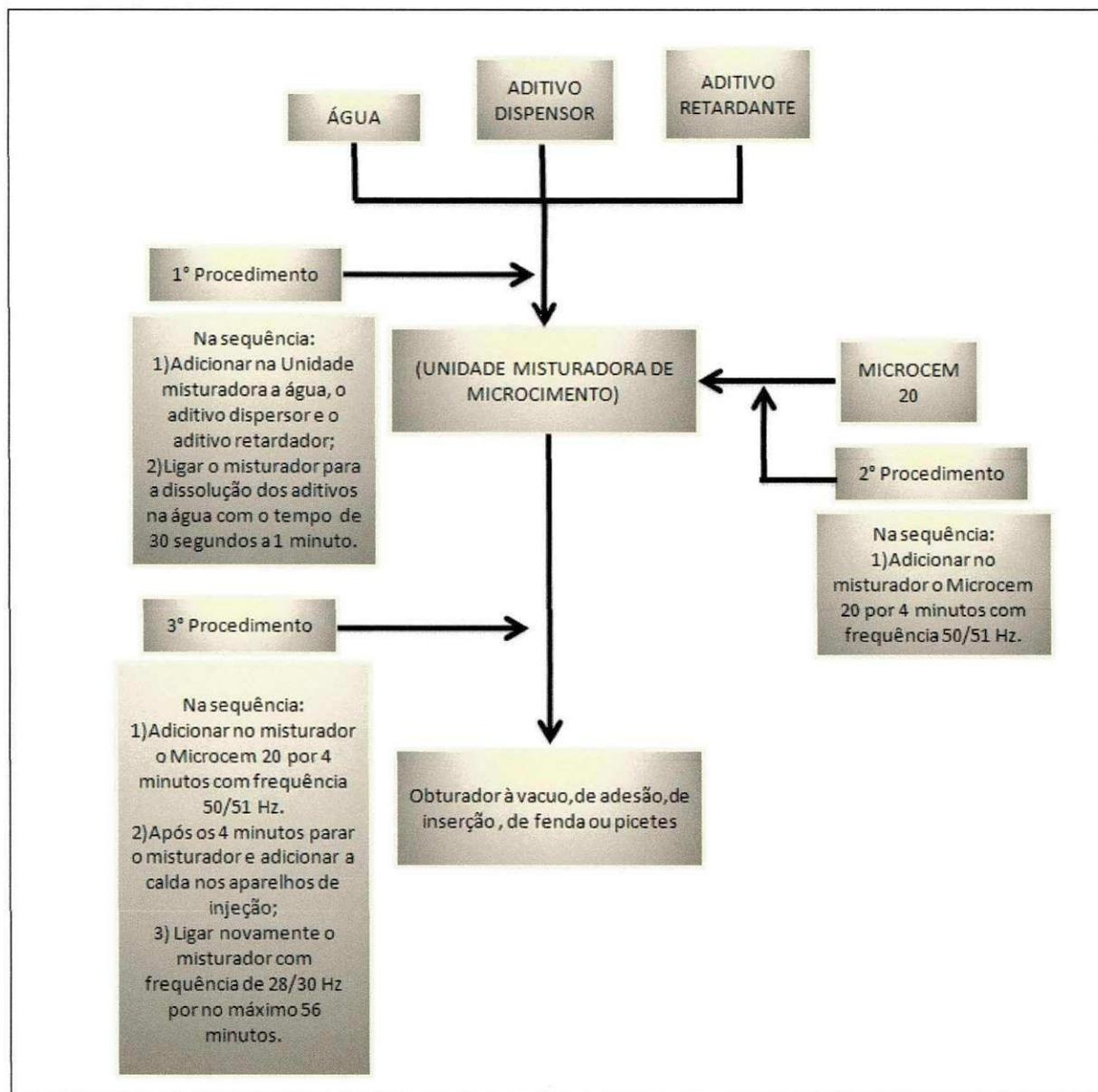
A quantidade de produção de calda coloidal de microcimento dependia do tempo relativo de aplicação, pois, após 1 hora, a calda perdia sua fluidez devido ao início de pega, com essa característica, eram produzidos para cada atividade de aplicação, 18 litros de calda coloidal num misturador de capacidade para 50 litros. A proporção do traço para cada atividade de aplicação se distribuiu de acordo com o Quadro 2.5:

QUADRO 2.5 – A proporção do traço da calda coloidal de microcimento



Foi adotada a seguinte seqüência para a preparação da calda coloidal:

QUADRO 2.6 - Seqüência para a preparação da calda coloidal de microcimento



### 3.1.2.3 Equipamentos de Campo

Para a aplicação da injeção de calda de microcimento no tratamento da patologia do pavimento de concreto da BR-101- Lote 5, foram utilizados equipamentos da empresa contratada (Holcim) e o laboratório de tecnologia do Exército Brasileiro sendo supervisionada pela ABCP. Dentre os equipamentos utilizados estão:

- Caminhão Pipa com capacidade de 8000 litros;



Figura 2.25 – Limpeza com caminhão Pipa.

- Compressor de ar;



Figura 2.26 – Compressor de ar para remoção de partículas sólidas.

### Especificações

- Modelo: Mobilair M-57

- Pressão: 7 bar
  - Motor: Diesel, Kubota, V2403, 4 tempos, 4 cilindros, refrigerado a água
  - Potência: 33,6 kW a 2400 rpm • Capacidade do tanque de combustível: 105 litros
  - Peso: 1225 kg
  - Dimensões (C x L x A): 3780 (6145) x 1680 x 1500 mm
- 
- Gerador;



Figura 2.27 – Gerador para alimentar o misturador coloidal.

### **Especificações**

- Motor: Branco 2.8 CV, 4 tempos / Gasolina
- Potência Máxima: 1,3 KVA
- Potência Nominal: 1,1 KVA
- Frequência: 60Hz
- Carregador de Baterias: 12V - 10A
- Combustível: Gasolina
- Capacidade do Tanque: 6 Litros
- Autonomia (50% de carga): 4,8 horas
- Sistema de Resfriamento: Ar
- Peso: 30 kg
- Fases: Monofásico

- Ruído: 67 dB a 7 metros
- Dimensões (C x L x A): 470mm x 360mm x 420 mm

- Extratora;



Figura 2.28 – Extratora para retirada dos testemunhos.

### **Especificações**

- Motor: 8HP
- Combustível: Gasolina
- Capacidade do Tanque: 8 Litros
- Sistema de Resfriamento: A água
- Peso: 140 kg
- Dimensões para cálices Ø 2", 3", 4" e 6"
- Capacidade de perfuração: 400 mm

#### 3.1.2.4 Equipamentos de Laboratório

Para a obtenção dos resultados de resistência dos corpos de prova extraídos do pavimento, após a injeção de calda coloidal de microcimento, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

1. Prensa hidráulica;
2. Retífica;

### 3.1.2.5 Placas de Concreto

O pavimento recuperado encontra-se no lote-05 da BR-101/PB, trecho que liga a divisa RN/PB a divisa PB/PE, no sub-trecho localizado na entrada da PB-025 até a divisa PB/PE com extensão de 54,9 km (Figura 2.29).



Figura 2.29 – Trecho da BR101- Lote 05

Fonte: Projeto executivo - Lote 05

A seção tipo do pavimento em questão é mostrada na Figura 2.30:

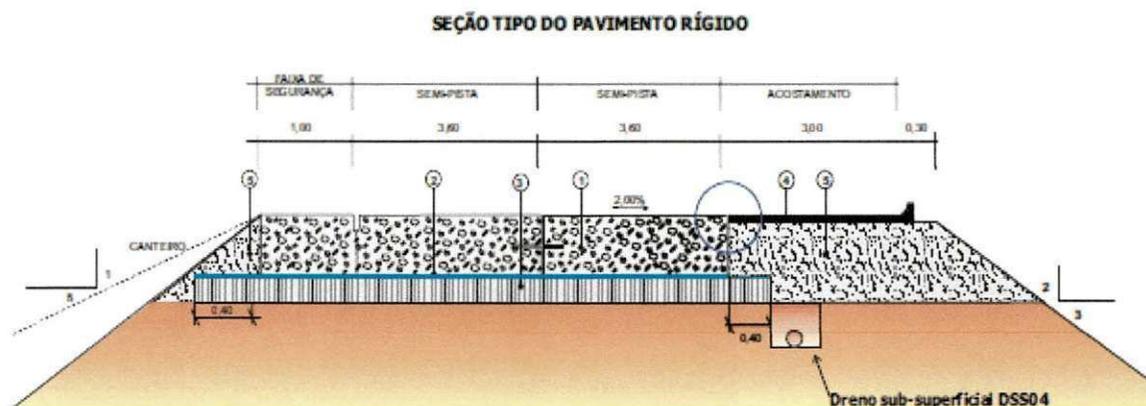


Figura 2.30 – Seção tipo do pavimento rígido da BR101- Lote 05

Fonte: Projeto executivo - Lote 05

As camadas do pavimento estão dispostas, segundo o projeto executivo, nesta seqüência:

Na pista de rolamento:

1. Placa de concreto de cimento *Portland*, com resistência à tração na flexão de 4,5 MPa e espessura de 0,22 m;
2. Pintura de ligação com RR-2C com a taxa de 0,6 l/m<sup>2</sup>;
3. Sub-base de concreto compactado a rolo (CCR), de resistência à tração na flexão de 1,8 MPa, com espessura de 0,10 m;

No acostamento:

4. Revestimento em concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) faixa C, com espessura de 0,04 m;
5. Base de brita graduada com espessura de 0,28 m.
6. As juntas transversais de retração são preenchidas com barras de transferência, com comprimento de 46 cm, diâmetro de 25mm (CA-25), sendo que 25 cm pintadas e

engraxadas (Figura 2.31) e espaçamentos de 30cm (Figura 2.33). As juntas longitudinais de articulação são preenchidas com barras de ligação com comprimento de 85 cm, diâmetro de 12,5mm (CA-50) (Figura 2.32), e espaçamentos de 75 cm (Figura 2.33).

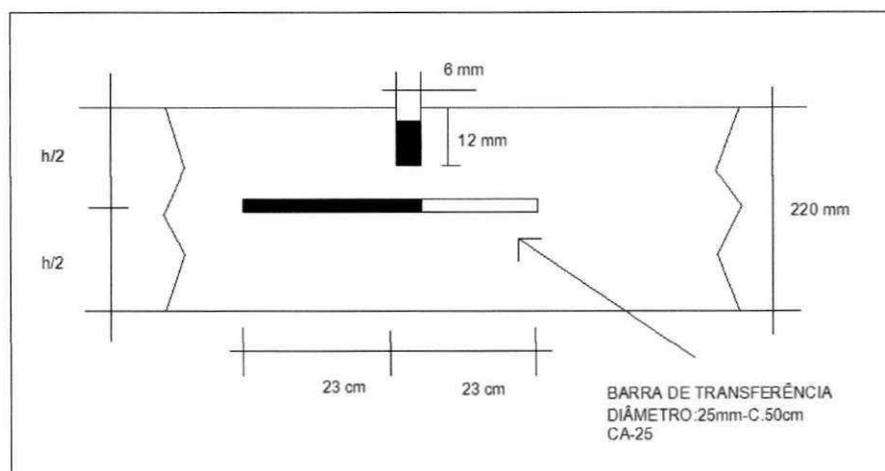


Figura 2.31 – Detalhamento das juntas transversais com barras de transferência.

Fonte: Projeto executivo - Lote 05

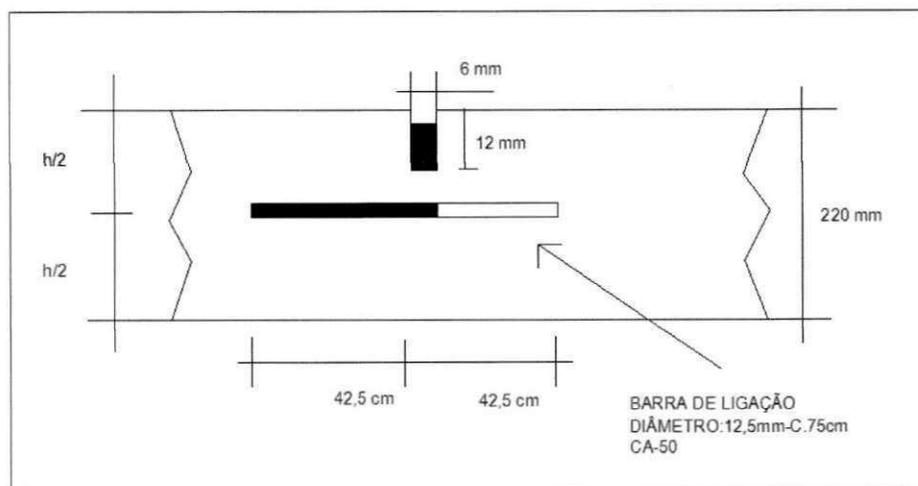


Figura 2.32 – Detalhamento das juntas longitudinais com barras de ligação.

