

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Curso de Engenharia Civil

Daiana Frank Bruxel

**CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA: ESTUDO DOS
EFEITOS TÉRMICOS**

Ijuí/RS

2009

DAIANA FRANK BRUXEL

CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA: ESTUDO DOS EFEITOS TÉRMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil
apresentado como requisito parcial para obtenção do
grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht
Co – Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges

Ijuí – RS

2009

FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Prof. Dr. Eng. Luciano Pivoto Specht - DeTec (Orientador)

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges– DeFEM (Co-orientador)

Prof. Raquel Paranhos - DeTec

Ijuí, RS, 13 de novembro de 2009

DEDICATÓRIA

A todos que acreditaram na minha capacidade e apostaram na minha vitória, pois eles são suporte de cada um de meus passos. As alegrias de hoje também são suas, pois seu amor, paciência e amizade, foram importantes para a conquista dessa vitória.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que deu-nos forças para chegar ao fim do caminho que escolhemos, que presenteou-nos com muitos momentos de vitórias e sucessos, compartilhando conosco as horas difíceis, acompanhando-nos no feliz desempenho de nossa missão.

Ao meu pai, minha mãe e minha irmã que contribuíram grandemente para meu êxito, compreendendo minhas ausências, compartilhando meus ideais e incentivando minha busca, com palavras de estímulo e carinho.

Ao meu namorado pela compreensão de minhas ausências e apoio incondicional em todos os momentos.

Ao professor Luciano Specht, orientador deste trabalho, a minha enorme gratidão por sua paciência e dedicação pelo meu crescimento pessoal e intelectual.

Ao professor Pedro A. Pereira Borges, a minha gratidão pelo empenho.

Aos nossos mestres, que ensinando fizeram que construíssemos conhecimentos.

Aos meus colegas pela amizade, parceria e companheirismo.

Enfim, a todos que me apoiaram e acreditaram o meu eterno obrigado!

RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade vem fazendo com que a construção civil desenvolva métodos construtivos visando à reutilização de resíduos urbanos. Com esta premissa houve interesse em desenvolver um trabalho que contemplasse o estudo das propriedades térmicas: condutividade, calor específico e difusividade térmica em concretos com diferentes teores de adição de borracha, como uma forma de aliar um benefício ambiental com a melhoria de um material importantíssimo para a construção civil. Foram preparadas amostras de concreto com teores de adição de borracha de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% e realizados os ensaios nas temperaturas de 0°C, 25°C e 50°C. Os ensaios consistiam no aquecimento e medição de temperatura em 4 pontos distintos, para a aquisição da variação da temperatura em função do tempo. O calor específico foi determinado através de sua definição, a condutividade térmica através de um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) e a difusividade térmica pelo Método do Problema Inverso. Para a análise dos resultados obtidos utilizaram-se, além de interpretação dos dados tabulados e dos gráficos, técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada uma das variáveis controláveis (teor de borracha, teor de cimento, fator a/c, Slump Test e temperatura) nas variáveis de resposta (C , k e α). Para tanto foram realizadas análises para cada variável de resposta. Os resultados aqui encontrados permitem o conhecimento do comportamento da borracha em concretos, visando sua utilização como material de construção civil e contribuindo para estudos posteriores dos efeitos térmicos.

