

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**RESISTÊNCIA, DENSIDADE E DESEMPENHO TERMO-ACÚSTICO DO**  
**CONCRETO COM ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)**  
**APLICADO ÀS CONSTRUÇÕES**

**PAULO SÉRGIO WOLFF**

**CASCADEL – Paraná – Brasil**

**Julho – 2008**

**PAULO SÉRGIO WOLFF**

**RESISTÊNCIA, DENSIDADE E DESEMPENHO TERMO-ACÚSTICO DO  
CONCRETO COM ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)  
APLICADO ÀS CONSTRUÇÕES**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

**CASCADEL – Paraná – Brasil**

**Julho – 2008**

### Ficha catalográfica

Elaborada pela Biblioteca Central do Campus de Cascavel - Unioeste

W849u	Wolff, Paulo Sérgio
	Resistência, densidade e desempenho termo-acústico do concreto com espuma de poliestireno expandido (EPS) aplicado às construções /Paulo Sérgio Wolff — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2008.
	141 f. ; 30 cm
	Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Bibliografia.
	1. Conforto ambiental. 2. Eficiência energética. 3. Meio ambiente. I. Souza, Samuel Nelson Melegari de. II. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. III. Título.
	CDD 21ed. 333.79

Bibliotecária: Jeanine da Silva Barros CRB 9/1362

**PAULO SÉRGIO WOLFF**

**RESISTÊNCIA, DENSIDADE E DESEMPENHO TERMO-ACÚSTICO DO  
CONCRETO COM ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)  
APLICADO ÀS CONSTRUÇÕES**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais, aprovada pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Eng<sup>o</sup> Dr. Luciano Jorge de Andrade Junior  
Comil Silos e Secadores Ltda. – Comil

Prof<sup>o</sup>. Dr. Antônio Gabriel Filho  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof<sup>o</sup>. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 24 de Julho de 2008.

Dedico

Aos meus familiares e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a todos os seus filhos, que nos ajudaram a realizar o presente trabalho.

A todos,  
**MUITO OBRIGADO!**

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 A Construção Civil e a Questão Ambiental.....	4
2.2 Construções Rurais .....	9
2.3 Concreto .....	13
2.4 Componentes do Concreto .....	14
2.5 Tipos de concretos .....	15
2.5.1 As principais vantagens do concreto .....	15
2.5.2 As principais desvantagens do concreto .....	16
2.5.3 Resistência do concreto .....	16
2.5.4 Produção do concreto.....	18
2.6 Concreto Leve.....	19
2.7 Concretos com Agregados Leves.....	22
2.8 Espuma de Poliestireno Expandido .....	24
2.8.1 Aplicações da espuma de poliestireno expandido.....	25
2.8.2 Principais características poliestireno expandido.....	25
2.9 Concreto com Espuma de Poliestireno Expandido.....	28
2.10 Desempenho Térmico.....	31
2.10.1 Temperatura e calor.....	33
2.10.2 Condutividade térmica (k).....	35
2.10.3 Capacidade térmica – Calor específico .....	36
2.10.4 Difusividade térmica ( $\alpha$ ).....	36
2.10.5 Resistência térmica (Rt).....	37
2.10.6 Inércia térmica .....	38
2.11 Arquitetura Bioclimática .....	39

2.12	Princípios de Transferência de Calor .....	39
2.12.1	Mecanismos de trocas térmicas.....	39
2.12.2	Trocas térmicas secas .....	40
2.12.3	Convecção .....	41
2.12.4	Radiação.....	43
2.12.5	Condução.....	44
2.12.6	Transferência de calor (carga térmica).....	47
2.13	Proteção Térmica de Fechamentos Verticais .....	48
2.14	Avaliação Acústica.....	51
2.14.1	Ondas físicas .....	51
2.14.2	Produção do som.....	57
2.14.3	Transmissão do som.....	59
2.14.4	Fenômenos sonoros .....	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	63
3.1	Caracterização dos Materiais .....	63
3.1.1	Areia (agregado miúdo) .....	63
3.1.2	Brita (agregado graúdo).....	65
3.1.3	Cimento.....	65
3.1.4	Espuma de Poliestireno Expandido (EPS).....	66
3.1.4.1	Granulometria .....	66
3.1.4.2	Módulo de finura .....	67
3.1.4.3	Massa específica .....	68
3.1.4.4	Massa unitária .....	68
3.1.5	Impurezas .....	68
3.2	Dosagem do Concreto Leve .....	69
3.3	Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Densidade .....	70
3.4	Placas de Concreto para Avaliações Térmica e Acústica .....	71
3.5	Montagem do Aparato Experimental para Avaliação Térmica.....	71
3.6	Aparato Experimental para Avaliação Acústica.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
4.1	Consistência no Estado Fresco .....	77
4.2	Densidade no Estado Endurecido .....	79
4.3	Resistência à Compressão no Estado Endurecido.....	80

4.4	Desempenho Térmico.....	84
4.5	Desempenho Acústico .....	90
5	CONCLUSÕES .....	94
6	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	96
	REFERÊNCIAS.....	97
	ANEXOS .....	103
	ANEXO A - ANÁLISE ESTATÍSTICA – RESISTÊNCIA E DENSIDADE .....	104
	ANEXO B - ANÁLISE ESTATÍSTICA – TÉRMICA.....	110

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação dos resíduos sólidos – NBR 10004/87 .....	9
<b>Tabela 2</b> - Comparativo das propriedades térmicas dos concretos leve e convencional.....	31
<b>Tabela 3</b> - Materiais isolantes mais usados na construção e em instalações térmicas a 300 K (27°C).....	49
<b>Tabela 4</b> - Propriedades termofísicas de materiais comuns a 300 K (27°C)	49
<b>Tabela 5</b> - Comparativo entre isolantes e tijolo comum .....	50
<b>Tabela 6</b> - Distribuição granulométrica da areia - NBR 7217/87 .....	64
<b>Tabela 7</b> - Caracterização física da areia .....	64
<b>Tabela 8</b> - Caracterização física da brita .....	65
<b>Tabela 9</b> - Composição do cimento Portland CII Z-32.....	65
<b>Tabela 10</b> - Exigências físicas e mecânicas do cimento Portland CII Z-32 ..	65
<b>Tabela 11</b> - Granulometria do material espuma de poliestireno expandido....	67
<b>Tabela 12</b> - Caracterização do diâmetro máximo, diâmetro mínimo e módulo de finura da espuma de poliestireno expandido .....	67
<b>Tabela 13</b> - Composições dos concretos preparados.....	70
<b>Tabela 14</b> - Níveis de decibéis relacionados aos sons do dia a dia .....	76
<b>Tabela 15</b> - <i>Slump</i> teste .....	77
<b>Tabela 16</b> - Densidade da EPS.....	79
<b>Tabela 17</b> - Comparação de médias da densidade (idade) - Tukey .....	80
<b>Tabela 18</b> - Comparação de médias da densidade (teor de EPS) - Tukey.....	80
<b>Tabela 19</b> - Resistência à compressão.....	81
<b>Tabela 20</b> - Médias da resistência à compressão.....	82
<b>Tabela 21</b> - Comparação de médias – Tukey - Resistência .....	82
<b>Tabela 22</b> - Diferença entre as temperaturas das faces interna e externa (T2 e T3, respectivamente), em °C, para valores de T1 propostos .....	88

<b>Tabela 23</b> - Valores absolutos e percentuais determinados para a temperatura na face interna das placas de concreto.....	89
<b>Tabela 24</b> - Densidades médias das placas de concreto .....	90
<b>Tabela 25</b> - Médias das medições acústicas no exterior, interior, passagem e retenção pela placa de estudos, conforme os teores de substituição.....	91

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> -	Representação do comprimento de onda. ....	52
<b>Figura 2</b> -	Representação da produção de uma onda sonora.....	57
<b>Figura 3</b> -	Procedimentos para a captação do som pelo ser humano. ....	58
<b>Figura 4</b> -	Freqüências de ondas sonoras. ....	59
<b>Figura 5</b> -	Representação gráfica do eco. ....	60
<b>Figura 6</b> -	Representação do sonar.....	61
<b>Figura 7</b> -	Caixa térmica e fonte de calor radiante. ....	73
<b>Figura 8</b> -	Teste dos componentes elétricos. ....	73
<b>Figura 9</b> -	Equipamento utilizado para coleta dos dados de temperaturas dos termopares. ....	74
<b>Figura 10</b> -	Visualização da posição dos decibelímetros, interno e externo e da caixa sem a placa de concreto e com a placa de concreto como tampa. ....	75
<b>Figura 11</b> -	Corpo-de-prova com 100% de EPS.....	78
<b>Figura 12</b> -	Resistência à compressão x idade (dias). ....	83
<b>Figura 13</b> -	Temperaturas médias das placas de concreto referência com 0% de espuma de poliestireno expandido. ....	85
<b>Figura 14</b> -	Temperaturas médias das placas de concreto com 25% de espuma de poliestireno expandido. ....	85
<b>Figura 15</b> -	Temperaturas médias das placas de concreto com 50% de espuma de poliestireno expandido. ....	86
<b>Figura 16</b> -	Temperaturas médias das placas de concreto com 75% de espuma de poliestireno expandido. ....	86
<b>Figura 17</b> -	Temperaturas médias das placas de concreto com 100% de espuma de poliestireno expandido. ....	87
<b>Figura 18</b> -	Ilustração esquemática da metodologia proposta para análise dos resultados. ....	88
<b>Figura 19</b> -	Placas de EPS x retenção, em % para a banda A.....	92

**Figura 20** - Placas de EPS x retenção, em % para a banda C.....92

## RESUMO

O uso de embalagens de poliestireno expandido (EPS) tem contribuído para a produção de resíduos sólidos no meio rural e urbano, gerando impactos ambientais consideráveis, por seu descartado na natureza ou em lixões, pois esse material demora, aproximadamente, cem anos para se degradar. Uma das soluções é o uso desse resíduo como agregado no concreto, tendo como resultado o concreto leve, reduzindo o consumo de recursos naturais e danos ambientais. O concreto leve pode ser aplicado em construções rurais, principalmente em instalações para animais, câmaras frias, climatização de silos, armazéns e depósitos para grãos. Neste trabalho, verificou-se a viabilidade da utilização de EPS como material alternativo para confecção de concreto, com substituição parcial do agregado graúdo, que pode ser utilizado em elementos construtivos urbanos e rurais. Utilizou-se EPS reaproveitada na forma de flocos, para produção de concreto leve. Os experimentos foram realizados sistematicamente com amostras na forma de corpos de prova cilíndricos e placas de concreto com 28 dias de idade. Os teores de substituição da brita por EPS foram de 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100% em volume, como base para realizar as análises de densidade e resistência aos 7, 14, 21 e 28 dias, de acordo com as normas da ABNT. Verificou-se que as placas ensaiadas apresentaram uma redução de transferência de calor de até 30% e redução de propagação de som de até 25% e, em relação à densidade, verificou-se uma redução de até 30%, possibilitando o uso de um concreto leve nas construções, tornando a sua estrutura leve e trazendo economia no seu dimensionamento. Por outro lado, ocorreu uma diminuição da resistência a partir de certo teor de EPS, fazendo com que o uso tenha maior aplicação como elemento de vedação sem fins estruturais. A substituição da brita pelo EPS, gradativamente, produz um concreto leve devido ao acréscimo do número de vazios, o que possibilita um material isolante térmico e acústico. Uma consequência direta do uso do concreto leve é a redução do consumo de energia elétrica utilizada pelos sistemas de climatização, não comprometendo o conforto térmico e acústico das edificações. Destaca-se, ainda, que o reaproveitamento do descarte industrial e de embalagens do EPS, como material alternativo de construção contribui para a redução dos problemas ambientais causados pelos materiais utilizados na fabricação do concreto.

**Palavras-chave:** conforto ambiental, eficiência energética, meio ambiente.

## ABSTRACT

### RESISTANCE, DENSITY AND THERMAL-ACOUSTIC PERFORMANCE OF CONCRETE WITH FOAM FROM EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) APPLIED TO BUILDINGS

The use of expanded polystyrene (EPS) packing has contributed for the production of solid residues in the agricultural and urban environments. This leads to a considerable amount of ambient impact, since same is discarded in garbage deposits, leading approximately one hundred years to degrade. One alternative to solve this problem is the use of this residue as aggregate in concrete, having as final product the light concrete, reducing the consumption of natural resources and ambient damages. The light concrete can be applied in the agricultural constructions, mainly in installations for animals, cold chambers, and climatization of silos, warehouses and deposits for grains. In this work it was verified the viability of use of an alternative material for concrete production, with partial substitution of the coarse aggregate, which can be used in urban and agricultural constructive elements. Reused EPS in the form of flakes was employed for production of light concrete. The experiments had been systematically carried through with cylindrical specimens and concrete plates after 28 days of curing. The rate of substitution of the coarse aggregate by EPS had been of 0% (reference), 25%, 50%, 75% and 100% in volume, as base to carry through the analyzes of density and strength corresponding to 7, 14, 21 and 28 days of curing, in accordance to ABNT's standards. It was verified that the assayed plates had presented a heat transfer reduction of up to 30% and reduction of sound propagation of up to 25%. With regard to the density, it was verified a reduction of up to 30%, generating a light concrete, making the structure lighter and bringing economy in the sizing of the structure. On the other hand, a reduction of the resistance from a certain content of EPS occurred, restricting the use of such concrete to closing, non-structural, elements. The substitution of the coarse aggregate by EPS gradually produces a lighter concrete due to the addition of voids, what it made possible to obtain a thermal and acoustic isolating material. A direct consequence of the use of the light concrete is the reduction of the consumption of electric energy used by the climatization systems, not compromising the thermal and acoustic comfort in the urban and agricultural constructions. Besides the reuse of the industrial discarding and EPS packing as alternative materials of construction, it must be detached the reduction of the ambient problems caused by the materials used in the concrete production.

**Keywords:** environmental comfort, energy efficiency, environment.

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação do meio ambiente, principalmente no que se refere à disposição final dos resíduos gerados pelos diversos setores da indústria e do comércio, tem sido crescente. Atualmente, várias empresas investem cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar ou minimizar a cultura do desperdício e consolidar uma cultura de redução de perdas e reciclagem de resíduos. Não só porque esses resíduos provoquem impactos negativos, como porque a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos.

A construção civil é um dos setores que provoca o maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria prima e recursos naturais que são extraídos do meio ambiente.

Neste contexto, tem aumentado o interesse pela reciclagem de resíduos diversos, como a espuma de poliestireno expandido, considerado um dos “vilões” do lixo, porque ocupa muito espaço nos aterros sanitários.

Os produtos finais de espuma de poliestireno expandido podem ser reciclados e transformados novamente em matéria-prima, inclusive na indústria da construção civil para a confecção de concreto, sendo utilizados como agregado leve substituindo, total ou parcialmente, os agregados graúdos.

O concreto com agregados leves tem sido utilizado desde o início do século 20, para fins estruturais e de vedação, com excelentes resultados. No entanto, a utilização de espuma de poliestireno expandido, necessita de informações sobre o seu comportamento térmico, acústico e resistência.

O concreto leve de espuma de poliestireno expandido é do tipo cimento/areia, que utiliza a espuma de poliestireno expandido moído no lugar da pedra britada. A mistura cimento/areia se solidifica envolvendo as partículas da espuma de poliestireno expandido, proporcionando um concreto

de baixa densidade aparente, bom desempenho térmico e acústico, proporcionando conforto com eficiência energética nas construções urbanas e rurais, destinadas ao uso de pessoas e de animais, principalmente como elemento de vedação em função da perda de resistência.

As construções rurais necessitam que sejam desenvolvidas tecnologias, relacionadas com a área agrônômica e veterinária, que permitam aumentar a produtividade, com base em estudos que tragam melhor desempenho no beneficiamento e armazenagem de seus produtos pela climatização de silos, depósitos, armazéns, graneleiros, câmaras frias e de instalações adequadas para animais, devendo adotar a definição do melhor material construtivo (convencional ou alternativo) a ser utilizado nas edificações, principalmente com relação ao conforto térmico e acústico, além da análise estrutural com dimensionamento adequado das construções, visando diminuir o impacto ambiental.

Segundo Rossignolo (2003), existe uma tendência mundial crescente, baseada em critérios econômicos e técnicos do uso de concreto leve com a finalidade estrutural e de vedação. Entretanto, esse tipo de concreto encontra pouca aplicação no Brasil e, atualmente, há pouca informação disponível sobre as propriedades dos concretos com agregados leves.

O estudo de alternativas que permitam reduzir o consumo de materiais naturais, agregados minerais, reutilização, reaproveitamento do que for possível pela trituração do descarte de isopor pelas indústrias em geral e, em última instância, reciclar, caso seja conveniente. Deverá trazer benefícios na conservação ambiental, promovendo a preservação da natureza.

Este estudo e o levantamento de dados podem subsidiar também profissionais da área de arquitetura e da engenharia, para projetarem obras com maior conforto interno, maior eficiência energética e menor custo, devido à redução da massa específica que estes agregados proporcionam, minimizando os carregamentos atuantes nas estruturas.

O desenvolvimento de tecnologias construtivas voltadas para o conforto humano e dos animais nos sistemas agropecuários proporcionará melhorias da ambiência nas construções rurais.

Esta pesquisa teve como objetivo geral: verificar a influência da adição de diferentes teores na substituição, parcial ou total, do agregado graúdo por espuma de poliestireno expandido, no que se refere à resistência a compressão do concreto, densidade e desempenho termo-acústico do concreto, e, como objetivos específicos: aplicar a metodologia do concreto para misturas com isopor; definir e realizar ensaios que possam avaliar o concreto leve no que se refere às características de resistência e de densidade; avaliar o conforto interno das obras de engenharia no aspecto térmico e acústico; possibilitar a reutilização do resíduo da indústria em geral; aplicação nas construções rurais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Construção Civil e a Questão Ambiental

A indústria da construção civil vem, ao longo dos anos, aprimorando suas técnicas construtivas e caminhando paralelamente com o avanço tecnológico que hoje está espalhado pelo mundo. Essa mesma indústria que cresce e se aprimora, está às voltas com problemas tão grandes quanto seu crescimento. Um dos questionamentos que se faz é: o que será da construção civil sem os recursos naturais? A princípio, tidos como inesgotáveis e renováveis, uma vez que sua exploração, excessiva e indiscriminada, tem causado graves problemas ambientais, utilizando entre 14% e 50% dos recursos naturais que são extraídos do meio ambiente (JOHN, 2001).

Sendo o setor da construção grande consumidor dos recursos naturais não renováveis. Os agregados naturais estão entre os minerais mais consumidos no Brasil (380,6 x 10 t/ano) e no mundo. As áreas degradadas pela extração e transporte intensivo para distribuição em obras trazem significativos impactos ambientais. Na cidade de São Paulo, para distribuição de areia natural nas obras estima-se que sejam feitas, aproximadamente, 1,35 milhões de viagens /ano (ÂNGULO *et al.*, 2003).

A cadeia produtiva da construção civil é responsável por grandes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo, que vai desde a extração, produção de materiais, construção e uso até a demolição. A redução do impacto ambiental dessa indústria não é uma tarefa das mais fáceis, sendo necessárias ações em várias áreas e, de forma concomitante, para que seja possível obter algum resultado positivo, devendo, portanto: minimizar o consumo dos recursos e maximizar a reutilização de recursos; usar recursos renováveis ou recicláveis; proteger o meio ambiente; criar um ambiente

saudável e não tóxico e buscar a qualidade na criação do ambiente construído (JOHN, 2001).

Conforme Bezerra (2003), em virtude do mercado da construção civil estar cada dia mais competitivo e exigir maior precisão, segurança, confiabilidade e redução dos custos na execução de uma obra, são necessários estudos e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais mais versáteis em todas as etapas construtivas de uma edificação, a fim de minimizar o impacto ambiental. Nas últimas décadas, têm sido grandes os esforços dos pesquisadores na busca por mais informações e conhecimentos sobre como será possível continuar promovendo o desenvolvimento das cidades sem que isto ocorra de forma agressiva ao meio ambiente.

A necessidade de reciclar resíduos industriais também tem motivado pesquisas, visando minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos, desenvolvendo-se aplicações apropriadas a eles. A produção anual de cimento gera, aproximadamente, 7,9% de toda a emissão de CO<sub>2</sub> no mundo inteiro, sendo que metade disto resulta da calcinação do calcário e o restante provém do uso de combustíveis fósseis na produção do clínquer. No momento que, em debates internacionais, países desenvolvidos e subdesenvolvidos se reúnem para discutirem formas de redução de emissão de poluentes ambientais, a utilização de resíduos industriais como matérias-primas assume papel cada vez mais importante na aplicação de medidas sustentáveis (RESCHKE *et al.*, 2005).

Um dos principais problemas que afetam a qualidade de vida nos grandes centros urbanos é o volume de resíduos gerados diariamente. Os aspectos técnicos e científicos envolvidos nesta questão assumem importância significativa para a minimização dos problemas ambientais. Atualmente, os resíduos de atividades urbanas e industriais constituem um dos maiores problemas para as empresas e para a administração pública, pois o gerenciamento correto destes resíduos exige custos elevados. Nas grandes cidades o problema é ainda mais grave, devido à quantidade de resíduos gerados e à falta de áreas adequadas, próximas e disponíveis para deposição desses materiais (CASSA, CARNEIRO & BRUM, 2001).

Para Dantas Filho (2004), a preocupação com o grave problema da geração de resíduos na indústria em geral vem, cada vez mais, despertando a conscientização da necessidade de realização de estudos com vistas ao melhoramento do ciclo de produção e adequação da destinação dos resíduos gerados.

O estudo de alternativas que permitam reduzir o consumo de materiais naturais, agregados minerais, reutilização, reaproveitamento do que for possível pela trituração do descarte dos resíduos gerados pelas indústrias em geral e, somente em último caso, reciclar, caso seja conveniente. Deverá trazer benefícios na conservação ambiental, promovendo a preservação da natureza.

A produção de resíduos em quantidades cada vez maiores tem exigido soluções mais eficazes e investimentos por parte de seus geradores e da sociedade de uma forma geral.

A qualidade de vida nos grandes centros urbanos é afetada pelo volume de resíduos gerados. Neste sentido, aspectos técnicos e científicos, voltados para este tema, ganham significativa importância para minimizar os problemas ambientais, principalmente para empresas e para a administração pública. O controle e destinação adequados dos resíduos gerados devem ter soluções efetivas e eficazes para assegurar a qualidade do meio ambiente (SIQUEIRA, STRAMARI & FOLGUERAS, 2004).

A construção civil pode ser considerada um grande reciclador de resíduos provenientes de outras indústrias, resíduos como a escória granulada de alto forno, as cinzas volantes, a sílica ativa, entre outros, são incorporados rotineiramente nas construções (CASSA, CARNEIRO & BRUM, 2001).

Os benefícios obtidos com a adição de resíduos no concreto são diversos, entre eles se destacam: a redução do consumo de recursos naturais, redução das áreas de aterro e a redução do efeito de contaminação do meio ambiente pelo descarte indiscriminado de materiais (SANTOS FILHO *et al.*, 2002).

A reciclagem de resíduos também apresenta dois tipos de risco: qualquer inovação tecnológica na construção civil, enfrenta a natureza empírica do conhecimento e a falta de tradição em inovações, além da

exigência de longa durabilidade que implica o inadequado desempenho de muitas novas tecnologias introduzidas no mercado; Aliado a este problema, está a própria reciclagem, de resíduos considerados perigosos (CASSA, CARNEIRO & BRUM, 2001). Tornando de extrema importância a análise cuidadosa da incorporação deste material alternativo, principalmente, evitando conseqüências como a obtenção de materiais com propriedades inferiores e de baixa durabilidade, além da contaminação do meio durante a produção e uso do material, tanto da matéria prima (resíduo), quanto do produto final.

Por definição, reciclagem é reaproveitar um material usado. Filho & Ferreira (1995) observam: “A reciclagem é uma forma muito atrativa de gerenciamento de resíduos, pois transforma o lixo em insumos para a indústria, com diversas vantagens ambientais. Ajuda a poupar valioso espaço do aterro sanitário. Reduz sensivelmente o consumo de energia e contribui para a economia dos recursos naturais e bem-estar da comunidade”. No contexto da reciclagem, a escassez de recursos naturais tem favorecido investigações científicas que possibilitaram reaproveitar resíduos sólidos urbanos.

Segundo Bezerra (2003), a reciclagem e o reaproveitamento de materiais que ainda possuem grande potencial de aplicabilidade são vistos como as soluções mais evidentes em direção ao desenvolvimento sustentável. Materiais como: latas de alumínio, vidros, papel e outros, antes eram vistos única e exclusivamente como simples passivos ambientais, um problema para os grandes centros urbanos do mundo. No entanto, muitos destes materiais têm sido grandemente reaproveitados em diversos segmentos da indústria, contribuindo para minimizar este problema.

Um exemplo do impacto desta política na construção civil é dado por Metha & Monteiro (1994), quando, para avaliar o futuro do concreto, inclui considerações econômicas, energéticas e ambientais. A construção civil é o ramo com melhores resultados na reciclagem de resíduos industriais. Escória de alto forno, cinzas e sílica ativa estão entre os resíduos mais empregados, além de existirem extensas pesquisas sobre outros resíduos. Desse modo, a concorrência no setor tem impulsionado pesquisas por sistemas mais eficientes, o que se traduz por leveza, resistência mecânica e bom

desempenho acústico e térmico. Também se inserem neste contexto, pesquisas realizadas para a reutilização de materiais alternativos em suas atividades. Dentre estes materiais, pode-se citar a espuma de poliestireno expandido.