Fonte: Projeto executivo - Lote 05

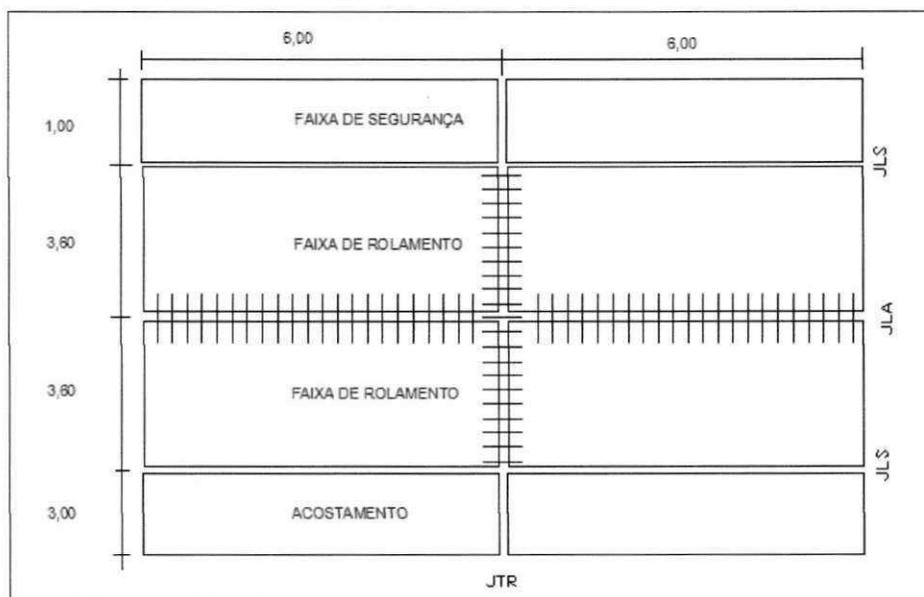


Figura 2.33 – Disposições das barras de transferência e de ligação no pavimento.

Fonte: Projeto executivo - Lote 05

O trecho recuperado corresponde às placas com numeração 1.346 a 1.839, totalizando 2.958 metros, porém este segmento apresenta ainda placas sem patologia.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. Desde que a pesquisa foi realizada em uma obra de pavimentação rodoviária, que se encontra ainda em execução, indicam-se as placas de concreto e extensão do trecho que representa o espaço amostral de onde foram extraídos os corpos de prova utilizados para estudo. Apresentam-se os equipamentos utilizados para extração, ruptura e análise microscópica dos corpos de prova e amostras deles retiradas. Sequencialmente apresenta-se a metodologia utilizada para o estudo.

Para esta pesquisa foram extraídos testemunhos (CP's) em locais pré-definidos por meio de um levantamento das patologias existentes. O plano de trabalho também foi determinado em função do tipo de tratamento adotado no trecho recuperado com injeção de calda de microcimento.

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Placas de concreto

Dentro do universo amostral das placas de concreto do pavimento recuperado, as amostras escolhidas para estudo foram aquelas dentro da numeração 1.508 a 1.825, situadas entre os quilômetros 113 e 115 com extensão de 1.902 metros.



Figura 3.1 – Trecho de placas recuperadas próximo ao km 114.

## 4.1.2 Equipamentos de Campo

### 4.1.2.1 Extratora

Para extração dos testemunhos utilizou-se uma extratora com capacidade de perfuração de 400 mm com cálice de diâmetro  $\varnothing$  de 4" para retiradas de CP's cilíndricos com 100 mm diâmetro por 200 mm de altura. A Figura 3.2 ilustra o equipamento de extração dos corpos de prova.

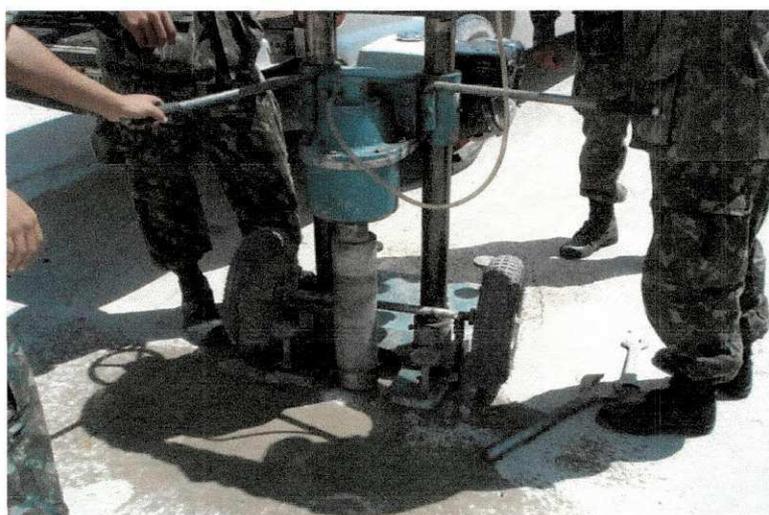


Figura 3.2 – Equipamento de extração dos corpos de prova.

## 4.1.3 Equipamentos de Laboratório

### 4.1.3.1 Prensa Hidráulica

Para o rompimento dos corpos de prova utilizou-se prensa elétrica hidráulica com 2 (dois) manômetros, capacidade 100/20 toneladas, com indicador analógico, escalas 0-120.000kgf divisão de 200kgf e de 0-24.000 kgf com divisão de 40kgf. Aplica-se em ensaios de corpos de prova cilíndricos de concreto com diâmetros  $\varnothing$  igual a 15cm ou 10cm por alturas de 30cm ou 20 cm respectivamente. A Figura 3.3 ilustra o equipamento de rompimento dos corpos de prova.



Figura 3.3 – Equipamento de rompimento dos corpos de prova.

#### 4.1.3.2 Microscopia óptica

A análise microscópica das amostras foi realizada através de dois microscópios, um com capacidade de ampliação de até 50,0 a 100,0 vezes de marca Olympus, SC30 , BX51 , MODEL U-L-M 100 -3 e o outro de marca também Olympus, SZ 40, com capacidade de ampliação de até 40,0. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram os equipamentos utilizados.

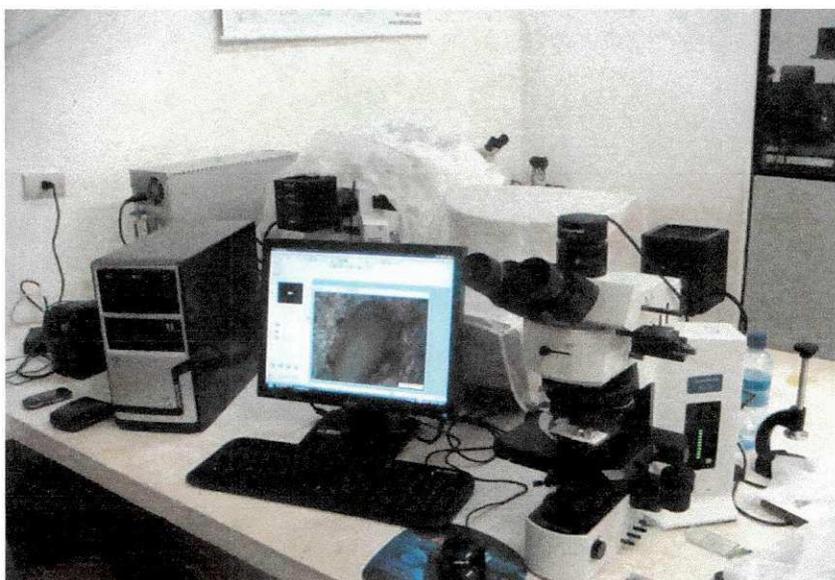


Figura 3.4 – Equipamento de microscopia óptica, SC30.



Figura 3.5 – Equipamento de microscopia óptica, SZ40.

## 4.2 MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho busca avaliar as condições do pavimento rígido, recuperado com a técnica de injeção de calda coloidal de microcimento quanto à eficiência da colmatação, para isso adotou-se o método destrutivo de extração de corpos de prova e posterior ruptura por compressão simples e análise microscópica.

### 4.2.1 Extração de Corpos de Prova

Através da extração de corpos de prova foi possível verificar a profundidade e espessura externa da fissura, avaliar a penetração da calda de microcimento, resistência e parâmetros complementares, tais como: homogeneidade do concreto e espessura da placa.

O método destrutivo pela sua própria natureza restringiu-se apenas ao segmento de placas de números 1.796 a 1.825, totalizando 174 metros, que seriam demolidas. Após avaliação desse segmento de placas, verificou-se que, em relação ao comprimento das fissuras, as mesmas apresentaram comprimento superior a 1,0m, aberturas superiores a 1,0 mm, interligadas, com profundidade que atingia toda a espessura da placa e com elevado grau de incidência por placa (Figura 3.6).

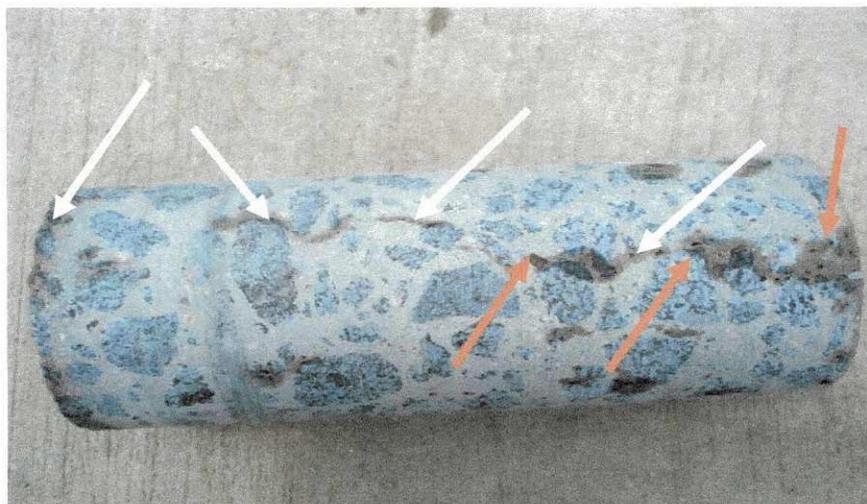
Entretanto parte deste segmento foi tratada com as técnicas de injeção pressurizada e por gravidade para servir de teste para avaliação posterior às aplicações. Depois da aplicação de injeções de calda coloidal de microcimento, foram realizadas 50 extrações em várias placas, no segmento acima mencionado, sendo observado o preenchimento parcial das fissuras, conforme as Figuras 3.7 e 3.8. As setas brancas indicam o preenchimento da fissura com o microcimento e as setas laranja os vazios deixados após a aplicação.



Figura 3.6 – Corpo de prova extraído sem injeção de calda coloidal de microcimento.



Figuras 3.7 – Corpo de prova extraído após injeção de calda coloidal de microcimento.



Figuras 3.8 – Corpo de prova extraído após injeção de calda coloidal de microcimento.

Para a verificação do desempenho mecânico dos corpos de provas (CPs) e a capacidade real de penetração da calda coloidal de microcimento, os CPs foram encaminhados ao laboratório tecnológico do Exército para serem rompidos à compressão axial (Figura 3.9). A ruptura dos corpos de prova cilíndricos foi realizada segundo o método de ensaio de compressão NBR- 5739/2007 da ABNT.



Figura 3.9 – Corpo de prova submetido à compressão axial.

A Figura 3.10 ilustra o procedimento de ruptura dos CPs extraídos. Observa-se que o processo de ruptura se inicia a partir de fissuras indicadas por setas azuis e não naquelas tratadas com calda coloidal de microcimento mostradas com setas laranjas.



Figura 3.10 – Corpo de prova submetido à compressão axial.

