



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE *PAVERS* FABRICADOS COM  
RESÍDUO DE CAULIM**

**PEDRO HUGO PEREIRA DA SILVA**

**POMBAL – PB**  
**FEVEREIRO – 2013**

**PEDRO HUGO PEREIRA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE *PAVERS* FABRICADOS COM  
RESÍDUO DE CAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, como um dos requisitos de avaliação para obtenção do grau de BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

**ORIENTADOR**

**Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias**

**Pombal – PB  
Fevereiro – 2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, Pedro Hugo Pereira da.  
Avaliação do desempenho de *pavers* fabricados com resíduo de caulim /  
Pedro Hugo Pereira da Silva. – Pombal, 2013.  
48 f. : il. color.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal  
de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar.  
Orientador: Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.  
Referências.

1. Resíduo de Caulim. 2. Reciclagem. 3. *Pavers*. 4. Resistência à  
Compressão. 5. Absorção de Água. I. Título.

CDU 666.321(043)

**PEDRO HUGO PEREIRA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE *PAVERS* FABRICADOS COM  
RESÍDUO DE CAULIM**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental, e aprovado em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

**APROVADO EM 21/02/2013**

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

**Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias**

Orientador – UACTA/CCTA/UFCG

---

**Prof. Dr. José Cleidimário Araújo Leite**

Examinador Interno – UACTA/CCTA/UFCG

---

**Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos**

Examinador Externo – CCJS/UFCG

Pombal – PB

Fevereiro – 2013

DEDICO aos meus pais, José Raimundo e Adeniza Pereira, pelos ensinamentos de vida, incentivo ao estudo e compreensão nos momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, primeiramente, por todas as coisas boas e pessoas essenciais em minha vida, que demonstraram ao longo de toda essa trajetória o verdadeiro significado da amizade, companheirismo, sabedoria e dedicação ao fruto da realização deste trabalho.

Aos meus padrinhos, Neto e Fátima, quero aproveitar a oportunidade para externar minha profunda gratidão e admiração que tenho como espelho em minha vida, sobretudo por terem acreditado no meu potencial.

Aos meus irmãos Maria Edginalda, Plínio Cesar e Paulo Sérgio, pelo apoio em alguns momentos. Também ao meu cunhado Francisco Batista e suas filhas Carla e Conceição, que me acolheram em momentos muito difíceis.

Ao Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias por não me deixar desistir, sua amizade e excelente orientação ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, e que sem dúvida contribuiu bastante para esse feito.

Agradeço a minha namorada Cinthya Morggana por se fazer presente em todos os momentos, pela compreensão e pelo amor que soube me dar todo esse tempo.

Aos outros familiares e amigos que direta ou indiretamente contribuíram com esforços, dedicação e colaboração para a realização de mais essa etapa alcançada em minha vida.

Aos professores do CCTA – UFCG, pela sabedoria e aprendizado. E ao técnico do Laboratório de Resíduos Sólidos, Emanuel Tarcísio, pela enorme ajuda.

Aos meus colegas do curso de Engenharia Ambiental, em especial a Ricardo Ricelli e Gilliano Fontes, sobretudo pela amizade e dificuldades enfrentadas durante todo o curso.

A empresa de MINERAÇÃO SILVESTRE, na pessoa de José Silvestre Henrique Neto e todos os seus familiares.

À Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Pombal – PB.

Mais uma vez, sobretudo, aos meus pais por não me deixarem desistir em momento algum de alcançar esta formação acadêmica e profissional, confiando sempre na minha capacidade. Por fim, a todos que almejam um dia alcançar seus objetivos com muito esforço e, acima de tudo, com muito sucesso.

## RESUMO

O atual momento da economia nacional tem favorecido o crescimento de diversos setores industriais, aumentando o consumo dos recursos naturais disponíveis e a geração de resíduos. A escassez dos recursos naturais, os altos custos dos componentes de engenharia e os problemas causados pela disposição inadequada dos resíduos sólidos são algumas das razões para o desenvolvimento de estudos sobre a reciclagem de resíduos nos mais variados setores. Este trabalho tem como objetivo a investigação do desempenho de blocos intertravados para pavimento, também conhecidos como *pavers*, produzidos com substituição de componentes naturais por resíduo de caulim. O procedimento básico consistiu na moldagem dos *pavers* e na obtenção de suas características físicas e mecânicas, enfatizando-se a resistência à compressão simples e à absorção de água. Os ensaios de comportamento dos *pavers* foram analisados para diferentes proporções do resíduo de caulim (0%, 50% e 100%) em substituição ao agregado natural, com tempo de cura definido para os 3, 7 e 14 dias. Os resultados obtidos para os *pavers* produzidos não atenderam as especificações normativas de pavimentação para uso por veículos comerciais e/ou especiais. No entanto, o comportamento das propriedades mecânicas sugere que os *pavers* avaliados podem ser utilizados em outras aplicações, como em pavimentos para calçadas e parques. Sendo assim, a utilização do resíduo de caulim para fabricação de *pavers* da construção civil pode contribuir como matéria-prima alternativa, minimizando problemas sociais, ambientais e econômicos.

**Palavras – Chave:** 1 Reciclagem, 2 Resíduo de caulim, 3 *Pavers*, 4 Resistência à compressão, 5 Absorção de água.

## ABSTRACT

The current state of the national economy has allowed the growth of various industrial sectors, increasing use of natural resources and generation of wastes. Scarcity of natural resources, high costs of engineering components and problems caused by improper disposal of solid wastes are some of the reasons for the development of studies on waste recycling in various sectors. This work aims at investigating the performance of paver blocks produced with the replacement of natural components by kaolin waste. The basic procedure consists of molding the pavers and obtaining their physical and mechanical properties, emphasizing the compressive strength and absorption of water. The performance of the pavers were examined for different ratios of kaolin waste (0%, 50% and 100%) in substitution to the natural aggregate. The tests were carried out over curing periods of 3, 7 and 14 days. The results obtained did not attend the specification for paving when considering the use by commercial and/or special vehicles. However, the mechanical properties of the produced pavers suggest they may be used for other applications, such as in pavements for sidewalks and parks. Thus, the use of kaolin waste for manufacturing civil construction pavers may contribute as an alternative material, minimizing social, economic and environmental problems.

**Key-words:** 1 Recycling, 2 Residue of kaolin, 3 *Pavers*, 4 Compressive strength,  
5 Absorption of water.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Caulim bruto.....	17
Figura 2 – Separação da fração mais fina do caulim.....	17
Figura 3 – Prensagem do caulim nas vibro-prensas.....	18
Figura 4 – Tortas de caulim produzidas.....	18
Figura 5 – Resíduos de caulim espalhados sobre a vegetação.....	20
Figura 6 – Passarela do Campus Universitário em Pombal – PB.....	22
Figura 7 – Camadas do pavimento intertravado.....	23
Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	28
Figura 9 – Agregado miúdo natural (areia).....	29
Figura 10 – Resíduo de caulim utilizado (“birra”).....	30
Figura 11 – Fôrma de madeira utilizada na moldagem dos <i>pavers</i> .....	31
Figura 12 – <i>Pavers</i> em processo de cura.....	33
Figura 13 – Prensagem do <i>paver</i> no momento da ruptura.....	34
Figura 14 – <i>Pavers</i> submersos em água.....	36
Figura 15 – Amostras em processo de secagem na estufa.....	37
Gráfico 1– Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).....	38
Gráfico 2 – Distribuição granulométrica do resíduo de caulim.....	38
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	39
Gráfico 4 – Resultados de resistência média dos <i>pavers</i> .....	41
Gráfico 5 – Resultados de resistência característica dos <i>pavers</i> .....	41
Gráfico 6 – Resultados de absorção média dos <i>pavers</i> .....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Requisitos físicos para produção de <i>pavers</i> .....	27
<b>Tabela 2.</b> Dimensões dos <i>pavers</i> estudados.....	32
<b>Tabela 3.</b> Fator multiplicativo “ <b>p</b> ” .....	34
<b>Tabela 4.</b> Valores de coeficientes de <i>Student</i> em nível de confiança de 80%.....	35
<b>Tabela 5.</b> Identificação dos <i>pavers</i> ensaiados (traço 1:6).....	40

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS.....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 RESÍDUOS DE CAULIM.....	13
2.1.1 Histórico.....	13
2.1.2 Origem e composição do caulim.....	15
2.1.3 Industrialização do caulim.....	16
2.1.4 Consequências da disposição inadequada do resíduo de caulim.....	18
2.1.5 Medidas mitigadoras.....	20
2.2 BLOCOS INTERTRAVADOS PARA PAVIMENTAÇÃO ( <i>PAVERS</i> ).....	21
2.2.1 Breve histórico sobre o pavimento intertravado.....	21
2.2.2 Estrutura do pavimento intertravado.....	23
2.2.3 Características do intertravamento dos <i>pavers</i> .....	24
2.3 ASPECTOS LEGAIS.....	26
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
3.1 Cimento <i>Portland</i> .....	29
3.2 Agregado miúdo natural (areia).....	29
3.3 Agregado alternativo (resíduo de caulim).....	29
3.4 Água.....	30
3.5 Dosagem.....	30
3.6 Moldagem dos <i>pavers</i> .....	31
3.7 Cura dos <i>pavers</i> .....	32
3.8 Capeamento dos <i>pavers</i> .....	33
3.9 Ensaio de resistência à compressão simples.....	33
3.10 Ensaio de absorção de água.....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	37
4.1.1 Agregado miúdo natural.....	37
4.1.2 Agregado alternativo.....	38
4.2 DOSAGEM.....	40
4.2.1 Relação água/cimento.....	40
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS <i>PAVERS</i> .....	40
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS <i>PAVERS</i> .....	42
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>44</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo a natureza tem sido tratada como uma fonte inesgotável de recursos (matéria e energia), de modo que algumas ações, principalmente a exploração indiscriminada de recursos naturais e a conseqüente geração de resíduos descartados inadequadamente no meio ambiente, têm desencadeado uma série de alterações indesejáveis nas interações entre as variáveis ambientais e o homem.