Palavras chaves: concreto, borracha e propriedades térmicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre o peso específico e os teores de borracha.....	26
Figura 2: Relação entre a resistência à compressão e os teores de borracha.....	27
Figura 3: Relação entre a resistência à tração e os teores de borracha.....	27
Figura 4: Mapa das unidades climáticas do Brasil.....	30
Figura 5: Comportamento da Temperatura.....	32
Figura 6: Modelo de taxa de energia.....	36
Figura 7: Distribuição granulométrica da areia.....	43
Figura 8: Distribuição granulométrica da borracha.....	45
Figura 9: Esquema ilustrativo dos corpos-de-prova	
(a) estrutura das amostras.....	47
(b) distribuição dos termopares e fonte de calor.....	47
Figura 10: Corpo-de-prova instrumentado para ensaio	48
Figura 11: Fonte Estabilizada.....	49
Figura 12: Esquema ilustrativo da montagem dos equipamentos.....	49
Figura 13: Termopares instrumentados em CP.....	50
Figura 14: Domínio de integração e os pontos da coleta das temperaturas para a temperatura de 0°C.....	58
Figura 15: Relação do calor específico do traço 1-6,5 em função da variação do teor de borracha.....	59
Figura 16: Relação do calor específico do traço 1-5,37 em função da variação do teor de borracha.....	59
Figura 17: Relação entre a condutividade térmica do traço 1-6,5 e a variação do teor de borracha.....	68
Figura 18: Relação entre a condutividade térmica do traço 1-5,37 e a variação do teor de borracha.....	68
Figura 19: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo.....	77
Figura 20: Relação entre a difusividade térmica do traço 1-6,5 e a variação do teor de borracha.....	77
Figura 21: Relação entre a difusividade térmica do traço 1-5,37 e a variação do teor de borracha	78

Figura 22: Relação entre o calor específico nas 3 temperaturas e a variação do teor de borracha.....	83
Figura 23: Relação entre a condutividade térmica nas 3 temperaturas e a variação do teor de borracha.....	83
Figura 24: Relação entre a difusividade térmica nas 3 temperaturas e a variação do teor de borracha.....	84
Figura 25: Estrutura tipo sanduíche.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de C, K, α para materiais da construção civil.....	41
Tabela 2: Variáveis estudadas.....	42
Tabela 3: Traço 1-6,52 para moldagem em concreto.....	46
Tabela 4: Traço 1-5,375 para moldagem em concreto.....	46
Tabela 5: Quantidade de agregados para 1 m ³ de concreto no traço 1 - 6,52.....	46
Tabela 6: Quantidade de agregados para 1 m ³ de concreto no traço 1 - 5,37.....	46
Tabela 7: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 0°C.....	52
Tabela 8: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 0°C.....	53
Tabela 9: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 25°C.....	54
Tabela 10: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 25°C.....	55
Tabela 11: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 50°C.....	56
Tabela 12: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 50°C.....	57
Tabela 13: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 0°C.....	62
Tabela 14: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 0°C.....	63
Tabela 15: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 25°C.....	64
Tabela 16: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 25°C.....	65
Tabela 17: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 50°C.....	66

Tabela 18: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 50°C.....	67
Tabela 19: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 0°C.....	71
Tabela 20: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 0°C.....	72
Tabela 21: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 25°C.....	73
Tabela 22: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 25°C.....	74
Tabela 23: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 50°C.....	75
Tabela 24: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 50°C.....	76
Tabela 25: Resumo dos resultados obtido para o Calor Específico.....	80
Tabela 26: Resumo dos resultados obtido para a Condutividade Térmica.....	81
Tabela 27: Resumo dos resultados obtido para a Difusividade Térmica.....	82

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

H_2SO_4	Ácido sulfúrico
NaOH	Hidróxido de sódio
NO	Óxidos de nitrogênio
CCl_4	Tetracloroeto de carbono
ε	emissividade da superfície, assume valor de zero a um;
T_{ab}^4	temperatura, a constante;
σ	constante;
\bar{q}	fluxo de calor;
\dot{T}	direção;
∇	gradiente de temperatura;
(\vec{x})	vetor posição;
k	coeficiente de condutividade térmica.
q	fonte de calor;
C_p	calor específico;
ρ	massa específica;
$\frac{\partial T}{\partial t}$	variação da temperatura em função do tempo.
$g(\vec{x}, t) = 0$	fonte de calor
α	difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$);
T_1	termopar 1;
T_2	termopar 2;
T_3	termopar 3;
T_4	termopar 4;
CP	corpo-de-prova;
kgm^3	kilograma por metro cúbico;
a/c	fator água cimento;
TB	teor de borracha;