#### 4.2.2 Microscópio Óptico

No intuito de realizar uma verificação complementar ao método anterior, com relação à penetração da calda de microcimento, foram extraídos cinco CPs e retiradas amostras para ensaios através da microscopia óptica (Figura 3.11). O trecho escolhido aberto ao tráfego havia 1 ano e dez meses e a análise servirá para verificar “in situ” o desempenho do método empregado para colmatação das fissuras.

Os cinco CP's foram extraídos das placas com números 1.508, 1.522, 1.636, 1.770 e 1.790 e encaminhados ao Laboratório de Gemologia da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia do CTRN da UFCG, em Campina Grande, para serem preparados para os ensaios de microscopia óptica.

Os CP's foram seccionados em cinco partes com alturas aproximadas de 4,2cm a 4,8cm cada uma (Figura 3.11). Na parte superior dos corpos de prova foram definidas duas regiões A e B, obtidas a partir de duas semi-circunferências limitadas pela corda perpendicular à fissura conforme ilustra a Figura 3.12. Destas partes seccionadas, foram retiradas outras amostras com forma paralelepípedica com dimensões 3,0 cm x 3,0 cm x 0,5cm de espessura. Estas amostras receberam polimento antes de serem analisadas ao microscópio óptico. A Fig.3.13 ilustra uma amostra utilizada para ensaio de microscopia óptica.

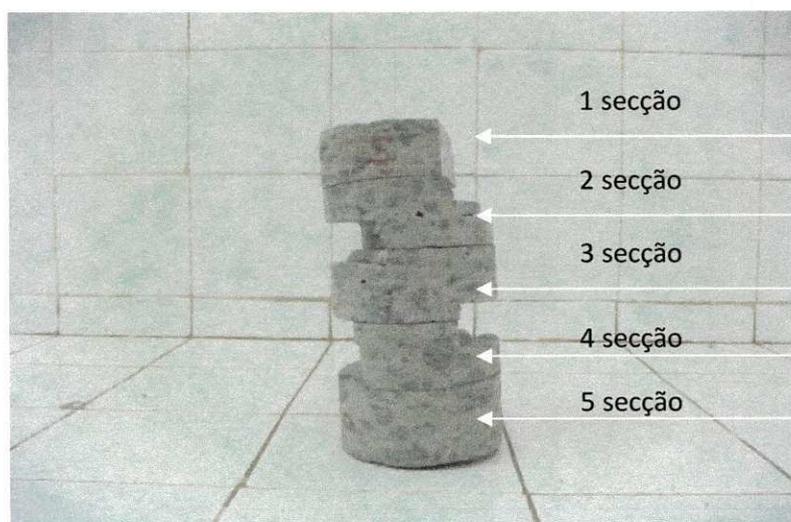


Figura 3.11 – Corpo de prova seccionado em cinco partes.

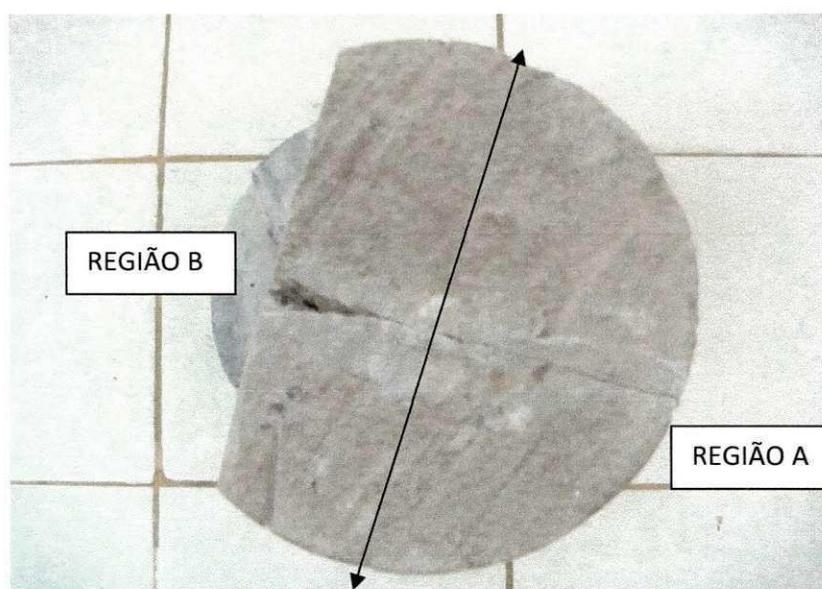


Figura 3.12 – Identificação das regiões dos CP's.

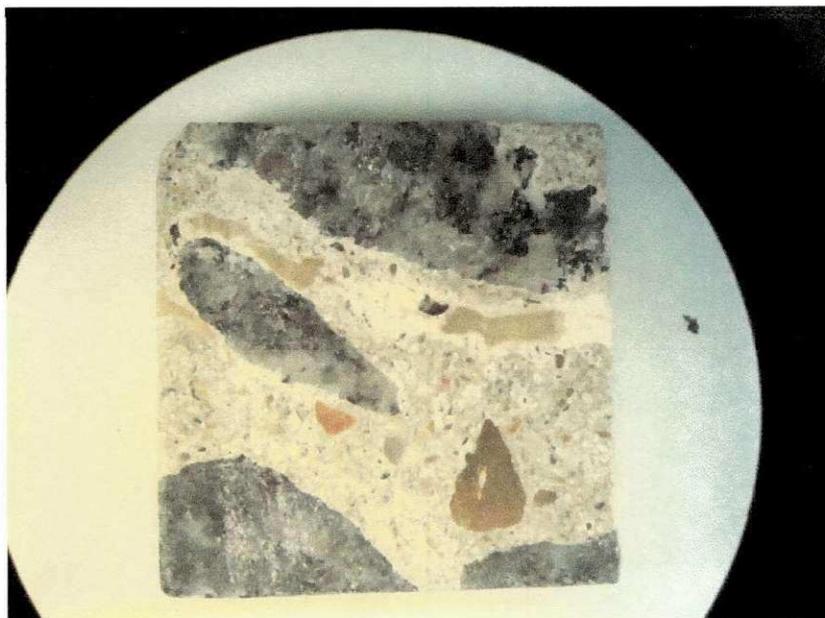


Figura 3.13 – Amostra retirada do corpo de prova com dimensões 3cm x 3cm x 0,5cm

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta as análises e discussões dos resultados experimentais obtidos por meio de ensaio de campo realizado no trecho de placas 1.508 até 1.825, da BR101 – lote 05.

Os trechos escolhidos foram com e sem liberação de tráfego. No trecho de placas de concreto, sem liberação ao tráfego, foram realizadas extrações em 48 pontos, para verificação da resistência do concreto recuperado com a técnica de injeção de microcimento e para o trecho de placas, com liberação ao tráfego, foram realizadas extrações em 5 pontos, para a verificação da eficiência da colmatação, quanto à sua penetração nas fissuras das placas do pavimento.

### 5.1 ANÁLISES DOS RESULTADOS DAS EXTRAÇÕES DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova extraídos nos 48 pontos das placas de concreto do pavimento em estudo, que sofreram o tratamento da injeção de calda coloidal de microcimento, foram submetidos ao controle estatístico de conformidade e não conformidade de aceitação do concreto através da norma DNIT049-2009-ES (DNIT, 2009).

A resistência característica estimada do concreto do trecho inspecionado à tração na flexão ou à compressão axial foi determinada a partir das expressões:

$$f_{ctM, est} = f_{ctM28} - ks$$

ou

$$f_{ck, est} = f_{c28} - ks$$

Onde:

$f_{ctM, est}$  = valor estimado da resistência característica do concreto à tração na flexão;

$f_{ctM28}$  = resistência média do concreto à tração na flexão, na idade de 28 dias;

$f_{ck, est}$  = valor estimado da resistência característica do concreto à compressão axial;

$f_{c28}$  = resistência média do concreto à compressão axial, na idade de 28 dias;

$s$  = desvio padrão dos resultados;

$k$  = coeficiente de distribuição de Student;

$n$  = número de exemplares.

O valor do coeficiente  $k$  é função da quantidade de exemplares do lote, sendo obtido na Tabela 4.1.

TABELA 02 - Coeficiente de distribuição de Student

AMOSTRAGEM VARIÁVEL													
$n$	6	7	8	9	10	12	15	18	20	25	30	32	>32
$k$	0,920	0,906	0,896	0,889	0,883	0,876	0,868	0,863	0,861	0,857	0,854	0,842	0,842

O pavimento será aceito automaticamente quanto à resistência do concreto, quando se obtiver uma das seguintes Condições:

$$f_{ctM, est} \geq f_{ctM, k}$$

ou

$$f_{ck, est} \geq f_{ck}$$

Os resultados obtidos das extrações dos CP's em cujas fissuras foram injetadas calda de microcimento foram satisfatórios quanto à resistência, apesar de se observar que na maioria dos CPs a colmatação destas fissuras foi parcial. Para que se chegasse a esses resultados satisfatórios, foram comparadas as resistências à compressão axial, dos concretos

moldados no período de execução do pavimento. Esses resultados encontram-se no Quadro 4.1 identificado pela cor azul. Diante disso, e levando em consideração que o projeto especifica a resistência à tração na flexão e não à resistência a compressão axial, estabeleceu-se uma relação entre o valor estimado da resistência característica do concreto à tração na flexão e o valor estimado da resistência característica do concreto à compressão axial para verificar se o resultado atenderia ao projeto. Este controle estatístico adotado pela fiscalização da obra, para atender as normas especificadas em projeto, serviu como parâmetro comparativo entre as resistências do concreto do trecho com fissuras e as resistências do mesmo concreto colmatado com injeção de calda coloidal de microcimento.

O Quadro 4.1 mostra, no intervalo das estacas 2.037 a 2.026, representado pela cor azul, dentro do trecho de placas 1.508 até 1.825, o resultado das resistências à compressão aos 28 dias de idade,  $f_{c28}$ , variando de 33,8MPa a 44,6MPa ,com média de 38,8MPa do concreto executado sem calda de microcimento. Na última coluna de cada Quadro verifica-se a relação entre o valor estimado da resistência característica do concreto à tração na flexão e o valor estimado da resistência característica do concreto à compressão axial que variou entre 0,14 a 0,12. Foram inseridos nos Quadros 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, os resultados das resistências dos 48 CP's colmatados com a injeção de calda coloidal de microcimento dividindo-se da seguinte forma:

- Para o Quadro 4.2 foram inseridos 12 resultados, sendo que no Lote 29, permaneceu com 2 resultados e no Lote 30 com 10 resultados.
- Para os demais Quadros seguiu-se essa mesma sequência;

Essa separação das extrações em 2 resultados para o Lote 29 e 10 resultados para o Lote 30 obedeceu aos mesmos critérios do Quadro 4.1(Quadro adotado pela empresa fiscalizadora da obra) e aos seguintes aspectos:

- No momento da execução do pavimento foram moldados 6 exemplares para o Lote 29 e 10 exemplares para o Lote 30;
- O trecho com ocorrência de fissuras estava compreendido entre o Lote 29 e Lote 30, entre as estacas 2037 a 2026; e
- As extrações foram realizadas entre as estacas 2035 a 2026.

Ao serem comparados esses resultados de resistências e as relações com os encontrados para o concreto executado com o tratamento de calda de microcimento, observa-se que estes valores obtidos estão atendendo aos critérios de aceitação, como mostra os Quadros 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

Apesar dos resultados terem sido satisfatórios, deve-se levar em consideração que o processo destrutivo de extração de CP's , pelo efeito de broqueamento do cálice, segundo a Norma NBR 7680/2007 da ABNT, pode acarretar em uma perda significativa de resistência, que não foi o caso. Ao avaliar externamente os CP's , observou-se que eles apresentaram fissuras com profundidades ao longo de sua altura e com trajetórias variadas. Os CP's não apresentaram espessuras inferiores à de projeto e nem excesso aparente de teor de argamassa.