Segundo Losso & Viveiros (2004), as construções vêm apresentando cada vez mais um acelerado processo de renovação tecnológica de seus componentes: materiais, técnicas e métodos em busca de melhorias no desempenho das edificações de forma a melhor atender às necessidades dos usuários e diminuir os problemas construtivos.

De acordo com Cincotto (1998), estudos desenvolvidos pela *Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux* - RILEM (1994) estabeleceram uma proposta de critério geral de avaliação do resíduo para uso na construção civil, a saber: a quantidade de resíduo disponível deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte; as distâncias de transporte envolvidas devem ser compatíveis com as dos materiais convencionais; o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação ao produto final.

Já a norma brasileira NBR 10004/87 (ABNT, 1987) define os resíduos sólidos como: os resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultem de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, e de serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviáveis o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível.

A Tabela 1 mostra a classificação dos resíduos de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

**Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos – NBR 10004/87**

CLASSIFICAÇÃO	DEFINIÇÃO
Resíduo classe I Perigosos	São aqueles que apresentam periculosidade ou uma das características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.
Resíduo classe II Não-inertes	São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe III, nos termos desta norma. Os resíduos classe II podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
Resíduo classe III Inertes	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo as normas da ABNT (NBR 10007/1987) – Amostragem de resíduos, e submetidos a um estado estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, segundo norma técnica da ABNT (NBR-10006/1987) – Solubilização de resíduos, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões de aspectos, cor, turbidez e sabor.

Segundo o Portal Ambiental (2007), a quantidade de lixo produzida diariamente por um ser humano é de, aproximadamente, 1 Kg e cerca de 35% do lixo que vai para os aterros sanitários é composto por materiais que poderiam ser reciclados ou reutilizados.

Segundo Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (ABRAPEX, 2006), a composição média do lixo Brasileiro é a seguinte: 65% material orgânico, 25% papel, 4% metal, 3% vidro e 3% plásticos. O “isopor” é responsável por fração de 0,1% do lixo total produzido, sendo um dos grandes “vilões” dos aterros sanitários devido ao seu grande volume.

## 2.2 Construções Rurais

Segundo Pereira (1996), construção rural é a parte da engenharia voltada ao fomento das atividades agropecuárias e deve ter projetos que preencham os requisitos de serem simples, higiênicos e econômicos, além de oferecerem conforto ambiental aos seus usuários. O seu campo de aplicação é bastante amplo, visando ao aumento da produtividade por meio de métodos de racionalização da produção, em instalações para animais, armazenamento e

beneficiamento da produção, industrialização e instalações para comercialização dos produtos. Requer por suas características, conhecimentos relacionados com a área agrônômica e veterinária de forma a proporcionar, dentro da técnica, funcionamento o desejável das instalações. As construções rurais devem ser executadas com economia, visando ao funcionamento desejável dentro da técnica, de forma a elaborar projetos voltados à criação de animais, armazenamento e conservação de produtos agropecuários, industrial, rurais, saneamento e irrigação.

Segundo Sartor *et al.* (2004), os criadores de animais vêm intensificando as técnicas de manejo, mudando-os gradualmente do sistema de criação extensivo para o sistema intensivo. Com isso melhoram o controle sanitário, a eficiência da mão-de-obra e o desempenho dos animais em ambiente propício ao seu bem estar. Neste sentido, as instalações apropriadas apresentam um papel fundamental no desempenho dos animais.

Ainda segundo os autores, quando se trata de instalações para animais, a racionalização do empreendimento é obrigatória, pois rentabilidade e aumento da produtividade estão intimamente ligados a instalações bem planejadas e executadas de forma a reduzir os custos de produção e utilizando mão de obra eficiente, boas condições de conforto e salubridade das instalações, que devem atuar no sentido de amenizar as adversidades climáticas, trazendo conforto aos animais e operadores em todas as fases do trabalho agrícola, tornando-os menos árduos e econômicos, promovendo o aumento da produtividade e permitindo a estocagem adequada da produção, de insumos e produtos. O conhecimento das necessidades ambientais dos animais é fundamental na definição das técnicas e dispositivos de construções que maximizem o conforto dos animais.

Com relação ao controle de temperatura para instalações de animais, segundo Pereira (1996), tem-se:

- Aves: são capazes de manter a temperatura do corpo constante dentro de certos limites de variação de temperatura no local que, em condições ideais, deve ser em torno de 16,5°C e seu máximo 27,5°C. Acima desta temperatura nota-se uma diminuição da produtividade das aves, que perdem o apetite, prejudicando, assim,

o ganho de peso. Nos meses de verão, todas as precauções devem ser tomadas para manter o ambiente com temperatura o mais amena possível, assim como as temperaturas elevadas são prejudiciais, às baixas também afetam a produção e a saúde das aves, principalmente, em relação a doenças do aparelho respiratório.

- Coelhos: toleram melhor o frio que o calor. O excesso de umidade os predispõem a contrair doenças. Além da umidade, deve-se evitar ventos frios e constantes.
- Abelhas: as instalações para criação de abelhas costumam ser de dois tipos: ao ar livre ou em pequenos galpões abertos. A cobertura do galpão deve ser isolante nos dias de verão e em locais de ventos fortes abrigo deve ser protegida.
- Bovinos: a produção do leite, principalmente de raças mais exigentes, é influenciada pelos excessos de temperatura. As muito baixas predispõem as vacas a consumirem suas reservas, transformando-as em calorías necessárias ao seu organismo, em detrimento ao rendimento leiteiro. Por outro lado, temperaturas elevadas causam perturbações na fisiologia animal refletindo-se na queda de produção, a faixa ideal de temperatura está entre 15°C e 22°C. Em locais cujas condições climáticas são rigorosas, principalmente no inverno, há necessidade dos estábulos serem fechados. Nessas condições as instalações tornam-se bem mais dispendiosas, porque além do emprego dos materiais comuns de construção são utilizados os de propriedade isolantes como fibra de vidro, cortiça, etc.
- Eqüinos: as condições de aeração e temperatura ambiente para os estábulos aplicam-se também para as cavalariças.
- Suínos: menos protegido contra o frio e a umidade, são mais sensíveis, principalmente à ação de vírus. Temperaturas elevadas, sem ventilação suficiente são bastante prejudiciais para fêmeas e crias.

Segundo Ferreira, Gobo & Cunha (2008), a destinação de resíduos gerados nas atividades agrícolas também é motivo de preocupação para a sustentabilidade das ações que envolvam as questões ecológica, social e econômica. O uso de tecnologias apropriadas nas construções rurais deve considerar a racionalização dos recursos disponíveis, principalmente por meio do uso isolado ou combinado de materiais e técnicas construtivas, convencionais ou não. Neste sentido, visando oferecer alternativas de destinação de resíduos agrícolas, foram desenvolvidos estudos da composição de mistura de resíduos de vegetais (casca de arroz e de braquiária), na fabricação de tijolos utilizados na execução de elementos de vedação, analisando os efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do tijolo de solo-cimento. A terra crua, por ser um material de grande disponibilidade e de baixo custo, tem se mostrado como excelente alternativa técnica e econômica para uso em construções rurais, por meio do resgate de técnicas, como a taipa de mão, a taipa de pilão, o adobe, as paredes monolíticas e, principalmente, sob a forma de tijolos ou blocos prensados. Seu uso isolado ou associado a aditivos químicos e/ou resíduos de atividade agrícola, industrial ou agroindustrial, tais como: cimento, cal, silicato de sódio, cinzas vegetais (da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar), cinzas volantes, escória de alto forno, dentre outros, vem sendo objeto de inúmeras pesquisas com a finalidade de melhorar sua resistência à compressão simples, seu comportamento sob a ação da água e sua durabilidade a longo tempo.

Segundo SILVA *et al.* (1975), não apenas problemas térmicos afetam a produtividade de suínos, mas também o ambiente aéreo e o nível de ruídos, causando alteração, em relação a sua alimentação, atitudes de defesa por meio de mecanismos de vocalização, além de situações que provocam *stress* reduzindo a produtividade da atividade de pecuarista.

## 2.3 Concreto

O concreto é um material de construção utilizado desde o império romano. Era constituído por uma mistura homogênea de aglomerantes, cal, cinza vulcânica, materiais pozolâmicos naturais e água. Atualmente, o concreto simples é constituído de uma mistura de aglomerante (cimento), água e agregados minerais (areia e brita) dosados em proporções adequadas, para que tenha as propriedades necessárias e exigidas para uso em obras de engenharia (NEVES & SPERANDIO NETO, 1999).

As principais propriedades do concreto são:

- No estado fresco deve possuir trabalhabilidade, plasticidade e coesão dos materiais adequados para ser transportado, lançado e adensado, sem ocorrência de segregação;
- No estado endurecido deve possuir resistência mecânica, durabilidade, densidade, conforto termo-acústico, estética, etc., determinadas pelas especificações do projeto;
- Tanto no estado fresco como endurecido, deve possuir o menor custo possível, para que a obra seja viável economicamente, em relação a outros materiais alternativos para sua execução.

Segundo Bauer (1987), a qualidade dos materiais empregados irá depender da solidez, durabilidade, custo e acabamento de uma obra. Uma parede pode ser feita com diferentes materiais, mas cada um corresponderá a diferentes qualidades e aparências. Por esta razão, o projetista deve conhecer os materiais ao seu dispor. As qualidades dos materiais podem ser estabelecidas pela observação continuada, pela experiência adquirida ou por ensaios em laboratórios especializados.

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas e fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água (METHA & MONTEIRO 1994). Definem aglomerantes hidráulicos como, aqueles que

não só endurecem por meio de reações com água, como também formam um produto resistente à água.

A esse meio contínuo aglomerante, ao qual se referem Metha & Monteiro (1994), denomina-se pasta. A pasta é a mistura de um material aglomerante – geralmente cimento Portland – com água. O aglomerante é um material com propriedades aglutinantes que geralmente se apresenta sob a forma pulverulenta. A pasta tem as funções de: dar impermeabilidade e trabalhabilidade ao concreto; envolver os grãos e preencher os vazios entre os grãos.

Para os estes autores, cimento é um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, mas que desenvolve propriedades ligantes, como resultado de hidratação, isto é, de reações químicas entre os minerais do cimento e água. O cimento Portland e suas várias modificações são os principais cimentos usados hoje em dia para a produção de concreto estrutural.

Concreto de cimento Portland é o material resultante da mistura, em determinadas proporções, de um aglomerante (cimento Portland), com um agregado miúdo, geralmente areia lavada e um agregado graúdo, geralmente brita e água. Pode-se ainda, se necessário, usar aditivos.

## **2.4 Componentes do Concreto**

Segundo Oliveira & Rachid (1999), o concreto é composto de:

- Aglomerante: material ativo, usualmente empregado é o cimento Portland, embora também possam ser utilizados outros tipos de cimento;
- Água;
- Aglomerados: materiais inertes, os quais são classificados em agregados miúdos (areia e pó de pedra) e agregados graúdos (brita e pedregulho);

- Aditivos: cuja função pode ser plastificante, retardadora ou aceleradora de pega, impermeabilizante, incorporador de ar, etc.

De modo sintético, as misturas dos materiais constituintes do concreto podem ser assim designadas:

- Pasta: cimento + água;
- Argamassa: pasta + agregado miúdo;
- Concreto: argamassa + agregado graúdo.

## **2.5 Tipos de concretos**

De acordo com Oliveira & Rachid (1999) vários tipos de concreto são utilizados nas construções, variando conforme sua classificação.

- Por composição: concreto simples, concreto armado, concreto protendido, concreto magro, concreto ciclópico, concreto com aditivos, concreto asfáltico, etc;
- Por massa específica: concreto leve, concreto normal, concreto pesado;
- Por processo: concreto misturado no local, concreto pré-misturado (usinado), concreto bombeado, concreto celular, concreto pré-moldado, concreto pré-fabricado, concreto aparente.
- Por destinação: concreto estrutural, concreto massa (em barragens), concreto de alta resistência;
- Por tipo de cura: concreto de cura normal, concreto curado a vapor;
- Por propriedade: concreto de cor normal, concreto colorido;
- Por consistência: concreto de consistência seca, média e fluida.

### **2.5.1 As principais vantagens do concreto**

Conforme Oliveira & Rachid (1999), as principais vantagens do concreto são:

- Alta durabilidade;
- Resistência ao fogo, às influências atmosféricas e ao desgaste mecânico;
- Boa trabalhabilidade;
- Boa impermeabilidade, sendo muito usado para obras hidráulicas.

### **2.5.2 As principais desvantagens do concreto**

Segundo Oliveira & Rachid (1999), as principais desvantagens do concreto são:

- Possui alta densidade;
- Requer a utilização de formas;
- Exige tempo de cura.

### **2.5.3 Resistência do concreto**

Segundo Oliveira & Rachid (1999), a resistência do concreto depende destes três fatores básicos:

- Resistência do agregado;
- Resistência da pasta;
- Resistência da ligação entre a pasta e o agregado.

Entretanto, para obter-se um conjunto monolítico e resistente, é indispensável produzir corretamente o concreto.

Como pelo menos três quartas partes do volume do concreto são ocupadas pelos agregados, não surpreende que a sua qualidade seja de importância considerável. O agregado pode influenciar a resistência do concreto, pois contendo propriedades indesejáveis, podem produzir um

concreto pouco resistente e comprometer a sua durabilidade e o seu desempenho estrutural (NEVILLE, 1997).

O agregado graúdo é usado para descrever partículas maiores do que 4,8 mm, e o termo agregado miúdo é usado para partículas menores do que 4,8 mm. Tipicamente, os agregados miúdos contêm partículas que variam, em dimensões, de 75  $\mu\text{m}$  a 4,8 mm, e os agregados graúdos de 4,8 mm até 50 mm, exceto para concreto massa (ciclópico), que pode conter agregados graúdos de até 150 mm (METHA & MONTEIRO, 1994).

O agregado, quando misturado ao cimento e à água para a confecção de concreto, é chamado material inerte e, sendo assim, tem como função principal o preenchimento dos vazios da mistura. As características destes agregados influenciam nas diversas propriedades do estado fresco e endurecido do concreto, como: consistência, coesão, trabalhabilidade, resistência mecânica, comportamento térmico e acústico, entre outras (FERREIRA, 2002).

A maioria dos concretos estruturais e não-estruturais tem sido confeccionada com agregados naturais, porém, a constante preocupação com a preservação do meio ambiente tem incentivado a busca de diversas alternativas para a incorporação de certos tipos de rejeitos industriais e passivos ambientais na confecção de argamassas e concretos. Neste contexto, o reaproveitamento do poliestireno expandido (Espuma Poliestireno Expandido) acumulado nos aterros sanitários das grandes cidades, como substituição de parte do agregado graúdo utilizado na confecção do concreto, parece ser uma alternativa interessante (FERREIRA, 2002).

Segundo Petrucci (1993), uma das classificações do concreto mais utilizadas é a classificação de acordo com sua resistência à compressão aos 28 dias. De acordo com esta classificação o concreto pode ser dividido em três categorias:

- Concretos de baixa resistência, com resistências inferiores a 20 MPa;
- Concretos de resistência moderada, com resistências entre 20 e 40 MPa;

- Concretos de alta resistência, com resistências superiores a 40 MPa.

A resistência aos esforços de tração do concreto é considerada baixa, da ordem de 1/10 da resistência à compressão, por esse motivo é comum o uso de estruturas em concreto armado, em que o concreto resiste aos esforços de compressão e o aço resiste aos esforços de tração. A determinação direta desta propriedade é difícil. A determinação geralmente é feita de forma indireta: por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, de acordo com a NBR 7222/99 (ABNT, 1999) ou por flexão de corpos-de-prova prismáticos, de acordo com a NBR 12142/92 (ABNT, 1992).

Outra importante propriedade do concreto no estado endurecido é a massa específica. Massa específica pode ser definida como uma relação entre a massa de uma amostra de concreto e o volume desta amostra. É função principalmente do agregado que se utiliza na mistura. Uma das classificações usuais dos tipos de concreto é baseada na massa específica. Ela divide os tipos de concreto em:

- Pesados, com massa específica superior a  $3200 \text{ Kg.m}^{-3}$ ;
- Normal, com massa específica média de  $2400 \text{ Kg.m}^{-3}$ ;
- Leves, com massa específica menor que  $1900 \text{ Kg.m}^{-3}$ .

#### **2.5.4 Produção do concreto**

A produção do concreto inclui uma série de operações executadas e controladas de forma a obter-se, a partir dos materiais componentes, um produto que, depois de endurecido, resista aos esforços derivados das mais diversas condições de carregamento a que possa ser submetido, bem como apresente características de durabilidade (SILVA, 1975).

As operações necessárias à obtenção de um concreto são:

- Dosagem ou quantificação dos materiais (podendo ser empírica ou racional);
- Mistura dos materiais;

- Transporte até o local da obra;
- Lançamento: colocação do concreto no seu local definitivo (normalmente em uma forma);
- Adensamento: consiste em tornar a massa do concreto a mais densa possível, eliminando os vazios;
- Cura: cuidados a serem tomados a fim de evitar a perda de água pelo concreto nos primeiros dias de idade.

Ao método utilizado para se determinar o traço do concreto dá-se o nome de dosagem. A dosagem, segundo SILVA (1975), é o estabelecimento das quantidades ótimas de cada um dos materiais componentes para que sejam atendidas: a homogeneidade, a plasticidade, a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

## 2.6 Concreto Leve

A mais antiga aplicação de concreto leve de que se tem notícia é no Pantheon, na Itália, no ano de 37 a.C. cuja cobertura esférica de 42 m de diâmetro foi feita com concreto leve utilizando pedra-pomes como agregado graúdo. Hoje em dia o concreto leve é empregado, principalmente na Europa, na construção de navios (pisos, piscinas, divisórias), edifícios altos, pontes, igrejas, cobertura de grandes vãos, tanques de armazenamento de petróleo, painéis pré-fabricados, enchimento de pisos, isolamento termo-acústico, etc. (BOCCHILE, 2002).

Existem diversos tipos de agregados leves usados para fabricação do concreto. O uso do concreto é determinado em função do tipo do agregado. Neville (1997) apresenta três categorias de concretos feitos com agregados leves:

- Concretos isolantes: utilizados para fins não estruturais, com massa específica variando entre 300 e 800 Kg.m<sup>-3</sup>;

- Concretos de resistência moderada: apresentam resistências entre 7 e 17 MPa e têm massa específica entre 800 e 1350 Kg.m<sup>-3</sup>;
- Concretos leves estruturais: possuem resistências superiores a 17 MPa e massa específica entre 1350 e 1900 Kg.m<sup>-3</sup>;

Segundo Bueno (2000), existem concretos especiais obtidos por meio de aditivos apropriados na mistura ou substituição dos materiais tradicionais, a fim de proporcionar características diferenciadas, destacando dos concretos simples cujo peso pode ser reduzido a partir da substituição da brita por um agregado leve (argila expandida ou isopor), alterando as características de resistência, permeabilidade e termo-acústicas.

Conforme Rossignolo (2003), os concretos leves são diferenciados dos concretos convencionais pela redução da massa específica, alterações das propriedades térmicas, trabalhabilidade, resistência, deformações, retração e fluência, além da redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Os concretos com agregados leves têm sido utilizados desde o início do século 20, para fins estruturais e de vedação, com excelentes resultados. A partir de 1980 foram realizadas pesquisas sobre os concretos leves, em todo mundo, demonstrando o grande potencial do uso desse material, nas mais diversas áreas da construção civil. A redução da massa específica do concreto, com a manutenção da resistência mecânica, propicia a redução do peso próprio e das cargas na fundação com conseqüente redução do custo final da obra (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Rossignolo (2003), existe uma tendência mundial crescente, baseada em critérios econômicos e técnicos do uso de concreto leve com a finalidade estrutural e de vedação na construção civil, especialmente em relação à utilização da tecnologia direcionada aos pré-fabricados.

O estudo e o levantamento de dados poderão subsidiar também profissionais da arquitetura, para projetarem obras com maior conforto ambiental interno, térmico e acústico, ocasionando conservação de energia durante o seu uso, promovendo eficiência energética, porém, esse tipo de concreto encontra pouca aplicação no Brasil e, atualmente, há pouca

informação disponível sobre as propriedades dos concretos com agregados leves (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Petrucci (1993), o crescente avanço tecnológico em todos os setores e, particularmente, na técnica construtiva, forçou o aparecimento de materiais novos que viessem a corresponder às necessidades impostas pelas obras. Assim, tendo em vista que uma das deficiências do concreto em face dos materiais competidores era o seu peso próprio, naturalmente elevado, e que a velocidade de execução e a própria economia da construção variam na razão inversa desse peso, impunha-se sua redução, sobretudo se considerado o surgimento de novas propriedades como, por exemplo, isolamento térmico. Surgiram e se desenvolveram, então, os chamados concretos leves.

Conforme Siqueira, Stramari & Folgueras (2004), a reciclagem de resíduos apresenta o risco da falta de conhecimento em relação à inovação tecnológica, além da preocupação com o uso de resíduos perigosos. Por isso, são necessárias análises cuidadosas antes da incorporação de materiais alternativos, para uso em construções.

Segundo Rossignolo (2003), o início da utilização de concretos de cimento Portland com agregados leves, tal qual se conhece hoje, ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando a *American Emergency Fleet Building Corporation* construiu embarcações com concreto leve, utilizando xisto expandido, com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica em torno de  $1700 \text{ Kg.m}^{-3}$ , enquanto o valor usual de resistência à compressão dos concretos tradicionais, na época, era de 15 MPa.

No Brasil, os estudos e a utilização dos concretos leves tiveram início em 1970, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila expandida) pelo Grupo Rabello, a CINASITA S. A. (atualmente CINEXPAN S.A.), com a finalidade de fornecer agregados leves para a CINASA - Construção Industrializada Nacional - também do Grupo Rabello, para a produção de elementos pré-fabricados leves. Entretanto, desde o início da produção de agregados leves no Brasil, o concreto leve foi motivo de poucos estudos e encontra utilização modesta na construção civil (SANTOS *et al.*, 2002).

Os concretos leves são: “Concretos com estrutura porosa, geralmente à base de ligantes hidráulicos, com massa específica inferior à dos concretos tradicionais, que podem ser obtidos com a utilização de agregados leves, com a incorporação de ar (concretos celulares) ou sem finos” (ROSSIGNOLO, 2003). Nos três casos citados há uma substituição de materiais sólidos por ar, o que causa a redução da massa específica. No caso dos concretos com agregados leves, que é o objeto de estudo desta pesquisa, o ar se encontra nas partículas do agregado. Nos concretos celulares o ar é incorporado na pasta de cimento e, no caso de concretos serem finos, o ar se encontra entre as partículas de agregado graúdo (NEVILLE, 1997).

Conforme a densidade do material que constitui as partículas, os agregados são classificados em leve, médio e pesados. Bauer (1987) relaciona alguns valores aproximados das médias das densidades aparentes:

- Leve: densidade aparente média variando entre 0,3 ton.m<sup>-3</sup> a 1,0 ton.m<sup>-3</sup>;
- Médio: densidade aparente média variando entre 1,4 ton.m<sup>-3</sup> a 1,7 ton.m<sup>-3</sup>;
- Pesado: densidade aparente média variando entre 2,9 ton.m<sup>-3</sup> a 3,3 ton.m<sup>-3</sup>.

## **2.7 Concretos com Agregados Leves**

Segundo Petrucci (1993), os agregados utilizados em concretos com agregados leves podem ser encontrados sob esta forma na natureza ou serem produzidos especialmente a partir da matéria-prima, quase sempre resíduo industrial.

Os agregados têm estrutura celular, porosa, as células de ar estão nas partículas de agregado que apresentam massa específica aparente bem menor do que os agregados naturais. A massa específica varia entre 950 e 2000 Kg.m<sup>-3</sup> da utilização de agregados miúdos e graúdos, ou da combinação

de agregado graúdo com areia natural. A resistência varia no mesmo sentido da massa específica, acontecendo o inverso com isolamento térmico. A dosagem destes concretos pode ser executada como a dos que utilizam agregados comuns.

Deve-se, entretanto, ter em vista os seguintes fatores:

- A resistência à tração é geralmente inferior à dos concretos correntes;
- A limitação da resistência do concreto é dada pela resistência do agregado. A lei de Abrams (correlação resistência mecânica a relação água – cimento) é válida, mas limitada pelas características do agregado;
- O concreto é mais difícil de misturar, lançar e adensar pela facilidade de segregação, motivada pela diferença das massas específicas constituintes;
- Na dosagem procura-se obter um concreto trabalhável quando fresco e com resistência adequada ao projeto depois de endurecido, mas com mínima massa específica aparente.

A dosagem ótima é, portanto uma solução de compromisso entre a resistência mecânica elevada e o peso próprio baixo.

De acordo com Metha & Monteiro (1994), o concreto convencional, feito com cimento Portland, areia e brita, apresenta diversas deficiências. A tentativa de minorar essas deficiências resultou num avanço da tecnologia do concreto e, com isso, foram desenvolvidos concretos especiais para superar cada deficiência. Uma dessas deficiências é a baixa relação resistência-peso, que constitui um problema de ordem econômica na construção civil, devido ao fato de que boa parte dos esforços a que o concreto resiste é gerada pelo peso próprio da estrutura. Neste cenário, o uso de concretos com uma massa específica menor pode resultar vantagens significativas para concretos estruturais ou de vedação, como diminuição das dimensões dos elementos estruturais e construção sobre solo com menor capacidade de suporte.