Diante disso, pode-se observar que alguns processos resultantes de atividades humanas permanecem em constante crescimento, utilizando e modificando os materiais naturais, e contribuindo cada vez mais com a enorme produção de resíduos.

Nesse sentido, o surgimento de novos conceitos, como a sustentabilidade e a visão holística, juntamente com o desenvolvimento de novas tecnologias, acabam por se tornar soluções no combate a destruição do meio ambiente. Sendo assim, a reciclagem de resíduos em setores que utilizam uma grande quantidade de componentes naturais, surge como uma importante alternativa na preservação dos recursos naturais, mitigação de impactos ambientais, e geração de emprego e renda.

A substituição dos materiais convencionais usados em pré-moldados da construção civil por materiais alternativos, como o resíduo do beneficiamento do caulim, além de preservar as reservas naturais, reduz os custos finais desses componentes, permitindo um maior acesso por parte das camadas sociais mais carentes. Já a redução do volume de resíduos de caulim gerados, mitiga consideravelmente as 11 lay11 qüências da sua disposição inadequada no meio ambiente, tal como a enorme quantidade de resíduos dispostos a céu aberto e a poluição dos fatores ambientais (NÓBREGA, 2007).

O setor mineral é responsável por gerar enormes quantidades de resíduos de vários tipos e níveis de periculosidade quanto ao risco ambiental. Como exemplo, pode-se citar os produtos à base de sílica, mica e caulinita, que são produzidos em grandes quantidades pela indústria de beneficiamento do caulim. Estima-se que, desde a extração do caulim, um percentual de 80% a 90% do volume total bruto explorado se transforma em resíduos, representando um impacto ambiental significativo (ANJOS, 2011).

A escassez dos recursos naturais, os altos custos dos componentes de engenharia e os problemas causados pela disposição inadequada dos resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo desenvolvimento de estudos sobre a reciclagem de resíduos nos mais variados setores. O emprego de materiais reciclados em substituição aos agregados naturais vem sendo alvo de estudo por parte de vários pesquisadores que almejam analisar sua viabilidade como matéria-prima alternativa para fabricação de blocos, minimizando problemas sociais, ambientais e econômicos (OLIVEIRA, 2004).

Atualmente o uso de blocos pré-moldados para pavimentação intertravada, também chamados de “*pavers*”, vem crescendo a cada ano em vários lugares do mundo, em particular no Brasil, onde a possibilidade de desenvolvimento de um sistema prático e viável torna-se imprescindível à medida que surge a preocupação do equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos desses materiais alternativos (FIORITI, 2007).

Os *pavers* são blocos pré-fabricados de argamassa ou concreto, maciços, que permitem pavimentar uma superfície por completo. Segundo Fioriti (2007), a vida útil dos pavimentos intertravados pode alcançar até 25 anos, desde que sejam atendidas as especificações para projetos apropriados de sub-base, e que os blocos produzidos apresentem boa qualidade com relação às características de assentamento.

As principais vantagens dos *pavers* estão relacionadas à sua facilidade de execução para pavimento, podendo ser executado com a utilização de mão-de-obra não especializada, além de apresentar alta resistência à compressão e durabilidade, facilidade de manutenção, homogeneidade, segurança, entre outras (AMADEI, 2011).

Para que haja a aceitação destes componentes alternativos, se faz necessário que algumas de suas características sejam aprovadas de acordo com os preceitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Dentro deste contexto, neste trabalho propõe-se a confecção e investigação do comportamento de *pavers* produzidos com resíduo de caulim, advindo de uma indústria de beneficiamento localizada na região produtora de caulim no estado da Paraíba.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de *pavers* alternativos fabricados com resíduo de caulim, visando minimizar o desperdício do setor de beneficiamento do caulim e os problemas de caráter ambiental.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Confeccionar *pavers* com diferentes composições do resíduo de caulim;
- Avaliar o comportamento físico e mecânico dos *pavers* para diferentes tempos de cura.
- Analisar a viabilidade do resíduo de caulim como matéria-prima alternativa para fabricação de *pavers*;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUO DE CAULIM

#### 2.1.1 Histórico

O termo caulim ou “*china 13lay*” deriva da palavra chinesa *Kauling*, que se refere ao alto de uma colina chamada *Jauchau Fu*, no norte da china, de onde o material é obtido há bastante tempo (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO/DNPM, 2001). O termo caulim é usado para designar a rocha que contém a caulinita, assim como o produto resultante de seu beneficiamento (CABRAL *et al.*, 2009).

A primeira utilização do caulim foi na fabricação de artigos cerâmicos e de porcelana há muitos séculos atrás. Apenas a partir de 1920 é que se teve início a utilização do caulim na indústria de papel, sendo precedida pelo setor da borracha. De acordo com o BALANÇO MINERAL (2001), suas principais aplicações industriais

são: agente de enchimento (*filler*) no preparo de papel; agente de cobertura (*coating*) para papel “*couché*”; na composição das pastas cerâmicas; e, em menor escala, na fabricação de materiais refratários, plásticos, tintas, produtos farmacêuticos, etc. Além disso, o caulim pode ser usado como isolante elétrico, agente fortalecedor de borrachas e concretos, fabricação de cimento branco, etc. O uso desse mineral na produção industrial em vários setores está relacionado principalmente com as suas propriedades ópticas, mineralógicas e químicas.

No Brasil, as reservas de caulim totalizam aproximadamente 24,5 bilhões de toneladas, das quais 9,4 bilhões são medidas. São reservas com alvura e pureza de boa qualidade internacional para uso principalmente na indústria de papéis especiais. Os estados do Pará, Amazonas e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque, participando com 56%, 41% e 2% do total, respectivamente. Em alguns estados, como por exemplo, São Paulo, Goiás, Santa Catarina e também no Paraná, verifica-se um predomínio de caulim primário, originado tanto da alteração de pegmatitos como do intemperismo de granitos. No período de 2003 a 2008, observou-se um aumento significativo das reservas descobertas de caulim no Brasil, devido principalmente ao desenvolvimento intensivo das pesquisas geológicas (ECONOMIA MINERAL DO BRASIL/DNPM, 2009).

Segundo o Sumário Mineral/DNPM (2012), a produção mundial de caulim em 2011 atingiu mais de 33 milhões de toneladas, sendo o principal produtor mundial o Uzbequistão, com aproximadamente 5,5 milhões de toneladas produzidas, o que representa algo em torno de 16,5% do total mundial. Em seguida, aparecem os Estados Unidos, com cerca de 5,48 milhões de toneladas. O Brasil ocupa a 5ª posição do *ranking* mundial de produtores de caulim, com praticamente 2 milhões de toneladas produzidas somente em 2011, representando 5,8% do total mundial. A cada ano a produção mundial tem registrado ligeiro aumento, o que demonstra uma estabilidade na demanda mundial do minério.

A produção mineral do Brasil apresentou fraco crescimento no primeiro semestre de 2012. Segundo o Índice de Produção Mineral (IPM), houve um crescimento tímido da produção de 0,97% comparado ao mesmo período do ano de 2011 (INFORME MINERAL/DNPM, 2012).

## 2.1.2 Origem e composição do caulim

Os depósitos de caulim possuem ampla distribuição no mundo, e podem ser classificados de acordo com sua gênese em dois tipos principais: os depósitos primários, que são o resultado de ações intempéricas de rochas cristalinas ou alterações hidrotermais; e os secundários, que resultam de processos erosivos e deposição dos materiais primários em grandes bacias (ANJOS, 2011).

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2001), as reservas de caulim são bastante abundantes, com destaque para a quantidade e qualidade do caulim secundário encontrado nos Estados Unidos e Brasil, e também de caulim primário no Reino Unido, localizadas no Sudoeste da Inglaterra.

O caulim é uma rocha formada por um grupo de silicatos de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. Entretanto, pode conter outras substâncias sob a forma de impurezas, como areia, grãos de feldspato, quartzo, palhetas de mica, óxidos de ferro e titânio, as quais podem atingir cerca de 40% a 70% em volume de material extraído. Também podem ocorrer os minerais do grupo caulinita: diquita, nacrita, folerita, anauxita, colirita e tuesita (CABRAL *et al.*, 2009).

Os caulins brasileiros podem ser divididos em cinco grupos: caulins sedimentares, caulins de rochas graníticas, oriundos de pegmatitos, de rochas vulcânicas e caulins derivados de anortosito (CASTRO, 2008).

O caulim extraído dos pegmatitos normalmente está encaixado em muscovita quartzitos da Formação Equador e nos micaxistos do Seridó. Pode estar associado a minerais como: tantalita, berilo, muscovita, quartzo e feldspato (CABRAL *et al.*, 2009).

O caulim possui muitas aplicações industriais e novos usos estão sendo constantemente pesquisados e desenvolvidos. Caracteriza-se como mineral industrial bastante especial, porque é quimicamente inerte em uma ampla faixa de pH (3 a 9); apresenta coloração branca ou quase branca; quando é usado na forma de pigmento possui ótimo poder de cobertura; é também macio e pouco abrasivo; é de fácil dispersão; possui baixas condutividades de calor e eletricidade; e seu custo é mais baixo quando comparado com outros materiais alternativos (ECONOMIA MINERAL DO BRASIL/DNPM, 2009).

### 2.1.3 Industrialização do caulim

A industrialização do caulim compreende dois tipos de processos: a lavra e o beneficiamento. A lavra pode ser feita de duas formas: subterrânea ou descoberta. A lavra subterrânea é mais comumente utilizada por ser preferida pelos trabalhadores de garimpo, por evitar a remoção da camada superficial do solo, e também por ser mais indicada em locais de relevo bastante acidentado (LUZ e CHAVES, 2000 *apud* NOBREGA, 2007).