QUADRO 4.1 - Resistências obtidas pelos corpos de prova sem aplicação da injeção de microcimento

TRECHO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)								N LOTE	RELAÇÃO TRAÇÃO COMPRESSÃO
	CONCRETO SEM INJEÇÃO DE MICROCEMENTO											
	7 DIAS	28 DIAS	28 DIAS	CONTROLE ESTATÍSTICO					ACEITAÇÃO DO LOTE			
				№ EXEMP.	fct 28 (MPa)	fctM28 (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	Coefficiente de distribuição de Student		fctM,est (MPa)		
PLACA PISTA	25	32,5	4,7	6	4,85	0,19	0,92	4,68	APROVADO AUTOMATICAMENTE	29	0,14	
Estacas 2046 a 2037		32,2	4,9									
PLACA PISTA	25,1	32,7	5,1									
Estacas 2046 a 2037		36,7	4,9									
PLACA PISTA	24,1	33	5,0									
Estacas 2046 a 2037		35,1	4,8									
PLACA PISTA	26,8	33,6	4,5									
Estacas 2046 a 2037		33,2	4,7									
PLACA PISTA	30,4	33,8	4,8									
Estacas 2037 a 2032		36,2	4,6									
PLACA PISTA	30,4	36,4	4,4									
Estacas 2037 a 2032		36,3	4,6									
PLACA PISTA	35,8	41,0	4,3	10	5,13	0,57	0,883	4,63	APROVADO AUTOMATICAMENTE	30	0,12	
Estacas 2032 a 2027		42,5	4,2									
PLACA PISTA	40,7	42,3	5,2									
Estacas 2032 a 2027		42,8	5,0									
PLACA PISTA	35,1	44,6	5,4									
Estacas 2027 a 2026		43,2	5,6									
PLACA PISTA	33,0	38,4	4,4									
Estacas 2026 a 2022	31,3	41,8	4,3									
PLACA PISTA	29,9	38,6	4,6									
Estacas 2026 a 2022	32,1	37,9	4,5									
PLACA PISTA	26,7	37,6	4,6									
Estacas 2022 a 2019	31,6	35,4	4,7									
PLACA PISTA	38,4	42,3	5,3									
Estacas 2019 a 2013	38,8	40,9	5,6									
PLACA PISTA	35,0	41,2	5,4									
Estacas 2019 a 2013	37,0	40,9	5,6									
PLACA PISTA	33,8	44,0	5,5									
Estacas 2019 a 2013	36,1	42,8	5,6									
PLACA PISTA	36,7	44,2	5,6									
Estacas 2019 a 2013	40,4	42,4	5,7									

Fonte: Empresa Fiscalizadora da obra (Dynatest).

QUADRO 4.2 - Resistências obtidas pelos corpos de prova com aplicação da injeção de microcimento

TRECHO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)							N LOTE	RELAÇÃO TRAÇÃO COMPRESSÃO	
	CONCRETO SEM INJEÇÃO DE MICROCEMENTO					CONTROLE ESTATÍSTICO								
	7 DIAS	28 DIAS	ALTURA DOS CP'S (cm)	PROFUNDI DADE DA FISSURA	28 DIAS	Nº EXEMP.	fct 28	fctM28	DESVIO PADRÃO	Coeficiente de distribuição de Student	fctM <sub>est</sub> (MPa)			ACEITAÇÃO DO LOTE
							(MPa)	(MPa)	(MPa)					
PLACA PISTA	25	32,5			4,7	6	4,85	0,19	0,92	4,68	APROVADO AUTOMATICAMENTE	29	0,14	
Estacas 2046 a 2037		32,2			4,9									
PLACA PISTA	25,1	32,7			5,1									
Estacas 2046 a 2037		36,7			4,9									
PLACA PISTA	24,1	33			5,0									
Estacas 2046 a 2037		35,1			4,8									
PLACA PISTA	26,8	33,6			4,5									
Estacas 2046 a 2037		33,2			4,7									
PLACA PISTA	30,4	33,8			4,8									
Estacas 2037 a 2035		36,2			4,6									
PLACA PISTA		42,0	20,6	20,6	4,4	10	5,13	0,57	0,883	4,63	APROVADO AUTOMATICAMENTE	30	0,12	
Estacas 2035 a 2032		38,2	22,6	22,6	4,6									
PLACA PISTA		48,9	23,2	23,2	4,3									
Estacas 2032 a 2030		35,4	23,7	23,7	4,2									
PLACA PISTA		42,7	23,2	23,2	5,2									
Estacas 2032 a 2030		37,7	23,4	23,4	5,0									
PLACA PISTA		33,1	22,8	22,8	5,4									
Estacas 2030 a 2028		40,3	23,2	23,2	5,6									
PLACA PISTA		42,0	20,7	20,7	4,4									
Estacas 2030 a 2028		38,2	22,6	22,6	4,3									
PLACA PISTA		48,9	23,1	23,1	4,6									
Estacas 2028 a 2026		35,4	23,5	23,5	4,5									
PLACA PISTA	26,7	37,6			4,6									
Estacas 2022 a 2019	31,6	35,4			4,7									
PLACA PISTA	38,4	42,3			5,3									
Estacas 2019 a 2013	38,8	40,9			5,6									
PLACA PISTA	35,0	41,2			5,4									
Estacas 2019 a 2013	37,0	40,9			5,6									
PLACA PISTA	33,8	44,0			5,5									
Estacas 2019 a 2013	36,1	42,8			5,6									
PLACA PISTA	36,7	44,2			5,6									
Estacas 2019 a 2013	40,4	42,4			5,7									

QUADRO 4.3 - Resistências obtidas pelos corpos de prova com aplicação da injeção de microcimento

TRECHO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)							N LOTE	RELAÇÃO TRAÇÃO COMPRESSÃO	
	CONCRETO SEM INJEÇÃO DE MICROCEMENTO				CONTROLE ESTATÍSTICO									
	7 DIAS	28 DIAS	ALTURA DOS CP'S (cm)	PROFUNDI DADE DA FISSURA	28 DIAS	Nº EXEMP.	fct 28	fctM28	DESVIO PADRÃO	Coeficiente de distribuição de Student	fctM,est			ACEITAÇÃO DO LOTE
							(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)			
PLACA PISTA	25	32,5			4,7	6	4,9	4,85	0,19	0,92	4,68	APROVADO AUTOMATICAMENTE	29	0,14
Estacas 2046 a 2037		32,2			4,9									
PLACA PISTA	25,1	32,7			5,1									
Estacas 2046 a 2037		36,7			4,9									
PLACA PISTA	24,1	33			5,0									
Estacas 2046 a 2037		35,1			4,8									
PLACA PISTA	26,8	33,6			4,5									
Estacas 2046 a 2037		33,2			4,7									
PLACA PISTA	30,4	33,8			4,8									
Estacas 2037 a 2035		36,2			4,6									
PLACA PISTA		37,7	23,3	23,3	4,4	10	4,3	5,13	0,57	0,883	4,63	APROVADO AUTOMATICAMENTE	30	0,12
Estacas 2035 a 2032		33,1	22,9	22,9	4,6									
PLACA PISTA		37,7	23,2	23,2	4,3									
Estacas 2032 a 2030		33,1	22,8	22,8	4,2									
PLACA PISTA		40,3	23,2	23,2	5,2									
Estacas 2032 a 2030		42,0	20,4	20,4	5,0									
PLACA PISTA		38,2	22,8	22,8	5,4									
Estacas 2030 a 2028		48,9	23,1	23,1	5,6									
PLACA PISTA		35,4	23,6	23,6	4,4									
Estacas 2030 a 2028		42,7	23,5	23,5	4,3									
PLACA PISTA		38,2	22,2	22,2	4,6									
Estacas 2028 a 2026		48,9	23,2	23,2	4,5									
PLACA PISTA	26,7	37,6			4,6									
Estacas 2022 a 2019	31,6	35,4			4,7									
PLACA PISTA	38,4	42,3			5,3									
Estacas 2019 a 2013	38,8	40,9			5,6									
PLACA PISTA	35,0	41,2			5,4									
Estacas 2019 a 2013	37,0	40,9			5,6									
PLACA PISTA	33,8	44,0			5,5									
Estacas 2019 a 2013	36,1	42,8			5,6									
PLACA PISTA	36,7	44,2			5,6									
Estacas 2019 a 2013	40,4	42,4			5,7									

QUADRO 4.4 - Resistências obtidas pelos corpos de prova com aplicação da injeção de microcimento

TRECHO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)							N LOTE	RELAÇÃO TRAÇÃO COMPRESSÃO	
	CONCRETO SEM INJEÇÃO DE MICROCEMENTO				CONTROLE ESTATÍSTICO									
	7 DIAS	28 DIAS	ALTURA DOS CP'S (cm)	PROFUNDI DADE DA FISSURA	28 DIAS	Nº EXEMP.	fct 28	fctM28	DESVIO PADRÃO	Coeficiente de distribuição de Student	fctM,est			ACEITAÇÃO DO LOTE
							(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)			
PLACA PISTA	25	32,5			4,7	6	4,85	0,19	0,92	4,68	APROVADO AUTOMATICAMENTE	29	0,14	
Estacas 2046 a 2037		32,2			4,9									
PLACA PISTA	25,1	32,7			5,1									
Estacas 2046 a 2037		36,7			4,9									
PLACA PISTA	24,1	33			5,0									
Estacas 2046 a 2037		35,1			4,8									
PLACA PISTA	26,8	33,6			4,5									
Estacas 2046 a 2037		33,2			4,7									
PLACA PISTA	30,4	33,8			4,8									
Estacas 2037 a 2035		36,2			4,6									
PLACA PISTA		35,4	23,6	23,6	4,4	10	5,13	0,57	0,883	4,63	APROVADO AUTOMATICAMENTE	30	0,12	
Estacas 2035 a 2032		40,3	23,2	23,2	4,6									
PLACA PISTA		42,0	20,6	20,6	4,3									
Estacas 2032 a 2030		38,2	22,5	22,5	4,2									
PLACA PISTA		35,4	23,6	23,6	5,2									
Estacas 2032 a 2030		33,1	22,9	22,9	5,0									
PLACA PISTA		42,0	20,6	20,6	5,4									
Estacas 2030 a 2028		48,9	23,3	23,3	5,6									
PLACA PISTA		42,7	23,2	23,2	4,4									
Estacas 2030 a 2028		38,2	22,7	22,7	4,3									
PLACA PISTA		38,2	22,5	22,5	4,6									
Estacas 2028 a 2026		35,4	23,5	23,5	4,5									
PLACA PISTA	26,7	37,6			4,6									
Estacas 2022 a 2019	31,6	35,4			4,7									
PLACA PISTA	38,4	42,3			5,3									
Estacas 2019 a 2013	38,8	40,9			5,6									
PLACA PISTA	35,0	41,2			5,4									
Estacas 2019 a 2013	37,0	40,9			5,6									
PLACA PISTA	33,8	44,0			5,5									
Estacas 2019 a 2013	36,1	42,8			5,6									
PLACA PISTA	36,7	44,2			5,6									
Estacas 2019 a 2013	40,4	42,4			5,7									

QUADRO 4.5 - Resistências obtidas pelos corpos de provas com aplicação da injeção de microcimento.

TRECHO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)							N LOTE	RELAÇÃO TRAÇÃO COMPRESSÃO
	CONCRETO SEM INJEÇÃO DE MICROCEMENTO					CONTROLE ESTATÍSTICO								
	7 DIAS	28 DIAS	ALTURA DOS CP'S (cm)	PROFUNDI DADE DA FISSURA	28 DIAS	Nº EXEMP.	fct 28 (MPa)	fctM28 (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	Coeficiente de distribuição de Student	fctM,est (MPa)	ACEITAÇÃO DO LOTE		
PLACA PISTA	25	32,5			4,7	6	4,9	4,85	0,19	0,92	4,68	APROVADO AUTOMATICAMENTE	29	0,14
Estacas 2046 a 2037		32,2			4,9									
PLACA PISTA	25,1	32,7			5,1									
Estacas 2046 a 2037		36,7			4,9									
PLACA PISTA	24,1	33			5,0									
Estacas 2046 a 2037		35,1			4,8									
PLACA PISTA	26,8	33,6			4,5									
Estacas 2046 a 2037		33,2			4,7									
PLACA PISTA	30,4	33,8			4,8									
Estacas 2037 a 2035		36,2			4,6									
PLACA PISTA		38,2	22,4	22,4	4,4									
Estacas 2035 a 2032		42,7	23,1	23,1	4,6									
PLACA PISTA		38,2	22,4	22,4	4,3									
Estacas 2032 a 2030		48,9	23,1	23,1	4,2									
PLACA PISTA		38,2	22,6	22,6	5,2									
Estacas 2032 a 2030		48,9	23,2	23,2	5,0									
PLACA PISTA		33,1	22,8	22,8	5,4									
Estacas 2030 a 2028		42,0	20,6	20,6	5,6									
PLACA PISTA		38,2	22,3	22,3	4,4									
Estacas 2030 a 2028		38,2	22,7	22,7	4,3									
PLACA PISTA		37,7	23,2	23,2	4,6									
Estacas 2028 a 2026		33,1	22,9	22,9	4,5									
PLACA PISTA	26,7	37,6			4,6	10	5,13	0,57	0,883	4,63	APROVADO AUTOMATICAMENTE	30	0,12	
Estacas 2022 a 2019	31,6	35,4			4,7									
PLACA PISTA	38,4	42,3			5,3									
Estacas 2019 a 2013	38,8	40,9			5,6									
PLACA PISTA	35,0	41,2			5,4									
Estacas 2019 a 2013	37,0	40,9			5,6									
PLACA PISTA	33,8	44,0			5,5									
Estacas 2019 a 2013	36,1	42,8			5,6									
PLACA PISTA	36,7	44,2			5,6									
Estacas 2019 a 2013	40,4	42,4			5,7									

## 5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

As amostras analisadas por microscopia óptica sofreram ampliações em tamanho de 6,7 vezes, 15,0 vezes, 40 vezes e 50,0 vezes. A microscopia forneceu a espessura das fissuras colmatadas e dos vazios encontrados. Na coleta das amostras levou-se em consideração a quantidade de fissuras identificadas em cada secção dos CP's.