O concreto contém cada vez mais freqüentemente adições minerais que possuem características que lhe conferem propriedades específicas. A ciência do concreto está apenas começando a se desenvolver e é esperado

que, nos próximos anos, novos tipos de concretos que melhor satisfaçam diferentes necessidades sócio-econômicas sejam desenvolvidos (NEVILLE, 1997).

Ainda segundo Neville (1997), o principal enfoque dos projetistas das estruturas de concreto armado tem sido o relacionado às propriedades mecânicas do concreto, com foco na resistência à compressão, porém, empregando-se adições, consideradas rejeitos de outras indústrias. No concreto, podem-se alterar suas propriedades e ao mesmo tempo obter-se uma vantagem ecológica por dar destino útil a rejeitos.

## **2.8 Espuma de Poliestireno Expandido**

A espuma de poliestireno expandido é mais conhecida no Brasil como “isopor” que foi a primeira empresa a comercializá-lo. O poliestireno expandido é um plástico celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Esse material sintético proveniente do petróleo foi descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, quando trabalhavam nos laboratórios da Basf, na Alemanha (ABRAPEX, 2006).

Segundo a Abrapex (2006), no mundo, são consumidos anualmente cerca de 2,5 milhões de toneladas de espuma de poliestireno expandido. O mercado Brasileiro consome, aproximadamente, 40 mil toneladas por ano deste produto. Desse total, 45% tiveram como destino o segmento da construção civil. As embalagens industriais foram responsáveis por 42% e 13% foram para artigos de consumo. Ainda no Brasil, aproximadamente, 15 mil toneladas, ou seja, 37,5% do total consumido anualmente vão parar no lixo.

O Portal Ambiental (2007) cita que a espuma de poliestireno expandido é considerada ecologicamente correta, por não contaminar o solo, a água e o ar, e é totalmente reciclável e reaproveitável. Apesar de ser um material reciclável e ecológico, hoje em dia ele se mostra como um grande problema ambiental, ocupando grandes espaços nos aterros sanitários. Isso se

deve a sua composição de 98% de ar e apenas 2% de plástico e, portanto, ser economicamente inviável para a reciclagem (derretimento do produto para reaproveitamento como matéria-prima), aliada ao longo tempo necessário para sua decomposição em ambiente natural, prevista em, aproximadamente, 150 anos.

### **2.8.1 Aplicações da espuma de poliestireno expandido**

A seguir são apresentadas algumas aplicações da espuma de poliestireno expandido na construção civil (ABRAPEX, 2006).

- Lajes industrializadas;
- Isolamento térmico de lajes industrializadas;
- Isolamento térmico de telhados;
- Isolamento térmico de dutos de ar condicionado;
- Isolamento térmico de tubulações e reservatórios;
- Isolamento térmico de câmaras frigoríficas;
- Concreto leve;
- Painéis autoportantes;
- Forros isolantes e decorativos;
- Isolamento acústico - piso flutuante;
- Painéis divisórios;
- Drenagem;
- Juntas de dilatação;
- Fundação para estradas;
- Lajes Nervuradas em edifícios.

### **2.8.2 Principais características poliestireno expandido**

Segundo o sítio Portal Ambiental (2007), as principais características da espuma de poliestireno expandido são:

- Baixo peso específico: podem ser obtidas densidades ao redor de  $9 \text{ Kg.m}^{-3}$ , podendo chegar até mais de  $40 \text{ Kg.m}^{-3}$ ; normalmente, mais de 97% de seu volume é constituído de ar; as peças moldadas possuem maior densidade que os blocos;
- Elasticidade;
- Baixa condutibilidade térmica;
- Estabilidade térmica;
- Nenhuma ascensão capilar;
- Baixa absorção de água e umidade;
- Inodoro;
- Não embolora;
- Adere a outros plásticos;
- Isolamento acústico;
- Durabilidade: não é conhecido o limite de idade da espuma de poliestireno expandido, no entanto, para que seja garantido desempenho ao longo do tempo é necessária uma correta aplicação.

Inicialmente, as pequenas pérolas ou grânulos de espuma de poliestireno expandido têm entre 3 mm e 8 mm de diâmetro, mas depois de expandidas com gás pentano assumem dimensões de até 50 vezes a original, podendo ser moldadas nos mais diferentes formatos. A densidade do isopor é baixa, variando entre  $10\text{-}30 \text{ Kg.m}^{-3}$ . Possui baixa condutividade térmica e acústica, baixa absorção de água é fácil de manusear, resistente, higiênico, inócuo, não apodrece nem embolora é durável, tem pouca ascensão capilar e é inodoro. Quimicamente é composto por dois elementos (carbono e hidrogênio), é compatível com cimento, gesso, cal, areia, brita e outros materiais utilizados na construção civil. Uma vantagem desse material é que sua produção não utiliza CFC ou qualquer de seus substitutos. O produto final é composto de partículas denominadas pérolas, com até 8 mm de diâmetro, que se destinam à expansão. Depois de expandidas, as pérolas consistem em

até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Os produtos finais da espuma de poliestireno expandido são inodoros, não contaminam o solo, a água ou o ar, são 100% reaproveitáveis e recicláveis e podem voltar à condição de matéria-prima.

Segundo a Abrapex (2006), além do fator ambiental, a espuma de poliestireno expandido apresenta inúmeras outras vantagens, dentre elas: baixa condutividade, baixíssima massa específica (entre 10 e 30 Kg.m<sup>-3</sup>), baixa absorção de água, facilidade de manuseio, versatilidade, resistência ao envelhecimento, absorção de choques. Seu ponto fraco, porém, fica por conta da baixa resistência a esforços mecânicos. É um material inovador, para o qual vêm sendo descobertos e desenvolvidos usos cada vez mais nobres e cujas possibilidades de aplicação ainda parecem longe de estarem totalmente aproveitadas, mesmo depois de mais de meio século de aplicação.

Atualmente, a espuma de poliestireno expandido tem suas aplicações em quatro áreas principais: consumo, embalagens, refrigeração e construção civil, sendo as duas últimas as mais recentes e com maior conteúdo tecnológico. Na construção civil possui uma gama enorme de aplicações. Seu uso vai desde elementos decorativos como forros e molduras até preenchimento de lajes nervuradas pré-fabricadas, isolamento térmico (lajes, telhados, dutos, reservatórios, câmaras frigoríficas, etc.), isolamento acústico, painéis divisórios (combinado com o gesso acartonado), fundação em estradas, drenagem, juntas de dilatação, entre outros (KNAUF, 2007).

Como nos demais tipos de concretos leves, o concreto com espuma de poliestireno expandido apresenta perda da resistência a esforços mecânicos, devido à sua composição ser majoritariamente de ar. Também devido ao grande número de vazios, apresenta bom desempenho térmico e acústico. Pelo fato de praticamente não absorver água e de ter um acabamento homogêneo, o concreto leve tem sido usado em elementos arquitetônicos e de paisagismo. Por reaproveita a espuma de poliestireno expandido, o concreto leve apresenta também vantagens de ordem financeira. Tem sido usado na fabricação de elementos pré-fabricados, regularização de lajes, painéis de fechamento, pavimentos rígidos (calçadas, painéis para fechamento de

alvenaria), entre outros empregos, comprovados por MALAKOSKI (2006) e AMBONI JUNIOR (2006).

Segundo a Abrapex (2006), a composição média do lixo brasileiro corresponde a: 65% material orgânico, 25% papel, 4% metal, 3% vidro e 3% plásticos. O “isopor” é responsável por fração de 0,1% do lixo total produzido, porém é um dos grandes “vilões” dos aterros sanitários, devido ao seu grande volume.

Com o aumento do valor dos insumos e com a crescente preocupação ecológica, o setor da construção civil vem realizando estudos tecnológicos sobre novos resíduos que possam ser reaproveitados. Alguns exemplos são: reaproveitamento dos entulhos da construção civil na pavimentação de estradas, aproveitamento de garrafas tipo “pet” na confecção de canos, estudos sobre a utilização de raspas de pneus em concreto, entre outros, (ABRAPEX, 2006).

Conforme Krueger & Deitos, (2002), foi desenvolvido na unidade de Curitiba do Centro Federal de Educação Tecnologia do Paraná, um material alternativo na forma de compósito envolvendo isopor (EPS) e garrafas plásticas usadas na composição de materiais para blocos de concreto chamados de ISOPET, contemplando o reaproveitamento de descarte industrial. O material foi utilizado num protótipo habitacional construído para avaliação de desempenho térmico de, aproximadamente, 15 m<sup>2</sup> de área, utilizando ainda raspas de pneus usados na confecção de piso. Para confeccionar esta unidade foram executados 365 blocos, utilizando ou retirando do meio ambiente 875 garrafas plásticas de 2 litros do tipo PET e 17 m<sup>3</sup> de EPS (isopor).

## **2.9 Concreto com Espuma de Poliestireno Expandido**

Conforme a Abrapex (2006), no processo de fabricação de blocos de espuma de poliestireno expandido o material passa pelo estado de pérolas

com diâmetros que variam de 3 a 8 mm, aproximadamente. Além das pérolas, toda espuma de poliestireno expandido descartada poderá ser moído e reaproveitado. Ambos os casos descritos são agregados leves que servem para a preparação de concreto leve de espuma de poliestireno expandido. Usando esse agregado leve com cimento, areia e água em proporções e em seqüência específica de mistura, pode-se obter concreto leve com densidade aparente de 600 a 1600 Kg.m<sup>-3</sup>.

A seguir, são relacionadas algumas aplicações do concreto leve, segundo a Abrapex (2006):

- Regularização de lajes em geral: inclinação para escoamento;
- Painéis de fechamento: prédios, casas pré-fabricadas e galpões;
- Elementos pré-fabricados: lajotas, blocos vazados, pilares para muros, elementos vazados, elementos decorativos para fachadas e jardins;
- Pavimentos: calçadas e painéis para fechamento de galerias;
- Elementos tipo "móveis": bancos para ambientes externos, base para montagem de sofás, balcões, camas;
- Áreas de lazer: quadras de esporte, base para dispositivos de exercícios;
- A utilização de poliestireno expandido na confecção de concreto leve.

Os produtos finais da espuma de poliestireno expandido podem ser reciclados e novamente transformados em matéria-prima, possibilitando a sua utilização como material de construção civil. Segundo Araujo (2001), o estudo da influência da adição de diferentes teores de espuma de poliestireno expandido em substituição total ou parcial do agregado graúdo, na resistência à compressão do concreto e a conseqüente diminuição de sua massa específica, deve ser avaliado.

Ainda segundo o autor, o concreto leve de espuma de poliestireno expandido é um concreto do tipo cimento/areia, que utiliza a espuma de poliestireno expandido moído no lugar da pedra britada. A mistura cimento/areia se solidifica envolvendo as partículas da espuma de poliestireno

expandido, proporcionando um concreto de baixa densidade aparente, e de múltiplas utilidades.

A massa específica aparente do concreto leve de espuma de poliestireno expandido varia de acordo com a dosagem, podendo ser de 600 a 1600  $\text{Kg.m}^{-3}$ , enquanto que o concreto convencional, com pedra britada é da ordem de 2400  $\text{Kg.m}^{-3}$ . Para cada uso pode ser feito um tipo de concreto que tem sua resistência mecânica proporcional à sua densidade aparente. Isto é, quanto mais leve for o concreto, menor será a sua resistência. O concreto leve tem larga aplicação em painéis pré-moldados para substituir as paredes convencionais e, assim, pode permitir o desenvolvimento da produção de casas industrializadas de baixo custo ou ser utilizado na produção de blocos para alvenarias em sistemas de mutirão. Desse modo, o uso de espuma de poliestireno expandido como material reciclado para a construção civil, torna-se uma excelente alternativa para as prefeituras, otimizando o espaço dos aterros sanitários e prolongando a sua vida útil (ARAUJO, 2001).

De acordo com Metha & Monteiro (1994), o concreto convencional, feito com cimento, areia e brita, apresenta diversas deficiências. A tentativa de minorar essas deficiências resultou num avanço da tecnologia do concreto e, com isso, foram desenvolvidos concretos especiais para superar cada deficiência. Uma dessas deficiências é a baixa relação resistência-peso, que constitui um problema de ordem econômica na construção civil, devido ao fato de que boa parte dos esforços a que o concreto resiste é ocasionada pelo peso próprio da estrutura. Neste cenário, o uso de concretos com uma massa específica menor pode resultar vantagens significativas para concretos estruturais ou de vedação, como diminuição das dimensões dos elementos estruturais e construção sobre solo com menor capacidade de suporte.

A espuma de poliestireno expandido apresenta bom desempenho térmico e acústico. Pelo fato de absorver pouca água e de ter um acabamento homogêneo, o concreto leve de espuma de poliestireno expandido tem sido usado em elementos arquitetônicos e de paisagismo. Se houver o reaproveitamento da espuma de poliestireno expandido, o concreto leve também apresentará vantagens de ordem financeira. Tem sido usado na fabricação de elementos pré-fabricados, regularização de lajes, painéis de

fechamento, pavimentos rígidos (calçadas, painéis para fechamento de alvenaria), entre outros empregos (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

## 2.10 Desempenho Térmico

A palavra desempenho na construção civil significa atender às necessidades que devem ser satisfeitas pelo edifício, a fim de que ele cumpra sua função durante sua vida útil. Os projetos e processos construtivos devem atender às exigências de desempenho com relação às várias especialidades e às especificações de materiais e componentes, buscando níveis mínimos quanto à parte estrutural, segurança ao fogo, estanqueidade da água, conforto térmico e acústico e com relação à durabilidade (HINO & MELHADO, 1998).

As propriedades térmicas dos concretos leves são significativamente diferentes das observadas nos concretos tradicionais. O ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves reduz a transferência e a absorção de calor em relação aos agregados tradicionais, alterando assim as propriedades térmicas dos concretos, como por exemplo, a redução da condutividade térmica. Por esta razão, algumas edificações utilizam o concreto leve na vedação de fachadas e na cobertura para reduzir a absorção e a transferência para o meio interno do calor proveniente da radiação solar (EUROLIGHTCON *apud* ROSSIGNOLO, 2003).

A Tabela 2 apresenta uma comparação genérica entre o concreto leve e o concreto convencional, quanto às suas propriedades térmicas.

**Tabela 2** - Comparativo das propriedades térmicas dos concretos leve e convencional

PROPRIEDADES	CONCRETO LEVE	CONCRETO NORMAL
Massa específica (Kg.m <sup>-3</sup> )	1850	2400
Resistência à compressão (MPa)	20 - 50	20 - 70
Calor específico (cal/g°.C)	0,23	0,22
Condutividade térmica (W/m.K)	0,58 - 0,86	1,4 - 2,9
Difusão térmica (m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,0015	0,0025 - 0,0079
Expansão térmica (microstrain.10 <sup>-6</sup> /°C)	9	11

Fonte: HOLM & BREMMER (2000).

Bezerra (2003) realizou análise experimental do desempenho térmico de sistema construtivo (parede) fabricado com blocos de concreto leve com espuma de poliestireno expandido como agregado graúdo, além de ensaio mecânico (compressão). Comparando os resultados com aqueles obtidos com bloco de concreto comum, verificou a viabilidade do uso do bloco de concreto leve tanto no que diz respeito à resistência mecânica quanto em relação ao desempenho térmico.

De acordo com o mesmo autor, a análise anterior foi repetida, considerando-se sistemas construtivos fabricados em bloco de concreto leve e em tijolo de oito furos. Constataram vantagens do sistema com bloco com agregado de espuma de poliestireno expandido sobre sistema convencional em relação ao desempenho térmico.

O conhecimento de técnicas de conservação pode resultar numa redução de até 15% do consumo de energia pelo setor produtivo. O uso de espuma de poliestireno expandido em obras civis, por exemplo, é uma tecnologia comprovadamente viável para conservação de energia, necessitando apenas maior divulgação de suas qualidades. Na Europa, a construção civil responde por 65% do consumo de espuma de poliestireno expandido, enquanto no Brasil chega a apenas 4% (KRÜGER, 2003).

Dos 229 TWh de energia elétrica consumida no Brasil em 1992, cerca de 42% eram destinados às edificações residenciais, comerciais e públicas. As residências respondiam por 23% do consumo de energia nacional. Este foi o setor responsável pelo maior crescimento nos últimos anos (triplicou entre 1990 e 1997), enquanto que os setores comercial e público respondiam, respectivamente, por 11% e 8% (BEZERRA, 2003).

Pelo exposto acima, percebe-se a importância da escolha do material para constituir o envelope das edificações. Em especial, na região Nordeste do Brasil, caracterizada por elevados índices de insolação, responsáveis pela maior parcela da carga térmica no interior das edificações, a escolha do material dos fechamentos reflete diretamente no consumo de eletricidade, utilizada pelos sistemas de climatização. Em prédios comerciais, por exemplo, onde são utilizados grandes fechamentos transparentes, os sistemas de climatização chegam a responder por até 70% do consumo de energia elétrica (BEZERRA, 2003).

Economizar energia é mais barato do que fornecê-la. Nesse ponto, inserem-se arquitetos e engenheiros cujos projetos devem ser concebidos de modo a possibilitar a construção de edifícios que proporcionem, simultaneamente, economia de energia e conforto ao usuário. A adoção desta estratégia, já produziu vários resultados positivos. Como exemplo, cita-se o Pavilhão de Sevilha (Espanha) cujo projeto permitiu reduzir o consumo da energia para obtenção de conforto térmico a um quarto do que seria requerido por um sistema de condicionamento de ar (GELLER *apud* BEZERRA, 2003).

### **2.10.1 Temperatura e calor**

A temperatura é o conceito físico que nos permite medir o estado térmico de um sistema, estabelecendo a sua maior ou menor capacidade de transmitir calor ou, de acordo com a teoria cinética, a energia cinética média de suas moléculas (COSTA, 1974).

A avaliação da temperatura não pode ser feita como se mede usualmente uma grandeza, mas sim por meio de um dos fenômenos que ela produz: a dilatação. Para isso, adotam-se as chamadas escalas termométricas, das quais as mais importantes são: a de Celsius (ou centígrado), a de Reamur e a de Fahrenheit (COSTA, 1974).

Estudos sobre o ciclo de rendimento máximo das máquinas térmicas, desenvolvidos por Sadi Carnot, permitiram a William Thomson (Lorde Kelvin) estabelecer uma nova escala de temperaturas  $T$ , independente da substância termométrica, que tomou o nome de escala absoluta ou escala termodinâmica de temperaturas (COSTA, 1974).

Segundo Incropera & Dewitt (1998), sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, haverá, necessariamente, transferência de calor. Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido o fluxo de calor é se dá por condução. A convecção de calor ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, quando eles se encontram em temperaturas diferentes. Toda superfície a uma temperatura não-nula emite energia na forma de ondas eletromagnéticas, radiação infravermelha que é trocada entre duas superfícies que se encontram a diferentes temperaturas.

O senso comum já demonstra que, quando se coloca um corpo quente em presença de um corpo frio, este se aquece, à proporção que o corpo quente se resfria. Pode-se explicar esse fenômeno do seguinte modo: o corpo quente fornece calor ao corpo frio e este absorve calor do corpo quente (GONÇALVES, 1974).

Ainda segundo Gonçalves (1974), o fenômeno prossegue até que, num certo instante, as duas temperaturas se tornam iguais. Neste instante, diz-se que cessou a transferência de calor e que os dois corpos se encontram em equilíbrio térmico.

De acordo com a teoria cinética, a temperatura de um elemento de matéria é proporcional à energia média de suas moléculas constituintes. A energia intrínseca de um elemento de matéria, em virtude da velocidade e da posição relativa das moléculas é chamada Energia Interna (KREITH & BOHN, 2003).

### 2.10.2 Condutividade térmica (k)

A condutividade térmica é classificada como uma das propriedades de transporte da matéria. Ela fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A condutividade térmica depende da estrutura física da matéria, em nível atômico e molecular que, por sua vez, está relacionada ao seu estado físico (KREITH & BOHN, 2003).

De acordo com Incropera & Witt (1998), a partir da Lei de Fourier, a condutividade térmica pode ser definida por:

$$k = \frac{-q_x''}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \quad (1)$$

Em que:

$k$  = condutividade térmica do material ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ );

$q_x''$  = transferência de calor na direção  $x$  por unidade de área perpendicular à direção da transferência ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$\partial T / \partial x$  = gradiente de temperatura na direção  $x$ .

Ainda, segundo Incropera & Witt (1998, p. XXX), na sua forma clássica, a Lei de Fourier pode ser enunciada como: “O fluxo de energia  $q_x''$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), é a taxa de transferência de calor na direção  $x$ , por unidade de área perpendicular à direção da transferência, sendo proporcional ao gradiente de temperatura nesta direção e á condutividade térmica  $k$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) do material”. O sinal de menos (-) da equação é uma consequência do fato de que o calor é transferido no sentido da diminuição de temperatura.

Sendo assim, o fluxo térmico condutivo aumenta com o aumento da condutividade térmica. De acordo com o mecanismo físico, associado à condução de calor, tem-se que, em geral, a condutividade térmica de um sólido é maior do que a de um líquido que, por sua vez, é maior do que a de um gás.

### 2.10.3 Capacidade térmica – Calor específico

Capacidade térmica de um sistema é a grandeza extensiva que expressa a quantidade de calor necessária para aumentar 1°C de sua temperatura. A capacidade térmica do sistema depende da massa do sistema. A capacidade referida à unidade de peso do sistema é uma grandeza específica que toma o nome de calor específico  $C$  e é expresso em  $\text{kcal.Kgf}^{-1}\text{C}$  (WYLLEN *et al.* 2004). (WYLEN, BORGNAKKE & SONNTAG, 2003).

O calor específico não é constante durante o aquecimento de um sistema. De um modo geral,  $C$  pode ser considerado como uma função linear da temperatura, de modo que o calor específico verdadeiro para uma temperatura qualquer será dado por:  $C = at + b$  (função de 1º grau).

Ao variar a temperatura de um sistema, o mesmo sofre variações de estado, efetuando uma transformação qualquer. A relação entre a quantidade de calor que entra em jogo, durante a transformação e a variação de temperatura sofrida pelo sistema é o calor específico do sistema correspondente (COSTA, 1974).

### 2.10.4 Difusividade térmica ( $\alpha$ )

Difusividade térmica é a relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica que é definida como o produto entre o calor específico dividido pela densidade do material. A difusividade térmica é uma propriedade que está relacionada à propagação do calor em um meio, no decorrer das variações de temperatura em função do tempo. Portanto, quanto maior a difusividade térmica, mais rápida será a difusão de calor no meio do material. De acordo com Incropera & Witt (1998), a difusividade térmica é expressa na forma matemática como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

(2)

Em que:

$\alpha$  = difusividade térmica ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$k$  = condutividade térmica do material ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$\rho$  = densidade do material ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$c_p$  = calor específico do material ( $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

### 2.10.5 Resistência térmica ( $R_t$ )

Fisicamente, a resistência térmica traduz-se como a maior ou menor facilidade com que se dá o fluxo de calor em determinada direção. No caso de uma parede plana, a resistência térmica depende da geometria do material e de sua condutividade térmica (KREITH & BOHN, 2003), definida pela equação (3) tem-se:

$$R_t = \frac{L}{k \cdot A}$$

(3)

Em que:

$R_t$  = resistência térmica ( $\text{K/W}$ );

$L$  = espessura da parede (m);

$k$  = condutividade térmica do material ( $\text{W/m.K}$ );

$A$  = área perpendicular ao fluxo de calor ( $\text{m}^2$ ).

De acordo com Bezerra (2003), analisando-se as equações que descrevem os fenômenos da difusividade térmica e da resistência térmica, pode-se constatar a possibilidade de redução da taxa de transferência de calor através de fechamentos opacos, se esses forem construídos com materiais de

baixa condutividade térmica, pois resultarão na redução da difusividade térmica e elevação da resistência térmica.

### **2.10.6 Inércia térmica**

Um sólido retém parte da energia que flui entre suas faces. A quantidade que ficará retida depende da capacidade térmica do material que o constitui. Essa característica dos corpos é denominada de inércia térmica. Materiais com elevada inércia térmica permitem diminuir a amplitude de variação da temperatura no interior das edificações. Dessa forma, os picos de temperatura interna dos ambientes podem ser modificados para reduzir as sensações de desconforto devido ao “calor” ou ao “frio” (BEZERRA, 2003).

A inércia térmica está associada a dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico do edifício: o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais. A inércia térmica depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos. Por exemplo, quando a temperatura exterior, suposta inicialmente igual à temperatura interior, se eleva, certo fluxo de calor penetra na parede. Esse fluxo não atravessa a parede imediatamente, antes a aquece internamente. Esse fluxo, se comparado com uma parede fictícia de peso nulo, atravessa a parede com certo atraso e amortecimento. O atraso e o amortecimento, juntos, compõem a inércia térmica, que é função da densidade, da condutividade térmica e da capacidade calorífica da parede. A capacidade calorífica da parede é expressa pelo calor específico, medido pela quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura a sua unidade de massa ( $\text{J.Kg}^{-1}.\text{°C}$ ) (FROTA, 2003).