TC teor de cimento;
TEMP temperatura;
R² coeficiente de correlação;

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	15
1.1 TEMA DA PESQUISA	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.3 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO.....	15
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1. <i>Objetivo geral</i>	15
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	15
1.5 JUSTIFICATIVAS.....	16
1.6 SISTEMATIZAÇÃO DO TCC.....	17
REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 SUSTENTABILIDADE.....	18
2.2 RECICLAGEM.....	19
2.3 BORRACHA.....	21
2.4 CONCRETO COM BORRACHA.....	23
2.5 CLIMA.....	28
2.5.1 <i>Clima Brasileiro</i>	29
2.5.2 <i>Clima no Rio Grande do Sul</i>	31
2.5.2.1 <i>Classificação</i>	31
2.5.2.2 <i>Aspectos Pluviométricos</i>	31
2.5.2.3 <i>Aspectos Térmicos</i>	32
2.5.2.4 <i>Umidade Relativa</i>	33
2.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	33
2.6.1 <i>Transferência de calor por Condução</i>	34
2.6.2 <i>Transferência de calor por Convecção</i>	34
2.6.3 <i>Transferência de calor por Irradiação</i>	35
2.7 FLUXO DE CALOR.....	36

3. METODOLOGIA	41
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	41
3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA	41
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS.....	42
3.3.1 Cimento.....	42
3.3.2 Areia.....	43
3.3.3 Brita.....	44
3.3.4 Água.....	44
3.3.5 Borracha.....	44
3.3.6 Concreto.....	45
3.4 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS.....	47
3.5 ANÁLISE DOS DADOS.....	50
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	51
4.1 CALOR ESPECÍFICO.....	51
4.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	62
4.3 DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	70
4.4 RESUMO DOS RESULTADOS.....	80
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
5.1 CONCLUSÕES.....	87
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
6. BIBLIOGRAFIA.....	89
7. ANEXOS.....	93

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema da Pesquisa

Propriedades térmicas de materiais de construção.

1.2 Delimitação do Tema

Este trabalho limita-se a estudar as propriedades térmicas de concretos com diversos teores de adição de borracha visando sua utilização como material de construção civil.

1.3 Formulação da questão de estudo

Quais as propriedades térmicas serão mais influenciadas com adição de escória de borracha em concretos de cimento Portland considerando como variáveis os diferentes teores de adição, traço e temperatura de medida?

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

Avaliar a influência de diferentes traços e teores de adição de escória de borracha em concretos de cimento Portland em relação as suas propriedades térmicas.

1.4.2. Objetivos específicos

a) Determinar a influência das propriedades físicas de um material como massa específica, calor específico, condutividade e difusividade térmica no concreto convencional em comparação com o concreto com adição de borracha.

b) Analisar métodos de cálculo práticos para a determinação das propriedades térmicas de concretos com adição de borracha.

c) Verificar a influência do teor de adição e traço nas propriedades térmicas.

1.5 Justificativas

Nos últimos anos, a preocupação com a qualidade de vida voltou-se para a obtenção de um modo de vida sustentável e para o reaproveitamento dos passivos ambientais. É importante saber que adotar as práticas que transformem nossa presença em determinado lugar o mais sustentável possível é a única saída para determos a degradação ambiental que estamos experimentando nos últimos anos e as graves alterações climáticas que causam grandes desastres em diversas partes do planeta.

Tendo em mente que a adoção de práticas sustentáveis é fator decisivo para a continuidade da disponibilidade de recursos naturais, a reutilização de materiais na construção civil pode se tornar um importante canal de eliminação de resíduos urbanos que, de outra forma, seriam depositados em qualquer local, aumentando o custo de deposição e tratamento, afetando o meio ambiente de forma agressiva e sem controle.

Os pneus fazem parte deste grupo indesejável que em algum momento, se transformará em um resíduo potencialmente danoso à saúde pública e a natureza. Com base nisto, várias pesquisas vem sendo realizadas nos últimos anos com o intuito de reutilizar este material aliando suas qualidades térmicas aos materiais de construção e ao condicionamento térmico das edificações.