Foram analisadas 56 amostras e inseridas na Tabela 03, detalhada através do número do corpo de prova, a secção, o número da amostra, a região e o número de vezes em ampliação para cada amostra. O exemplo abaixo detalha esta seqüência.

Para amostra 1.1.1.A, significa:

- análise no CP 1, na seção 1, amostra 1, na região A ;

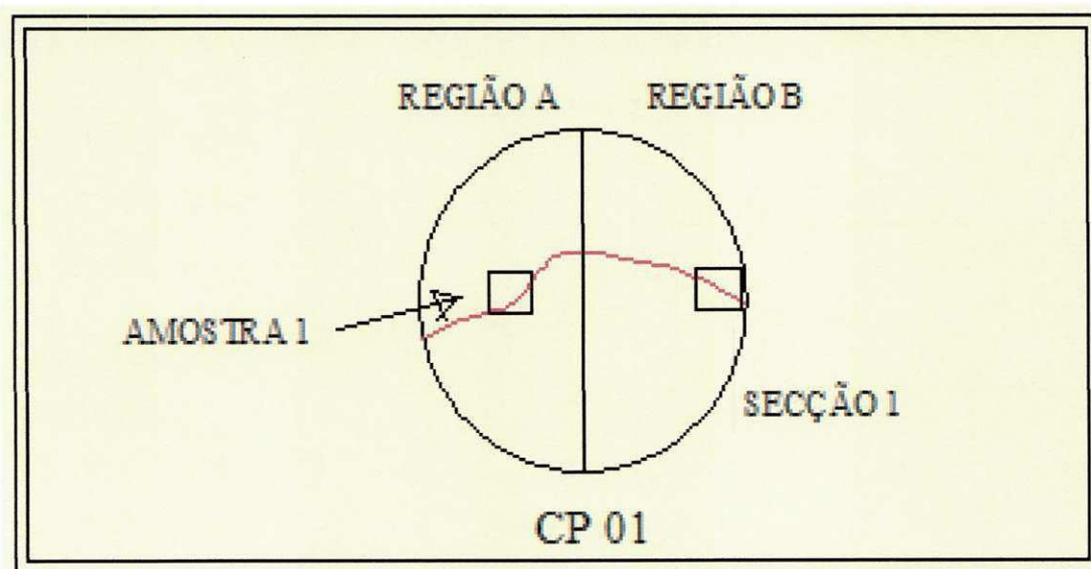


Figura 4.1 – Secção 1 do CP 01.

A Tabela 03 apresenta os 5 CP's separados por cores e a seqüência das amostras analisadas microscopicamente.

TABELA 03 - Seqüência de amostras retiradas dos corpos de prova

N°CP/SECÇÃO/AMOSTRA/REGIÃO	NÚMERO DE VEZES EM AMPLIAÇÃO(mm)				FISSURA COLMATADA		FISSURAS PARCIALMENTE COLMATADAS	
					ESPESSURA ESCALA ( 500µm)	ESPESSURA ESCALA( mm)	ESPESSURA ESCALA ( 500µm)	ESPESSURA ESCALA( mm)
					1.1.1.A	6,7	15	40
1.1.2.A	6,7	15	40	50	2028,95	1,01	1492,47	0,75
1.1.3.A	6,7	15	40	50	1596,03	0,80	1638,76	0,82
1.1.4.B	6,7	15	40	50	1784,21	0,89	1699,76	0,85
1.1.5.B	6,7	15	40	50	1168,72	0,58	1066,42	0,53
1.1.6.B	6,7	15	40	50	1999,89	1,00	1825,39	0,91
1.2.1.A	6,7	15	40	50	1382,95	0,69	1001,78	0,50
1.2.2.A	6,7	15	40	50	1382,13	0,69	1025,85	0,51
1.2.3.B	6,7	15	40	50	978,72	0,49	1280,08	0,64
1.2.4.B	6,7	15	40	50	658,37	0,33	1195,77	0,60
1.3.1.A	6,7	15	40	50		0,00	714,21	0,36
1.3.2.A	6,7	15	40	50	717,67	0,36	1750,63	0,88
1.3.3.B	6,7	15	40	50	2460,97	1,23	1030,28	0,52
1.4.1.A	6,7	15	40	50	547,51	0,27	832,37	0,42
1.4.2.B	6,7	15	40	50	768,16	0,38	443,81	0,22
1.5.1.B	6,7	15	40	-	SEM FISSURAS	0,00		0,00
2.1.1.A	6,7	15	40	50	741,47	0,37	COLMATADA	0,00
2.2.2.A	6,7	15	40	50	666,26	0,33	COLMATADA	0,00
2.3.3.A	6,7	15	40	50	675,66	0,34	COLMATADA	0,00
2.4.4.A	6,7	15	40	50	899,19	0,45	COLMATADA	0,00
2.5.5.A	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
2.1.1.B	6,7	15	40	50	1374,95	0,69	COLMATADA	0,00
2.2.2.B	6,7	15	40	50	918,18	0,46	COLMATADA	0,00
2.3.3.B	6,7	15	40	50	833,68	0,42	COLMATADA	0,00
2.4.4.B	6,7	15	40	50	1342,45	0,67	COLMATADA	0,00
2.5.5.B	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
3.1.1.A	A AMOSTRA NÃO APRESENTOU COLMATAÇÃO DAS FISSURAS							
3.2.2.A	A AMOSTRA NÃO APRESENTOU COLMATAÇÃO DAS FISSURAS							
3.3.3.A	6,7	15	40	50	721,73	0,36	COLMATADA	0,00
3.4.4.A	6,7	15	40	50	638,4	0,32	COLMATADA	0,00
3.5.5.A	6,7	15	40	50	655,02	0,33	COLMATADA	0,00
3.1.1.B	A AMOSTRA NÃO APRESENTOU COLMATAÇÃO DAS FISSURAS							
3.2.2.B	6,7	15	40	50	484,83	0,24	COLMATADA	0,00
3.3.3.B	A AMOSTRA NÃO APRESENTOU COLMATAÇÃO DAS FISSURAS							
3.4.4.B	6,7	15	40	50	432,42	0,22	COLMATADA	0,00
3.5.5.B	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
4.1.1.A	6,7	15	40	50	1081,74	0,54	COLMATADA	0,00
4.2.2.A	6,7	15	40	50	1365,36	0,68	COLMATADA	0,00
4.3.3.A	6,7	15	40	50	848,85	0,42	COLMATADA	0,00
4.4.4.A	6,7	15	40	50	1428,41	0,71	COLMATADA	0,00
4.5.5.A	6,7	15	40	50	250,86	0,13	COLMATADA	0,00
4.1.1.B	6,7	15	40	50	1393,79	0,70	COLMATADA	0,00
4.2.2.B	6,7	15	40	50	484,83	0,24	COLMATADA	0,00
4.3.3.B	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
4.4.4.B	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
4.5.5.B	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
5.1.1.A	6,7	15	40	50	1955,47	0,98	1797,86	0,90
5.2.2.A	6,7	15	40	50	1312,46	0,66	1844,74	0,92
5.3.3.A	6,7	15	40	50	1876,67	0,94	1676,77	0,84
5.4.4.A	6,7	15	40	50	1885,6	0,94	COLMATADA	0,00
5.5.5.A	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00
5.1.1.B	6,7	15	40	50	2658,65	1,33	2112,15	1,06
5.2.2.B	6,7	15	40	50	1776,65	0,89	1052,24	0,53
5.3.3.B	6,7	15	40	50	951,83	0,48	1110,52	0,56
5.4.4.B	6,7	15	40	50	808,23	0,40	COLMATADA	0,00
5.5.5.B	6,7	15	40	50	SEM FISSURAS	0,00		0,00

De acordo com os resultados encontrados na Tabela 03, verifica-se que cada CP apresentou características diferentes quanto à capacidade de penetração da calda de microcimento em suas fissuras, em função do tipo de abertura da fissura e do tipo de técnica empregada para colmatar.

- Descrição das características encontradas no CP 01:

Este CP foi extraído da placa de concreto de número 1.508 do pavimento da BR-101-Lote 05, no qual foi realizada a colmatação da fissura com a técnica de injeção gravitacional. A abertura encontrada em ambos os lados do CP 01 a partir da secção 1 até a secção 5, foi:

REGIÃO DO CP	ABERTURA DA FISSURA(mm)
REGIÃO A	1,01 a 0,27
REGIÃO B	1,23 a 0,33

O CP 01 apresentou as seguintes dimensões, após a extração: altura de 21 cm e diâmetro de 10 cm. Com a microscopia óptica, observou-se que em todas as secções, exceto na secção 1.3.1.A, na qual não ocorreu colmatação, foram encontradas fissuras com colmatação parcial. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram os vazios encontrados em várias amostras do CP 01 após a colmatação.

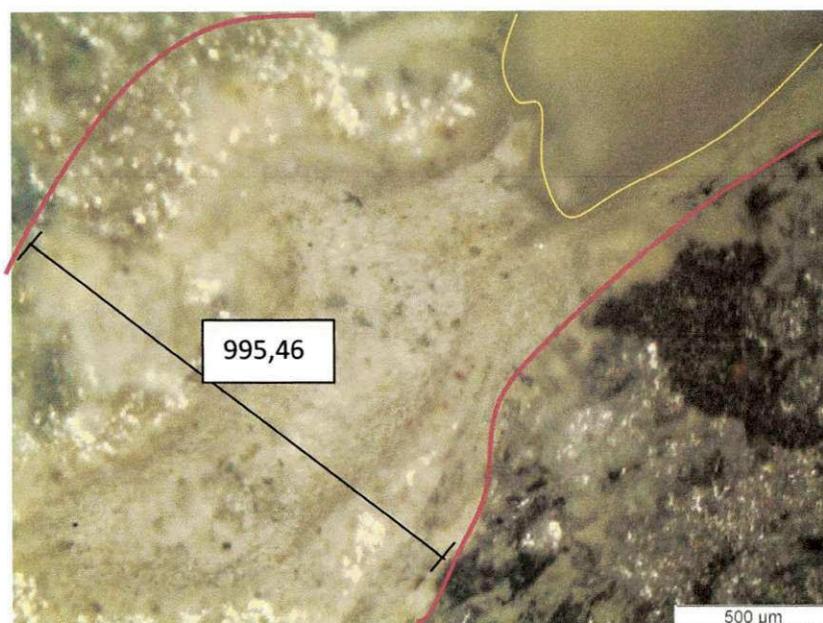


Figura 4.2 – Amostra 1.1.1. A retirada do CP 01 colmatada com microcimento.