## **2.11 Arquitetura Bioclimática**

Chama-se arquitetura bioclimática ao estudo que visa harmonizar as construções ao clima e características locais, pensando no homem que a habitará ou trabalhará nelas, tirando proveito da energia solar, de correntes convectivas naturais e de microclimas criados por vegetação apropriada. É a adoção de soluções arquitetônicas e urbanísticas adaptadas às condições específicas (clima e hábitos de consumo) de cada lugar, utilizando, para isso, a energia que pode ser diretamente obtida das condições locais (FROTA, 2003).

A arquitetura bioclimática não se restringe a características arquitetônicas adequadas. Preocupa-se, também, com o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que são necessários ao uso da edificação (aquecimento de água, circulação de ar e de água, iluminação, conservação de alimentos, etc.) e com a utilização de materiais de conteúdo energético tão baixo quanto possível (BEZERRA, 2003).

## **2.12 Princípios de Transferência de Calor**

### **2.12.1 Mecanismos de trocas térmicas**

Para a compreensão do comportamento térmico das edificações, é necessária uma base conceitual de fenômenos de trocas térmicas. Esse conhecimento permite também melhor entendimento acerca do clima e do relacionamento do organismo humano com o meio ambiente térmico. As trocas térmicas entre os corpos advêm de uma das duas condições básicas (FROTA, 2003):

- a) existência de corpos que estejam a temperaturas diferentes;

b) mudança de estado de agregação.

Segundo Frota (2003), corpos que estejam a temperaturas diferentes trocam calor, os mais “quentes” perdendo e os mais “frios” ganhando, sendo que o calor envolvido é denominado calor sensível. No âmbito do conforto termohigrométrico, o elemento que proporciona as trocas térmicas por mudança de estado de agregação, sem mudança de temperatura, é a água, e somente no caso de passar do estado líquido para o estado de vapor e do estado de vapor para o estado líquido. O calor envolvido nestes mecanismos de troca é denominado calor latente.

Kreith & Bohn (2003) definiram transmissão de calor como a transmissão de energia de uma região para outra, resultante de uma diferença de temperatura entre elas. Como existem diferenças de temperatura em todo o universo, os fenômenos de transmissão de calor são tão universais quanto os associados às atrações gravitacionais. Ao contrário da gravidade, entretanto, a transmissão de calor não é governada por uma única relação, mas por uma combinação de várias leis independentes da física.

### **2.12.2 Trocas térmicas secas**

As trocas de calor que envolvem variações de temperatura são denominadas trocas secas, em contraposição à denominação de trocas úmidas (evaporação e condensação), relativa às trocas térmicas que envolvem água. Os mecanismos de trocas secas são convecção, radiação e condução (FROTA, 2003).

Entretanto, apesar serem encontrados na literatura os três modos distintos de transmissão de calor acima citados, estritamente falando, apenas a condução e a radiação devem ser classificadas como processos de transmissão de calor, pois somente esses dois mecanismos dependem, para sua operação, da existência de uma diferença de temperatura. O último dos três, a convecção, não concorda estritamente com a definição de transmissão

de calor, pois também depende, para sua operação, do transporte mecânico de massa. Porém, como a convecção também efetua transmissão de energia de regiões de maior temperatura para as de menor, o termo “transmissão de calor por convecção” tornou-se geralmente aceito (KREITH & BOHN, 2003).

Deve-se, a priori, atentar para o fato de que, em muitas situações que ocorrem na natureza, o calor não flui por um, mas por vários dos mecanismos simultaneamente. Na Engenharia, a confluência dos diversos modos de transmissão de calor é particularmente importante, porque, na prática, quando um dos mecanismos domina quantitativamente, soluções aproximadas são obtidas desprezando-se todos, exceto o mecanismo dominante. Entretanto, uma mudança das condições externas freqüentemente exigirá que um ou ambos os mecanismos desprezados anteriormente sejam levados em consideração (KREITH & BOHN, 2003).

### 2.12.3 Convecção

De acordo com Incropera & Witt (1998), quando um fluido em repouso é aquecido, o gradiente de temperatura entre suas regiões está associado a um gradiente de densidade que provoca deslocamento da massa do fluido de forma cíclica, originando as chamadas correntes convectivas. Dessa forma, o transporte de calor se processa através do transporte de massa. De outro modo, se o fluido escoar sobre uma superfície sólida, estando ambos a temperaturas distintas, haverá troca de calor entre a superfície e o fluido. Se a agitação ou o escoamento do fluido for feito mecanicamente, então se define como transferência de calor por convecção forçada. Por outro lado, se a movimentação do fluido for originada apenas pela diferença de densidade, tem-se a convecção livre (ou natural). Para calcular a taxa de fluxo de calor trocado por convecção utiliza-se a equação a seguir:

$$Q_{\text{conv}} = Ah(T_1 - T_2)$$

(4)

Em que:

$Q_{conv}$  = taxa de fluxo de calor transferido por convecção (W);

$A$  = área da superfície que participa do processo de transferência de calor ( $m^2$ );

$h$  = coeficiente médio de transferência de calor da convecção ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ );

$T_1$  = temperatura da superfície (K);

$T_2$  = temperatura do fluido circulante (K).

Segundo Kreith (2003), a convecção é um processo de transporte de energia que combina a condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura.

Kreith & Bohn (2003) descrevem assim o processo de transmissão de calor por convecção: o calor flui por condução, da superfície para as partículas adjacentes de fluido. A energia assim transferida servirá para aumentar a temperatura e a energia interna dessas partículas fluidas, em seguida estas partículas fluidas se moverão para uma região de menor temperatura no fluido, onde se misturarão e transferirão uma parte de sua energia para outras partículas fluidas. O fluxo, neste caso, é tanto de fluido como de energia. A energia é, na realidade, armazenada nas partículas fluidas e transportada como resultado do movimento de massa destas.

O coeficiente de transferência de calor por convecção depende do fluido que escoar sobre a superfície, da natureza do escoamento, do acabamento superficial e de uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido (INCROPERA & WITT, 1998).

De acordo com Frota (2003), as trocas de calor por convecção são ativadas pela velocidade do ar quando se trata de superfícies verticais. Nesse caso, mesmo que o movimento de ar advinha de causas naturais, como o vento, o mecanismo de troca entre a superfície e o ar passa a ser considerado convecção forçada.

Frota (2003) também explica que no caso de superfície horizontal, o sentido do fluxo desempenha importante papel. Quando o fluxo é ascendente, há coincidência do sentido do fluxo com o natural deslocamento ascendente das massas de ar aquecidas, enquanto no caso de fluxo descendente, o ar,

aquecido pelo contato com a superfície, encontra nela mesma uma barreira para sua ascensão, dificultando a convecção, seu deslocamento e sua substituição por nova camada de ar à temperatura inferior à sua.

Croiset (1972) *apud* Frota (2003) sugere alguns valores para o coeficiente de troca térmica por convecção ( $h$ ), no caso de convecção natural:

- Para superfície horizontal, fluxo descendente:  $h = 1,2 \text{ W.m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ;
- Para superfície vertical:  $h = 4,7 \text{ W.m}^{-2}\text{°C}^{-1}$ ;
- Para superfície horizontal, fluxo ascendente:  $h = 7,0 \text{ W.m}^{-2}\text{°C}^{-1}$ .

#### 2.12.4 Radiação

A radiação térmica emitida por toda matéria com temperatura acima de 0 K é uma forma de transmissão de calor que não necessita de um meio material para propagação, pois a energia é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas (ou ainda, na forma de fótons). Dessa forma, todos os corpos em presença uns dos outros e que se apresentam a diferentes temperaturas, trocam calor por radiação e o fluxo de calor se traduz como sendo a taxa líquida de energia que é trocada entre os corpos. A equação a seguir descreve o fenômeno, matematicamente (INCROPERA & WITT, 1998).

$$Q_{\text{rad}} = A_1 \delta \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

Em que:

- $Q_{\text{rad}}$  = taxa de fluxo de calor radiante (W);
- $A_1$  = área da superfície que participa do processo de transferência de calor ( $\text{m}^2$ );
- $\sigma$  = constante da radiação de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ );
- $\varepsilon_1$  = fator de emissividade da superfície (adimensional);
- $T_1$  = temperatura da superfície 1 (K);
- $T_2$  = temperatura da superfície 2 (K).

A emissividade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação à medida de um corpo negro (radiador ideal). Com valores que se encontram na faixa de  $0 < \epsilon \leq 1$ , a emissividade depende fortemente do material da superfície e do seu acabamento (BEZERRA, 2003). A energia transmitida dessa forma é chamada de calor radiante (KREITH & BOHN, 2003).

Todos os corpos emitem continuamente calor radiante. A intensidade das emissões depende da temperatura e da natureza da superfície. A energia radiante viaja com a velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s) e se assemelha, fenomenologicamente, à radiação da luz. De fato, de acordo com a teoria eletromagnética, a luz e a radiação térmica diferem apenas nos respectivos comprimentos de onda (KREITH & BOHN, 2003).

O calor radiante é emitido por um corpo na forma de impulsos ou quanta de energia. O movimento de energia radiante do espaço é semelhante à propagação da luz, e pode ser descrito pela teoria de ondas. Quando as ondas de radiação encontram algum outro objeto, sua energia é absorvida próximo à superfície. A transmissão de calor por meio de radiação torna-se de importância crescente quando a temperatura de um objeto aumenta. Nos problemas de Engenharia envolvendo temperaturas que se aproximam da atmosférica, o aquecimento radiante freqüentemente pode ser desprezado (KREITH & BOHN, 2003).

A principal fonte de energia radiante conhecida é o sol, sendo que em regiões de baixas latitudes, como no Nordeste do Brasil, a radiação solar é o principal fator de ganho térmico em edificações. Dessa forma, a análise do comportamento dos materiais utilizados nos fechamentos opacos que compõem o envelope construtivo é imprescindível à análise da eficiência energética das edificações (BEZERRA, 2003).

#### **2.12.5 Condução**

A transferência de calor por condução pode ser definida como a transferência de energia sem grande movimento de massa, devido à diferença de temperatura num ou entre dois sistemas em contato, sempre no sentido da fonte elevada para a região de baixa temperatura, por meio de vibrações das moléculas ocasionando transmissão de energias entre elas (PAULA, 2002).

A condução é o modo de transferência de calor que está diretamente relacionado à atividade atômica, molecular e eletrônica, sendo que o transporte de energia, de uma região de maior temperatura para outra com temperatura inferior, é causado pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso dos fluidos em repouso, e pelo movimento de elétrons, no caso de metais (BEZERRA, 2003).

Segundo Kreith & Bohn (2003), este impacto entre as moléculas não gera um deslocamento apreciável. De acordo com a Teoria Cinética, quanto mais rápido se movem as moléculas, maiores serão a temperatura e a energia interna do elemento de matéria. Quando as moléculas em uma região adquirem uma energia cinética média maior do que a das moléculas da região adjacente, o que se manifesta por uma diferença de temperatura, as moléculas possuidoras de maior energia transmitirão parte de sua energia para as moléculas da região de temperatura mais baixa.

Independente do mecanismo exato, que de forma alguma é totalmente entendido, o efeito observável da condução de calor consiste em uma equalização da temperatura. Entretanto, se diferenças de temperatura são mantidas pela adição ou remoção de calor em pontos diferentes, uma transmissão contínua de calor da região mais quente para a mais fria será estabelecida.

A condução é o único mecanismo pelo qual o calor pode ser transmitido em sólidos opacos. A condução também é importante nos fluidos, mas nos meios não-sólidos ela é usualmente combinada com a convecção e, em alguns casos, com a radiação (KREITH & BOHN, 2003).

Bezerra (2003,) descreve a Lei de Fourier da seguinte forma: “a taxa de fluxo de calor por condução, em uma dada direção, é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura naquela direção”. No

caso de parede planas a Lei de Fourier pode ser expressa matematicamente, de forma simplificada, como:

$$Q_{cond} = \frac{A.k}{L}(T_1 - T_2)$$

(6)

Em que:

$Q_{cond}$  = taxa de fluxo de calor transferido por condução (W);

$k$  = condutividade térmica do material ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ );

$A$  = área da superfície que participa do processo de transferência de calor ( $m^2$ );

$T_1$  = temperatura da superfície 1 (K);

$T_2$  = temperatura da superfície 2 (K);

$L$  = distância entre as superfícies 1 e 2 (m).

Num sistema construtivo, o coeficiente de condutividade térmica ( $k$ ) depende, principalmente, do material, de sua espessura e da diferença de temperatura entre suas faces. Nos materiais compostos,  $k$  também é função das propriedades radiantes das superfícies e da fração de ar aprisionado no interior do material (AKTUSU & SATO *apud* BEZERRA, 2003). Em materiais porosos,  $k$  depende da composição, da quantidade de matéria sólida, da distribuição, geometria e dimensões dos poros, do teor de umidade e do tipo de gás aprisionado. Materiais com porosidade celular homogênea exibem melhores características isolantes do que materiais com mesma densidade, mas com células de ar extrudadas, no qual o calor se propaga principalmente por convecção natural (SILVA *apud* BEZERRA, 2003).

Tzou (1995) *apud* Bezerra (2003) concluiu que, mais do que uma propriedade térmica do material poroso,  $k$  é uma propriedade estrutural.

Frota (2003) define o termo Coeficiente Global de Transmissão Térmica ( $K$ ), como parâmetro que engloba as trocas térmicas superficiais (por convecção e radiação) e as trocas térmicas através do material (por condução). Portanto, englobam as trocas de calor referentes a um determinado material, segundo a espessura da lâmina, o coeficiente de condutividade térmica, a posição horizontal ou vertical da lâmina e, ainda, o sentido do fluxo.

### 2.12.6 Transferência de calor (carga térmica)

Uma edificação absorve energia térmica do meio externo pelos mecanismos de radiação e convecção. A temperatura de sua face externa eleva-se em relação à temperatura inicial e, como a temperatura da face interna é menor, ocorrerá um fluxo de calor por condução na direção desta última. A intensidade desse fluxo dependerá, entre outros fatores, da espessura da parede ( $L$ ), da capacidade calorífica do material ( $c_p$ ), de sua densidade ( $\rho$ ) e de sua condutividade térmica ( $k$ ). Em consequência da elevação da temperatura, haverá um fluxo de calor da face interna da parede para o ambiente interno, através dos mecanismos de radiação e de convecção (BEZERRA, 2003).

Para determinar a influência que o tipo de material tem sobre a intensidade de fluxo através da parede, utiliza-se a propriedade térmica denominada condutividade térmica ( $k$ ). Materiais bons condutores de calor têm valores de  $k$  elevados, por exemplo: alumínio ( $k = 237 \text{ W/m.K}$  a  $300 \text{ K}$ ). Quanto maior o valor de  $k$ , maior será o fluxo de calor através da parede e, portanto, a temperatura da face interna (INCROPERA *apud* BEZERRA, 2003).

Materiais que possuem baixa densidade (cortiça, espuma de poliestireno expandido, lã de vidro, concreto celular, espuma de poliuretano) têm baixa condutividade principalmente devido à porosidade que apresentam. Neles, o ar confinado no interior dos poros dificulta a transferência de calor (LAMBERTS, DUTRA & PEREIRA, 1997).

Frota (2003) explica, ainda, que os espaços de ar confinados, portanto não ventilados, entre duas lâminas paralelas, apresentam resistência térmica que será função dos seguintes fatores: espessura da lâmina de ar, sentido do fluxo térmico e emissividade das superfícies em confronto.

Segundo Bezerra (2003), as variáveis citadas acima podem ser combinadas em duas propriedades térmicas de especial interesse da análise

de desempenho térmico dos fechamentos, a saber: difusividade térmica ( $\alpha$ ) e resistência térmica ( $R_t$ ).

### **2.13 Proteção Térmica de Fechamentos Verticais**

Numa edificação, os ganhos de energia por radiação podem ocorrer de modo direto, difuso, por reflexão da energia no solo e nas adjacências, por emissão do solo aquecido e da atmosfera. As perdas, por sua vez, podem ocorrer por radiação emitida da edificação para o ar circundante, para o solo ou para a superfície (BEZERRA, 2003).

Lamberts, Dutra & Pereira (1997) afirmam que é possível reduzir a carga solicitada aos sistemas de climatização artificial e, conseqüentemente a demanda de energia elétrica, se forem adotadas estratégias como: uso de proteções solares em aberturas; uso de cores claras no exterior; uso de ventilação cruzada e redução da “condutância” (ou transmitância) térmica ( $U$ ) das paredes, janelas e coberturas. Sendo a condutância térmica entendida como propriedade definida pelo inverso da resistência térmica total do fechamento.

O uso de materiais isolantes, segundo Costa (1974), pode contribuir para tal redução. Entende-se aqui como isolantes, materiais de baixo coeficiente de condutividade térmica  $k$ . Os materiais isolantes são normalmente materiais porosos, cuja elevada resistência térmica se baseia na baixa condutividade do ar contido em seus vazios.

Do exposto, depreende-se que, quanto menor a densidade do material e maior o número de poros, maior o seu poder de isolamento. O limite dessa capacidade, naturalmente, é a condução pura do ar em repouso cujo valor é da ordem de  $0,02 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^\circ\text{C}$ . A finalidade do isolamento é evitar as trocas térmicas indesejáveis e manter a temperatura da parede a níveis adequados, tanto na técnica do calor como na do frio (COSTA, 1974). Para este autor, um bom isolante deve apresentar as seguintes características:

- Baixa condutividade térmica  $k$ ;

- Resistir bem à temperatura em que é aplicado;
- Ter boa resistência mecânica;
- Ser imputrescível e inatacável por pragas;
- Ser incombustível;
- Não ser higroscópico e apresentar, se possível, baixa porosidade à penetração do vapor d'água.

INCROPERA & WITT (1998) apontam alguns dos materiais isolantes mais usados, tanto na indústria da construção como nas instalações térmicas, apresentados, com suas respectivas características, na Tabela 3.

**Tabela 3 -** Materiais isolantes mais usados na construção e em instalações térmicas a 300 K (27°C)

MATERIAL	DENSIDADE $\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> )	CONDUTIVIDADE TÉRMICA k (W.m <sup>-1</sup> K)	CALOR ESPECÍFICO $c_p$ (J/Kg <sup>-1</sup> K)
Lã de vidro	24	0,0323	-
Lã de rocha	64	0,0224	-
Serragem	200	0,06	-
Papelão laminado	650	0,07	-
Concreto celular	300	0,049	-
Gesso celular	288	0,043	-
Poliestireno expandido - extrudado	55	0,027	1210
Poliestireno expandido - pérolas moldadas	16	0,040	1210
Espuma de poliuretano	70	0,026	1045

Fonte: INCROPERA & WITT (1998).

A Tabela 4 mostra algumas propriedades dos principais materiais de construção convencionais utilizados em edificações.

**Tabela 4 -** Propriedades termofísicas de materiais comuns a 300 K (27°C)

MATERIAL	DENSIDADE $\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> )	CONDUTIVIDADE TÉRMICA k (W/m K)	CALOR ESPECÍFICO $c_p$ (J/Kg K)
Argamassa de cimento	1860	0,72	780
Tijolo comum	1920	0,72	835
Bloco de concreto	-	1,1	-

Emboço de cimento e areia	1860	0,72	1085
Asfalto	2115	0,062	920
Concreto com brita	2300	1,4	880
Granito	2630	2,79	775
Mármore	2680	2,8	830
Areia	1515	0,27	800
Vidro	2500	1,4	750 - 835

Fonte: INCROPERA & WITT (1998).

Costa (1974) compara a resistência térmica de alguns dos isolantes com a do tijolo comum, e propõe a relação expressa na Tabela 5.

**Tabela 5 -** Comparativo entre isolantes e tijolo comum

ESPESSURA DE 1 CM DE ISOLANTE	EQUIVALE À ESPESSURA DE TIJOLO DE:
Madeira de pinho	6 cm
Papelão corrugado	6 cm
Cortiça, lã de vidro	10 cm
Chapas de fibra de madeira	19 cm

Fonte: COSTA (1974)

Segundo Massetto & Sabratini (1998), o desempenho das alvenarias relaciona-se com o atendimento para a qual foi dimensionado, tendo como função principal proteger os ambientes contra a ação dos agentes externos e relacionado com os usuários, procurando atender às condições de habitabilidade, segurança e durabilidade. As principais propriedades, que devem ser analisadas são:

- Resistência mecânica;
- Estabilidade;
- Estética;
- Propriedades térmicas;
- Propriedades acústicas;
- Resistência a agentes agressivos e intempéries.

## **2.14 Avaliação Acústica**

Os tratamentos acústicos tornam-se cada vez mais importantes no projeto de edifícios (PATTON, 1978).

Na construção de prédios devem ser considerados dois tipos de geração de sons: um que compreende as fontes de sons que se propagam pelo ar, como a voz humana e os alto-falantes e outro que inclui as fontes que atuam diretamente sobre a estrutura dos prédios e que produzem sons transmitidos pela estrutura (PATTON, 1978).

O estudo das propriedades acústicas do concreto alcança progressiva importância com respeito a dois aspectos fundamentais: como material de construção de edifícios, o seu comportamento em face do som desempenha importante papel como condutor de sons e ruídos ou como isolante ou amortecedor dos mesmos. Em segundo lugar, o desenvolvimento recente de métodos não destrutivos de qualificação de concretos baseados na determinação de velocidade de propagação de sons e ultra-sons veio despertar enorme interesse nesse campo (BAUER, 1987).

As vedações das edificações devem ter a capacidade de oferecer isolamento acústico de forma a proteger os espaços utilizados frente à poluição sonora. A demanda por privacidade requer que se alcance isolamento acústico entre os cômodos internos das edificações. A transmissão sonora entre dois ambientes ocorre de duas maneiras: pela transmissão via ar e via sólida, portanto as partes de um edifício devem proporcionar isolamento acústico aéreo e estrutural (LOSSO & VIVEIROS, 2004).

### **2.14.1 Ondas físicas**

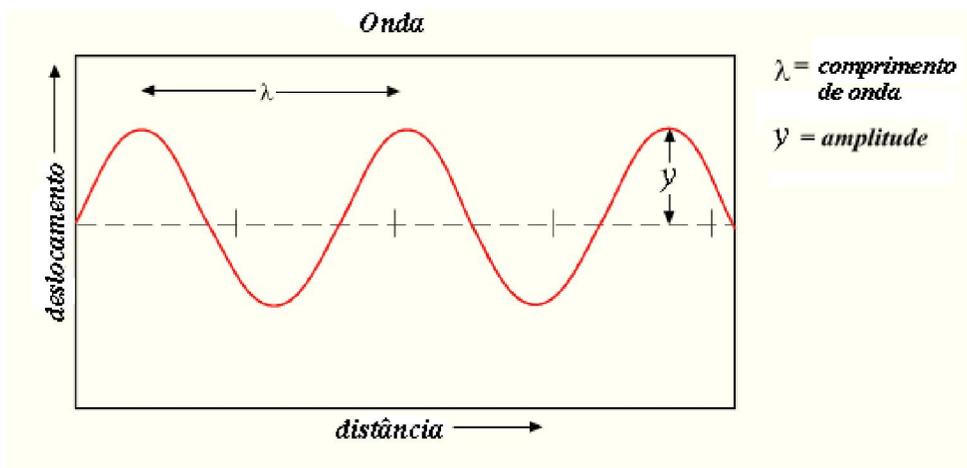
Segundo a Wikipédia (2007), uma onda em física é uma perturbação oscilante de alguma grandeza física no espaço e periódica no tempo. A oscilação espacial é caracterizada pelo comprimento de onda e a

periodicidade no tempo é medida pela frequência da onda, que é o inverso do seu período. Estas duas grandezas estão relacionadas pela velocidade de propagação de uma onda.

Fisicamente uma onda é um pulso energético que se propaga através do espaço ou através de um meio (líquido, sólido ou gasoso). Nada impede que uma onda magnética se propague no vácuo ou através da matéria, como é o caso das ondas eletromagnéticas no vácuo.

Comprimento de onda é a distância entre valores repetidos num padrão de onda. É usualmente representado pela letra grega lambda ( $\lambda$ ).

Numa onda senoidal, o comprimento de onda é a distância entre picos ou máximos (Figura 1).



**Figura 1** - Representação do comprimento de onda.

Na Figura 1, o eixo x representa a distância e o eixo y representa alguma quantidade periódica, como, por exemplo, a pressão, no caso do som ou o campo elétrico para ondas eletromagnéticas, também chamada de amplitude da onda (WIKIPÉDIA, 2007).

O comprimento de onda  $\lambda$  tem uma relação inversa com a frequência  $f$ , sendo igual à velocidade da onda dividida pela frequência da onda. Quando se lida com radiação eletromagnética no vácuo, essa velocidade é igual à velocidade da luz 'c', para sinais (ondas) no ar, essa é a velocidade em que a onda viaja. Esta relação é dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(7)

Em que:

$\lambda$  = comprimento de onda de uma onda sonora ou onda eletromagnética;

$c$  = velocidade da luz no vácuo = 299.792,458 km/s ~ 300.000 km/s = 300.000.000 m/s;

$c$  = velocidade do som no ar = 300 000 m.s<sup>-1</sup> a 20 °C (68 °F);

$f$  = frequência da onda 1/s = Hz.

A velocidade de uma onda pode, portanto, ser calculada por:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

(8)

Em que:

$v$  = velocidade da onda;

$\lambda$  = comprimento de onda de uma onda sonora ou onda eletromagnética;

$T$  = período da onda.