Com a crise de energia, o problema do condicionamento térmico das edificações ficou em evidência, uma vez que o homem ofuscado por suas descobertas tecnológicas esqueceu-se dos recursos que a natureza pôs à sua disposição para o conforto térmico. No mínimo uma melhoria substancial quanto ao conforto térmico pode ser obtida com o uso de técnicas construtivas simples, por isso o concreto com adição de borracha vêm sendo agora estudado para verificar sua eficiência quanto ao conforto ambiental, já que é comprovado suas qualidades de resistência ao intemperismo, elasticidade e peso reduzido.

Com esta premissa houve interesse em desenvolver um trabalho que contemplasse o estudo das propriedades térmicas: condutividade, calor específico e difusividade térmica em concretos com adição de borracha, como uma forma de aliar um benefício ambiental com a melhoria de um material importantíssimo para a construção civil.

1.6 Sistematização do TCC

Além deste 1º Capítulo onde se apresentou os objetivos e justificativas da relevância deste trabalho, o trabalho será organizado da seguinte forma:

2º Capítulo: apresentará a revisão de literatura, onde serão abordados os seguintes temas: sustentabilidade, reciclagem, borracha, concreto com borracha, clima, transferência de calor e fluxo de calor.

3º Capítulo: abordará a metodologia utilizada, procedimentos utilizados, estudo de caso, materiais, equipamentos e descrição dos ensaios realizados.

4º Capítulo: apresenta os resultados obtidos.

5º Capítulo: trata das conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

No final do trabalho serão apresentadas as referências bibliográficas, bem como os anexos pertinentes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SUSTENTABILIDADE

O homem moderno destrói e influencia o meio ambiente que o cerca como nunca. E as conseqüências desses atos podem levar até mesmo a inviabilização da vida, como a conhecemos, em nosso planeta. Felizmente, a aparente aniquilação iminente fez com que os seres humanos acordassem e descobrissem que somente a convivência sustentável com o ambiente que os cerca é a chave para a sobrevivência de nossa espécie. Nunca se falou tanto em sustentabilidade, da mesma forma que nunca se tentou seguir e estudar formas de encontrar caminhos alternativos e harmonizar nossa existência com as necessidades de preservação do meio ambiente (NUNES, 2009).

Segundo a Wikipédia (2009), sustentabilidade é um conceito sistêmico, relacionado com a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade. Nunes (2009) diz que a sustentabilidade é a capacidade de um indivíduo, grupo de indivíduos ou empresas têm de se manterem inseridos num determinado ambiente sem, contudo, impactar violentamente esse meio.

O Santo Graal da Sustentabilidade é o impacto zero, cenário em que, por exemplo, constrói-se uma casa e vive-se nela sem afetar negativamente a natureza, neutralizando quaisquer impactos decorridos da presença humana naquele local. Isso não quer dizer que você vai viver sem arrancar uma folha do lugar, mas que vai existir o cuidado de retirar só o necessário e dar condições de recuperação para a natureza (NOSSO QUINTAL, 2009).

O consenso é que é preciso diminuir drasticamente a emissão de Gases Estufa (como gás carbônico e metano) na atmosfera ou a coisa vai ficar muito feia. Só que, para se ter uma idéia, se parássemos hoje, instantaneamente de jogar esses gases na atmosfera, todos ao mesmo tempo, o planeta continuaria a esquentar por mais uma década. Então a saída é fazer o possível para diminuir as emissões e, ao mesmo tempo, desenvolver tecnologias para diminuir a concentração de Gases Estufa na atmosfera. Seja seqüestrando para baixo da terra (que é

basicamente o que árvores fazem), seja neutralizando as emissões daqui pra frente (NOSSO QUINTAL, 2009).