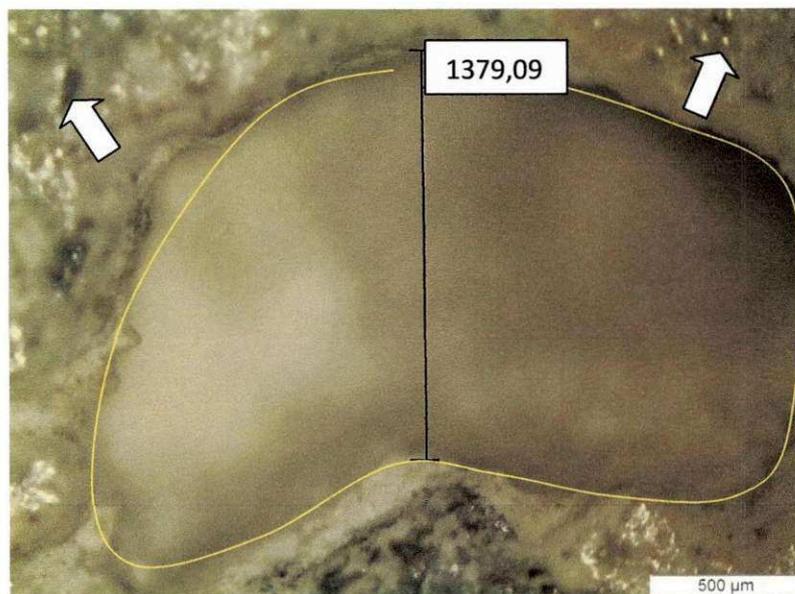


Figura 4.3 – Amostra 1.1.1.A retirada do CP 01 apresentando vazios após colmatação.

A Figura 4.2 mostra, na parte mais clara (entre as linhas vermelhas) e com a largura de  $995,46\mu\text{m}$  ( $0,99546\text{mm}$ ) em uma escala de  $500\mu\text{m}$  ( $0,5\text{mm}$ ), o preenchimento da fissura do CP 01 com microcimento, porém, devido a colmatação ter sido parcial, a Figura 4.3 mostra o vazio identificado na mesma amostra (contorno amarelo), com largura de  $1.379,09\mu\text{m}$  ( $1,37909\text{mm}$ ), na escala de  $500\mu\text{m}$  ( $0,5\text{mm}$ ). As setas brancas indicam a fissura com preenchimento parcial de microcimento.

A projeção das fissuras do CP 01 se deu de forma desordenada, ou seja, irradiando em várias direções, por isso, houve a necessidade de retirada na parte superior de um número maior de amostras. A Figura 4.4 esquematiza o comportamento das fissuras e o detalhamento das seções do CP01.

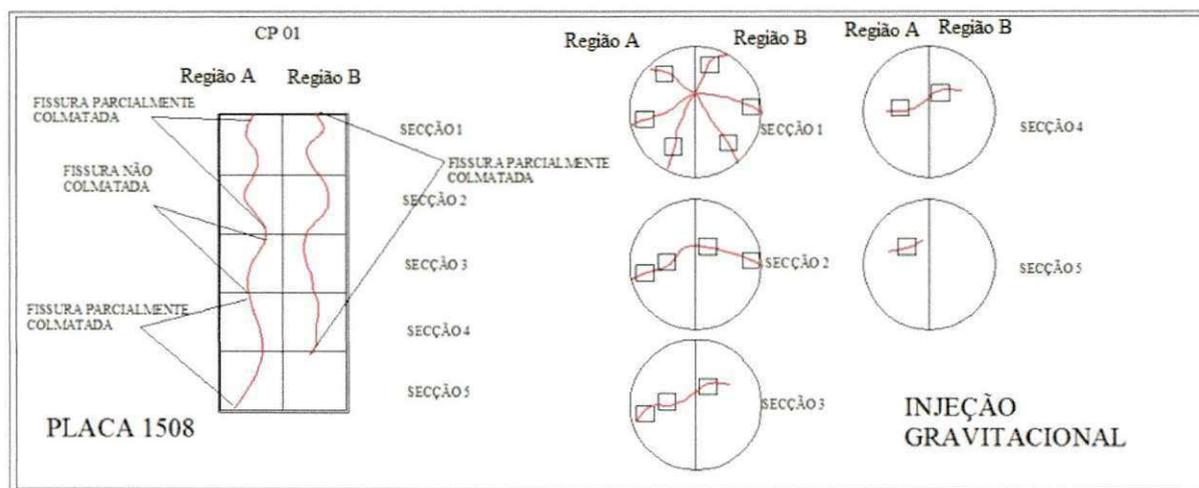


Figura 4.4– Detalhamento das seções do CP01.

- Descrição das características encontradas no CP 02:

Este CP foi extraído da placa de concreto de número 1.522 do pavimento da BR-101-Lote 05, no qual foi realizada a colmatação das fissuras com a técnica de injeção pressurizada. A abertura encontrada em ambos os lados do CP 02 a partir da secção 1 até a secção 5, foi:

REGIÃO DO CP	ABERTURA DA FISSURA(mm)
REGIÃO A	0,45 a 0,33
REGIÃO B	0,69 a 0,42

O CP 02 apresentou as seguintes dimensões, após a extração: altura de 24 cm e diâmetro de 10 cm. As fissuras encontradas no CP 02 apresentaram em todas as secções colmatação total, ou seja, não surgimento de vazios. A Figura 4.5 mostra a microscopia da colmatação encontrada na amostra 2.1.1.A retirada do CP 02.

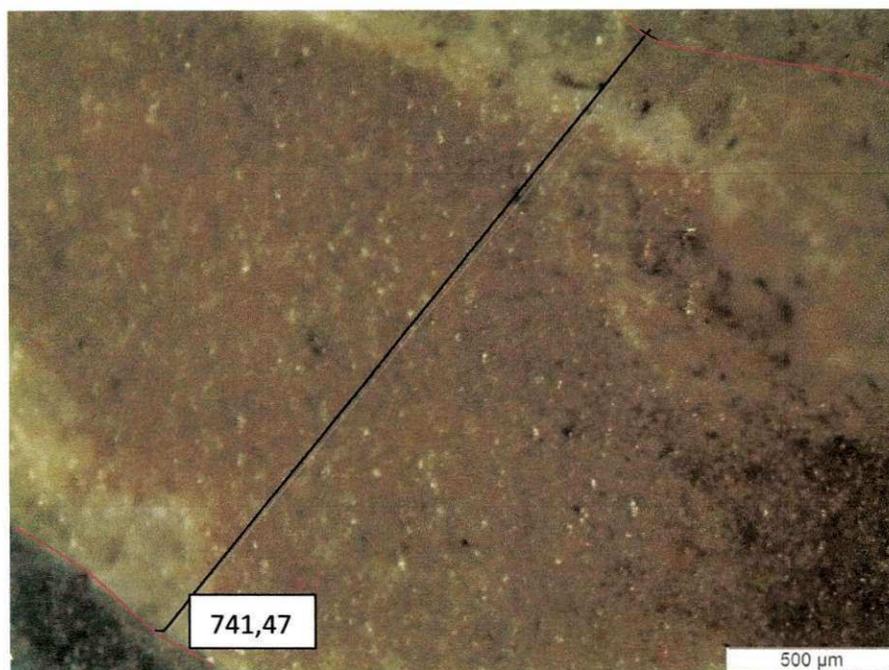


Figura 4.5 – Amostra 2.1.1.A retirada do CP 02 colmatada com microcimento.

A Figura 4.5 mostra, na parte central e de cor marrom (entre as linhas vermelhas), com a largura de  $741,47\mu\text{m}$ ( $0,74147\text{mm}$ ) em uma escala de  $500\mu\text{m}$ ( $0,500\text{mm}$ ), o preenchimento do microcimento da fissura do CP02.

A Figura 4.6 esquematiza o comportamento das fissuras e o detalhamento das secções do CP 02.

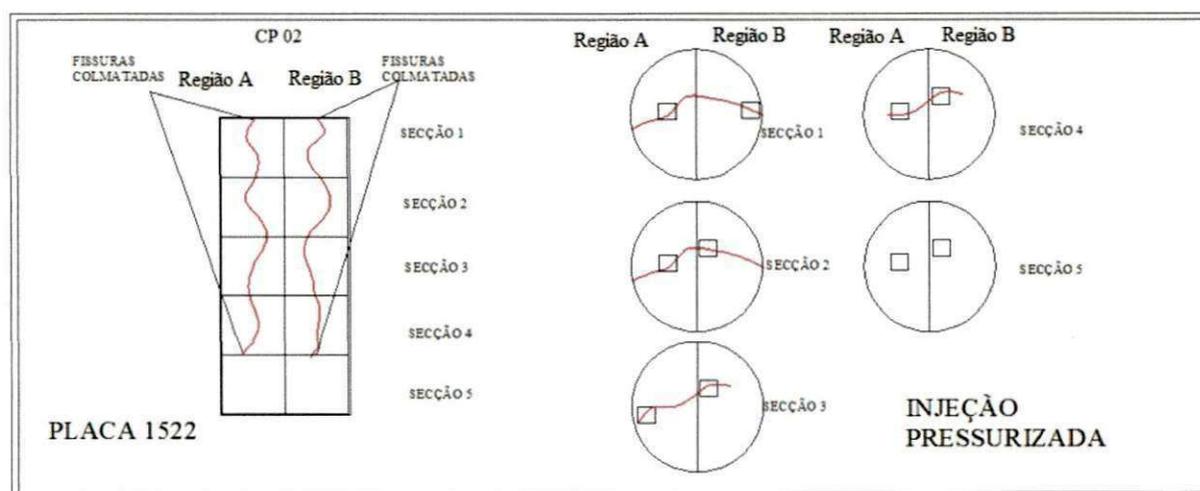


Figura 4.6– Detalhamento das secções do CP02.

- Descrição das características encontradas no CP 03:

Este CP foi extraído da placa de concreto de número 1.636 do pavimento da BR-101-Lote 05, no qual foi realizada a colmatação com a técnica de injeção gravitacional. A abertura encontrada em ambos os lados do CP 03 a partir da secção 1 até a secção 5, foi:

REGIÃO DO CP	ABERTURA DA FISSURA(mm)
REGIÃO A	0,36 a 0,32
REGIÃO B	0,24 a 0,22

O CP 03 apresentou as seguintes dimensões, após a extração: altura de 23,5 cm e diâmetro de 10 cm. Com a microscopia óptica, observou-se duas características a não colmatação das fissuras e o que foi colmatado, não apresentou vazios nas secções. Nas secções 3.1.1.B, 3.3.3.B, 3.1.1.A e 3.2.2.A não ocorreram colmatação das fissuras.

Na técnica de injeção gravitacional, observou-se que o CP 03, não apresentou colmatação nas secções 1 e 3, localizadas entre a parte superior e sua metade, do CP, apesar da profundidade da fissura atingir 100% da altura. As aberturas variaram entre 0,36mm a 0,32mm na região A e 0,24mm a 0,22mm na região B, dentro do limite estabelecido pela metodologia definida entre ABCP, que é de aberturas inferiores a 1,0mm.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram a microscopia da colmatação entre as linhas vermelhas e a não colmatação encontradas em várias amostras do CP 03.

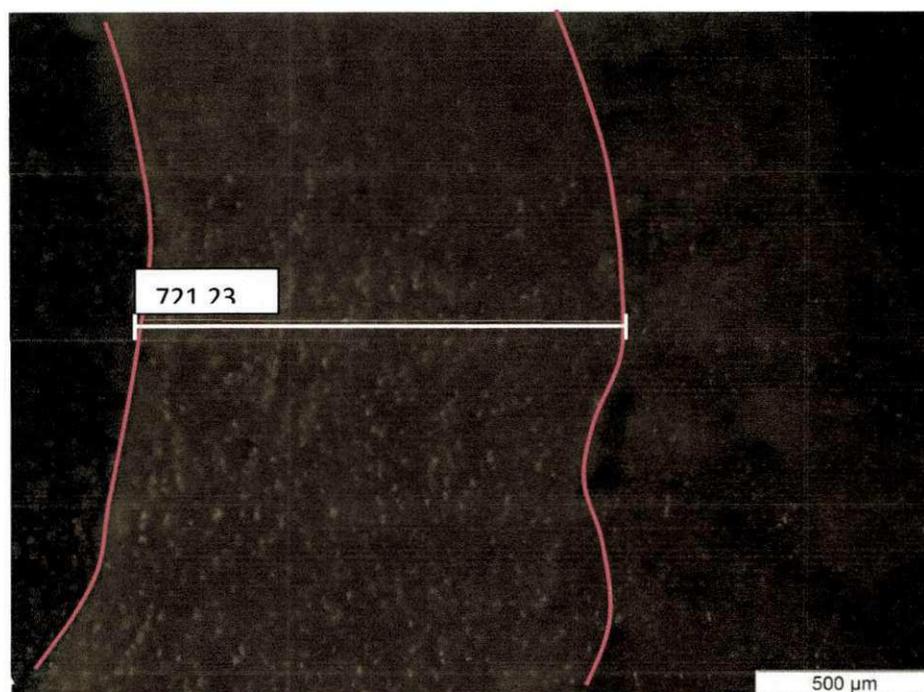


Figura 4.7 – Amostra 3.3.3.A retirada do CP 03 colmatada com microcimento.