O inverso do período 1/T é chamado de frequência da onda, ou frequência de onda:

$$f = \frac{1}{T}$$

(9)

e mede o número de ciclos (repetições) por segundo executados pela onda, em Hertz (ciclos/segundo).

Para caracterizar uma onda, portanto, é necessário conhecer apenas duas quantidades, a velocidade e o comprimento de onda ou a frequência e a velocidade, já que a terceira quantidade pode ser determinada da equação acima, que pode ser reescrito como:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

(10)

Quando ondas de luz (e outras ondas eletromagnética) entram num dado meio, o seu comprimento de onda é reduzido por um fator igual ao índice de refração  $n$  do meio, mas a freqüência permanece inalterada. O comprimento de onda no meio  $\lambda'$  é dado por:

$$\lambda' = \frac{\lambda_0}{n}$$

(11)

Em que:

$\lambda_0$  = comprimento de onda da onda no vácuo.

A freqüência de onda é uma grandeza física associada a movimentos de características ondulatórias que indica o número de revoluções (ciclos, voltas, oscilações, etc.) por unidade de tempo.

Alternativamente, pode-se medir o tempo decorrido para uma oscilação. Este tempo em particular recebe o nome de período (T). Desse modo, a freqüência é o inverso do período (WIKIPÉDIA, 2007).

$$F = \frac{1}{T}$$

(12)

Percebe-se que, neste caso, o comprimento da onda é inversamente proporcional à freqüência.

Unidades de medidas: Hertz (Hz) corresponde ao número de oscilações por segundo. Nome dado em honra ao físico Alemão Heinrich Rudolf Hertz.

Rotações por minuto (rpm): corresponde ao número de oscilações por minuto.

Amplitude: é uma medida escalar não negativa da magnitude de oscilações de uma onda, conforme ilustrado na Figura 1.

A distância  $Y$  é a amplitude da onda, também conhecida como "pico de amplitude" para distinguir de outro conceito de amplitude, usado especialmente em engenharia elétrica: *root mean square amplitude* (ou amplitude rms), definida como a raiz quadrada da média temporal da distância vertical entre o gráfico e o eixo horizontal. O uso de "pico de amplitude" não é ambíguo para ondas simétricas e periódicas como senóides, onda quadrada e onda triangular. Para ondas sem simetria, como, por exemplo, pulsos periódicos em uma direção, o termo "pico de amplitude" torna-se ambíguo, pois o valor obtido é diferente, dependendo se o máximo valor positivo é medido em relação à média, se o máximo valor negativo é medido em relação à média ou se o máximo sinal positivo é medido em relação ao máximo sinal negativo e dividido por dois. Para ondas complexas, especialmente sinais sem repetição tais como ruído, a amplitude rms é usada freqüentemente porque não tem essa ambigüidade e também porque tem um sentido físico. Por exemplo, a potência transmitida por uma onda acústica ou eletromagnética ou por um sinal elétrico é proporcional à raiz quadrada da amplitude rms e, em geral, não tem essa relação com a raiz do pico de amplitude (WIKIPÉDIA, 2007).

A equação (13) será adotada para formalizar amplitude:

$$y = A.\sin(t - K) + b$$

(13)

Em que:

$A$  = amplitude da onda.

Amplitude de uma onda é a medida da magnitude da máxima perturbação do meio durante um ciclo da onda. A unidade utilizada para a medida depende do tipo da onda. Por exemplo, a amplitude de ondas de som e sinais de áudio costuma ser expressa em decibéis (dB).

O período na área de física é chamado de período o tempo necessário para que um movimento realizado por um corpo volte a se repetir. Por exemplo, em um relógio de pêndulo, o período do pêndulo é determinado pelo tempo que este leva para realizar o movimento de ida e de volta. Nota-se que

depois deste período o pêndulo fará o mesmo movimento novamente, ou seja, se repetirá. O período é usualmente representado pela letra T. No Sistema Internacional de Unidades (SI), o período é medido em segundos (s).

A natureza das ondas pode ser de duas naturezas: mecânicas e eletromagnéticas.

As ondas mecânicas são constituídas por impulsos mecânicos que se transmitem por meio de vibrações das partículas que constituem o meio, as quais requerem a presença do meio material (das partículas) para se transmitirem. Essa é a razão pela qual elas não se propagam no vácuo. Transportam uma energia mecânica de vibração que se apresenta na forma de energia potencial e de energia cinética. Os exemplos mais comuns de ondas mecânicas são: ondas sonoras (som), ondas em cordas e molas e as ondas em superfícies líquidas.

As ondas eletromagnéticas são constituídas por dois campos perpendiculares entre si, um elétrico (E) e um magnético (B), variáveis com o tempo e com a posição e perpendiculares à direção de propagação da onda. Elas se propagam em alguns meios materiais e também no vácuo. Os exemplos mais comuns de ondas eletromagnéticas são: ondas de rádio e TV, microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X, raios  $\gamma$  (gama).

Pela definição da Física o vácuo é denominado como a ausência de matéria (como moléculas e átomos) em um volume de espaço.

Além disso, as ondas podem ser classificadas em ondas longitudinais, transversais e mistas de acordo com a direção de vibração das partículas, em relação à direção de propagação.

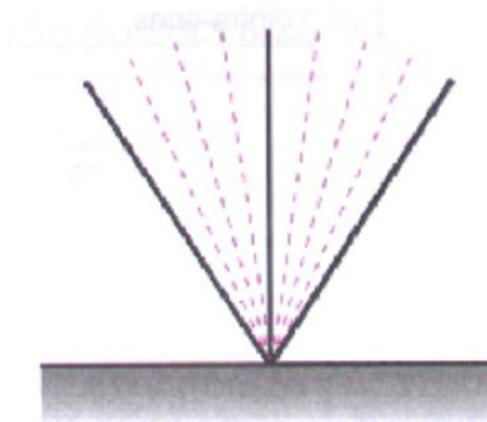
As ondas longitudinais são ondas nas quais a direção em que vibram as partículas (direção de vibração) coincide com a direção de propagação da onda, no qual o som é um exemplo de ondas longitudinais.

As ondas transversais são ondas em que a direção de vibração das partículas é perpendicular às direções de propagação da onda, tomando como exemplo, as ondas eletromagnéticas como a luz.

As ondas mistas são ondas em que as partículas vibram longitudinal e transversalmente, ao mesmo tempo, tomando-se como exemplo as ondas nas superfícies dos líquidos.

### 2.14.2 Produção do som

Segundo a Wikipédia (2007), a produção do som é analisada de acordo com a seguinte metodologia: fixa-se uma lâmina de aço muito fina para que ela possa oscilar, conforme indica a Figura 2.



**Figura 2** - Representação da produção de uma onda sonora.

Fonte: WIKIPÉDIA (2007).

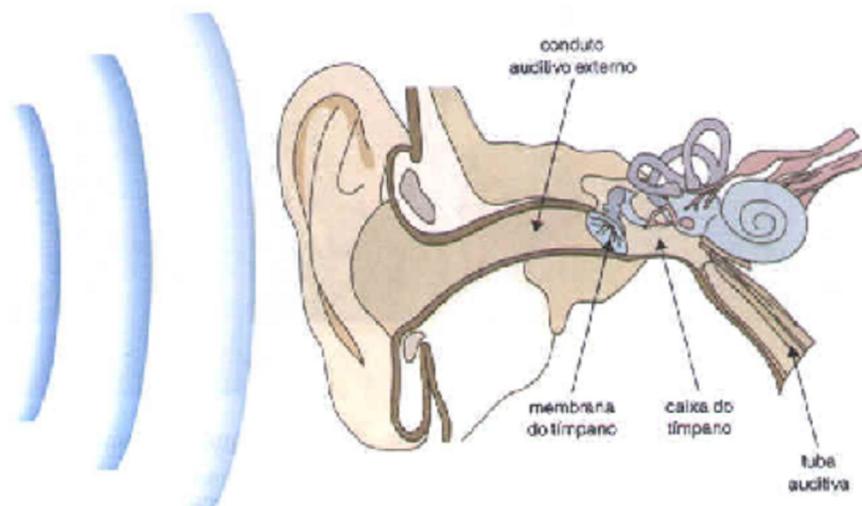
Na medida em que a lâmina é deslocada, sua extremidade livre oscila para a direita e para a esquerda. Se a lâmina vibrar com rapidez, produzirá um som sibilante, mostrando que os sons são produzidos pela matéria em vibração.

À medida que a lâmina oscila para a direita, ela realiza trabalho nas moléculas do ar, comprimindo-as, transferindo a elas energia na direção da compressão. Ao mesmo tempo, as moléculas do ar, situadas à esquerda, se expandem e se tornam rarefeitas, o que retira energia delas. Quando a lâmina se move no sentido inverso, ela transfere energia para as moléculas do ar situadas à esquerda, enquanto as da direita perdem energia.

O efeito combinado de compressão e rarefação simultâneas transfere energia das moléculas do ar da esquerda para a direita ou da direita para a

esquerda, na direção do movimento da lâmina, produzindo ondas longitudinais, nas quais as moléculas do ar se movimentam para frente e para trás, recebendo energia das moléculas mais próximas da fonte e transmitindo-a para as moléculas mais afastadas dela, até chegarem ao ouvido.

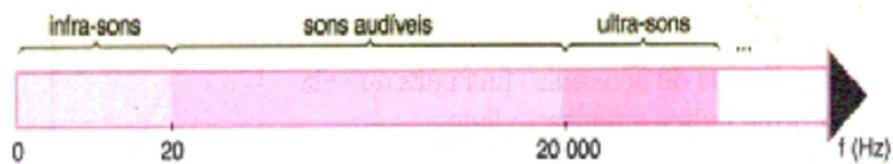
No ouvido, as ondas atingem uma membrana denominada tímpano que vibra na mesma frequência das ondas, transmitindo ao cérebro, por impulsos elétricos, a sensação denominada som (Figura 3).



**Figura 3** - Procedimentos para a captação do som pelo ser humano.

Fonte: WIKIPÉDIA (2007).

As ondas sonoras podem se propagar com diversas frequências, porém o ouvido humano é sensibilizado somente quando elas chegam a ele com frequência entre 20 Hz e 20.000 Hz, aproximadamente (Figura 4).



**Figura 4** - Frequências de ondas sonoras.

Fonte: WIKIPÉDIA (2007).

Quando a frequência é maior que 20.000 Hz, as ondas são ditas ultra-sônicas, e menor que 20 Hz, infra-sônicas.

### 2.14.3 Transmissão do som

Segundo a Wikipédia (2007), a maioria dos sons chega ao ouvido transmitido pelo ar, que age como meio de transmissão.

Nas pequenas altitudes, os sons são bem audíveis, o que não ocorre em altitudes maiores, onde o ar é menos denso. O ar denso é melhor transmissor do som que o ar rarefeito, pois as moléculas gasosas estão mais próximas e transmitem a energia cinética da onda de umas para outras com maior facilidade.

Os sons não se transmitem no vácuo, porque exigem um meio material para sua propagação. De uma maneira geral, os sólidos transmitem o som melhor que os líquidos, e estes, melhor do que os gases.

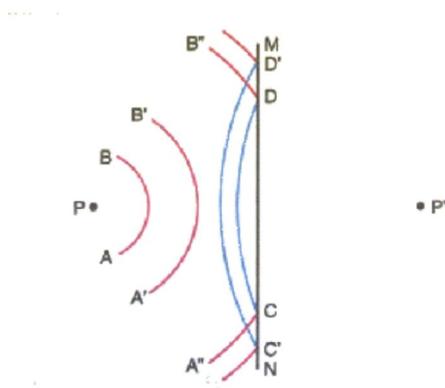
Se a energia emitida pela fonte é grande, isto é, se o som é muito forte, tem-se uma sensação desagradável no ouvido, pois a quantidade de energia transmitida exerce sobre o tímpano uma pressão muito forte. Quanto maior a vibração da fonte, maior a energia sonora, logo: quanto menor a velocidade menor a intensidade.

#### 2.14.4 Fenômenos sonoros

Sendo o som uma onda, ele apresenta as seguintes propriedades características: reflexão, refração, difração, interferência e ressonância.

Reflexão: quando ondas sonoras  $AB$ ,  $A'B'$ ,  $A''B''$ , provenientes de um ponto  $P$  encontram um obstáculo plano, rígido,  $MN$ , produz-se reflexão das ondas sobre o obstáculo. Na volta, produz-se uma série de ondas refletidas  $CD$ ,  $C'D'$ , que se propagam em sentido inverso ao das ondas incidentes e se comportam como se emanassem de uma fonte  $P'$ , simétrica da fonte  $P$  em relação ao ponto refletor, conforme ilustrado pela Figura 5.

A reflexão do som pode ocasionar os fenômenos eco e reverberação.

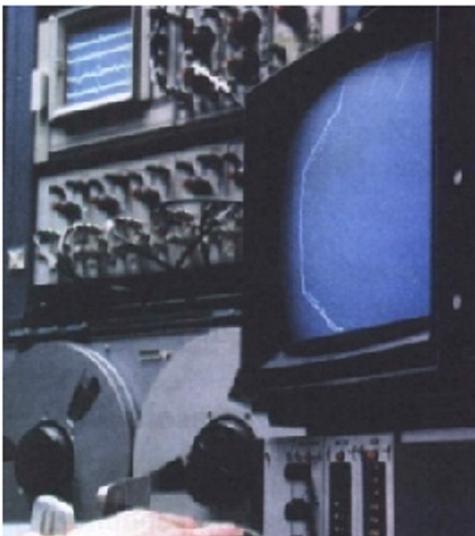


**Figura 5** - Representação gráfica do eco.

Fonte: WIKIPÉDIA (2007).

Os obstáculos que refletem o som podem apresentar superfícies muito ásperas. Assim, o som pode ser refletido por um muro, uma montanha, etc. Ao som refletido denomina-se eco, quando se distingue do som direto. Para que uma pessoa possa ouvir o eco de um som por ela produzido, deve ficar situada a, no mínimo, 17 m do obstáculo refletor, pois o ouvido humano só pode distinguir dois sons com intervalo de 0,1 s. O som, que tem velocidade de 340 m/s, percorre 34 m nesse tempo.

O sonar é um aparelho capaz de emitir ondas sonoras na água e captar seus ecos, permitindo, assim, a localização de objetos sob a água (Figura 6).



**Figura 6** - Representação do sonar.

Fonte: WIKIPÉDIA (2007).

**Reverberação:** em grandes salas fechadas ocorre o encontro do som com as paredes. Esse encontro produz reflexões múltiplas que, além de reforçar o som, prolongam-no durante algum tempo depois de cessada a emissão. É esse prolongamento que constitui a reverberação.

A reverberação ocorre quando o som refletido atinge o observador no instante em que o som direto está se extinguindo, ocasionando o prolongamento da sensação auditiva.

**Refração:** consiste na passagem da onda sonora de um meio para o outro, mudando sua velocidade de propagação e comprimento, mas mantendo constante a frequência.

**Difração:** fenômeno que consiste em uma onda sonora poder transpor obstáculos.

Quando se coloca um obstáculo entre uma fonte sonora e o ouvido, por exemplo, o som é enfraquecido, porém não extinto. Logo, as ondas

sonoras não se propagam somente em linha reta, mas sofrem desvios nas extremidades dos obstáculos que encontram.

Interferência: consiste no recebimento de dois ou mais sons de fontes diferentes. Neste caso, tem-se uma região do espaço na qual, em certos pontos, será ouvido um som forte, e em outros, um som fraco ou ausência de som, considerando:

- Som forte à interferência construtiva;
- Som fraco à interferência destrutiva.

Ressonância: quando um corpo começa a vibrar por influência de outro, na mesma frequência deste, ocorre um fenômeno chamado ressonância. Como exemplo, pode-se citar o vidro de uma janela que se quebra ao entrar em ressonância com as ondas sonoras produzidas por um avião a jato.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para avaliar a influência da resistência à compressão axial, densidade, comportamento térmico e acústico, na confecção de concreto leve, com substituição de parte do agregado graúdo por espuma de poliestireno expandido (EPS), foi desenvolvida a metodologia descrita a seguir. Os materiais utilizados e os ensaios necessários foram realizados nos laboratórios de materiais de construção e estruturas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Cascavel, seguindo as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

#### **3.1 Caracterização dos Materiais**

Inicialmente foi realizada a caracterização dos materiais envolvidos na pesquisa: areia, brita, cimento e espuma de poliestireno expandido.

##### **3.1.1 Areia (agregado miúdo)**

Utilizou-se areia seca, do tipo areia de rio ou natural, quartzosa, proveniente da região de Guaíra – PR, devidamente armazenada no laboratório para a não ocorrência de problemas, por contaminação com outros materiais e ou intempéries (chuvas). Mantida pelo tempo necessário sob a lona e devidamente misturada para a secagem natural, mantendo apenas a umidade relativa do ar.

A composição granulométrica, isto é, a proporção relativa expressa em forma de porcentagem em que se encontram os grãos de certo agregado, tem importante influência sobre a qualidade do concreto, agindo na compacidade e resistência. A composição granulométrica ou granulometria do agregado foi determinada por peneiração, de acordo com a NBR 7217/87 (ABNT, 1987), apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6 -** Distribuição granulométrica da areia - NBR 7217/87

PENEIRAS (mm)	MASSA RETIDA (g)	RETIDA %	RETIDA ACUMULADA %
4,8	-	-	0,00
2,4	11,20	1,12	1,12
1,2	101,60	10,18	11,30
0,6	136,50	13,67	24,97
0,3	468,60	46,94	71,91
0,15	256,10	25,65	97,57
Fundo	24,30	2,43	100,00
TOTAL	998,30	100,00	-
Diâmetro máximo (mm)		2,40	
Diâmetro mínimo (mm)		0,15	
Módulo de finura		2,07	
Classificação NBR 7217/87		FINA	

A massa específica é a relação entre a massa e o volume de cheios, isto é, o volume dos grãos dos agregados. Verificada conforme o estabelecido pela NBR 6508/84 (ABNT, 1984). A massa unitária é a relação entre a massa total de certo volume de agregados e esse volume, considerando-se os vazios existentes entre os grãos do agregado. É por meio da massa unitária que são feitas as transformações dos traços em massa para volume e vice-versa. Verificada pela NBR 7251/82 (ABNT, 1982). Os parâmetros definidos são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 -** Caracterização física da areia

Massa Específica (NBR 6508/84)	2604,16	Kg.m <sup>-3</sup>
Massa unitária (NBR 7251/82)	1680,64	Kg.m <sup>-3</sup>

### 3.1.2 Brita (agregado graúdo)

Utilizou-se brita de origem basáltica, da região oeste do Paraná, com características físicas, conforme apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8** - Caracterização física da brita

Massa específica (NBR 6508/84)	2950,00	Kg.m <sup>-3</sup>
Massa unitária (NBR 7251/82)	1472,49	Kg.m <sup>-3</sup>
Classificação NBR 7217/87*		BRITA 1

Nota: \* Como o objetivo deste trabalho foi de substituir o agregado graúdo por espuma de poliestireno expandido, decidiu-se utilizar uma faixa granulométrica de 9,5 mm a 19 mm (passa na peneira de 19 mm e fica retido na peneira de 9,5 mm), para se reduzir as variáveis pertinentes aos vários diâmetros do agregado classificado como brita 1.

### 3.1.3 Cimento

Nas tabelas 9 e 10 são apresentados o cimento Portland Votoran<sup>1</sup> (CPII Z-32), utilizado nesta pesquisa, e as suas características de composição, exigências físicas e mecânicas obtidas pelo fabricante.

**Tabela 9** - Composição do cimento Portland CPII Z-32

TIPO	SIGLA	CLASSE	NORMA	CLÍNQUER + GESSO	CALCÁRIO	POZOLANA
II	CPII Z	32	11578	76 a 94%	0 a 10%	6 a 14%

**FONTE:** Votorantim Cimentos. Disponível na embalagem do produto.

**Tabela 10** - Exigências físicas e mecânicas do cimento Portland CPII Z-32

FINURA		TEMPO DE PEGA		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (Mpa)		
Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m <sup>2</sup> /Kg)	Início (h)	Término (h)	3 dias	7 dias	28 dias
≤12	≥260	≥1	≤10	≥10	≥20	≥32

1 A citação de marcas de produtos utilizados neste trabalho não constitui sua recomendação comercial, mas somente a descrição necessária dos elementos da pesquisa.

**FONTE:** Votorantim Cimentos. Disponível na embalagem do produto.

### **3.1.4 Espuma de Poliestireno Expandido (EPS)**

Toda a espuma de poliestireno expandido utilizada nesta pesquisa foi doada por um empresário da cidade de Cascavel. Esta empresa, devido ao seu ramo de atuação, consome uma grande quantidade de materiais cujas embalagens são fabricadas com espuma de poliestireno expandido. Em razão do grande volume de EPS, o empresário destinou em sua empresa, um espaço para separação de resíduos sólidos. Neste depósito, encontrou-se matéria-prima suficiente para o desenvolvimento deste trabalho. Depois de feita a coleta dos blocos de EPS, o material foi moído manualmente, com o auxílio de peneiras utilizadas nos ensaios de granulometria.

#### **3.1.4.1 Granulometria**

Neste trabalho foram utilizados flocos de espuma de poliestireno expandido provenientes da trituração de placas e caixas térmicas provenientes de resíduos industriais. Houve necessidade de formulação do ensaio granulométrico do EPS que, como não é comumente usado para confecção de concreto, foi necessário realizar os ensaios de forma análoga aos utilizados para o agregado miúdo, de acordo com a NBR 7217/87 (ABNT, 1987). Suas características são as apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11** - Granulometria do material espuma de poliestireno expandido

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA - EPS			
Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,5	-	-	0
4,8	0,90	20,00	20,00
2,4	3,20	71,11	91,11
1,2	0,30	6,67	97,78
0,6	0,10	2,22	100,00
0,3	-	-	-
0,15	-	-	-
Fundo	-	-	-
TOTAL	4,50	100	-

### 3.1.4.2 Módulo de finura

Relaciona-se com a área superficial do agregado e, conseqüentemente, altera a água de molhagem para certa consistência. Deve ser mantido constante, para evitar a alteração do traço. Os ensaios foram realizados de forma semelhante aos utilizados para o agregado miúdo e de acordo com a NBR 7217/87 (ABNT, 1987), cujas características são as apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12** - Caracterização do diâmetro máximo, diâmetro mínimo e módulo de finura da espuma de poliestireno expandido

Diâmetro máximo (mm)	4,80
Diâmetro mínimo (mm)	1,20
Módulo de finura	3,09
Classificação NBR 7211/2004*	BRITA 1

Nota: \* = Classificação da brita 1 utilizada e que será substituída por EPS.

### 3.1.4.3 Massa específica

A massa específica é a relação entre a massa e o volume de cheios, isto é, o volume dos grãos dos agregados. O ensaio foi realizado de acordo com o que é estabelecido na NBR 6508/84, com valor da massa específica de  $22,58 \text{ Kg.m}^{-3}$ .

### 3.1.4.4 Massa unitária

É a relação entre a massa total de certo volume de agregados e esse volume total, considerando-se os vazios existentes entre os grãos do agregado. É por meio da massa unitária que são feitas as transformações dos traços em massa para volume e vice-versa. Conforme a NBR 7251/82 (ABNT, 1982) foi determinado pelo ensaio o valor da massa unitária de  $10,65 \text{ Kg.m}^{-3}$ .

### 3.1.5 Impurezas

Os agregados não devem conter impurezas (orgânicas, torrões de argila e materiais pulverulentos), substâncias nocivas que prejudiquem as reações e o endurecimento do aglomerante nos concretos. Os ensaios realizados para a areia, brita e espuma de poliestireno expandido, utilizados na pesquisa, não demonstraram índice significativo de impurezas, uma vez que foram previamente selecionados para realização do experimento, observados os limites estabelecidos pelas NBRs 7218/87, 7219/87 e 7220/87.

### 3.2 Dosagem do Concreto Leve

Utilizou-se o traço 1:2, 5:2, 5:0, 75 (cimento: areia: brita: água), em volume, devido à facilidade que este proporciona para a quantificação dos materiais envolvidos, além de ser este, um traço comumente utilizado nas construções.

Caso não seja pré-fixado o traço para a composição, segundo Tango & Saad (2002), pode-se utilizar o método de dosagens do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológicas), com as devidas adaptações para uso de adições e aditivos, podendo-se adotar distribuições granulométricas e materiais diferentes nas dosagens de concreto.

Os teores de substituição da brita pela espuma de poliestireno expandido foram de 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%, perfazendo cinco dosagens. Consistência ou plasticidade, conforme ensaio de abatimento do tronco de cone realizado de acordo com a NBR 7223/92 (ABNT, 1992) de forma a se ter baixa plasticidade, diminuindo a possibilidade de desagregação da mistura em função da baixa densidade do EPS, com faixa de 3 cm a 8 cm e limite de tolerância de (+ou-) 1 cm, com a relação água/cimento de 0,75.