Ao atuarmos de forma irresponsável e queimarmos indiscriminadamente nossos recursos naturais, sem dar tempo ao planeta para se recuperar, estamos provocando a escassez de recursos necessários a nossa sobrevivência e dificultando a vida de milhões de pessoas. Ações aparentemente simples e de pouco impacto, quando tomadas por um grande número de pessoas, tornará a sustentabilidade uma realidade palpável e real em qualquer parte onde haja a presença humana e garantirá a sobrevivência de nossa espécie por muito mais tempo.

É importante entender que a busca por caminhos da sustentabilidade global, passam antes de qualquer coisa, pela busca da sustentabilidade individual. Pois, cada um como indivíduo pode combater ao lado das forças que desejam proporcionar uma melhor qualidade de vida para o futuro da humanidade. Cidades que tratam seus efluentes e resíduos, empresas que evitam o desperdício de energia e recursos e pessoas que vivem atentas para o modo como interferem na natureza e no meio ambiente que as cercam. Essas são as formas para encontrar os caminhos da sustentabilidade e para manter nosso planeta com capacidade de sustentar a vida por muitas e muitas gerações ainda.

2.2 RECICLAGEM

Aplicada aos objetos produzidos pelo ser humano, a reciclagem de materiais refere-se ao aproveitamento de substâncias que, já tendo sido empregadas na constituição de um produto, são novamente utilizadas (também num tempo posterior) para a fabricação de outro. Neste contexto, a reciclagem implica na aplicação de processos de transformação, sejam eles industriais ou artesanais. Como na maioria das atividades humanas, depende de uma disposição para ser realmente efetiva (PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO, 1999).

A palavra reciclagem foi introduzida ao vocabulário internacional no final da década de 80, quando foi constatado que as fontes de petróleo e outras matérias-primas não

renováveis estavam e estão se esgotando. Reciclar significa = Re (repetir) + Cycle (ciclo). Para compreendermos a reciclagem, é importante "reciclarmos" o conceito que temos de lixo, deixando de enxergá-lo como uma coisa suja e inútil em sua totalidade. O primeiro passo é perceber que o lixo é fonte de riqueza e que para ser reciclado deve ser separado. Ele pode ser separado de diversas maneiras, sendo a mais simples separar o lixo orgânico do inorgânico (lixo molhado/ lixo seco) (AMBIENTE BRASIL, 2009).

Segundo a Wikipédia (2009) a reciclagem é termo genericamente utilizado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para um novo produto. Muitos materiais podem ser reciclados e os exemplos mais comuns são o papel, o vidro, o metal e o plástico. No Quadro 1 tem-se um comparativo da reciclagem no mundo.

<i>Material</i>	<i>%</i>	
Vidro	5%	O Japão recicla 55,5%.
Papel/Papelão	36%	O Brasil importa apenas para reciclar.
Plástico	15%	Representa 3% do lixo urbano nas capitais.
PET (embalagens de refrigerante)	15%	O PET reciclado se transforma em fibras.
Óleo	18%	Apenas 1% do óleo consumido no mundo é reciclado.
Latas de aço	35%	O Brasil importa latas usadas para reciclagem.
Pneu	10%	O Brasil exporta pneus para reciclagem.
Embalagens Longa-vida	Não há dados	A incineração é considerada excelente combustível.

Fonte: Compromisso Empresarial para a Reciclagem (Cempre), 2008.

Quadro 1 – Comparativo da Reciclagem

As maiores vantagens da reciclagem são a minimização da utilização de fontes naturais, muitas vezes não renováveis; e a minimização da quantidade de resíduos que necessita de tratamento final, como aterramento, ou incineração.

O conceito de reciclagem serve apenas para os materiais que podem voltar ao estado original e ser transformado novamente em um produto igual em todas as suas características. O conceito de reciclagem é diferente do de reutilização.

O reaproveitamento ou reutilização consiste em transformar um determinado material já beneficiado em outro. Um exemplo claro da diferença entre os dois conceitos, é o

reaproveitamento do papel. No aspecto econômico a reciclagem contribui para a utilização mais racional dos recursos naturais e a reposição daqueles recursos que são passíveis de reaproveitamento.