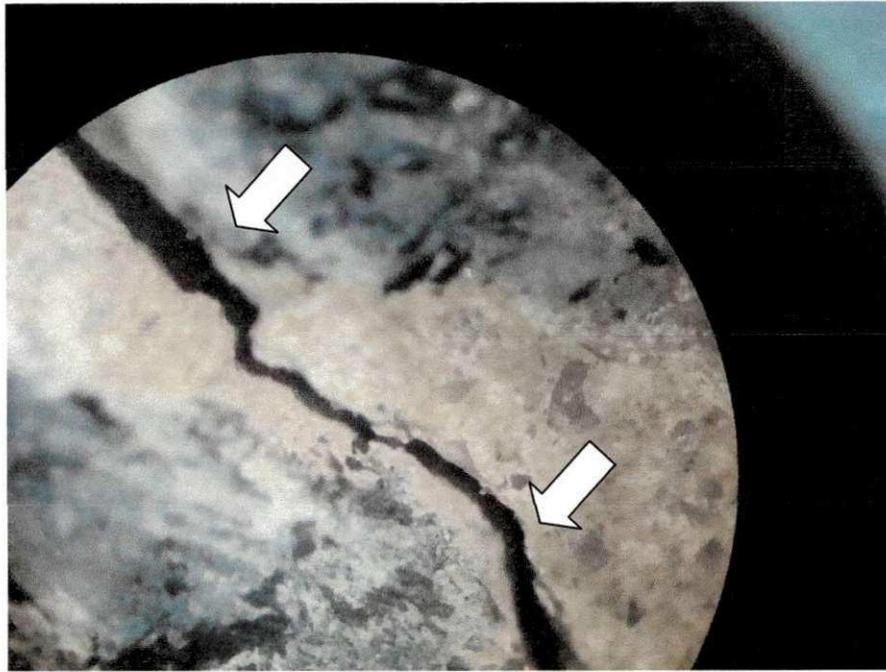


Figura 4.8 – Amostra 3.1.1B retirada do CP 03 fissura não colmatada.

A figura 4.7 mostra (entre as linhas vermelhas), na parte central e de cor marrom, com a largura de  $721,23\mu\text{m}$  ( $0,72123\text{mm}$ ) em uma escala de  $500\mu\text{m}$  ( $0,500\text{mm}$ ), o preenchimento do microcimento da fissura do CP 03, porém na Figura 4.8, indicadas pelas setas, mostra-se a fissura não colmatada.

A Figura 4.9 esquematiza o comportamento das fissuras e o detalhamento das secções do CP 02.

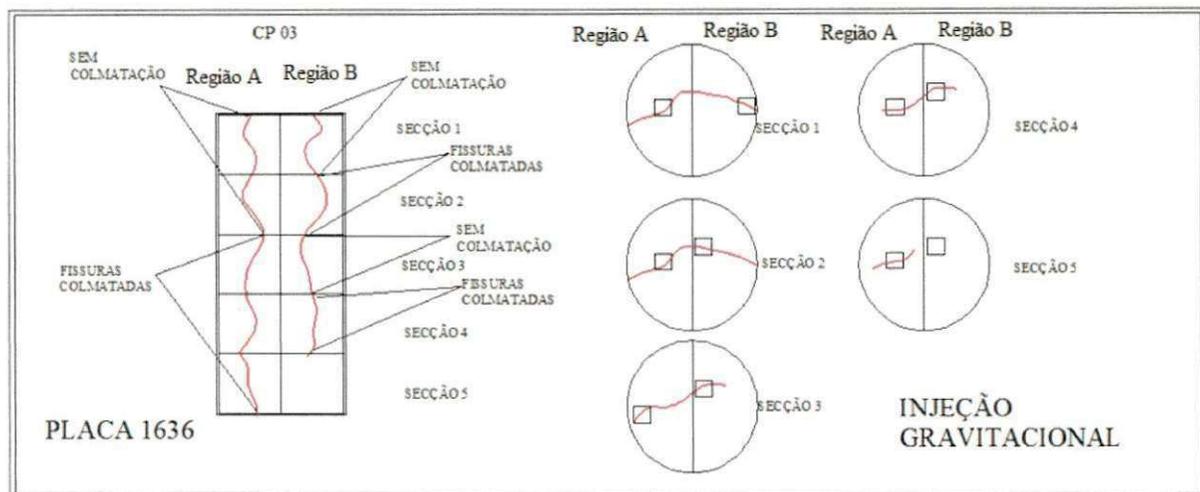


Figura 4.9– Detalhamento das secções do CP 03.

- Descrição das características encontradas no CP 04:

Este CP foi extraído da placa de concreto de número 1.770 do pavimento da BR-101-Lote 05, no qual foi realizada a colmatação com a técnica de injeção pressurizada. A abertura encontrada em ambos os lados do CP 04 a partir da secção 1 até a secção 5, foi:

REGIÃO DO CP	ABERTURA DA FISSURA(mm)
REGIÃO A	0,71 a 0,13
REGIÃO B	0,70 a 0,24

O CP 04 apresentou as seguintes dimensões, após a extração: altura de 22 cm e diâmetro de 10 cm. Todas as fissuras encontradas nas amostras do CP 04 estavam colmatadas e sem apresentar vazios. A Figura 4.10 mostra a microscopia da colmatação encontrada em várias amostras do CP 04.

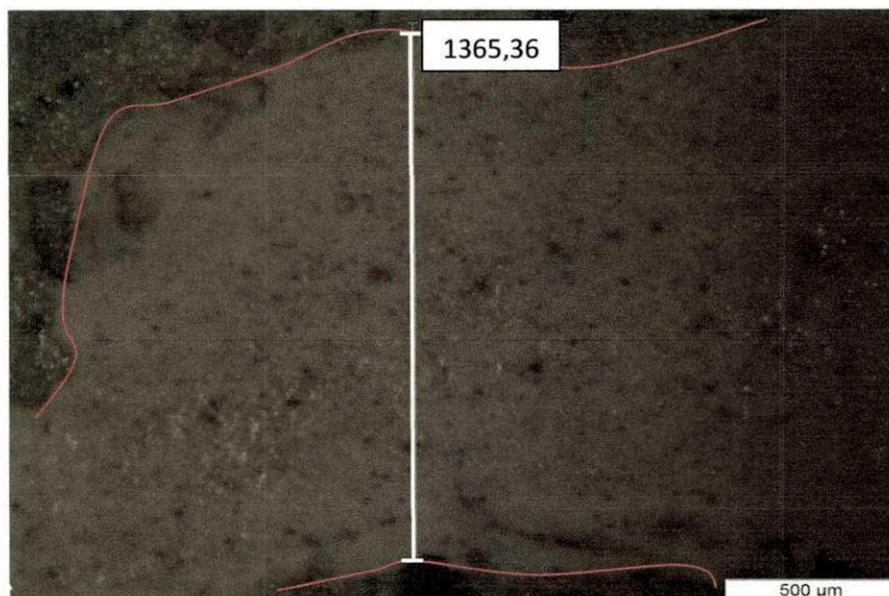


Figura 4.10 – Amostra 4.2.2A retirada do CP 04 colmatada com microcimento.

A figura 4.10 mostra, na parte mais clara (entre as linhas vermelhas) e com a largura de  $1365,36\mu\text{m}$  ( $1,36536\text{mm}$ ) em uma escala de  $500\mu\text{m}$  ( $0,5000\text{mm}$ ), o preenchimento da fissura do CP 04 com microcimento.

A figura 4.11 esquematiza o comportamento das fissuras e o detalhamento das secções do CP 04.

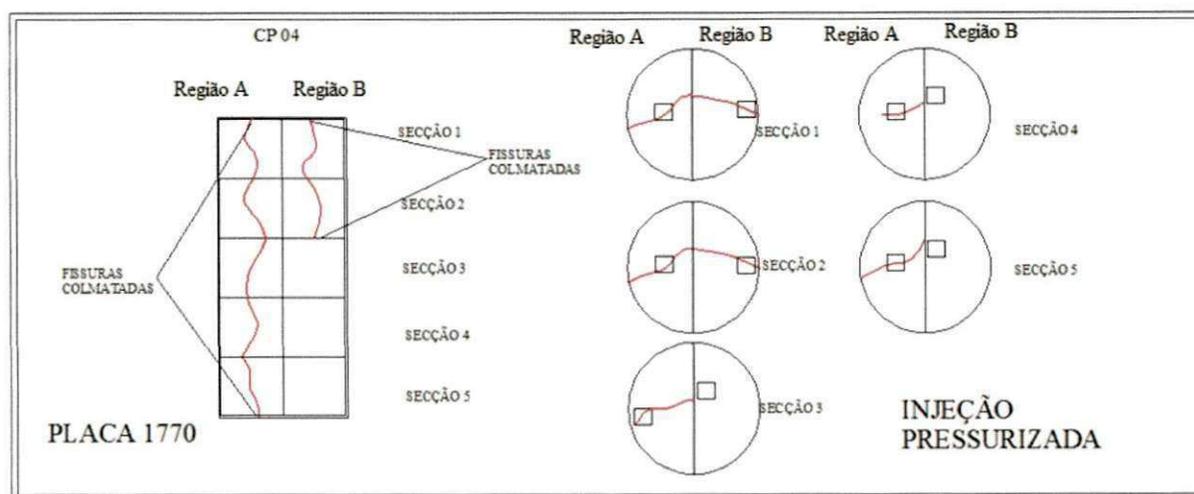


Figura 4.11– Detalhamento das secções do CP 04.

- Descrição das características encontradas no CP 05:

Este CP foi extraído da placa de concreto de número 1.790 do pavimento da BR-101-Lote 05, no qual foi realizada a colmatação com a técnica de injeção pressurizada. A abertura encontrada em ambos os lados do CP 05 a partir da secção 1 até a secção 5, foi:

REGIÃO DO CP	ABERTURA DA FISSURA(mm)
REGIÃO A	0,98 a 0,66
REGIÃO B	1,33 a 0,43

O CP 05 apresentou as seguintes dimensões, após a extração: altura de 23,5 cm e diâmetro de 10 cm. Nas secções 1,2 e 3 em ambos os lados, exceto na secção 4 que ocorreu preenchimento total, foram encontradas fissuras com o preenchimento parcial, ou seja ,

apresentou nas fissuras vazios intermediários. As figuras 4.12 e 4.13 mostram a microscopia da colmatação e dos vazios encontradas em várias amostras do CP 05.

Para o CP 05 foi adotado o processo de injeção pressurizada no qual apresentou variações de colmatação. Devido a essas características e aos resultados do ensaio complementar de microscopia óptica, a técnica de injeção de microcimento na colmatação de fissuras para aquela condição patológica detectada no pavimento da BR-101-Lote 05, não foi eficiente.

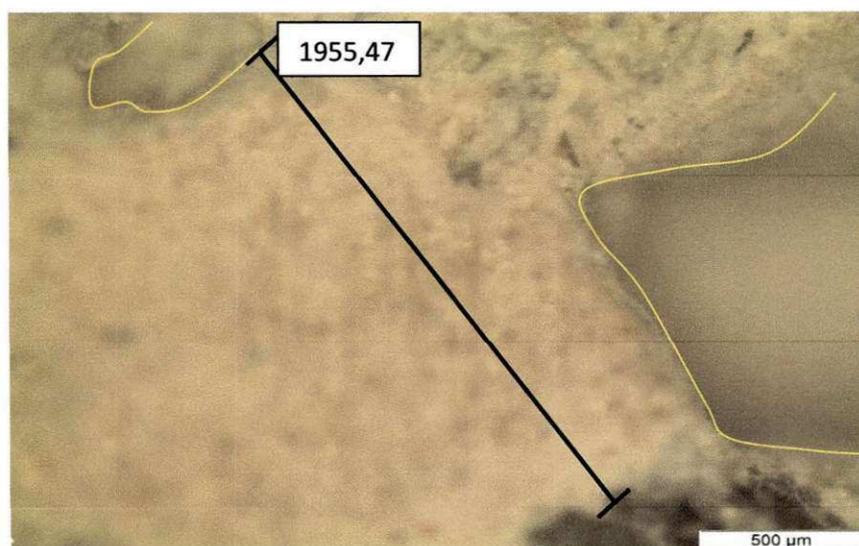


Figura 4.12 – Amostra 5.1.1.A retirada do CP 05 colmatada com microcimento.