Para sua execução o concreto foi misturado mecanicamente por meio de betoneira elétrica convencional, visando obter uma seqüência de mistura ideal, visto que havia a possibilidade de ocorrer a flutuação do EPS mediante a presença de água, proporcionando uma mistura homogênea entre os materiais, adotando-se o seguinte procedimento de colocação e mistura do material na betoneira:

- 1) Reservaram-se os materiais nos respectivos recipientes de acordo com o traço estipulado para pesquisa (caixas metálicas, com volume equivalente ao saco de cimento de 50 Kg = 0,0357 m<sup>3</sup>);
- 2) Inicialmente, colocou-se cem por cento da brita 1 na betoneira em funcionamento;
- 3) Adicionou-se um terço da água, reservada anteriormente em recipiente graduado apropriado;
- 4) Adicionou-se cem por cento do cimento;

- 5) Adicionou-se mais um terço da água;
- 6) Adicionou-se cem por cento da espuma de poliestireno expandido;
- 7) Adicionou-se toda a areia;
- 8) Adicionou-se o restante da água.

O tempo total de mistura na betoneira em funcionamento foi de 5 minutos.

Citar Tabela 13.

**Tabela 13** - Composições dos concretos preparados

REGISTRO	CONCRETOS (CINCO DOSAGENS)				
	I	II	III	IV	V
Traço em volume cimento: agregado total (1:m)	1,0:5,0	1,0:5,0	1,0:5,0	1,0:5,0	1,0:5,0
Cimento CII - E 32	1	1	1	1	1
Areia	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Brita	2,5	1,875	1,25	0,625	0
EPS	0	0,625	1,25	1,875	2,5
Relação a/c	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

### 3.3 Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Densidade

O procedimento de preparação, molde e cura dos corpos de prova cilíndricos, utilizados para avaliação da resistência e densidade do concreto, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, com teores de EPS de 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%, substituindo a brita, segue as recomendações da NBR 5738/03 (ABNT, 2003). Para cada dosagem, foram moldados quatro corpos-de-prova por idade para a determinação da resistência à compressão e densidade do concreto no estado endurecido, perfazendo um total de 80 corpos de prova (ensaios). O procedimento para determinação da densidade foi estabelecido pela relação entre o peso (balança digital) e o volume dos corpos de prova, executado antes do rompimento dos corpos de prova (prensa hidráulica) que foram utilizados para determinação da resistência à compressão, executado conforme a norma NBR 5739/07.

### **3.4 Placas de Concreto para Avaliações Térmica e Acústica**

Foram confeccionadas, junto com os corpos de prova cilíndricos, quatro placas para cada um dos teores de substituição de brita por EPS sendo, 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%, (totalizando 20 placas), com dimensões iguais a 5 x 40 x 40 cm.

Para conformação das placas de concreto foram feitas molduras quadradas de madeira com 5 cm de altura (correspondente à espessura da placa) e 40 cm de lado. Estas molduras foram posicionadas sobre uma lona plástica, sobre a qual foi aplicado um desmoldante (óleo mineral). Procedeu-se então a execução das placas despejando o concreto com o auxílio de um carrinho de mão e colher de pedreiro. Em seguida, fez-se o adensamento das placas utilizando-se uma haste metálica. Para perfeito acabamento da superfície, utilizou-se desempenadeira de madeira. Os ensaios para análise do desempenho térmico e acústico foram realizados somente após 28 dias de execução das placas.

### **3.5 Montagem do Aparato Experimental para Avaliação Térmica**

O sistema constituiu-se de: placas de concreto, caixa térmica, fonte de calor radiante e sistema de medição de temperatura.

As placas de concreto foram moldadas conforme procedimento acima descrito e submetidas aos testes aos 28 dias de idade.

As paredes da caixa térmica foram construídas em chapas de compensado naval de 18 mm de espessura. Cada parede possuía três camadas de chapas compensadas espaçadas a cada 18 mm. Entre as chapas,

utilizou-se como preenchimento espuma expansiva de poliuretano (na forma de aerosol) da marca EXPANCIT. Desta forma, as paredes da caixa térmica se constituíam de um “sanduíche” de madeira-poliuretano. A espessura final das paredes da caixa era de 90 mm.

A caixa térmica era formada, portanto, de quatro paredes madeira-poliuretano, sem “fundo” e sem “frente”. A parte da frente da caixa destinava-se a acomodar as placas de concreto. Na parte dos fundos da caixa fixou-se a fonte radiante de calor.

Para o fornecimento de calor foi montado um painel com dimensões de 9 x 40 x 40 cm (correspondente à medida do “fundo” da caixa térmica) com os seguintes componentes:

- 2 lâmpadas incandescentes de secagem (infravermelho), de 250W/127V cada, da marca EMPALUX;
- 2 soquetes de porcelana da marca LORENZETTI;
- 4 m de cabo condutor flexível preto de 2,50 mm 750V;
- 1 variador de luminosidade – DIMMER – bivolt (500W/127V – 1000W/220V), da marca PIAL LEGRAND;
- 1 plugue macho da marca TRAMONTINA;
- 3 chapas de compensado naval de 18 mm de espessura e 40 x 40 cm de lado;
- Espuma expansiva de poliuretano da marca EXPANCIT.

Inicialmente montou-se a base do painel, constituída pelas chapas de compensado espaçadas e pelo preenchimento em poliuretano (idêntico ao procedimento adotado para confecção das paredes da caixa térmica). Em seguida, fixaram-se os soquetes de porcelana e procedeu-se a instalação do material elétrico (fios, *dimmer* e plugue), conforme recomendação dos fabricantes. Feito isto, as lâmpadas puderam ser instaladas e devidamente testadas. Finalizada a montagem do painel, procedeu-se a sua fixação junto ao fundo da caixa térmica, utilizando-se a espuma expansiva de poliuretano.



**Figura 7** - Caixa térmica e fonte de calor radiante.



**Figura 8** - Teste dos componentes elétricos.

O sistema de medição de temperatura era constituído por quatro termopares tipo “T”, ligados a um equipamento para a coleta de dados dos termopares da marca *General Controls*. Este equipamento possuía um mostrador digital (*display*) no qual a temperatura de cada termopar podia ser lida à medida que se girava um seletor de canais. Os quatro termopares mediam a: temperatura próxima às lâmpadas (T1), a temperatura na face interna da placa de concreto (T2), na face externa da placa de concreto (T3), e o monitoramento da temperatura ambiente (T4).

Na Figura 9 é mostrado o equipamento eletrônico utilizado na coleta de dados de dados de temperatura dos termopares.



**Figura 9** - Equipamento utilizado para coleta dos dados de temperaturas dos termopares.

O tempo total de leitura, para cada placa, foi de exatas duas horas. Durante os primeiros dez minutos os dados foram registrados minuto a minuto, devido à elevada variação da temperatura dos termopares T1, T2 e T3. Dos dez aos trinta minutos, as leituras foram realizadas a cada cinco minutos, e dos trinta aos cento e vinte minutos, a medição foi feita a cada dez minutos.

Os experimentos foram realizados em local fechado para evitar a interferência de rajadas de vento.

### **3.6 Aparato Experimental para Avaliação Acústica**

O sistema usado na experiência é constituído por: placas de concreto, caixa acústica, fonte sonora e sistema de medição do som através de decibelímetro.

Todas as avaliações tiveram como base, a transmissão sonora que ultrapassava a caixa acústica fabricada com madeira laminada colada, que tinha quatro de suas paredes laterais interiormente revestidas com duas

camadas de espuma de poliestireno expandido na forma de placas coladas entre si e devidamente seladas, para maior segurança do ensaio.

Como a caixa possuía duas paredes livres, sem tampa e fundo, foram colocadas como tampa as placas com os diversos teores de substituição de brita por espuma de poliestireno expandido a serem analisadas, e como fundo foi utilizada uma camada de espuma de poliestireno expandido na forma de placa, colocada sobre a mesa em que ficou a caixa, tomando-se os devidos cuidados para que o som não chegasse de outra forma a não ser a desejada para a pesquisa.

A fonte sonora ficou presa e elevada para que, desse modo, não houvesse contato ou proximidade com a placa que estava sendo avaliada.

Foram obtidas duas leituras, por meio de dois decibelímetros, um dentro e outro fora da caixa. A leitura gerada pelo som que ficava na parte externa (próximo da fonte sonora e sem isolamento acústico), e a leitura do som interno com o decibelímetro no interior da caixa, conforme Figura 10.



**Figura 10** - Posição dos decibelímetros, interno e externo e da caixa sem a placa de concreto e com a placa de concreto como tampa.

Com a obtenção dos resultados foram montadas análises correspondentes para a obtenção das relações de passagem e absorção acústica.

Segundo Amboni Jr. (2006), O decibelímetro é um aparelho que mede precisamente áreas de ruídos e outros níveis de som. Tanto o digital quanto o analógico designam e medem características especiais, possuindo gráfico de

barras e outros dados de gravação, sendo preciso em qualquer ambiente acústico. O medidor é leve e fácil de operar. Na Tabela 14 são apresentados os níveis medidos de ruído para cada ambiente bem como os comparativos.

**Tabela 14** - Níveis de decibéis relacionados aos sons do dia a dia

NÍVEL	BAIXO	-	ALTO	UNID.	SONS DO DIA A DIA
Muito baixo	0	a	20	db	Farfalar de folhas
Baixo	20	a	40	db	Conversação silenciosa
Moderado	40	a	60	db	Conversação normal
Alto	60	a	80	db	Ruído médio de fábrica ou trânsito
Muito alto	80	a	100	db	Apito de guarda e ruído de caminhão
Ensurdecedor	100	a	120	db	Ruído de discoteca ou avião decolando

Fonte: Instituto Nacional de Educação dos Surdos (INES)

Os aparelhos são compostos de duas bandas de medição: acústica (A e C) e em modo *slow*, que são respectivamente definidos por:

- Banda A: designa a relação em que o som se mantém sobre determinada frequência por tempo adequado sem a ação imediata de variação instantânea;
- Banda C: comparado com a Banda A é somente a medida instantânea referente à variação gerada por percussão imediata podendo ou não ser continua na sua medição;
- Modo *slow*: define continuamente o estudo das variações acústicas relacionadas à condição desejada. Utilizado previamente com melhores respostas sobre a condição da Banda A.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e a discussão das análises experimentais dos concretos executados com a substituição parcial de brita por espuma de poliestireno expandido, divididos em cinco etapas principais: consistência ou trabalhabilidade no estado fresco, densidade, resistência à compressão, desempenho térmico e desempenho acústico.

### 4.1 Consistência no Estado Fresco

Para os diferentes teores de espuma de poliestireno expandido incorporado ao traço de referência, observou-se boa coesão e consistência adequada para a moldagem dos corpos-de-prova. Não foram observados os fenômenos de exudação e segregação da espuma de poliestireno expandido no concreto leve em estudo.

Entretanto, houve perda na consistência ou trabalhabilidade do concreto, devido à substituição do agregado graúdo por espuma de poliestireno expandido que, por ser um material de menor granulometria, possui área específica maior e, em consequência, maior área de molhagem dos grãos, diminuindo a água de amassamento e tornando o concreto mais seco. A Tabela 15 apresenta os valores obtidos para o *Slump* Teste ou abatimento pelo tronco de cone (NBR 7223/92).

**Tabela 15 - *Slump* teste**

TRAÇO	RF	25% EPS	50% EPS	75% EPS	100% EPS
Slump (cm)	7,5	7,0	5,0	5,0	2,0

Siqueira, Stramari & Folgueras (2004) constataram em sua pesquisa, envolvendo mistura com aparas de poliuretano, em lugar de EPS, a ocorrência do mesmo fenômeno, em relação à necessidade de aumentar o fator água/cimento, por motivo de absorção de água a mais, proveniente do uso de materiais alternativos. Tendo constatado que 1 grama de poliuretano absorve 7,2 vezes o seu peso em quantidade de água necessária para a mistura, de modo a não diminuir água utilizada para a hidratação do cimento no concreto. Neste estudo, a espuma de poliestireno expandido absorve 9,8 gramas de água a mais na mistura para cada grama de EPS, que foi considerado na relação do fator água/cimento.

Apesar do traço com 100% de EPS ter um índice de consistência baixo para a relação água/cimento de 0,75, utilizada para todos os resultados, não houve dificuldade de se garantir um bom adensamento na moldagem dos corpos-de-prova.

Após o rompimento dos corpos de prova, verificou-se que a distribuição do EPS durante o processo de secagem permaneceu homogênea, não havendo má distribuição do EPS no concreto no estado endurecido, conforme ilustra a Figura 11.



**Figura 11** - Corpo-de-prova com 100% de EPS.

## 4.2 Densidade no Estado Endurecido

A densidade dos concretos leves foi determinada pela relação entre o peso e o volume dos corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (volume = 0,001571 m<sup>3</sup>), nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias e teores de substituição de brita por EPS, sendo: 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%. Para cada teor foram moldados quatro corpos-de-prova por idade para a determinação da densidade do concreto no estado endurecido. Os resultados obtidos estão relacionados na Tabela 16 e as análises estatísticas estão demonstradas nas tabelas 17 e 18.

Os dados da análise estatística da densidade da EPS constam no Anexo A.

**Tabela 16** - Densidade da EPS

TRAÇO	RF		25% EPS		50% EPS		75% EPS		100% EPS	
Idade	g	Kg.m <sup>-3</sup>	g	Kg.m <sup>-3</sup>						
7 dias	3690	2348,82	3425	2180,14	3170	2017,82	2865	1823,68	2590	1648,63
	3705	2358,37	3405	2167,41	3195	2033,74	2840	1807,77	2575	1639,08
	3700	2355,19	3405	2167,41	3150	2005,09	2790	1775,94	2620	1667,73
	3755	2390,20	3415	2173,77	3185	2027,37	2835	1804,58	2580	1642,27
Média	2354,13		2172,18		2026,31		1802,99		1649,43	
14 dias	3740	2380,65	3375	2148,31	3115	1982,81	2795	1779,12	2560	1629,54
	3760	2393,38	3450	2196,05	3140	1998,73	2795	1779,12	2570	1635,90
	3705	2358,37	3430	2183,32	3155	2008,27	2845	1810,95	2560	1629,54
	3685	2345,64	3415	2173,77	3170	2017,82	2840	1807,77	2575	1639,08
Média	2352,01		2168,47		2008,27		1794,24		1633,51	
21 dias	3690	2348,82	3395	2161,04	3095	1970,08	2790	1775,94	2575	1639,08
	3690	2348,82	3385	2154,68	3105	1976,45	2780	1769,57	2540	1616,80
	3705	2358,37	3405	2167,41	3150	2005,09	2795	1779,12	2540	1616,80
	3735	2377,47	3415	2173,77	3125	1989,18	2780	1769,57	2560	1629,54
Média	2352,01		2164,23		1978,57		1773,55		1625,56	
28 dias	3685	2345,64	3390	2157,86	3100	1973,27	2780	1769,57	2525	1607,26
	3660	2329,73	3360	2138,77	3150	2005,09	2775	1766,39	2550	1623,17
	3670	2336,09	3385	2154,68	3115	1982,81	2810	1788,67	2520	1604,07
	3720	2367,92	3355	2135,58	3105	1976,45	2795	1779,12	2505	1594,53
Média	2337,15		2146,72		1977,51		1775,94		1607,26	

**Tabela 17-** Comparação de médias da densidade (idade) - Tukey

IDADE (dias)	MÉDIAS – Tukey
28	1971,83 a
21	1981,41 a
14	1994,91 b
7	2001,75 b

Notas: Letras iguais correspondem a médias iguais ao nível de 5% de significância;  
 Letras diferentes correspondem a médias diferentes ao nível de 5% de significância.

**Tabela 18 -** Comparação de médias da densidade (teor de EPS) - Tukey

EPS (%)	MÉDIAS – Tukey
100	1628,94 a
75	1786,68 b
50	1998,13 c
25	2164,66 d
0	2358,96 e

Notas: Letras iguais correspondem a médias iguais ao nível de 5% de significância;  
 Letras diferentes correspondem a médias diferentes ao nível de 5% de significância.

Se comparados aos concretos convencionais que, usualmente, apresentam valores da densidade na ordem de 2300 Kg.m<sup>-3</sup>, os concretos leves com EPS apresentaram redução dos valores da densidade de até 31%, isso com 100% de EPS. Este fato torna-se positivo quando se busca um concreto com baixa massa específica.

Siqueira, Stramari & Folgueras (2004) substituíram a brita por aparas de poliuretano e constataram que, com 10% em peso de substituição, resultou numa redução de 29,47% na densidade do concreto.

#### 4.3 Resistência à Compressão no Estado Endurecido

A resistência à compressão dos concretos leves foi determinada segundo as recomendações da NBR 5739/07 (ABNT, 2007), utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, nas

idades de 7, 14, 21 e 28 dias e teores de substituição de brita por espuma de poliestireno expandido. Sendo: 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%. Para cada dosagem foram moldados quatro corpos-de-prova por idade para a determinação da resistência à compressão do concreto no estado endurecido. A resistência à compressão está demonstrada na Tabela 19, as médias da resistência à compressão estão apresentadas na Tabela 20 e a análise estatística na Tabela 21. Os resultados dos ensaios estão relacionados na Tabela 17, e os valores médios na Tabela 21.

**Tabela 19 - Resistência à compressão**

TRAÇO	RF		25% EPS		50% EPS		75% EPS		100% EPS	
Idade	cgf	Kgf/cm <sup>2</sup>	cgf	Kgf/cm <sup>2</sup>	cgf	Kgf/cm <sup>2</sup>	cgf	Kgf/cm <sup>2</sup>	cgf	Kgf/cm <sup>2</sup>
7 dias	13920	177,23	7836	99,77	7361	93,72	5409	68,87	5240	66,72
	13830	176,09	7792	99,21	7968	101,45	4257	54,20	5214	66,39
	12770	162,59	7239	92,17	7983	101,64	4875	62,07	5571	70,93
	13180	167,81	5777	73,56	8425	107,27	5063	64,46	5133	65,36
14 dias	13550	172,52	9332	118,82	9515	121,15	6518	82,99	4901	62,40
	15200	193,53	8533	108,65	10070	128,22	6286	80,04	5515	70,22
	13650	173,80	9146	116,45	9309	118,53	6024	76,70	4894	62,31
	15560	198,12	8019	102,10	9883	125,83	6617	84,25	5187	66,04
21 dias	17480	222,56	10180	129,62	9338	118,90	5674	72,24	5850	74,48
	16850	214,54	10590	134,84	8587	109,33	6032	76,80	5915	75,31
	16890	215,05	10300	131,14	9073	115,52	5442	69,29	5401	68,77
	17410	221,67	10940	139,29	10030	127,71	7034	89,56	4288	54,60
28 dias	18310	233,13	10960	139,55	12870	163,87	5719	72,82	7018	89,36
	18750	238,73	10580	134,71	11890	151,39	7188	91,52	6919	88,10
	18060	229,95	10400	132,42	11870	151,13	7059	89,88	7151	91,05
	16660	212,12	11240	143,11	11710	149,10	7497	95,45	7103	90,44

**Tabela 20** - Médias da resistência à compressão

TRAÇO	IDADE	FCK (Mpa)
RF	7	17,10
	14	18,00
	21	21,84
	28	23,40
25%	7	9,71
	14	11,15
	21	13,37
	28	15,05
50%	7	10,34
	14	12,51
	21	12,10
	28	13,74
75%	7	6,24
	14	8,10
	21	7,70
	28	9,23
100%	7	6,74
	14	6,52
	21	7,28
	28	8,97

A análise estatística da resistência à compressão da EPS consta no Anexo B.

**Tabela 21** - Comparação de médias – Tukey - Resistência

IDADE (dias)	TEORES DE ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO(%) - TUKEY				
	0% (RF)	25%	50%	75%	100%
7	170,93 aC	91,18 aB	101,02 aB	62,40 aA	67,35 aA
14	184,49 aD	111,26 bC	123,43 bC	81,00 bB	65,24 aA
21	218,46 bD	133,72 cC	117,87 bB	76,95 bA	68,29 aA
28	228,48 bD	137,45 cB	153,87 cC	87,17 bA	89,73 bA

Notas: Letras minúsculas iguais correspondem a médias iguais, nas colunas a 5% de significância;

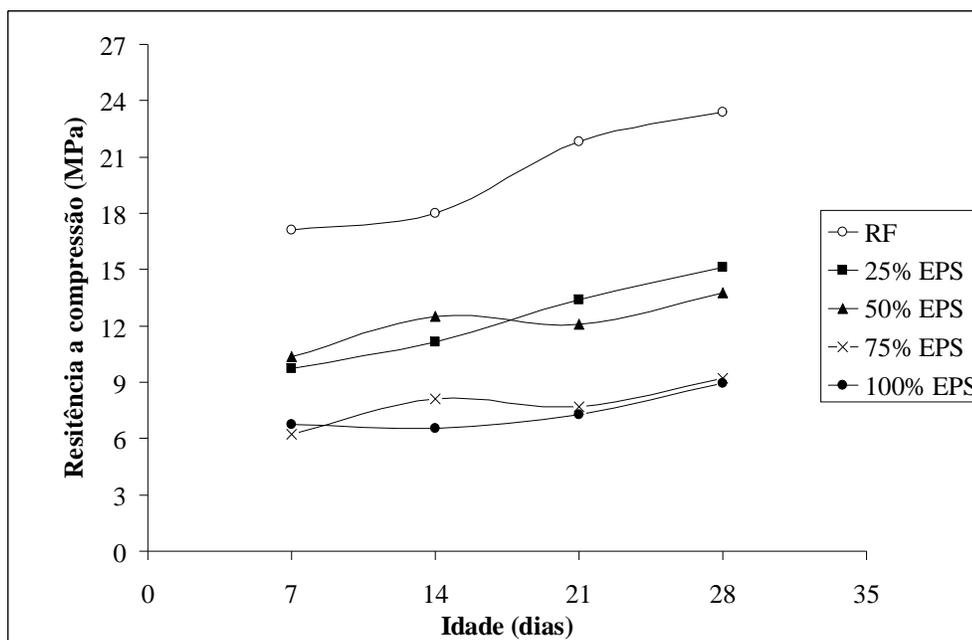
Letras maiúsculas iguais correspondem a médias iguais nas linhas, a 5% de significância.

Pode-se observar que para uma adição de 25% de espuma de poliestireno expandido ao concreto, houve uma queda bastante significativa na resistência à compressão, aproximadamente 42%. Para uma adição de 50%

de espuma de poliestireno expandido ao concreto, nota-se uma pequena perda na resistência à compressão, em relação ao traço com 25%. De 50 para 75% de EPS há uma perda de 39% na resistência à compressão e permanece praticamente constante até a substituição total do agregado graúdo por EPS.

A análise do gráfico da Figura 12 permite considerar que:

- 1) Os traços de referência e o de 25% EPS, tiveram um comportamento similar na evolução da resistência à compressão nas diferentes idades, em que o traço com 25% de EPS encontrava-se com a resistência já estabilizada aos 21 dias de idade.
- 2) Comportamento idêntico ocorreu entre os traços com 50% EPS e 75% EPS, que tiveram ganho de resistência dos 7 aos 14 dias, e dos 14 aos 21 dias mantiveram a resistência à compressão praticamente constante, tornando a ganhar resistência a partir dos 21 dias de idade.
- 3) Para o traço com 100% EPS, observa-se ganho de resistência nas primeiras idades e dos 7 aos 14 dias mantendo-se constante, tornando a ganhar resistência a partir dos 14 dias.



**Figura 12** - Resistência à compressão x idade (dias).

Siqueira, Stramari & Folgueras (2004), em pesquisa com substituição parcial de brita por poliuretano, também constataram a redução na resistência mecânica do concreto, à medida que aumentava a quantidade do produto na mistura.

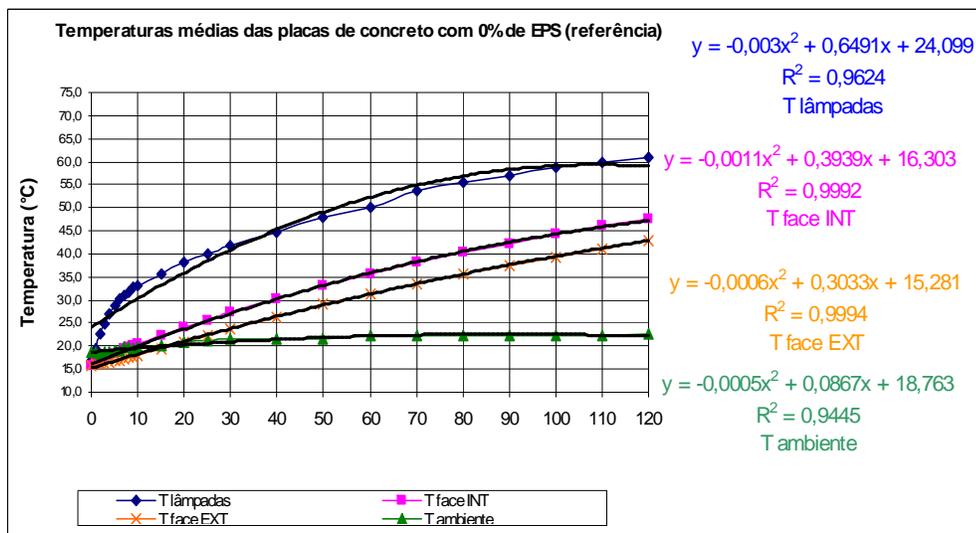
Esta queda explica-se pelo fato do poliuretano e, no caso desta pesquisa, o EPS terem baixa resistência à compressão, aliado à formação de porosidade em função da alta absorção de água dos materiais utilizados por pesquisas.