2.3 BORRACHA

A borracha natural é um polímero obtido da seiva da seringueira, árvore de origem amazônica, mas que ganhou o mundo, principalmente pela rápida adaptação que sofreu quando, na virada do século, foi plantada com sucesso nas florestas tropicais asiáticas. Para sua extração são feitos pequenos cortes superficiais no caule da árvore, através dos quais o látex é captado. Depois de sua coagulação e secagem, este material é aquecido e posteriormente processado com outras substâncias químicas, transformando-se em borracha (RECICLOTECA, 2008).

Com o passar do tempo, criou-se na Alemanha a tecnologia para fabricá-la artificialmente a partir do petróleo. Apesar de a borracha sintética ser muito parecida com a borracha natural, ela não é tão resistente ao calor e fragiliza-se com a rápida mudança de temperatura. Por isso, os artefatos são sempre constituídos de uma parcela da borracha natural.

Segundo a Recicloteca (2008), no Brasil, a maior parte da borracha produzida industrialmente é usada na fabricação de pneus, correspondendo a 70% da produção. Além disso, ela pode ser empregada em calçados, instrumentos cirúrgicos (como tubos, seringas e outros produtos farmacêuticos, além de luvas cirúrgicas e preservativos) e na construção civil.

Os pneus foram inventados em 1845, depois que o norte-americano Charles Goodyear descobriu casualmente o processo de vulcanização da borracha, quando deixou cair borracha e enxofre no fogão (SILVA, 2008).

Tornaram-se então substitutos das rodas de madeira e ferro, usadas em carroças e carruagens. A borracha além de ser mais resistente e durável, absorve melhor o impacto das rodas com o solo, o que tornou o transporte mais confortável e funcional.

A maior parte dos pneus hoje é feita de 10% de borracha natural (látex), 30% de petróleo (borracha sintética) e 60% de aço e tecidos (tipo lona), que servem para fortalecer ainda mais a estrutura (RECICLOTECA, 2008).

Conforme a Recicloteca (2008) um estudo feito pela Universidade de Vrije, na Holanda, descobriu que todos os dias são fabricados cerca de 2 milhões de novos pneus no mundo. Isto significa uma produção anual de 730 milhões de pneus (janeiro/1999). Ao mesmo tempo, hoje são transformados em sucata 800 milhões de unidades por ano.

Segundo Silva (2008) no Brasil, em 1993, 0,5% do lixo urbano brasileiro eram de pneus velhos e fora de uso. São descartados no país cerca de 17 milhões de pneus por ano, com isto o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em sua Resolução 258/99, exige que os fabricantes e importadores de pneumáticos colem e dêem uma destinação final ambientalmente correta a cinco pneus inservíveis para cada quatro novos fabricados comercializados no Brasil (CONAMA, 1999).

Outro destino de pneus inservíveis é o de gerar energia. Este uso cresce a cada ano e é, atualmente, o maior destino de pneus descartados. A conversão de pneus em energia preserva recursos naturais, já que faz uso da energia armazenada nos pneus a base de petróleo, aproveitando seu PCI de 6,600 a 8,400 kcal/kg. Além disso, pneus apresentam teor de cinzas menor do que a maior parte dos tipos de carvão, e menos enxofre do que o carvão betuminoso. Os pneus podem ser queimados por inteiro ou triturados. Queimar pneus inteiros pode diminuir os gastos com a trituração, porém acarreta maiores custos com transporte e armazenamento. Em 1998, fornos de cimento, fábricas de papel e celulose, termoelétricas e caldeiras industriais queimaram aproximadamente 114 milhões de pneus. Especialmente em fornos de calcinação, pneus são utilizados, também, para diminuir a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) (DYNAMIS, 2004).