A natureza da lavra do caulim no Brasil desenvolveu-se a céu aberto, aonde foram utilizadas galerias para desenvolvimento de estudos em depósitos primários. Em alguns depósitos de caulim como, por exemplo, os de origem sedimentar, a lavra é feita totalmente mecanizada, como é o caso das minas na região Norte. Em outros casos, pode ser apenas semimecanizada, comum nos depósitos de caulim primário nas regiões Sudeste e Sul (ECONOMIA MINERAL DO BRASIL/DNPM, 2009).

Na etapa de beneficiamento ocorrem basicamente dois processos: via seca e via úmida, na qual depende o tipo de uso a que é destinado o produto. No processo por via seca, ou também chamado de separação ao ar, o caulim bruto é levado à usina de beneficiamento em grandes proporções, onde é fragmentado em moinhos de rolos desintegradores e em seguida colocado em um moinho de bolas com um separador de ar tipo ciclone. Sendo assim, as partículas mais finas são recolhidas por meio de um coletor e colocadas em sacos plásticos, enquanto que as mais grossas retornam ao moinho (NOBREGA, 2007).

Durante o processamento do caulim são gerados dois tipos de resíduos: o primeiro é proveniente da etapa de separação do quartzo do próprio minério, no qual representa cerca de 70% do total produzido e é gerado pelas empresas de mineração logo após a extração; o segundo resíduo é resultado da segunda fase do beneficiamento, que envolve processos de tratamento por via úmida, onde se busca separar a fração mais fina do minério, purificando o caulim e gerando um subproduto (rejeito) com aspecto argiloso (MENEZES *et al.*, 2007).

As indústrias de beneficiamento do caulim na Paraíba utilizam o processo por via úmida, onde o caulim bruto (Figura 1) é desintegrado por uma espécie de batedor, onde é adicionada água para lavagem dos minerais acessórios de modo a retirar a fração de caulim agregada a eles (Figura 2).

**Figura 1** – Caulim bruto.



**Fonte:** Fotografia do autor.

**Figura 2** – Separação da fração mais fina do caulim.



**Fonte:** Fotografia do autor.

Depois, o material passa por tanques para separação do minério da areia e em seguida para tanques de sedimentação, onde ocorre a precipitação dos flocos.

Todo o caulim precipitado na etapa anterior é bombeado para os filtros-prensa (Figura 3), nos quais é retirado todo o excesso de água, resultando nas chamadas tortas de caulim (Figura 4). Cada torta é seca ao ar livre em pátios abertos ou em fornos-de-teto-quente nos períodos chuvosos.

**Figura 3** – Prensagem do caulim nas vibro-prensas.



**Fonte:** Fotografia do autor.

**Figura 4** – Tortas de caulim produzidas.



**Fonte:** Fotografia do autor.

No final do processo as tortas de caulim são quebradas em várias partes, passando ainda por mais uma etapa de moagem antes de serem ensacadas e depois comercializadas.

#### 2.1.4 Consequências da disposição inadequada do resíduo de caulim

Segundo a Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, impacto ambiental pode ser considerado como:

*“qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, segurança e bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a fauna e a flora de uma determinada área; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais.”*

Durante os processos de industrialização do caulim, tais como a extração e o beneficiamento, a quantidade de resíduos gerados é enorme. Esses resíduos são descartados ao ar livre sem nenhuma medida de monitoramento e/ou acompanhamento técnico, desprezando-se assim quaisquer exigências de utilização de aterros e provocando uma série de danos ao meio ambiente e à saúde de pessoas residentes próximas ao local de “depósitos” de resíduos (RESENDE *et al.*, 2008).

Segundo Rezende *et al.* (2008), vários estudos tem sido feito no âmbito do acúmulo de resíduos gerados e os prováveis impactos ambientais, visando minimizar e/ou buscar soluções ótimas para redução dos danos ambientais causados pela disposição inadequada do resíduo, por meio de métodos de otimização (exploração e armazenamento) ou pela reutilização do resíduo de caulim como matéria-prima alternativa em diversos setores industriais.

Algumas atividades que envolvem grande quantidade de materiais rochosos, a serem retirados para extração do caulim, acabam, por sua vez, provocando impactos no meio físico, biótico e antrópico. A maioria dos impactos requer diferentes medidas de recuperação ambiental, dependendo de fatores específicos, tais como: o tipo de minério, técnicas de extração e beneficiamento, e condições ambientais locais.

De acordo com Cabral *et al.* (2009) o principal problema na etapa de extração do caulim está relacionado à segurança e saúde dos trabalhadores. Diante disso, observar-se que as condições de trabalho enfrentadas pelos trabalhadores são muito precárias, o que acarreta um alto potencial de risco à vida dessas pessoas. Ainda nessa etapa, estudos indicam que a escavação do subsolo e alteração da superfície sem nenhum conhecimento técnico pode causar sérios danos, como a degradação de ecossistemas e também contaminação de lençóis freáticos.

Já na etapa de beneficiamento, os principais problemas estão ligados ao volume de resíduos acumulados no entorno das próprias empresas geradoras e

também a poluição do ar. Como já se sabe que os resíduos são dispostos de qualquer maneira no ambiente (Figura 5), observa-se que, depois de seco, transformam-se em pó e que, pela ação do vento, se espalham, poluindo o ar e a vegetação circundante (CABRAL *et al.*, 2009).

Ainda segundo Rezende *et al.* (2008), o acúmulo dos rejeitos de caulim em torno das próprias empresas de mineração na região produtora do estado da Paraíba, que compreende os municípios de Assunção, Junco do Seridó, Juazeirinho e Tenório, é algo alarmante, devido a enorme quantidade inestimável de resíduos, o que vem sendo alvo de severas fiscalizações e tem preocupado ambientalistas e pesquisadores acerca dos efeitos futuros sobre o meio ambiente.

**Figura 5** – Resíduos de caulim espalhados sobre a vegetação.



**Fonte:** Fotografia do autor.

### 2.1.5 Medidas mitigadoras

As medidas mitigadoras devem ser, implementadas e acompanhadas, por todas as recomendações estabelecidas após a tomada de decisão sobre a aprovação do projeto, visando reduzir, eliminar ou compensar os impactos ambientais negativos e também maximizar os positivos (FOGLIATTI *et al.*, 2004).

- A reutilização dos resíduos, dando a estes uma nova funcionalidade por meio de métodos tecnologicamente eficientes, buscando-se atingir aceitação por parte da normalização dos materiais confeccionados com resíduos de caulim, tais como os próprios blocos alternativos para pavimento;

- Incentivo a pesquisa científica e tecnológica para averiguar estudos sobre a viabilidade econômico-social dos materiais alternativos, sobretudo os de caráter ambiental;
- Conscientização das empresas com a preservação ambiental;
- Atender ao cumprimento da legislação ambiental vigente;
- Fiscalização rigorosa por parte dos órgãos ambientais competentes;
- Cursos de capacitação sobre segurança do trabalho e proteção ambiental;
- Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) e os demais estudos ambientais (EIA/RIMA);
- Disposição adequada dos resíduos de caulim em aterros sanitários;

## 2.2 BLOCOS INTERTRAVADOS PARA PAVIMENTAÇÃO (*PAVERS*)

### 2.2.1 Breve histórico sobre o pavimento intertravado

Alguns dados históricos de vários povos retratam o surgimento dos primeiros caminhos e trilhas que foram feitas para vencer grandes distâncias entre os povoados e colônias. Segundo Cruz (2003), os povos Etruscos, foram os pioneiros na construção de caminhos para transporte de pessoas e cargas entre as vilas e colônias da época. Algumas das técnicas utilizadas pelos Etruscos visavam ligar grandes distancias, de modo a garantir conforto e resistência sobre as superfícies planas. Em seguida, foi à vez dos Romanos aprimorarem as técnicas instituídas pelos Etruscos, onde se iniciou um processo de modificação principalmente nos materiais utilizados para construção das vias de acesso a cada uma das cidades romanas.

De acordo com alguns estudos, o primeiro *paver* de concreto foi confeccionado no final do século XIX, antes mesmo do início da Primeira Guerra Mundial. Registros apontam que os primeiros avanços no desenvolvimento da utilização de *pavers* no pavimento intertravado ocorreram na Holanda e Alemanha no período pós-guerra. A partir disso, em meados de 1950, houve uma rápida evolução dos modelos de fôrmas existentes para fabricação dos blocos intertravados. Em um primeiro momento, as peças pareciam com tijolos e pedras aparelhadas que eram utilizadas na época para proporcionar a substituição gradual. Nesta fase, pôde-

se observar que as únicas vantagens dos *pavers* em relação às demais peças aparelhadas eram os custos mais baixos e a homogeneidade, devido uma melhor uniformidade dos *pavers* (CRUZ, 2003).

Dessa forma, com o desenvolvimento do pavimento intertravado, permitiu-se relacionar a forma geométrica com o desempenho dos *pavers*, em função do tipo de tráfego, como por exemplo: as praças, calçadas, pátios, ruas, pisos industriais, portos e aeroportos, em quantidades diferentes e em praticamente todos os lugares do mundo (FIORITI, 2007). Na figura 6 apresenta-se a passarela de um campus universitário.

**Figura 6** – Passarela do Campus Universitário em Pombal – PB.



**Fonte:** Fotografia do autor.

Segundo Amadei (2011), os *pavers* têm conquistado espaço nos pavimentos urbanos em todo o país, principalmente pelo aumento na sua produção por parte das empresas de construção civil, incentivadas mediante as suas vantagens técnicas. Dentre as principais vantagens, citam-se: a facilidade de assentamento, a praticidade da manutenção, a liberação do tráfego rapidamente e o fácil acesso às redes subterrâneas.

O bloco intertravado de concreto não oferece apenas vantagens técnicas, mas também apresenta ótima eficiência ambiental, o que torna o bloco cada vez mais consolidado no mercado atual. Considerando os aspectos estéticos, além de apresentar uma série de modelos, cores e tamanhos, os *pavers* ainda podem abrir possibilidades para se utilizar resíduos em sua composição, e contribuir para melhorar a drenagem urbana, por serem semipermeáveis (AMADEI, 2011).