#### **4.4 Desempenho Térmico**

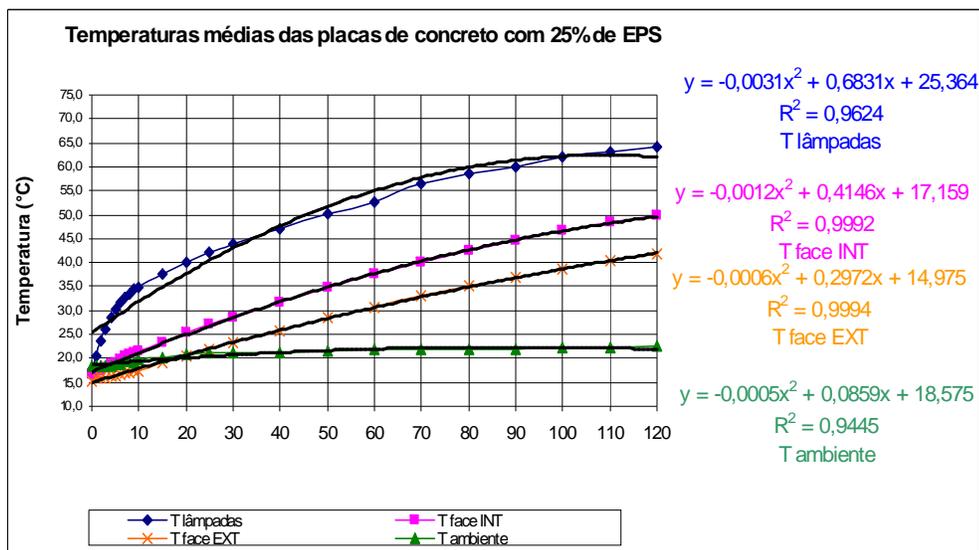
Nas figuras 13 a 17, observam-se as curvas para as temperaturas médias em função do tempo, para cada um dos teores de substituição brita/EPS. As temperaturas são: temperatura próxima às lâmpadas (T1), temperatura na face interna da placa de concreto (T2), na face externa da placa de concreto (T3) e monitoramento da temperatura ambiente (T4).

O modelo estatístico do desempenho térmico foi obtido por meio de análise de planilha eletrônica *Excel*. Sendo que, os parâmetros estimadores dos coeficientes da regressão foram testados quanto à sua significância pelo teste t, ao nível de 95% de probabilidade (Anexo B).

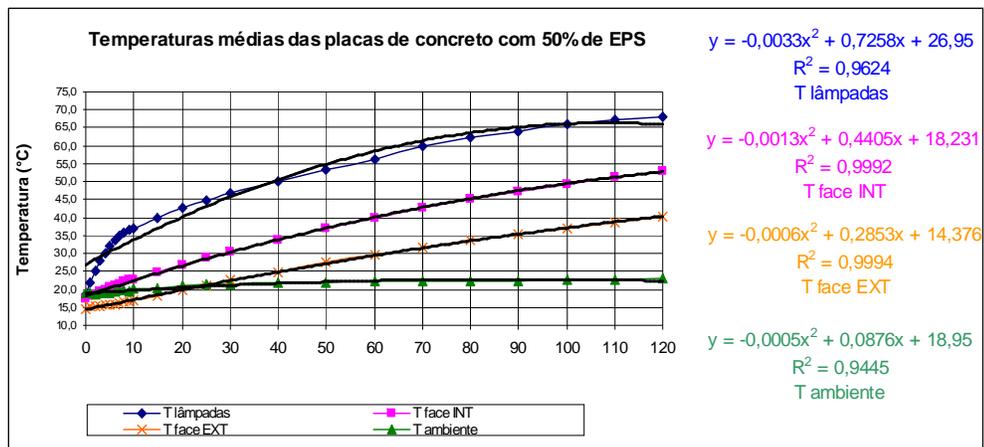
As equações e coeficiente da equação para os diferentes teores de espuma de poliestireno expandido substituindo as britas serão apresentados ao lado dos respectivos gráficos com visualização nas figuras de 13 a 17.



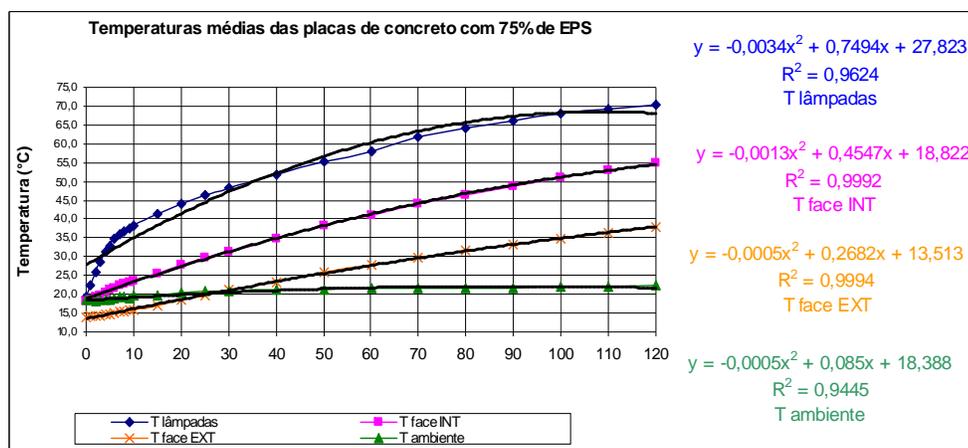
**Figura 13** - Temperaturas médias das placas de concreto referência com 0% de espuma de poliestireno expandido.



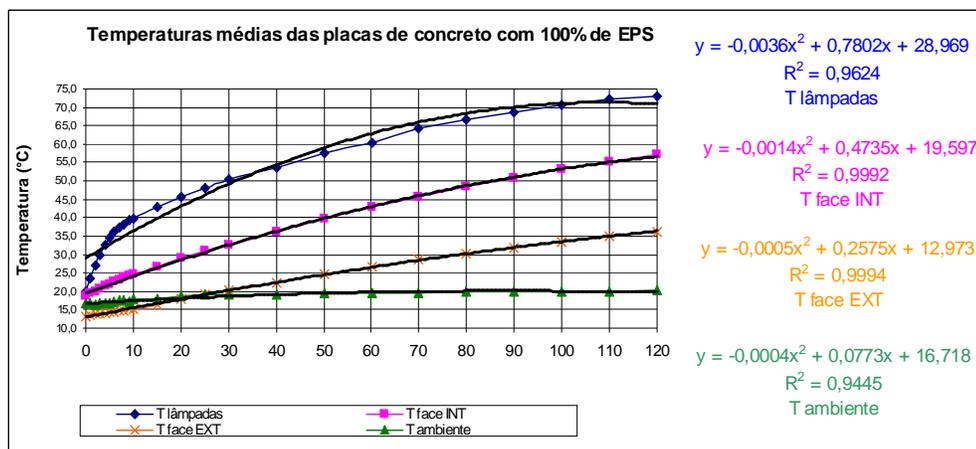
**Figura 14** - Temperaturas médias das placas de concreto com 25% de espuma de poliestireno expandido.



**Figura 15** - Temperaturas médias das placas de concreto com 50% de espuma de poliestireno expandido.



**Figura 16** - Temperaturas médias das placas de concreto com 75% de espuma de poliestireno expandido.



**Figura 17** - Temperaturas médias das placas de concreto com 100% de espuma de poliestireno expandido.

À medida que aumenta o teor de incorporação de espuma de poliestireno expandido na mistura de concreto, diminuindo a densidade, tem-se uma maior “resistência” à transferência do calor. Isto se manifestou de duas maneiras, descritas a seguir.

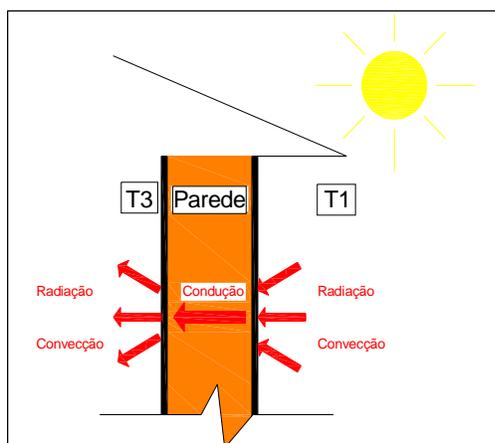
A segunda manifestação da dificuldade do calor em atravessar as placas com maior incorporação de espuma de poliestireno expandido ficou comprovada pelo aumento da diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre as faces interna e externa das placas de concreto (T2 e T3, respectivamente). Todas estas afirmações podem ser comprovadas nos gráficos apresentados nas (Figuras 13 a 17), analisando-se a “distância” entre as curvas “T face INT” e “T face EXT”.

Para facilitar a análise dos resultados e a observação do efeito da incorporação de espuma de poliestireno expandido, propõe-se a seguinte metodologia:

1. Considerar T1 (temperatura nas lâmpadas) como equivalente à temperatura ambiente externa a uma edificação qualquer;
2. Considerar T3 como a temperatura medida na face interna da parede desta edificação;

3. Para determinados valores de T1 propostos (iguais a 20, 40 e 60°), apresentar os valores da diferença de temperatura entre T2 e T3 (face interna e externa da parede, respectivamente).

A Figura 18 ilustra esta metodologia.



**Figura 18** - Representação da metodológica proposta para análise dos resultados.

Na Tabela 22, são apresentados os valores encontrados para a diferença entre as temperaturas interna e externa das placas de concreto, para cada um dos teores de substituição brita/espuma de poliestireno expandido, conforme metodologia acima descrita.

**Tabela 22** - Diferença entre as temperaturas das faces interna e externa (T2 e T3, respectivamente), em °C, para valores de T1 propostos

	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA BRITA PELO EPS				
	0% (ref.)	25%	50%	75%	100%
T1	$\Delta = T2 - T3$	$\Delta = T2 - T3$	$\Delta = T2 - T3$	$\Delta = T2 - T3$	$\Delta = T2 - T3$
°C	°C	°C	°C	°C	°C
20	0,1	1,3	2,9	4,3	5,6
40	3,3	4,8	6,7	8,3	9,4
60	4,8	7,7	11,0	13,7	16,0

Na Tabela 19, pode-se verificar que: se a temperatura ambiente externa (lado de fora) for igual a 20°C, em uma edificação cujas paredes são construídas com placas de concreto de 5 cm de espessura, as diferenças entre as temperaturas das faces destas placas será igual a:

- 0,1°C, para placas com 0% de espuma de poliestireno expandido;
- 1,3°C, para placas com 25% de espuma de poliestireno expandido;
- 2,9°C, para placas com 50% de espuma de poliestireno expandido;
- 4,3°C, para placas com 75% de espuma de poliestireno expandido;
- 5,6°C, para placas com 100% de espuma de poliestireno expandido.

Para as temperaturas externas iguais a 40 e 60°C, ver Tabela 14.

Os valores absolutos medidos na face interna das placas (T3), quando a temperatura ambiente externa (T1) assume certos valores. A Tabela 14 apresenta estes resultados.

**Tabela 23** - Valores absolutos e percentuais determinados para a temperatura na face interna das placas de concreto

TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DA BRITA PELO EPS											
T1	0% (ref.)		25% EPS		50% EPS		75% EPS		100% EPS		
	T3	Variação	T3	Variação	T3	Variação	T3	Variação	T3	Variação	
(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	
20	16,1	-	15,7	-2,5	14,9	-7,5	13,9	-13,7	13,2	-18,0	
40	22,4	-	20,4	-8,9	18,2	-18,8	16,5	-26,3	15,1	-32,6	
60	41,2	-	36,7	-10,9	31,6	-23,3	28,8	-30,1	26,6	-35,4	

Como pode ser visto na Tabela 14, quando a temperatura ambiente externa é igual a 40°C, a temperatura na face interna da placa com 0% de espuma de poliestireno expandido é igual a 22,4°C. Para os demais teores, T3 é igual a:

- 20,4°C, para o concreto 25%;
- 18,2°C, para o concreto 50%;
- 16,5°C, para o concreto 75%;
- 15,1°C, para o concreto 100% de espuma de poliestireno expandido.

Estes valores correspondem a uma redução de: 8,9%, 18,8%, 26,3% e 32,6%, respectivamente.

Para as temperaturas externas iguais a 20 e 60°C, conforme se verifica na Tabela 14.

Outro ponto a ser analisado é o que se refere à densidade das placas de concreto leve. É significativa para a análise a influência da densidade de um material sobre sua condutividade térmica, que é a propriedade que rege a maior ou menor facilidade com que um corpo, submetido a um gradiente de temperatura, conduz calor (quanto menor a densidade, menor será a condutividade térmica do material). Na Tabela 15, apresentam-se os valores médios encontrados para a densidade das placas de concreto.

**Tabela 24** - Densidades médias das placas de concreto

PLACAS	PESO MÉDIO (Kg)	VOLUME MÉDIO (cm <sup>3</sup> )	DENSIDADE MÉDIA (Kg.m <sup>-3</sup> )
0%	21,0	8250,0	2545,5
25%	18,1	7812,5	2316,8
50%	16,8	7875,0	2133,3
75%	15,9	8687,5	1830,2
100%	14,9	8875,0	1678,9

A análise destes resultados confirma a hipótese de que, quanto maior o teor de substituição da brita pela espuma de poliestireno expandido, menor será a densidade da placa de concreto leve e, portanto:

- Maior será a diferença de temperatura entre as faces interna e externa ( $T_2 - T_3$ );
- Menor será a temperatura  $T_3$  na face interna da placa, para uma mesma temperatura  $T_1$  ambiente externa;
- Melhor será o desempenho térmico das placas e, se estas forem utilizadas como elemento de vedação, maior será a eficiência energética da edificação.

#### 4.5 Desempenho Acústico

Para o desenvolvimento do trabalho, foram feitas comparações por meio de ensaios cujos resultados são apresentados na Tabela 25.

**Tabela 25** - Médias das medições acústicas no exterior, interior, passagem e retenção pela placa de estudos, conforme os teores de substituição

0% de EPS	Banda	A		C	
	Local	Ext.	Int.	Ext.	Int.
	Valor (dB)	97,38	89,40	97,75	97,05
	Retenção	8,19	%	0,72	%
25% de EPS	Banda	A		C	
	Local	Ext.	Int.	Ext.	Int.
	Valor (dB)	97,78	72,03	96,30	93,20
	Retenção	26,34	%	3,22	%
50% de EPS	Banda	A		C	
	Local	Ext.	Int.	Ext.	Int.
	Valor (dB)	97,80	70,60	97,93	94,23
	Retenção	27,81	%	3,78	%
75% de EPS	Banda	A		C	
	Local	Ext.	Int.	Ext.	Int.
	Valor (dB)	98,10	70,50	97,98	92,93
	Retenção	28,13	%	5,15	%
100% de EPS	Banda	A		C	
	Local	Ext.	Int.	Ext.	Int.
	Valor (dB)	97,90	69,15	97,88	92,00
	Retenção	29,37	%	6,00	%

Notas: Banda A: som contínuo; Banda C: som de percussão.

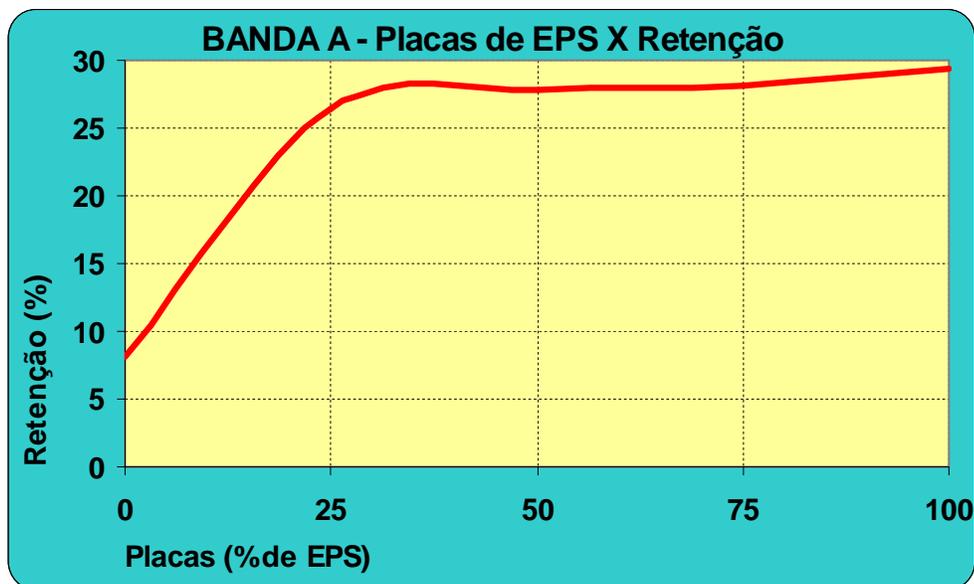


Figura 19 - Placas de EPS x retenção, em % para a banda A.

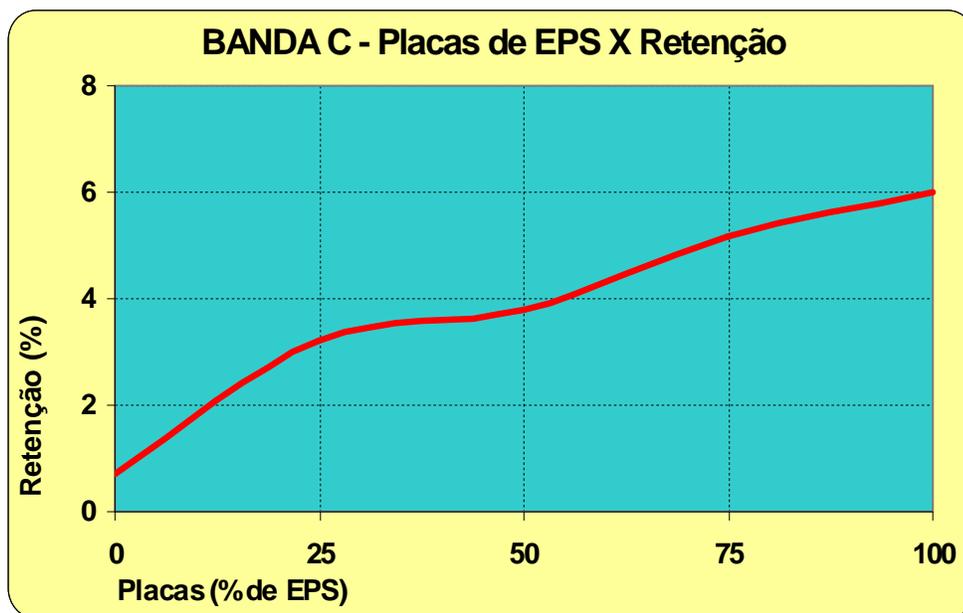


Figura 20 - Placas de EPS x retenção, em % para a banda C.

A condição de melhoria com variação de substituição da brita por espuma de poliestireno expandido permite baixa variação para a Banda C (variação de 0,72% a 6%), indicando a resultante por percussão imediata

sobre o local, ou seja, para esta determinada medição verifica-se que não é viável a implantação para esta condição, pois se observa que a diferença entre a inicial e a final é irrisória para a audição, mas analisando em relação ao aumento gerado, haverá uma melhoria de 833%.

Na implantação de aplicação para a resultante da Banda A, verifica-se que é viável o uso como placa divisória chega a níveis aproximados de 30% de retenção na placa e que nos dá diminuição dos ruídos para níveis adequados e muito bem aproveitados para conforto acústico.

Comparando-se as duas bandas verifica-se que, para valores e porcentagens respectivas tem-se: para a Banda C, uma melhoria de 833%, e para a Banda A 359%. Assim, seria mais interessante o uso adequado à Banda C, mas a variação entre inicial e final para cada banda traz conforto acústico adequado, em relação à variação imediata no local somente pela Banda A, a variação é considerável e perceptível no meio.

## 5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, em relação à utilização da espuma de poliestireno expandido como agregado para fabricação de concreto leve, conclui-se que representa uma alternativa, não só do ponto de vista da resistência, densidade, conforto térmico e acústico, principais enfoques deste trabalho, como também do ponto de vista ambiental, porquanto esta proposta vise ao uso da espuma de poliestireno expandido descartado em lixões ou aterros sanitários, reaproveitando material gerador de passivo ambiental.

As conclusões sobre a consistência do concreto no estado fresco, resistência e densidade no estado endurecido e o desempenho térmico e acústico são descritas a seguir:

- Consistência no estado fresco
  - O ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), revela uma tendência à redução da consistência e trabalhabilidade do concreto, à medida que aumenta a incorporação de espuma poliestireno expandido substituindo a brita. Isto se deve ao fato de que, por possuírem menor granulometria, possuem área específica maior e, por conseqüência, maior área a ser “molhada” para envolver os grãos, gerando uma redução da água disponível para as reações químicas do cimento na argamassa, tornando o concreto mais seco e causando redução da consistência e trabalhabilidade.
  
- Resistência e densidade no estado endurecido
  - Houve uma diminuição significativa, porém, em contrapartida, a resistência à compressão foi fortemente diminuída, influenciada pela presença da espuma de poliestireno expandido em

substituição ao agregado graúdo. Isto se justifica pelo fato da espuma ser composta por 98% de ar e a sua resistência ser bastante baixa comparativamente à brita. Destaca-se que este estudo limitou-se a um traço pré-determinado, não tendo como objetivo obter uma resistência à compressão definida, mas somente observar a influência do EPS no traço em questão.

- Desempenho térmico e acústico
  - A espuma de poliestireno expandido conferiu ao concreto maior resistência à passagem do calor (resistência térmica) e do som (retenção acústica), pois este polímero é um material com baixo coeficiente de condutividade térmica e acústica. Estas propriedades estão intimamente ligadas à “incorporação” de vazios (ar) no interior da massa de concreto, dificultando a transferência do calor por condução e retendo a passagem do som pela diminuição de sua velocidade.
  - Desta forma, quanto menor a densidade do concreto, densidade esta diminuída por meio do aumento da incorporação da espuma na mistura, menor será a condutividade térmica e acústica nos elementos construtivos fabricados com este concreto.
  - Neste sentido, as placas com 100% de substituição da brita por EPS mostraram-se mais eficientes. Reduzindo-se o fluxo de calor e do som através das paredes, reduz-se a carga térmica e acústica no interior da edificação. Reduzindo também a carga solicitada por sistemas de climatização e de controle do som artificial e, conseqüentemente, a demanda de energia elétrica, trazendo eficiência energética e conforto ambiental para as construções urbanas e rurais.

## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se para futuras pesquisas a realização dos seguintes estudos:

- Absorção de água, estabelecendo na dosagem do concreto um fator água-cimento que permita manter constante a consistência e trabalhabilidade.
- Avaliação do concreto leve proposto, pelo aumento da quantidade de cimento no traço, de forma a permitir seu uso com fins estruturais;
- Resistência mecânica à tração;
- Desenvolvimento de um modelo matemático que represente a análise térmica e acústica de diferentes tipos de dosagens.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO - ABRAPEX. **Manual de utilização de espuma de poliestireno expandido na Construção Civil**. 1. ed. São Paulo - SP: PINI, 2006.

AMBONI JR., G. **Poliestireno expandido (Espuma de poliestireno expandido) como agregado graúdo em concreto não estrutural. Análise de desempenho acústico**. 2006. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2006. Não consta no texto.

ANGULO, S. C.; KAHN, E.; JHON V. M.; ULSEN, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 6, São Paulo 27 e 28 de outubro de 2003. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2003. 1 CD-ROOM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11578**. Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

----- **NBR 5738**. Concreto. Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova, 2003. 9 p.

----- **NBR 5739**. Concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 4 p.

----- **NBR 6118**. Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978. 221 p.

----- **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

----- **NBR 7217**. Agregados. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

----- **NBR 7222**. Argamassas de concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1999. 3 p.

----- **NBR 7223**. Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

----- **NBR 7251**. Agregado em estado solto. Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

----- **NBR 9937**. Agregados. Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

----- **NBR 10004**. Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 71 p.

----- **NBR 12142**. Concreto. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1992.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. v. 2. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1987.

----- **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora, 1994.

BEZERRA, L. A. C. **Análise de desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com espuma de poliestireno expandido como agregado graúdo**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - RN, 2003.

BOCCHILE, C. Leve como argamassa. **Revista Técnica**. São Paulo, n. 61, p. 2002.

BUENO, C. F. H. **Tecnologia de materiais de construções**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000.

CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (Org.) **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Projeto entulho bom. Salvador - BA: EDUFBA, 2001.

CENCIG, M. O. **Energia: o quê é isso?** Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/energiaeletrica/energia10.htm>. Acesso em: 03 out 2006.

CINCOTTO, M. A. **Reaproveitamento do concreto fresco dosado em central com o uso de aditivo estabilizador de hidratação** (1998).

COSTA, E. C. **Física aplicada à construção: conforto térmico**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. 6. ed. São Paulo: LTC, 2004.

GRIGOLI, A. S. **Desempenho de argamassa de entulho de obra quanto a sua resistência, com materiais cerâmicos oriundos de blocos cerâmicos de vedação**. Universidade de São Paulo, PCC. USP. 61.548, São Paulo.

DANTAS FILHO, F. P. **Contribuição ao estudo para aplicação do pó de serra da madeira em elementos de alvenaria não estrutural**. 2004.– Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2004.

FERREIRA, R. C.; GOBO J. C. C.; CUNHA A. H. N. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, jan./mar. 2008.

FERREIRA, R. **Utilização de pó-de-pedra em substituição parcial do agregado miúdo na confecção de concreto**. 2002. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2002.