A partir de então a recuperação e reciclagem deste material vem sendo estudada com o intuito de se obter novas formas de utilização o que tem instigado pesquisadores a buscar formas de reaproveitamento dos pneus tanto em sua forma original quanto moído. Sendo uma das propriedades principais da borracha a grande resistência ao intemperismo e a umidade, torna-se possível utilizá-la como agregado de compósitos cimentícios para algumas aplicações como: preenchimento de lajes em concreto, contra-pisos e calçadas, além de já ser utilizada em asfaltos com adição de borracha, proteção de construções à beira mar (nos diques e cais; barragens e contenção de encostas, onde são geralmente colocados inteiros), recauchutagem e reaproveitamento energético (fornos de cimento e usinas termoelétricas).

2.4 CONCRETO COM BORRACHA

Em busca de fornecer alternativas de uso para os pneus inservíveis, vários pesquisadores propuseram o uso da borracha através de sua incorporação em concretos e argamassas.

Eldin e Senouci (1993 *apud* Rosa 2007) realizaram um dos primeiros estudos com a incorporação de borracha de pneu em concreto. Estes autores fizeram substituições no agregado miúdo por borracha de 1mm, assim como a substituição no agregado graúdo por borracha com dimensões de 38, 25, 19 e 6mm. Além da menor trabalhabilidade após a incorporação da borracha, foi observada menor queda na resistência à compressão e resistência à tração de misturas com substituição no agregado miúdo e granulometrias mais finas. A queda nas propriedades mecânicas foi atribuída à falta de aderência entre a superfície da borracha e a matriz de cimento.

Rostami *et al.* (1993) estudaram a resistência à compressão de concretos com substituição de 0 a 100% de agregado graúdo por borracha. O tratamento superficial do resíduo feito pelos autores, com o intuito de incremento de aderência da borracha com a matriz de cimento, incluiu lavagem com água, solução de tetracloreto de carbono (CCl₄) e uma mistura de limpador látex. O resultados mostraram que a borracha apresenta grande quantidade de impurezas provenientes do processo de trituração e a simples lavagem com

água melhorou a resistência à compressão em 16% em relação ao resíduo não tratado. O melhor resultado foi apresentado pelo tratamento com a solução de CCl₄, com um aumento da resistência de 57% em relação à borracha não tratada.

Nos ensaios de resistência à compressão e flexão, foi verificado que os corpos-de-prova de concreto com borracha apresentaram menores valores de resistência que os controle. Também foi observado que quanto maior a quantidade de borracha adicionada maior a queda na resistência (TOUTANJI,1996).

Alguns autores, procurando avaliar o uso da borracha de pneu em concreto, realizaram uma pesquisa na qual submeteram o resíduo a diversos tipos de meios alcalinos. Através de microscopia eletrônica, concluíram que para um período de até quatro meses de exposição a esse meio, não há mudança na textura do resíduo. Isto conta como um fator positivo para o uso da borracha de pneu em concreto (HUYNH e RAGHAVAN, 1997).

Em estudo com argamassas de cimento contendo borracha de pneu, Raghavan *et al.*(1998), mostraram que a trabalhabilidade das argamassas contendo borracha é próxima ou melhor que a das argamassas sem partículas de borracha, quando submetidas ao teste VeBe. Isso mostra que a propriedade estudada pode apresentar resultados diferentes dependendo do método adotado.

A influência da forma do resíduo e de como o ensaio é feito pode ser mostrada por Khatib e Bayomy (1999 *apud* Marques, 2005). Estes observaram que em concreto, pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, a mistura contendo borracha apresenta pior trabalhabilidade que a composição controle. Também foi observado que quanto maior a quantidade de borracha adicionada, menor é o abatimento, sendo que para 40% de substituição tem-se um abatimento próximo a zero.

Segundo Segre (2000 *apud* Marques, 2005), a mistura de borracha de pneu moída e pasta de cimento resultam num composto resistente à abrasão e à flexão, propriedades consideradas importantes do ponto de vista mecânico. Outra observação é que o material não adere bem à superfície da matriz de cimento. De acordo com a autora surgiu a idéia de tratar a borracha para melhorar suas propriedades na adição à pasta de cimento. Usou ainda dois

reagentes simples e muito usados na química, o ácido sulfúrico (H₂SO₄) e hidróxido de sódio (NaOH). Após vários ensaios para testar propriedades como a resistência à flexão, e averiguar a densidade, ficou demonstrado que a mistura de cimento e borracha tratada com NaOH apresentou os melhores desempenhos.