O setor industrial de pavimentos intertravados de concreto vem crescendo em larga escala no mundo inteiro. Um material que era utilizado apenas em áreas para proporcionar melhores efeitos estéticos, passou a ser tido como um sistema prático e confiável que possibilita a harmonização com qualquer meio que seja aplicado, inclusive o rodoviário e industrial, desde que se mantenha o equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos (FIORITI, 2007).

O pavimento intertravado de concreto está situado como mais uma alternativa moderna, viável, racional, com eficiência técnica, econômica e ambiental, onde podem ser incorporados vários tipos de materiais reciclados e/ou reaproveitados.

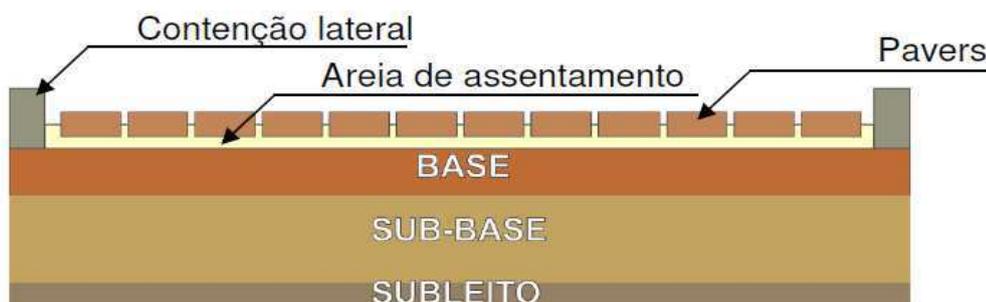
## 2.2.2 Estrutura do pavimento intertravado

Segundo Fioriti (2007), o pavimento resulta de uma estrutura construída sobre terraplenagem, ao qual é destinada de forma econômica, técnica e simultaneamente a resistir e distribuir os esforços verticais e horizontais proveniente do tráfego, tornando mais durável a superfície de rolamento, como também de melhorar as condições do próprio rolamento quanto ao conforto e segurança.

Sendo assim, afirma-se que a camada de rolamento é composta por vários blocos intertravados com um revestimento de grande durabilidade e resistência, assentados sobre uma camada de areia. A camada superior (revestimento) deve suportar as tensões e cargas elevadas geradas pelo tráfego intenso, de modo a proteger a camada inferior (base) dos efeitos abrasivos, e assim permitir uma melhor estabilidade (HALLACK, 1998 *apud* FIORITI, 2007).

Na Figura 7 mostram-se os elementos constituintes do pavimento intertravado, de acordo com a Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP).

**Figura 7** – Camadas do pavimento intertravado.



**Fonte:** AMADEI (2011).

O subleito é a camada final de terraplenagem ao qual será executada a pavimentação, devendo estar bem compactado e regularizado, antes de serem colocadas as camadas superiores. Além disso, é bastante importante a implementação de uma avaliação topográfica do local, de modo a garantir um melhor preparo do terreno e propiciar uma estrutura de trabalho firme para o pavimento (AMADEI, 2011).

A sub-base poderá ser composta de material granular ou solo-brita, dependendo da espessura da camada previamente determinada no projeto e também ser capaz de suportar o tráfego contínuo (AMADEI, 2011).

Segundo Cruz (2003), a camada de base deve receber a maior parte das tensões advindas da camada de revestimento. E sua principal função é proteger o subleito de forças externas, de modo a evitar prováveis deformações sobre o pavimento. O autor ressalta ainda que acima da base está a camada de assentamento, responsável por acomodar os *pavers* em superfície regular, evitando possíveis dilatações. Dessa forma, a areia é utilizada para compor a camada de assentamento, considerando-se a disponibilidade local, mas sem nenhum tipo de comprometimento da função estrutural do pavimento intertravado.

A camada final é composta pelos *pavers*, onde são assentados os blocos intertravados, e em seguida realizado o acabamento das bordas e quaisquer outros meios de interrupção do pavimento e no final é feita a vibração dos *pavers* sobre a área pronta (FIORITI, 2007).

O método manual ainda é bastante utilizado no Brasil para execução do intertravamento de peças pré-moldadas. Entretanto, em alguns países o assentamento dos *pavers* é feito por equipamentos automatizados, devido os mesmos dominarem esse tipo de prática há mais tempo (AMADEI, 2011).

### 2.2.3 Características do intertravamento dos *pavers*

A definição do intertravamento está relacionada com a capacidade que os *pavers* adquirem para resistir às cargas de deslocamento individual, seja com movimento na horizontal, vertical, de rotação ou giratório em relação às peças vizinhas. Para que ocorra um melhor travamento das peças, é necessária uma boa contenção lateral, que possibilite aos blocos uma transmissão de cargas superficiais

aplicadas em áreas menores para áreas maiores na camada de base. Os quatro tipos ocorrem de forma simultânea ao longo de toda vida útil do pavimento (AMADEI, 2011).

O intertravamento horizontal é a capacidade de um *paver* não se deslocar no sentido horizontal em relação ao outro independentemente do tipo de arranjo. As juntas são as responsáveis pelo melhor desempenho desse tipo de pavimento. Segundo Fioriti (2007), os *pavers* variam em diversos formatos e são os mais utilizados atualmente, pois acabam tornando o assentamento bastante simples.

Já o intertravamento vertical é a não movimentação dos *pavers* em relação aos *pavers* vizinhos, devido a enormes forças de cisalhamento absorvidos pelo rejuntamento da areia do bloco e sua capacidade estrutural de partes inferiores (FIORITI, 2007).

Este tipo de pavimento exige maior complexidade de execução em relação ao horizontal, pois necessitam de formatos que se encaixem para adquirir o melhor agrupamento das peças. Geralmente apresentam dimensões grandes e o manuseio deve ser feito com bastante cuidado.

O pavimento giratório é o travamento que ocorre para as peças não girarem em torno do seu próprio eixo horizontal, podendo ser evitado através de um bom rejuntamento, assim como um bom confinamento lateral.

Por fim, o intertravamento rotacional é a capacidade do *paver* de não girar em torno do seu próprio eixo em qualquer direção. A sua ocorrência depende principalmente do tipo de junta entre os blocos, ou seja, da sua espessura, tipo de areia e confinamento lateral entre as peças adjacentes (AMADEI, 2011).

De acordo com Hood (2006), os fatores que mais interferem na qualidade final da produção de blocos de concreto variam desde os equipamentos usados até a quantidade de água da mistura. Além disso, conhecer bem os parâmetros relacionados às propriedades dos materiais constituintes, à execução dos ensaios de dosagem e o processo de fabricação são fatores primordiais para obtenção de ótimos resultados.

Oliveira (2004) avaliou a durabilidade de blocos de concreto produzidos com agregado reciclado, e chegou à conclusão que a resistência à compressão de blocos de concreto é determinada principalmente em função do seu grau de compactação, consumo de cimento e resistência mecânica dos agregados.

## 2.3 ASPECTOS LEGAIS

No Brasil, o primeiro dispositivo legal que apresentou instrumentos para minimizar os impactos ambientais negativos causados por empreendimentos de mineração, entre elas as que utilizam o caulim (argila), foi a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que, por meio do Decreto Federal nº 88.351, de 01 de junho de 1983, instituiu o Licenciamento Prévio (LP), o Licenciamento de Instalação (LI) e Licenciamento de Operação (LO). A partir de 1986, com a Resolução CONAMA nº 001, estabeleceram-se as definições, as responsabilidades, as diretrizes gerais e os critérios básicos para implantação do processo de Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81).

Em 1989, o Decreto Federal nº 97.632, definiu, em seu artigo 1º, que os empreendimentos que se destinam à exploração dos recursos minerais deverão submeter seus projetos à aprovação por parte dos órgãos ambientais federais, estaduais e municipais competentes e deverão executar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e posterior Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente (RIMA), assim como o PRAD. E para aqueles empreendimentos que se encontram já em operação, deverão regularizar sua situação por meio do PRAD.

Em seguida, com as Resoluções CONAMA nº 009 e 010, de 06 de dezembro de 1990, estabeleceram-se os critérios e normas específicas para extração de substâncias minerais, sem e com emprego imediato na construção civil, respectivamente. Depois, a Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, estabeleceu os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental.

Logo depois, com a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, em seu artigo 13, para os efeitos desta lei, prescreve a classificação dos resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade, onde os resíduos de mineração são aqueles gerados nas atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Além desses mecanismos legais, existem ainda as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), tais como: a NBR 10.004 (ABNT, 2004), que traz um sistema de classificação e métodos de ensaios para os resíduos sólidos,

e as NBR 9.780 (ABNT, 1987), NBR 9.781 (ABNT, 1987) e NBR 12.118 (ABNT, 2010) que estabelecem métodos e critérios para testes e aprovação de componentes utilizados na pavimentação.

No Brasil as duas normas que referenciam os pavimentos intertravados de concreto são: a NBR 9.780 (ABNT, 1987) e a NBR 9.781 (ABNT, 1987). Esta última fixa as condições mínimas exigidas para a aceitação das peças pré-moldadas de concreto na pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento e similares, não abrangendo demais usos, a exemplo de calçamentos e ciclovias e até mesmo rodovias. Os requisitos físicos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Requisitos físicos para produção de *pavers*.

Requisitos Físicos		Limites Admissíveis
Tolerância Dimensional (mm)	Comprimento (mm)	$\pm 3,0$
	Largura (mm)	$\pm 3,0$
	Altura (mm)	$\pm 5,0$
Resistência à Compressão	1	$\geq 35,0$ Solicitações de veículos comerciais de linha
	2	$\geq 50,0$ Solicitações de veículos especiais ou cargas que produzem acentuado efeito de abrasão

Fonte: NBR 9.781 (1987)

Com base nas suas determinações, o *paver* é definido como uma peça pré-moldada de concreto, de geometria regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm.