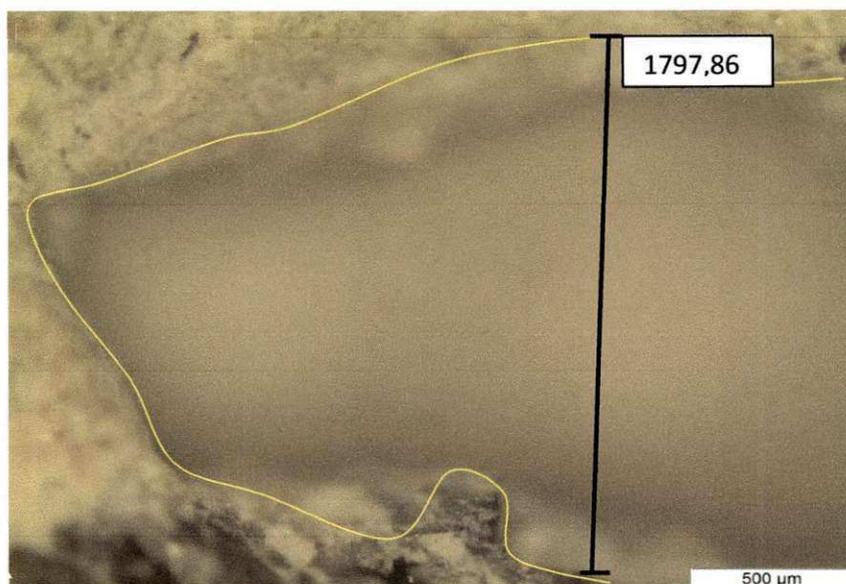


Figura 4.13 – Amostra 5.1.1.A retirada do CP 05 apresentando vazios após colmatação.

A Figura 4.12 mostra, na parte clara e com a largura de 1955,47  $\mu\text{m}$  (1,95547mm) em uma escala de 500  $\mu\text{m}$  (0,500mm), o preenchimento da fissura do CP 05 com microcimento, porém, devido a colmatação ter sido parcial, a Figura 4.13 mostra o vazio(entre linhas amarelas) identificado com largura de 1797,86 $\mu\text{m}$  (1,79786mm) em uma escala de 500  $\mu\text{m}$  (0,500mm).

A Figura 4.14 esquematiza o comportamento das fissuras e o detalhamento das seções do CP 05.

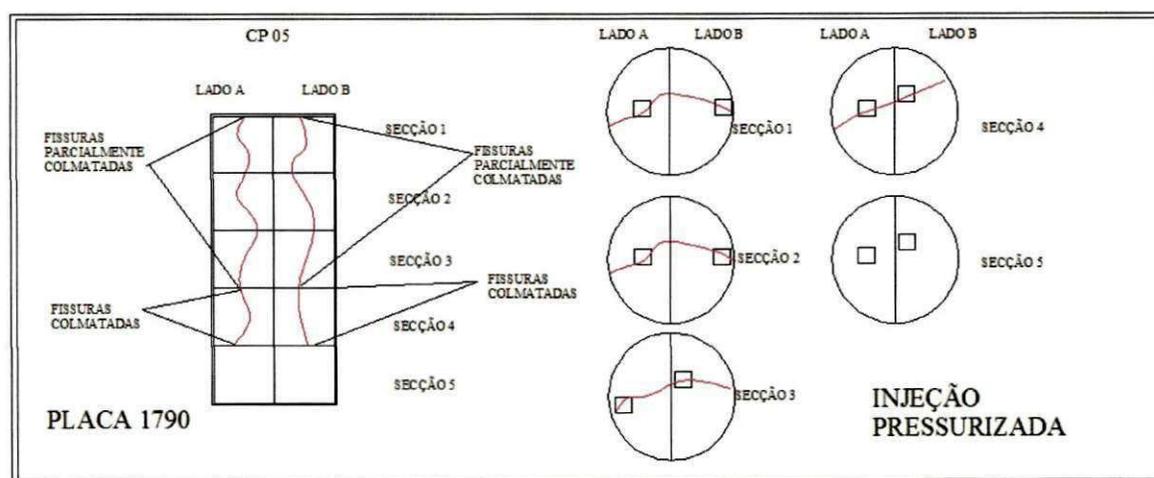


Figura 4.14– Detalhamento das seções do CP 05.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos dois processos de verificação referentes à colmatação das fissuras do pavimento em questão, pode-se concluir:

- Quanto à análise da resistência à compressão axial:

Os resultados do ensaio de compressão axial comprovam que, apesar do processo de fissuração ter ocorrido por retração plástica com possíveis modificações na sua estrutura interna, o concreto atingiu a resistência necessária exigida em projeto.

- Quanto ao preenchimento das fissuras:

A análise da penetração e preenchimento das fissuras, apesar dos CP's extraídos terem atendido aos requisitos quanto a resistência de projeto, os ensaios complementares de Microscopia Óptica comprovaram que a estrutura interna apresentava vazios em vários pontos internos parcialmente colmatados. Nos CP's tratados com a técnica de injeção por gravidade, constatou-se que o número de vazios encontrados nas secções eram bem maiores do que nos CP's tratados com a técnica de injeção pressurizada.

Durante a pesquisa bibliográfica, verificou-se que muitos autores e alguns artigos científicos, tratam o assunto sobre as colmatações ou preenchimento de fissuras através das injeções de microcimento, adotando apenas os parâmetros de resistência e análise visual. Verifica-se com isso que o pavimento da obra acometido de fissuras de retração plástica, apresentou variações em abertura desde a parte superior do CP's até a parte inferior, ou seja, a análise das aberturas devem ser consideradas a partir de verificações internas em toda a profundidade e direções. Fato este verificado no ensaio complementar de Microscopia óptica no qual mostra que ambas as técnicas de injeção preencheram a última secção do corpo de prova, porém deixando secções intermediárias com preenchimento parcial.

- Quanto às técnicas de colmatação empregadas:

A metodologia empregada e recomendada pelo Exército Brasileiro e ABCP, para a execução da colmatação das fissuras nas placas de concreto da referida obra, que se baseia em abertura e profundidade de fissuras, demonstrou que, ambas as técnicas de injeção, atenderam parcialmente a resolução do problema patológico. Além desses parâmetros de execução, a

recomendação para comprovação da eficiência da colmatação apenas se baseia, nos resultados das resistências e verificações externas dos CP's extraídos e colmatados.

- Quanto ao modo de ruptura dos corpos de prova:

Quanto à análise do comportamento da ruptura dos corpos de prova do pavimento recuperado, observou-se que a mesma ocorreu fora das fissuras pré-existentes.

- Quanto à durabilidade do trecho do pavimento estudado:

Os estudos das técnicas de recuperação utilizados especificamente para este trecho de pavimento, apresentaram limitações. A durabilidade é a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração. Devido a essas limitações deverá ser realizado um monitoramento através de outros ensaios que melhor possam espelhar a capacidade de desempenho em serviço, para que o pavimento estudado se mantenha em condições plenas de utilização, não vindo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetado ao longo da sua vida útil.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

✓ Ensaio de Fadiga – Sugere-se que seja realizado, no trecho de placas de concreto no qual foi realizada a recuperação das fissuras de retração plástica, através da injeção de calda coloidal de microcimento, o ensaio de Fadiga para verificar e monitorar este pavimento, quanto à influência das fissuras parcialmente colmatadas numa possível perda de vida útil;

✓ Compressão Diametral ou à tração indireta – Fazer uma correlação entre a compressão diametral e a compressão axial deste pavimento recuperado, para se obter novos parâmetros de resistência, quanto à tração na flexão, e verificar se as mesmas atendem ao especificado em projeto;

✓ O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – Através deste ensaio poderão ser realizados estudos neste pavimento recuperado, para observar e entender o comportamento da microestrutura do concreto após liberação ao tráfego.

✓ O Ultra-som como forma de verificação de anomalias (vazios causados por fissuras) no concreto, quanto à extensão e profundidade, principalmente neste trecho colmatado, de forma simples e sem causar danos ao pavimento.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, V. J. , MEZZALIRA, A. F.e MAIA,C. O. L, Brazilian special cements for shotcrete and injections in undergrounding constructions. **International Symposium for underground structures**. Anais. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND* (ABCP). Informativo Técnico. **Cimentos Gaúchos adotam o whitetopping** – Ano V, n.º 32 – Fevereiro 2001.

ARAUJO, R. F. **Materiais de Construção. Concreto de Cimento Portland**. Disponível em: [www.ufrj.br/institutos/it/dau eduardo/Concreto%20simples.pdf](http://www.ufrj.br/institutos/it/dau%20eduardo/Concreto%20simples.pdf). Acesso em: 03 nov 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7207**: pavimentação: terminologia. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7681**: Calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7682**: Calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7683**: Calda de cimento para injeção – Determinação dos índices de exsudação e expansão. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7684**: Calda de cimento para injeção – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7685**: Calda de cimento para injeção – Determinação da vida útil. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento *Portland*. Preparo, controle e recebimento. Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7680**: Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

BALBO, J. T. **Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação nos Pavimentos Semi-Rígidos**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1993.

\_\_\_\_\_, J. T. Pavimentos viários e pisos industriais de concreto. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

\_\_\_\_\_. **Contribuição à análise estrutural de reforços com camadas ultradelgadas de concreto de cimento *Portland* sobre pavimentos asfálticos (*whit topping ultradelgado*)**. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

BAUER, L A Falcão. **Materiais de construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

CHAGAS FILHO, Milton Bezerra das. **Estudo de agregados lateríticos para utilização em concretos estruturais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Relatório final do projeto executivo – Volume 01**. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. DNIT 005/2003 – **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirígidos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. DNIT IPR-719 – **Manual de pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT IPR-720 – **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT 049/2009-ES – **Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante: Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2009.

FORTES, R. M. **Estudo da aderência entre o concreto de cimento *Portland* e concretos asfálticos para fins de reforços ultradelgados de pavimentos**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

HELENE, Paulo *et al.* **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, PINI / SENAI, 2004.

HELENE, Paulo. Red Rehabilitar Cyted XV.2001 F. **Manual de Recuperação de Estruturas de Concreto**. Disponível em: [http://www.degussa-cc.com.br/pdf/manual\\_reparos\\_introducao.pdf](http://www.degussa-cc.com.br/pdf/manual_reparos_introducao.pdf). Acesso em: 14 nov 2009.

INFRAERO. INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA. Relatório Técnico. **Avaliação funcional de pátio e pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes**, abr. 2010.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo: PINI, 1994.

MELO NETO, A.A. *et al.* **Influência do teor de ativador e da idade de exposição na retração por secagem de argamassas com cimentos de escória ativada com silicato de sódio.** São Paulo: USP, 2002.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** São Paulo, PINI, 1982.

PITTA, M. R. *Whit topping*: A evolução de um conceito. In: **IX Congresso Brasileiro de Cimento.** São Paulo, 1996.

\_\_\_\_\_, M. R. **Materiais para pavimentos de concreto.** 4 ed. São Paulo: ABCP, 1992.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** São Paulo: PINI, 1997.

SIAN, Sérgio Valmir. **Recuperação de pavimento asfáltico com aplicação de whit topping.** Monografia (Graduação do Curso de Engenharia Civil) - Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2007.

SILVA, Paulo Fernando A. **Manual de patologias e manutenção de pavimentos.** São Paulo: PINI, 2008.

SISTEMA MICROINJET. Relatório Técnico. **T004 Injeção de Calda Coloidal de Microcimento em Fissuras do Pavimento da BR 101,** n. 6, dez. 2008.