FILHO, L. A. B.; FERREIRA, M. G. **Coleta Seletiva e reciclagem: A experiência de Curitiba - Lixo que não é lixo**. In: Seminário Internacional sobre coleta seletiva e reciclagem de resíduos sólidos urbanos. Paraná, 1995.

FROTA, A.; SHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**. 6. ed. São Paulo - SP: Studio Nobel, 2003..

GONÇALVES, D. **Física: Do científico ao vestibular**. 5. ed. Rio de Janeiro - RJ: Ao Livro Técnico, 1974.

HINO, M. K.; MELHADO, S. B., **Melhoria da qualidade do projeto de empreendimentos habitacionais de interesse social utilizando o conceito de desempenho**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dpto de Engenharia da Construção Civil - PCC-USP 3 A 6 De Novembro De 1998 – São Paulo – Brasil.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE EDUCAÇÃO DOS SURDOS (INES)

JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CASSA. J. C. S; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA, 2001.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 p. Tese – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

KNAUF ISOPOR. Disponível em <http://www.knauf-isopor.com.br/html/inicio.php>. Acesso em: 27 set 2007.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo - SP: Thomson, 2003.

KRUEER, L. E. O uso de equações predetivas na avaliação do desempenho térmico de um protótipo habitacional constituído de materiais alternativos. Centro Federal de Educação Tecnologia do Paraná: Departamento de Construção Civil; Porto Alegre, v. 3, nº. 2, p. 77-78 abr./jun.2003.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: Editora PW, 1997.

LOSSO, M.; VIVEIROS, E. Gesso acartonado e isolamento acústico: teoria versus prática no Brasil. CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10. 18-21 Julho 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo:ISBN 85-89478-08-4.

MALAKOSKI, J. **Poliestireno expandido (Espuma de Poliestireno Expandido) como agregado graúdo em concreto não estrutural. Análise de desempenho térmico**. 2006.. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2006.

MASSETTO, L. T.; SABRATINI, H. F. **Estudo comparativo da resistência das alvenarias de vedação de blocos utilizados na região de São Paulo**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Dpto de Engenharia da Construção Civil - PCC-USP 3 A 6 De Novembro De 1998 – São Paulo – Brasil.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

NEVES, I. F.; SPERANDIO NETO, E. **Estudo de dosagem racional do concreto estrutural comum**. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 1. ed. Trad. Salvador Giamusso. São Paulo: PINI, 1997.

PATTON, W. J. **Materiais de construção**. Editora Pedagógica e Universitária Ltda. São Paulo, 1978.

PAULA, A. M. **Estudo do desempenho térmico dos revestimentos aplicados em ferramentas de corte**. Laboratório de Transferência de Calor e Massa LTCM/UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica Centro de Ciências

Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. Setembro de 2002.

PEREIRA, M. F. **Construções rurais**. São Paulo: Nobel, 1986.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 12. ed. São Paulo: Globo, 1993.

PORTAL AMBIENTAL. Disponível em:

<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?Base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/isopor.html> Acesso em: 06 maio 2007.

RESCHKE, J. S.; CECCATTOA, D. M.; MASUEROA, A. B.; MORAES, C. A. M.; VILELA, A. C. F.; NORIE, A. Avaliação da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Porto Alegre. v. 2, n. 1, p. 78-91, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). São Paulo, 2003.

SANTOS FILHO, M. L.; MOREIRA, A. R.; NÓBREGA, S. M. S.; BINI, S. C.; ZANETTI, C. Estudo da viabilidade do aproveitamento do poliuretano expandido reciclado como adição ao concreto de cimento Portland para fabricação de blocos de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

SANTOS, V.; SOUZA, C. F. TINOCO, I. F. F. **Informações básicas para projetos de construções rurais**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG: 2004.

Sartor et al. (2004).

SIQUEIRA, L. V. M.; STRAMARI, M. R.; FOLGUERAS, M. V. Adição de poliuretano expandido para a confecção de blocos de concreto leve. v. 9, n. 4, p. 399-410, 2004.

SILVA, G. R. **Manual de traços de concreto**. 3. ed. São Paulo:, 1975.

TANGO, C. E. S.; SAAD, V. M. K. Incrementos no método de dosagem ipt para concretos com amplo espectro de desempenho. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43. Tema 3 - Qualidade da construção em concreto.: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.

WEBER, A. H. **Estudo da influência da espuma de poliestireno expandido na resistência à compressão e na massa específica do concreto**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2006.

WIKIPÉDIA - A enciclopédia livre. **Ondas sonoras**. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Onda\\_estacion%C3%A1ria](http://pt.wikipedia.org/wiki/Onda_estacion%C3%A1ria). Acesso em: 27 set 2007.

WYLEN, R.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2003. Mestrando. Universidade de São Paulo, PCC.USP. C.P. 61.548. São Paulo.

**ANEXOS**

**ANEXO A - ANÁLISE ESTATÍSTICA – RESISTÊNCIA E DENSIDADE**

Arquivo analisado:

C:\Documents and Settings\unioeste\Desktop\disertacao final\densidade.DB

-----  
Variável analisada: densidade

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

-----  
TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

-----  
FV GL SQ QM Fc Pr>Fc

-----  
idade 3 10811.808345 3603.936115 18.028 0.0000  
EPS 4 5414049.578493 1353512.394623 6770.822 0.0000  
idade\*EPS 12 2181.520017 181.793335 0.909 0.5431  
erro 60 11994.222300 199.903705

-----  
Total corrigido 79 5439037.129155

-----  
CV (%) = 0.71

Média geral: 1987.4742500 Número de observações: 80

-----  
Teste Tukey para a FV idade

-----  
DMS: 11,818173343347 NMS: 0,05

-----  
Média harmonica do número de repetições (r): 20

Erro padrão: 3,16151628969392

-----  
Tratamentos Médias Resultados do teste

28 1971.829500 a1  
 21 1981.410000 a1  
 14 1994.907000 a2  
 7 2001.750500 a2

-----  
 -----  
 Teste Tukey para a FV EPS  
 -----

DMS: 14,0634807797386 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 16  
 Erro padrão: 3,53468266786426  
 -----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
 -----

100 1628.938750 a1  
 75 1786.680000 a2  
 50 1998.129375 a3  
 25 2164.660625 a4  
 0 2358.962500 a5  
 -----

-----  
 Análise do desdobramento de idade dentro de cada nível de:

EPS  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA  
 -----

FV GL SQ QM Fc Pr>Fc  
 -----

idade /1 3 1315.852100 438.617367 2.194 0.0971  
 idade /2 3 1971.866569 657.288856 3.288 0.0263  
 idade /3 3 3572.382619 1190.794206 5.957 0.0012  
 idade /4 3 2444.197850 814.732617 4.076 0.0104  
 idade /5 3 3689.029225 1229.676408 6.151 0.0010  
 Resíduo 60 11994.222300 199.903705  
 -----

Codificação usada para o desdobramento

cod. EPS

1 = 0

2 = 25

3 = 50

4 = 75

5 = 100

Teste de Tukey para o

desdobramento de idade dentro da codificação:

1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV idade  
-----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4

Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

28 2344.825000 a1

21 2358.370000 a1

7 2363.145000 a1

14 2369.510000 a1  
-----

Teste de Tukey para o

desdobramento de idade dentro da codificação:

2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV idade  
-----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4

Erro padrão: 7,06936533572853

-----  
Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

28 2146.722500 a1  
21 2164.375000 a1 a2  
7 2172.182500 a1 a2  
14 2175.362500 a2  
-----

Teste de Tukey para o  
desdobramento de idade dentro da codificação:

3

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente  
-----

Teste Tukey para a FV idade  
-----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

28 1984.405000 a1  
21 1985.200000 a1  
14 2001.907500 a1 a2  
7 2021.005000 a2  
-----

Teste de Tukey para o  
desdobramento de idade dentro da codificação:

4

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente  
-----

Teste Tukey para a FV idade  
-----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
 Erro padrão: 7,06936533572853

-----  
 Tratamentos Médias Resultados do teste

-----  
 21 1773.550000 a1  
 28 1775.937500 a1  
 14 1794.240000 a1 a2  
 7 1802.992500 a2  
 -----

-----  
 Teste de Tukey para o  
 desdobramento de idade dentro da codificação:

5

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
 Teste Tukey para a FV idade  
 -----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
 Erro padrão: 7,06936533572853

-----  
 Tratamentos Médias Resultados do teste

-----  
 28 1607.257500 a1  
 21 1625.555000 a1 a2  
 14 1633.515000 a1 a2  
 7 1649.427500 a2  
 -----

-----  
 Análise do desdobramento de EPS dentro de cada nível de:

idade  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

-----  
FV GL SQ QM Fc Pr>Fc  
-----

EPS /1 4 1294640.103670 323660.025917 1619.080 0.0000  
EPS /2 4 1375248.098570 343812.024643 1719.888 0.0000  
EPS /3 4 1381711.830200 345427.957550 1727.972 0.0000  
EPS /4 4 1364631.066070 341157.766518 1706.611 0.0000  
Resíduo 60 11994.222300 199.903705  
-----

Codificação usada para o desdobramento

cod. idade

1 = 7

2 = 14

3 = 21

4 = 28

Teste de Tukey para o

desdobramento de EPS dentro da codificação:

1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV EPS  
-----

DMS: 28,1269615594772 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4

Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

100 1649.427500 a1

75 1802.992500 a2

50 2021.005000 a3

25 2172.182500 a4

0 2363.145000 a5  
-----

Teste de Tukey para o

desdobramento de EPS dentro da codificação:

2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV EPS  
-----

DMS: 28,1269615594772 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

100 1633.515000 a1  
75 1794.240000 a2  
50 2001.907500 a3  
25 2175.362500 a4  
0 2369.510000 a5  
-----

Teste de Tukey para o  
desdobramento de EPS dentro da codificação:

3

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente  
-----

Teste Tukey para a FV EPS  
-----

DMS: 28,1269615594772 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

100 1625.555000 a1  
75 1773.550000 a2  
50 1985.200000 a3  
25 2164.375000 a4  
0 2358.370000 a5  
-----

Teste de Tukey para o  
desdobramento de EPS dentro da codificação:

4

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV EPS  
-----

DMS: 28,1269615594772 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4

Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

100 1607.257500 a1

75 1775.937500 a2

50 1984.405000 a3

25 2146.722500 a4

0 2344.825000 a5  
-----

-----  
Análise do desdobramento de idade dentro de cada nível de:

EPS  
-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA  
-----

FV GL SQ QM Fc Pr>Fc  
-----

idade /1 3 1315.852100 438.617367 2.194 0.0971

idade /2 3 1971.866569 657.288856 3.288 0.0263

idade /3 3 3572.382619 1190.794206 5.957 0.0012

idade /4 3 2444.197850 814.732617 4.076 0.0104

idade /5 3 3689.029225 1229.676408 6.151 0.0010

Resíduo 60 11994.222300 199.903705  
-----

Codificação usada para o desdobramento  
cod. EPS

1 = 0  
2 = 25  
3 = 50  
4 = 75  
5 = 100

Teste de Tukey para o  
desdobramento de idade dentro da codificação:

1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV idade  
-----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste  
-----

28 2344.825000 a1  
21 2358.370000 a1  
7 2363.145000 a1  
14 2369.510000 a1  
-----

Teste de Tukey para o  
desdobramento de idade dentro da codificação:

2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
Teste Tukey para a FV idade  
-----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
Erro padrão: 7,06936533572853  
-----

Tratamentos Médias Resultados do teste

-----  
 28 2146.722500 a1  
 21 2164.375000 a1 a2  
 7 2172.182500 a1 a2  
 14 2175.362500 a2  
 -----

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de idade dentro da codificação:

3

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
 Teste Tukey para a FV idade  
 -----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
 Erro padrão: 7,06936533572853  
 -----

Tratamentos Médias Resultados do teste

-----  
 28 1984.405000 a1  
 21 1985.200000 a1  
 14 2001.907500 a1 a2  
 7 2021.005000 a2  
 -----

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de idade dentro da codificação:

4

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
 Teste Tukey para a FV idade  
 -----

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 4

Erro padrão: 7,06936533572853

---

Tratamentos Médias Resultados do teste

---

21 1773.550000 a1  
28 1775.937500 a1  
14 1794.240000 a1 a2  
7 1802.992500 a2

---

Teste de Tukey para o  
desdobramento de idade dentro da codificação:  
5

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

---

Teste Tukey para a FV idade

---

DMS: 26,4262389655998 NMS: 0,05

---

Média harmonica do número de repetições (r): 4  
Erro padrão: 7,06936533572853

---

Tratamentos Médias Resultados do teste

---

28 1607.257500 a1  
21 1625.555000 a1 a2  
14 1633.515000 a1 a2  
7 1649.427500 a2

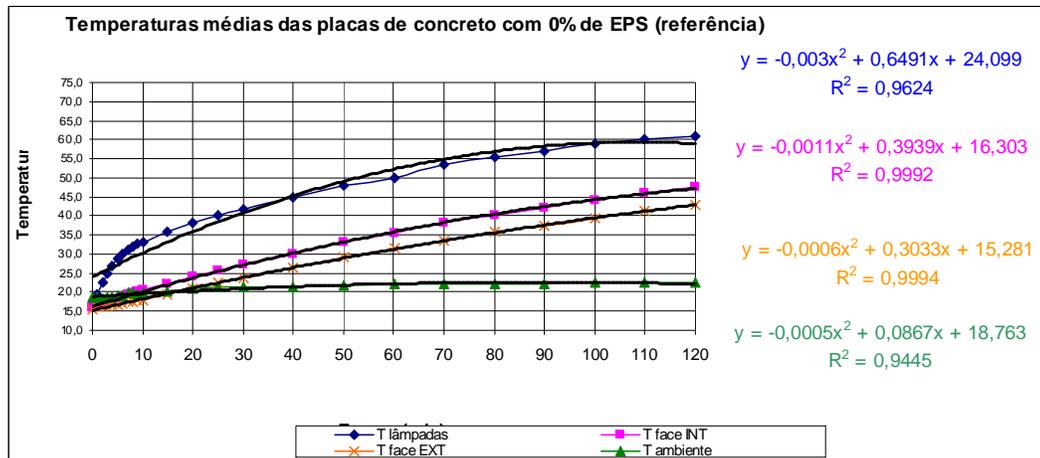
---



**ANEXO B - ANÁLISE ESTATÍSTICA – TÉRMICA**

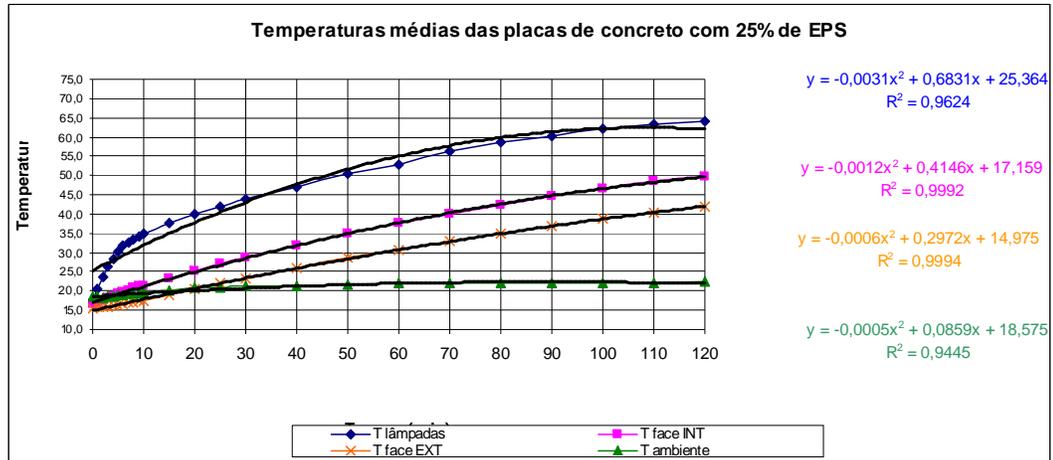
## PL - 0

t (min)	T1 °C			T3 °C	T4 °C
0	16,7	15,7	0,1	15,6	18,7
1	19,5	16,2	0,1	16,1	18,7
2	22,5	16,6	0,3	16,3	18,4
3	24,9	17,2	0,9	16,3	18,7
4	27,0	17,8	1,3	16,5	18,7
5	28,6	18,3	1,6	16,7	19,0
6	30,1	18,8	1,9	16,9	19,1
7	31,1	19,3	2,0	17,3	19,6
8	31,8	19,8	2,3	17,5	19,6
9	32,6	20,2	2,5	17,7	19,4
10	33,2	20,4	2,6	17,8	19,9
15	35,7	22,2	2,9	19,3	20,2
20	38,1	24,0	3,1	20,9	21,0
25	40,0	25,7	3,3	22,4	21,3
30	41,8	27,2	3,3	23,9	21,4
40	44,7	30,1	3,7	26,4	21,5
50	47,8	33,2	4,0	29,2	21,7
60	50,1	35,6	4,2	31,4	22,1
70	53,6	38,1	4,5	33,6	22,1
80	55,6	40,3	4,5	35,8	22,2
90	57,1	42,3	4,7	37,6	22,2
100	58,9	44,2	4,8	39,4	22,4
110	60,0	46,0	4,8	41,2	22,4
120	60,8	47,4	4,6	42,8	22,7



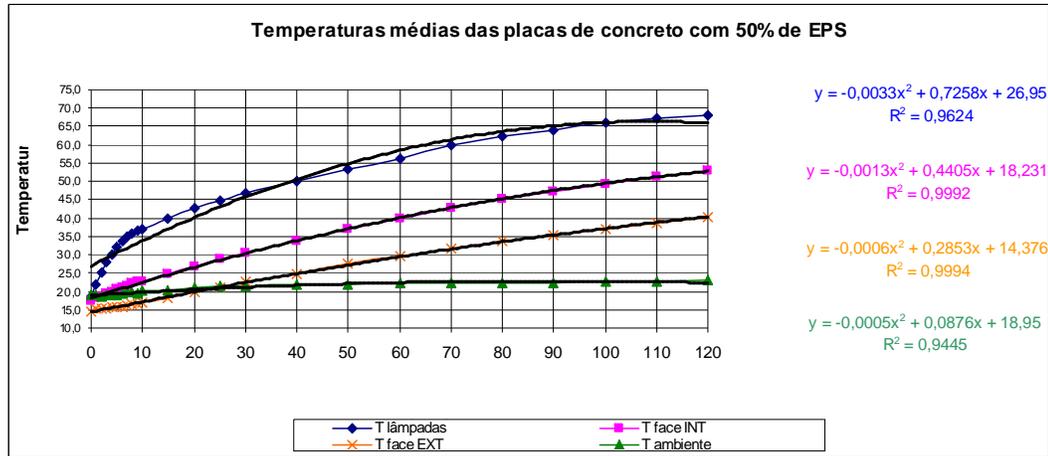
### PL - 25

T1 °C	T2 °C		T3 °C	T4 °C
17,6	16,5	1,2	15,3	18,5
20,5	17,1	1,3	15,8	18,5
23,7	17,5	1,5	16,0	18,2
26,2	18,1	2,1	16,0	18,5
28,4	18,7	2,6	16,2	18,5
30,1	19,3	2,9	16,4	18,8
31,7	19,8	3,2	16,6	18,9
32,7	20,3	3,4	17,0	19,4
33,5	20,8	3,7	17,2	19,4
34,3	21,3	3,9	17,3	19,2
34,9	21,5	4,0	17,4	19,7
37,6	23,4	4,5	18,9	20,0
40,1	25,3	4,8	20,5	20,8
42,1	27,0	5,1	22,0	21,1
44,0	28,6	5,2	23,4	21,2
47,0	31,7	5,8	25,9	21,3
50,3	34,9	6,3	28,6	21,5
52,7	37,5	6,7	30,8	21,9
56,4	40,1	7,2	32,9	21,9
58,5	42,4	7,3	35,1	22,0
60,1	44,5	7,7	36,8	22,0
62,0	46,5	7,9	38,6	22,2
63,2	48,4	8,0	40,4	22,2
64,0	49,9	7,9	41,9	22,5



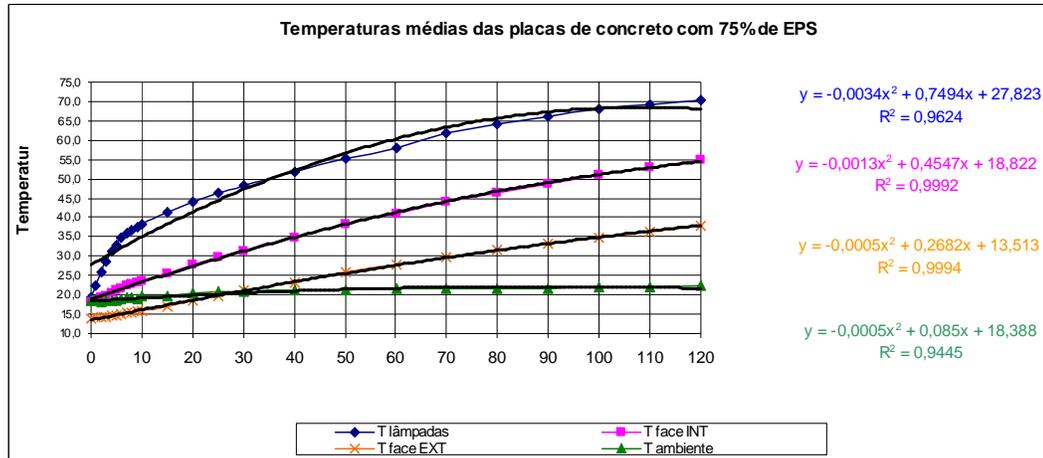
### PL - 50

T1 °C	T2 °C		T3 °C	T4 °C
18,7	17,6	2,9	14,7	18,9
21,8	18,1	3,0	15,1	18,9
25,2	18,6	3,2	15,3	18,6
27,8	19,2	3,9	15,3	18,9
30,2	19,9	4,4	15,5	18,9
32,0	20,5	4,8	15,7	19,2
33,7	21,0	5,1	15,9	19,3
34,8	21,6	5,3	16,3	19,8
35,6	22,1	5,7	16,5	19,8
36,5	22,6	5,9	16,7	19,6
37,1	22,8	6,1	16,7	20,1
39,9	24,8	6,7	18,2	20,4
42,6	26,8	7,2	19,7	21,2
44,7	28,7	7,7	21,1	21,5
46,7	30,4	7,9	22,5	21,6
50,0	33,7	8,8	24,8	21,7
53,5	37,1	9,7	27,5	21,9
56,0	39,8	10,3	29,5	22,3
59,9	42,6	11,0	31,6	22,3
62,2	45,1	11,4	33,7	22,4
63,9	47,3	11,9	35,4	22,4
65,9	49,4	12,4	37,1	22,6
67,1	51,4	12,7	38,8	22,6
68,0	53,0	12,7	40,3	22,9



### PL - 75

T1 °C	T2 °C		T3 °C	T4 °C
19,3	18,1	4,3	13,8	18,3
22,5	18,7	4,5	14,2	18,3
26,0	19,2	4,7	14,4	18,0
28,7	19,9	5,4	14,4	18,3
31,2	20,6	6,0	14,6	18,3
33,0	21,1	6,4	14,8	18,6
34,8	21,7	6,8	14,9	18,7
35,9	22,3	7,0	15,3	19,2
36,7	22,9	7,4	15,5	19,2
37,6	23,3	7,7	15,7	19,0
38,3	23,6	7,8	15,7	19,5
41,2	25,6	8,6	17,1	19,8
44,0	27,7	9,2	18,5	20,6
46,2	29,7	9,9	19,8	20,9
48,3	31,4	10,3	21,1	21,0
51,6	34,8	11,4	23,3	21,1
55,2	38,3	12,5	25,8	21,3
57,8	41,1	13,3	27,8	21,7
61,9	44,0	14,3	29,7	21,7
64,2	46,5	14,9	31,7	21,8
65,9	48,8	15,6	33,3	21,8
68,0	51,0	16,2	34,8	22,0
69,3	53,1	16,7	36,4	22,0
70,2	54,7	16,9	37,9	22,2



### PL - 100

T1 °C	T2 °C		T3 °C	T4 °C
20,1	18,9	5,6	13,2	16,7
23,4	19,5	5,8	13,7	16,7
27,0	20,0	6,1	13,8	16,4
29,9	20,7	6,8	13,8	16,7
32,5	21,4	7,4	14,0	16,7
34,4	22,0	7,8	14,2	16,9
36,2	22,6	8,3	14,3	17,0
37,4	23,2	8,5	14,7	17,5
38,2	23,8	8,9	14,9	17,5
39,2	24,3	9,3	15,0	17,3
39,9	24,5	9,4	15,1	17,7
42,9	26,7	10,3	16,4	18,0
45,8	28,8	11,1	17,7	18,7
48,1	30,9	11,9	19,0	19,0
50,2	32,7	12,4	20,3	19,1
53,7	36,2	13,8	22,4	19,2
57,5	39,9	15,1	24,8	19,3
60,2	42,8	16,1	26,7	19,7
64,4	45,8	17,3	28,5	19,7
66,8	48,4	18,1	30,4	19,8
68,6	50,8	18,9	31,9	19,8
70,8	53,1	19,7	33,4	20,0
72,1	55,3	20,3	35,0	20,0
73,1	57,0	20,6	36,3	20,2