Comentando as normas brasileiras, segundo Fioriti (2007), a resistência mecânica à compressão é um dos principais ensaios referenciados pela maioria das normas internacionais para avaliar o desempenho dos *pavers*. A norma brasileira institui a resistência à compressão como único parâmetro de desempenho a ser atingido pelos blocos pré-moldados, admitindo, assim, que todas as outras características estão relacionadas diretamente com essa capacidade estrutural.

Todavia, Fioriti (2007), ressalta ainda que os valores mínimos exigidos pela NBR 9.781 (1987) para tal ensaio são considerados bastante elevados, tendo em vista se compararmos os valores mínimos exigidos em alguns países, como

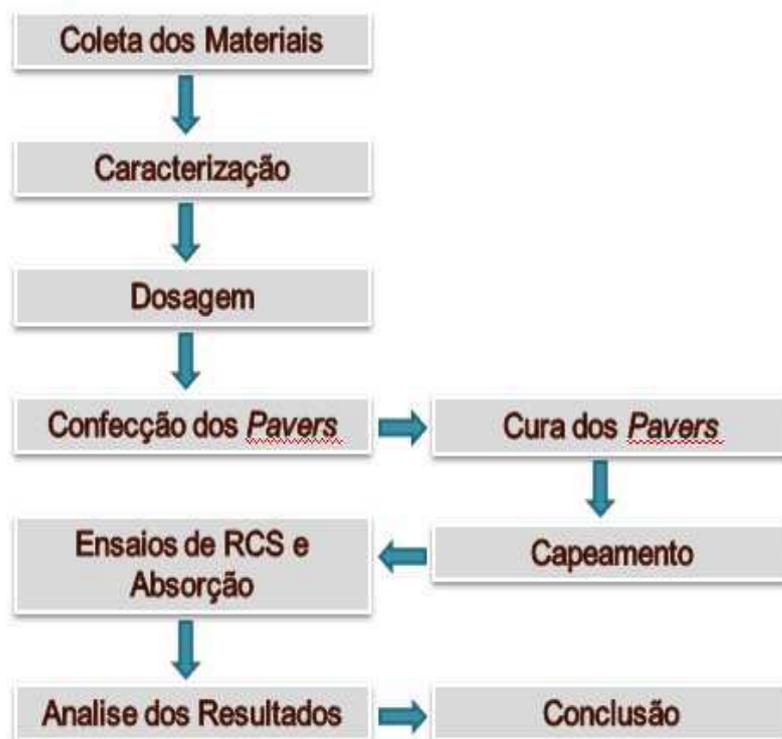
Austrália e África do Sul, que dispõem de normas que especificam valores de resistência mínimo de 25 Mpa, dependendo da utilização do produto, e que dominam estas técnicas de pavimentação há muito mais tempo que no Brasil. Sendo assim, verifica-se que os valores exigidos pela norma brasileira são realmente elevados, principalmente por não considerar a pavimentação de ambientes de baixa sobrecarga, como em calçadas e praças.

Além disso, Fioriti (2007), após realizar estudos sobre aplicação de resíduos de pneus para pavimentação de tráfego leve, afirma que a resistência à compressão de 15 Mpa foi satisfatória, pois as especificações são inferiores. Como conclusão, este autor cita que os valores mínimos exigidos pela norma brasileira deveriam ser reduzidos considerando a aplicação do material, bem como a incorporação de outros tipos de ensaios para melhor avaliação dos *pavers*.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 8 mostra os procedimentos experimentais realizados neste trabalho.

**Figura 8** – Fluxograma de procedimentos experimentais.



**Fonte:** Fluxograma do autor.

### 3.1 Cimento *portland*

Durante o desenvolvimento da pesquisa para produção dos *pavers*, optou-se por utilizar o cimento da marca MIZU CP II-Z-32 que, segundo a norma NBR 11.578 (ABNT, 1991) apresenta teor de *filler* de calcário (0-10%) e também possui uma adição de material pozolânico (6-14%), permitindo-se assim uma menor permeabilidade.

### 3.2 Agregado miúdo natural (areia)

A areia usada neste trabalho é proveniente do rio Piancó, Pombal – PB. As amostras de areia foram colocadas para secar ao sol e ar livre e, posteriormente, foram peneiradas e utilizadas nos traços adotados com as devidas proporções estudadas para os agregados. Na Figura 9 mostra-se a areia escolhida.

**Figura 9** – Agregado miúdo natural (areia).



**Fonte:** Fotografia do autor.

Foram realizados ensaios de composição granulométrica da areia, segundo a NBR 7217 (ABNT, 1987), onde foram determinados alguns parâmetros como: dimensão máxima ( $\Phi_{\text{máx}}$ ) e módulo de finura (MF).

### 3.3 Agregado alternativo (resíduo de caulim)

Na Figura 10 apresenta-se o resíduo de caulim coletado no entorno da fábrica MP CAULIM localizada nas proximidades da BR 230 no município de Assunção – PB. Uma enorme quantidade desse material é disposta de maneira inadequada no meio ambiente, sendo a maior parte colocada nas proximidades das próprias fábricas de beneficiamento. O material utilizado é resultante da primeira etapa do beneficiamento do caulim, sendo composto por uma fração mais arenosa, conhecida popularmente como “birra”.

**Figura 10** – Resíduo de caulim utilizado.



**Fonte:** Fotografia do autor.

Também foram realizados ensaios de composição granulométrica para o resíduo de caulim, segundo a NBR 7217 (ABNT, 1987), onde foram determinados alguns parâmetros como: dimensão máxima ( $\Phi_{m\acute{a}x}$ ) e módulo de finura (MF).

### 3.4 Água

A água utilizada é potável e proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Pombal – PB, onde a captação ocorre no rio Piancó pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba).

### 3.5 Dosagem

a) Relação cimento: agregados (traços)

Os *pavers* convencionais produzidos nesta pesquisa foram moldados com traço único em massa, com cimento e areia na proporção 1:6 (traço 1:6). Já para os blocos alternativos foram utilizadas as proporções de 50% e 100% de resíduo de caulim em substituição ao agregado miúdo natural.

#### b) Relação água: cimento

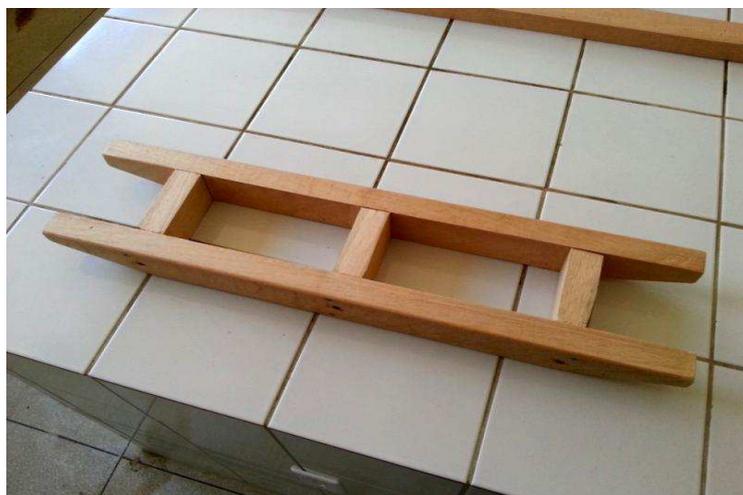
Os valores obtidos para relação água:cimento em todas as composições nessa pesquisa foram determinados em função do ponto de pelota, ou teste da mão, como também é conhecido. Este método consiste em moldar uma pelota ou “bolo” da massa nas mãos sem que esta desmanche ao ser liberada.

Segundo Hood (2006), o ponto de pelota é utilizado para verificar a umidade ótima da mistura, que corresponde à máxima quantidade de água permitida na moldagem da pelota sem que sua forma possa sofrer algum tipo de alteração, seja por excesso ou por falta de água.

### 3.6 Moldagem dos *pavers*

Na Figura 11 apresenta-se a fôrma de madeira utilizada na moldagem dos *pavers*. A utilização deste tipo de equipamento pode ser justificada em razão da não disponibilidade de outros equipamentos automatizados para produção dos *pavers*. As dimensões dos *pavers* são mostradas na Tabela 2.

**Figura 11** – Fôrma de madeira utilizada na moldagem.



**Fonte:** Fotografia do autor.

**Tabela 2** – Dimensões dos *pavers* estudados

<b>Blocos de concreto</b>	<b>Dimensões (cm x cm x cm)</b>
<i>Pavers</i>	6 x 10 x 20

Durante o preparo da massa, procurou-se tomar alguns cuidados para evitar a exposição da mesma à ação do sol e do vento, pois é necessário evitar perdas de água por evaporação. Segundo Farias (2006), a falta de água nos grãos de cimento acarreta prejuízos à hidratação e, conseqüentemente, ao aumento da resistência à compressão com o passar do tempo.

### 3.7 Cura dos *pavers*

Após a moldagem, os *pavers* foram deixados dentro do Laboratório de Resíduos Sólidos do CCTA – UFCG com temperatura de  $23 \pm 0,5$  °C por um período de aproximadamente 12 horas. Durante estas 12 horas, os blocos foram umidificados três vezes por meio de borrifadores, de modo a evitar a perda de umidade. Logo após as 12 horas, os blocos foram imersos em tambores e caixas de plástico com água, dando continuidade ao regime de cura até as respectivas idades de controle.

Os tempos de cura adotados para todas as composições estudadas foram de 3, 7 e 14 dias. Estes períodos são considerados razoáveis, uma vez que, na prática, buscam-se ter *pavers* prontos para comercialização e utilização já após os primeiros 7 dias de cura. Na Figura 12 mostram-se os *pavers* em processo de cura, durante a realização dos ensaios experimentais.

**Figura 12** – *Pavers* em processo de cura



**Fonte:** Fotografia do autor.

### 3.8 Capeamento dos *pavers*

Depois de retirados do processo de imersão em água, os *pavers* foram capeados com uma pasta de cimento e água, de modo a garantir que sua superfície fosse a mais uniforme possível antes da submissão aos testes de resistência à compressão simples. Segundo Farias (2006), a superfície plana é muito importante, pois permite evitar que, durante o ensaio de resistência, ocorra a concentração de carga sobre pontos específicos, o que poderia interferir em um melhor resultado.

### 3.9 Ensaio de resistência à compressão simples

Segundo vários autores e também a maioria das normas nacionais e internacionais, o ensaio de resistência à compressão simples é tido como um dos principais parâmetros na avaliação do desempenho dos *pavers*. Este ensaio foi feito no Laboratório de Resíduos Sólidos do CCTA – UFCG, Campus de Pombal – PB. Os *pavers* foram ensaiados de acordo com a NBR 9780 (1987): Peças de Concreto para Pavimentação – Determinação da Resistência à Compressão. Esta norma prevê que todas as outras características envolvendo os *pavers* estejam diretamente relacionadas com essa propriedade.

Dessa forma, os *pavers* foram submetidos ao teste de resistência de modo que a carga foi sendo aplicada na direção do esforço ao qual o *paver* normalmente sofreria durante o seu emprego. Em seguida, cada *paver* foi devidamente alinhado na prensa para que o seu centro de gravidade coincidisse com o alinhamento do centro das placas auxiliares, de modo que os carregamentos fossem bem distribuídos até o momento da ruptura (Figura 13).

**Figura 13** – Prensagem do *paver* no momento da ruptura.



**Fonte:** Fotografia do autor.

Foram ensaiados seis (6) exemplares para cada traço e idade de controle pré-estabelecidas.

A resistência à compressão de cada *paver*, dada em MPa, foi obtida dividindo-se a carga de ruptura, em N, pela área de carregamento, em mm<sup>2</sup>; e multiplicando-se o resultado pelo fator “**p**”, que depende da altura da peça, como se mostra na Tabela 3.

**Tabela 3** – Fator multiplicativo “**p**”

<b>Altura nominal da peça (mm)</b>	<b>Fator multiplicativo “p”</b>
<b>60</b>	0,95
<b>80</b>	1,00
<b>100</b>	1,05

**Fonte:** NBR-9780 (1987).

A resistência à compressão de cada peça ( $f_{pi}$ ) foi calculada obedecendo a Equação (1):

$$f_{pi} = \frac{\text{carga (N)}}{\text{área (mm}^2\text{)}} \times 0,95 \text{ (fator "p")} \quad (1)$$

No cálculo da resistência característica à compressão ( $f_{pk}$ ), em MPa, utilizou-se a Equação (2), conforme determina a NBR 9.781 (1987): Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação. Nesta norma são também apresentados os requisitos mínimos para produção das peças, conforme descrito na Tabela 1.

$$f_{pk} = f_p - t_x s \quad (2)$$

onde:

$f_{pk}$  = resistência característica à compressão, em MPa;

$f_p$  = resistência média dos *pavers* ensaiados de acordo com a NBR 9.780 (1987), em MPa;

$t$  = coeficiente de *Student*, em função do tamanho da amostra, conforme a Tabela 4;

$s$  = desvio padrão da amostra, fornecido pela Equação (3); e

$n$  = tamanho da amostra.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (3)$$

**Tabela 4** – Valores para o coeficiente de *Student* em nível de confiança de 80%.

$n$	$T$	$n$	$t$
6	0,920	18	0,863
7	0,906	20	0,861
8	0,896	22	0,859
9	0,889	24	0,858
10	0,883	26	0,856
12	0,876	28	0,855
14	0,870	30	0,854
16	0,866	≥ 32	0,842

Fonte: NBR-9.781 (1987)

### 3.10 Ensaio de absorção de água

A absorção de água indica a quantidade de poros de uma peça. Quanto menor a porosidade de uma peça, menor o índice de absorção da mesma e consequentemente, melhor poderão ser suas propriedades mecânicas. Este ensaio foi executado no Laboratório de Resíduos Sólidos do CCTA – UFCG, Câmpus de Pombal, e teve como objetivo averiguar essa propriedade juntamente com as demais características dos *pavers* produzidos.

Para execução deste ensaio foram utilizados os procedimentos da NBR 12118 (2010): Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Foram utilizadas seis amostras para cada traço e idade de cura.

O procedimento adotado neste ensaio é descrito abaixo:

- os *pavers* foram imersos dentro de caixas contendo água (Figura 14) com temperatura de  $23 \pm 0,5$  °C até as respectivas idades de controle (3, 7 e 14 dias);

**Figura 14** – *Pavers* submersos em água.



**Fonte:** Fotografia do autor.

- após o ensaio de resistência à compressão simples, amostras saturadas dos *pavers* foram pesadas com a superfície seca, anotando-se a sua massa, aqui denominada de  $M_2$ (kg);
- na sequência, as amostras devidamente identificadas foram levadas para estufa por um período de 24 horas (Figura 15);

- por fim, foram resfriadas naturalmente e pesada cada uma das amostras, sendo anotada sua massa seca denominada  $M1$ (kg).

**Figura 15** – Amostras em processo de secagem na estufa.



**Fonte:** Fotografia do autor.

O resultado da absorção de água ( $A$ ), expresso em porcentagem, foi calculado por meio da Equação (4).

$$A = \frac{M2 - M1}{M1} \times 100 \quad (4)$$

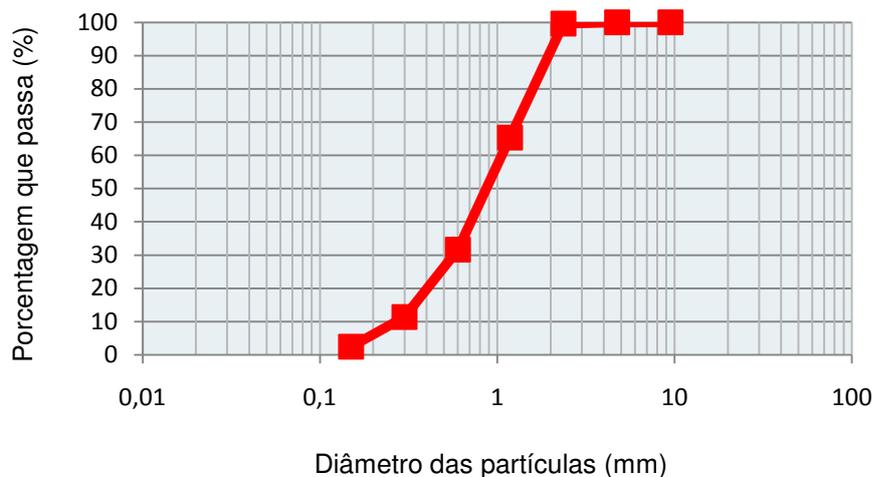
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

#### 4.1.1 Agregado miúdo natural

No Gráfico 1 apresentam-se os resultados da análise granulométrica obtido para a areia utilizada. Segundo a norma NBR 7217 (ABNT, 1987), a areia usada apresentou diâmetro máximo ( $\Phi_{\text{máx}}$ ) igual a 2,36 mm e módulo de finura (MF) igual a 2,89.

**Gráfico 1** – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).

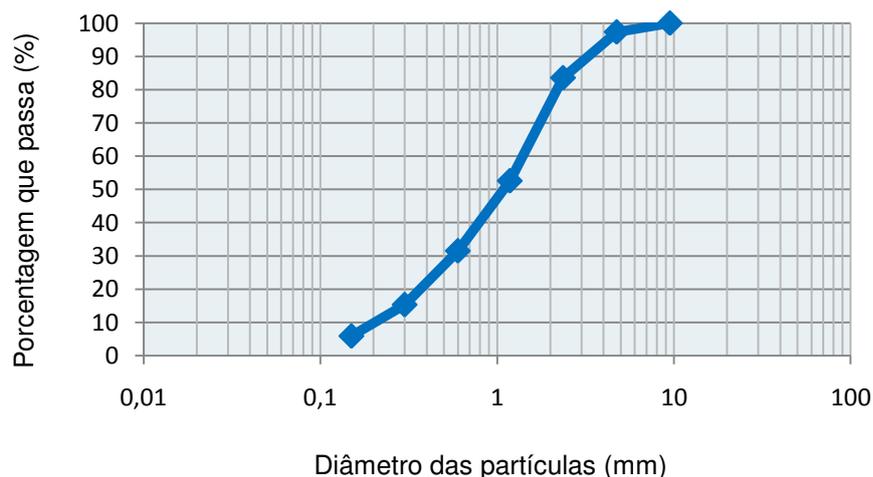


**Fonte:** Gráfico do autor.

#### 4.1.2 Agregado alternativo

A composição granulométrica do resíduo de caulim utilizado nesta pesquisa pode ser observada no Gráfico 2, onde o  $\Phi_{\text{máx}}$  e MF foram 4,75mm e 3,14, respectivamente.

**Gráfico 2** – Distribuição granulométrica do resíduo de caulim.



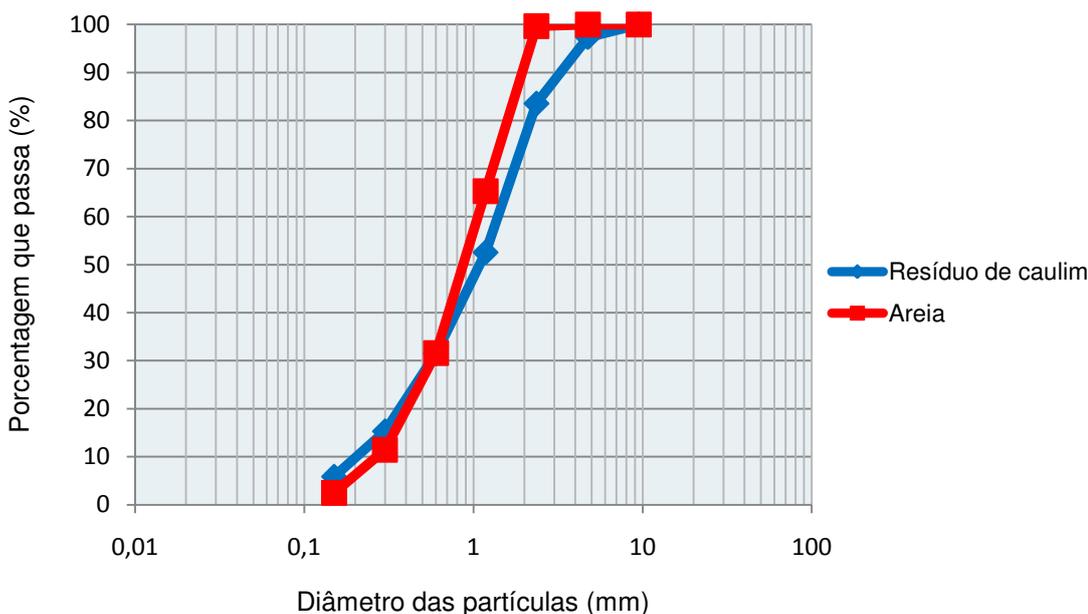
**Fonte:** Gráfico do autor.

De acordo com estudos realizados por Rezende *et al.* (2008), o resíduo de caulim apresenta elevados teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e em menor quantidade de  $\text{K}_2\text{O}$  na

sua composição química, sugerindo que o resíduo é constituído, predominantemente, por quartzo (areia). Já no estudo realizado por Nóbrega (2007), observou-se a presença de caulinita, quartzo, mica e traços de calcita, com predominância de caulinita nas frações mais finas do resíduo, enquanto que o quartzo predominou nas frações mais grosseiras. Os ensaios por Difração de Raios-X para análise mineralógica não foram feitos por falta de equipamentos apropriados.

No Gráfico 3 mostram-se os comparativos entre as distribuições granulométricas da areia e do resíduo de caulim, ensaiadas de acordo com a NBR – 7217 (ABNT, 1987). Ambos apresentam composições bem parecidas, o que indica, do ponto de vista granulométrico, a possibilidade de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado alternativo para fabricação de blocos da construção civil.

**Gráfico 3** – Distribuição granulométrica dos agregados.



**Fonte:** Gráfico do autor.

Resíduos de caulim com características arenosas, com origem na mesma região deste trabalho, foram classificados quanto à periculosidade segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) em um estudo realizado por Rezende *et al.* (2008). Neste estudo, foram feitos os ensaios do extrato lixiviado, verificando-se assim que o resíduo não apresenta características de toxicidade, ou seja, enquadra-se como resíduo da Classe II ou não perigoso. Além disso, também foi realizado o ensaio do

extrato solubilizado, onde se constatou que o resíduo, apesar de não ser tóxico, é não inerte, sendo classificado como Classe IIA. Diante disso, se faz necessário que haja descarte adequado em aterros sanitários para este tipo de resíduo.

Estima-se ainda que a quantidade acumulada de resíduo somente na região produtora do estado da Paraíba seria mais ou menos de 2,6 milhões de toneladas descartadas indiscriminadamente no meio ambiente, o que acarreta enormes prejuízos aos ecossistemas próximos das fábricas de beneficiamento.

## 4.2 DOSAGEM

### 4.2.1 Relação água:cimento

Na Tabela 5 apresentam-se os valores ideais encontrados para relação água:cimento (a/c) com base no teste da mão, como também são identificados os *pavers* produzidos para cada teor de substituição do agregado miúdo por resíduo de caulim.

**Tabela 5** – Identificação dos *pavers* ensaiados (traço 1:6)

Traço (em massa)			Relação a/c	
	Teor de resíduos nas misturas	c : a : r		
<b>Convencional</b>	P0	0%	1 : 6 : 0	0,73
<b>Alternativos</b>	P50	50%	1 : 3 : 3	0,75
	P100	100%	1 : 0 : 6	0,81

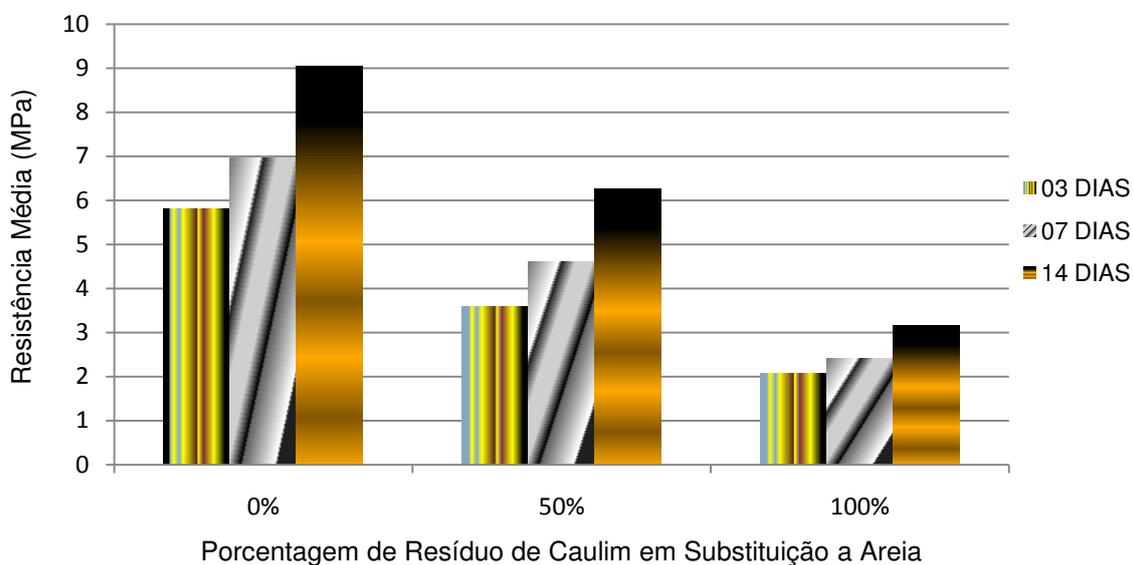
**Fonte:** Tabela do autor. Obs.: **c** = cimento; **m** = total de agregados; **a** = areia; **r** = resíduo de caulim.

## 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS *PAVERS*

Os Gráficos 4 e 5 apresentam os resultados da resistência média e característica dos *pavers*, respectivamente.

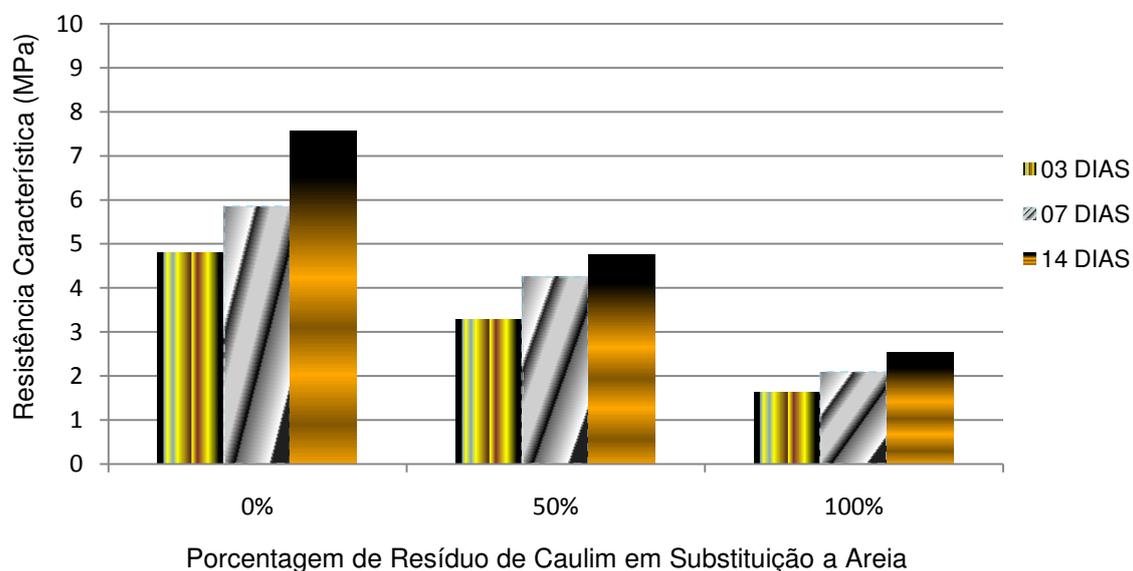
Analisando os Gráficos 4 e 5, observa-se que todas as composições apresentaram aumento da resistência média e característica ao longo do tempo, o que mostra a importância do processo de cura adotado, mantendo assim as reações de hidratação das partículas de cimento.

**Gráfico 4** – Resultados de resistência média dos *pavers*.



**Fonte:** Gráfico do autor.

**Gráfico 5** – Resultados de resistência característica dos *pavers*.



**Fonte:** Gráfico do autor.

Segundo Farias (2006), a água não absorvida durante o processo de cura pelos agregados em substituição participará das reações químicas com o cimento e

irá funcionar como uma espécie de lubrificante para proporcionar maior trabalhabilidade e melhor adensamento dos blocos.

Os resultados indicam um crescente aumento na resistência dos *pavers* em todas as substituições estudadas ao longo do tempo. Isso ocorre em função do aumento da idade de controle, ou seja, os *pavers* quando submetidos ao um tempo maior de cura, tendem a ficar mais maciços. Porém, todas as composições estudadas apresentaram valores abaixo dos 35 MPa, valor estabelecido como mínimo pela norma NBR 9781 (ABNT, 1987) para tráfego de veículos leves.

Observou-se, também, que houve redução de resistência à medida que se tinha uma maior quantidade de resíduo de caulim na mistura. Esta situação pode estar ligada às características do resíduo de caulim, que exigiu uma maior quantidade de água durante a moldagem para se alcançar a chamada trabalhabilidade, como pode ser visto nas relações a/c estabelecidas. Quanto mais água livre estiver na massa, mais poros serão deixados nos *pavers* após a sua evaporação e conseqüentemente, menores resistências poderão ser esperadas.

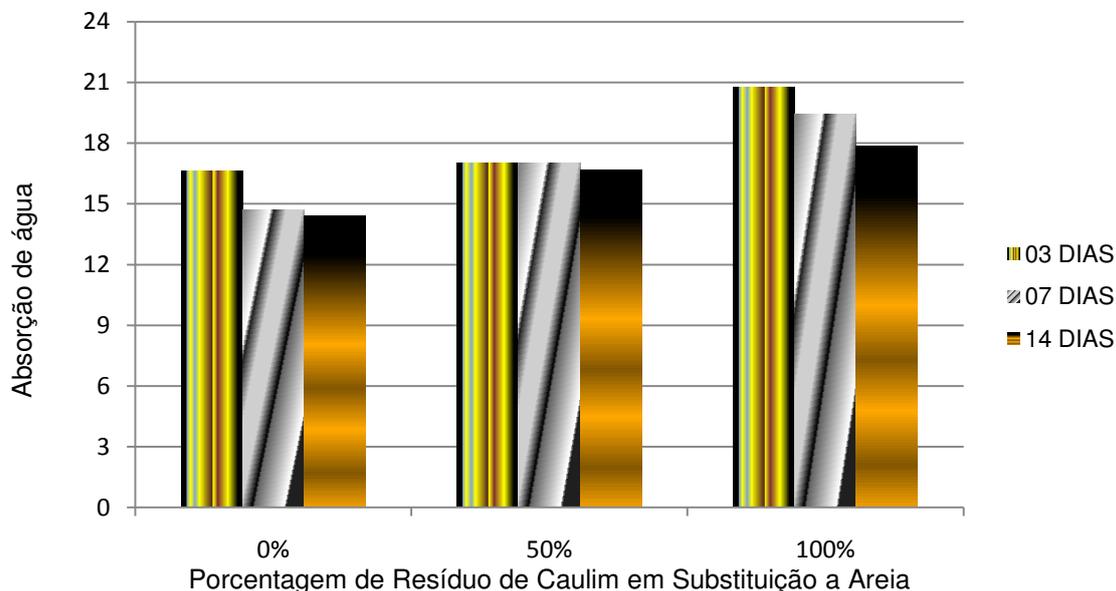
De acordo com Fioriti (2007), a hidratação do concreto juntamente com a relação a/c são elementos determinantes da resistência à compressão. O aumento da idade de hidratação proporciona também uma menor porosidade, ou seja, à medida que o tempo vai passando o sistema tende a ficar mais denso, mais compacto.

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS PAVERS

Esta propriedade avalia a quantidade de poros presente nos blocos, de modo que, quanto maior o volume de espaços vazios, menor será a resistência adquirida pelos *pavers*. Este ensaio foi baseado na norma ABNT – NBR 12118 (2010), no qual os *pavers* foram imersos em água até atingirem suas respectivas idades de controle.

No Gráfico 6 apresenta-se os valores de absorção média dos *pavers* para cada traço e idade de controle estabelecida. Os resultados apontam diminuição da absorção com o passar do tempo, ocasionada pelas reações de hidratação que estão constantemente acontecendo à medida que ocorre o preenchimento dos poros ao longo das idades de controle.

**Gráfico 6** – Resultados de absorção média dos *pavers*.



**Fonte:** Gráfico do autor.

Porém, verifica-se que os resultados para todas as composições estudadas foram superiores ao estabelecido pela norma NBR 12118 (2010), onde o seu limite máximo de absorção é de 10%. Pode-se atribuir esses resultados a forma de moldagem dos *pavers*, um processo manual e bastante deficiente nos quesitos vibração e prensagem mecânica.

Os *pavers* com 100% de resíduo de caulim apresentaram os valores mais elevados. Tal fato pode ser explicado em virtude da alta relação a/c necessária para obter a trabalhabilidade da massa, proporcionando dessa forma uma maior quantidade de espaços vazios e acarretando em prejuízos nas suas propriedades físicas e mecânicas.

Rezende et al (2008) analisaram o comportamento de blocos de vedação com a utilização de resíduos de caulim em substituição ao agregado miúdo natural e verificaram que a incorporação do resíduo provoca um leve aumento na absorção de água. Este aumento pode está associado ao menor estado de adensamento das partículas. Valores entre 40% e 70% de resíduos em substituição a areia não apresentaram grandes alterações na absorção dos blocos. Esse resultado mostra a

viabilidade e a necessidade de testes com a substituição da areia por resíduo de caulim em outras proporções.

Fioriti (2007) concluiu que o uso de resíduos de pneus em substituição ao agregado natural não altera de forma significativa a absorção de água no concreto. Para isso, ele se baseou em algumas dosagens que apresentaram valores dentro das especificações internacionais e nacionais para pavimentos. Em alguns casos, os resultados da absorção dos *pavers* com resíduos de pneus foram menores que os *pavers* de controle, indicando que a presença de outros agregados pode não acarretar aumento dessa propriedade.

## 5 CONCLUSÕES

As principais conclusões que podem ser aqui explicitadas são referentes aos resultados obtidos durante a execução do plano experimental proposto. Para tal, foram feitas as discussões com base na literatura especializada, com intuito de averiguar da melhor forma possível as condições enfrentadas para realização deste trabalho.

Esta pesquisa buscou avaliar o desempenho de *pavers* para pavimento intertravado de baixa intensidade de sobrecargas, fabricados com diferentes teores de incorporação de resíduos provenientes do beneficiamento de caulim.

Os *pavers* avaliados apresentaram valores de resistência média e característica inferiores aos estimados pela norma NBR – 9781 (1987), que estabelece limite mínimo de 35 MPa para tráfego de veículos leves. Cabe aqui ressaltar que a norma não trata de tráfego com menor sobrecarga, como praças, calçadas, passarelas, entre outros. A normalização internacional avalia até 15 MPa para tráfego de pedestres em situações que exigem um menor esforço na direção do pavimento.

Apesar de não terem sido alcançados valores de resistência da ordem de 15 MPa, os resultados obtidos neste trabalho são promissores, principalmente quando deve-se levar em consideração que a moldagem dos *pavers* foi realizada de forma manual, sem os benefícios da vibração e prensagem. A moldagem manual não contribui para um melhor adensamento das partículas, de modo que os espaços

vazios promovem uma maior absorção de água e conseqüentemente prejuízos na resistência à compressão simples.

Os resultados de absorção foram superiores em todas as composições estudadas ao limite máximo de 10% estabelecido pela NBR – 12118 (ABNT, 2010). Este resultado foi, provavelmente, também influenciado pelo modo manual de moldagem. É importante ressaltar que outras normas brasileiras permitem valores de absorção entre 8 e 25%. No caso de *pavers* para calçadas e praças, valores altos de absorção chegam a ser desejados, pois propiciam uma maior capacidade de infiltração e aliviam problemas provocados por escoamentos superficiais durante o período de chuvas.

Deve-se observar que os traços cimento: agregados adotados nesse trabalho, o traço em massa 1:6, não é considerado um traço forte, sendo normalmente utilizado para funções não estruturais. Diante disso, os resultados de absorção e resistência à compressão simples poderiam ainda ser bastante melhorados por meio do uso de traços mais fortes, como os traços 1:4 ou 1:3, e/ou com a adição de agregados graúdos, como a brita.

Este estudo revela o potencial do uso do resíduo de caulim como substituto ao agregado miúdo natural para fabricação de *pavers*, amenizando problemas ambientais, sociais e econômicos. Ao mesmo tempo em que mostra tal potencial, este trabalho sugere que outros estudos devem ser conduzidos com outras avaliações considerando várias proporções do resíduo de caulim em substituição aos agregados naturais e com outras dosagens e idades de controle.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9780:** Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR.** 2011. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

ANJOS, C. M. dos. **Utilização de resíduos de caulim em tijolos de solo-cal.** 2011. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei 12305, 02 de agosto de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.** Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. de 2010.

BRASIL. Política Nacional do Meio Ambiente. Lei 6938, de 31 de agosto de 1981. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.** Poder Executivo, Brasília, DF, 02 set. de 1981.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 17 fev. de 1986. Seção 1, p. 2548-2549.

CABRAL, Eduardo da Silva *et al.* Impactos ambientais: uma abordagem das atividades de beneficiamento de caulim na região Borborema/Seridó da Paraíba. **Enciclopédia Biosfera** – Centro científico conhecer. Goiânia, vol. 5, n.8, 2009.

CASTRO, S. F. **Incorporação de resíduos de caulim em solo-cimento para construções civis**. 2008. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. 228f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Balanço Mineral Brasileiro 2001**. Disponível em:<<http://www.dnrm.gov.br>> acesso em 06 Nov. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Economia Mineral do Brasil 2009**. Disponível em:<<http://www.dnrm.gov.br>> acesso em 21 Nov. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2012**. Disponível em:<<http://www.dnrm.gov.br>> acesso em 10 Jan. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Informe Mineral 2012**. Disponível em:<<http://www.dnrm.gov.br>> acesso em 11 Jan. 2013.

FARIAS, C. A. S. de. **Uso de redes neurais artificiais na determinação de dosagens para produção de blocos de concreto com resíduos da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

HOOD, R. da S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MENEZES, R. R. et al. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. **Revista Matéria**, v. 12, n. 1, p. 226-236, 2007.

NÓBREGA, A. F. da. **Potencial do aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulho da construção civil.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

REZENDE, Maria Luiza de S. *et al.* Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. **Revista Escola de Minas – REM.** Ouro Preto, p. 285-290, 2008.