Além da constatação de perda de resistência à compressão, percebeu-se que as amostras de concreto contendo borracha apresentam menor absorção de água que as amostras controle e que a porcentagem que permite melhor trabalhabilidade em concreto é a substituição de 20% em volume do agregado miúdo (BAUER et al., 2001).

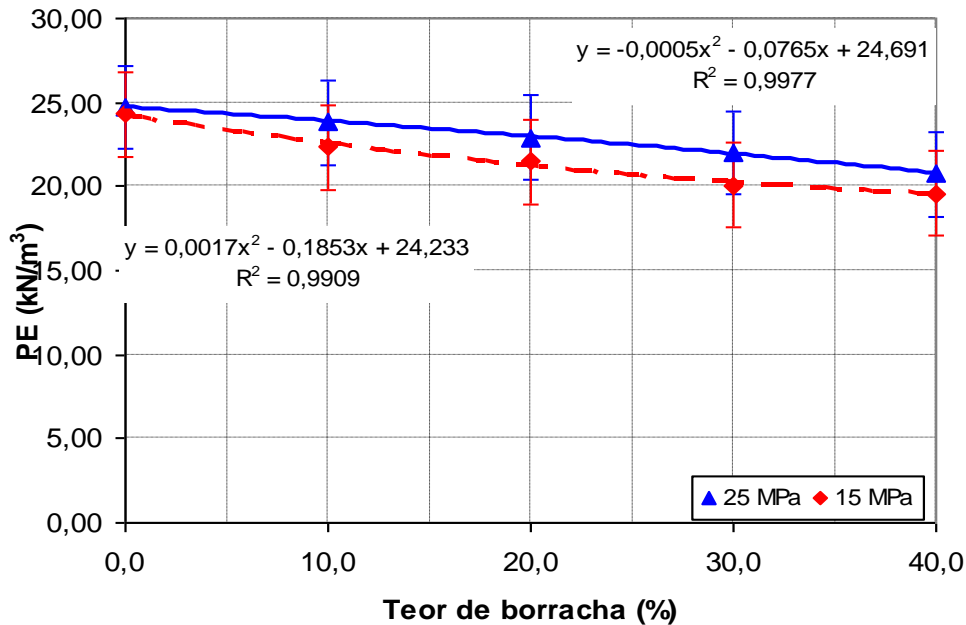
Na bibliografia existente são encontrados poucos resultados sobre tratamentos superficiais aplicados à borracha com o objetivo de melhorar a aderência e aumentar a resistência à flexão. LI *et al.* (1998), citados por Albuquerque e Andrade (2002), fizeram uma tentativa pré-revestindo a borracha com METHOCEL (solução polimérica derivada da celulose) e com pastas de cimento. Entretanto, não houve resultados satisfatórios: os concretos com borracha tratada apresentaram comportamento igual ou inferior ao concreto com borracha sem tratamento.

Autores, que fizeram ensaios de microscopia eletrônica em amostras de pasta de cimento contendo borracha, afirmam que ocorre perfeita aderência entre a borracha e os produtos de hidratação do cimento, pois pode ser observada alta concentração de cristais de óxido de cálcio, óxido de silício e alumínio sobre a superfície da borracha (HERNÁNDEZ OLIVARES et al., 2002).

As opções promissoras para descarte dos pneus fora de uso são: uso em misturas de concreto asfáltico, incineração e reuso de borracha de pneu triturado em uma série de produtos plásticos ou de borracha. Além dessas opções existem outras maneiras de se aproveitar tal material, seja na forma de combustível para fornos de cimenteiras, como contenção de margens de rios ou recifes artificiais (SIBDIQUE e NAIK, 2004).

De acordo com Bruxel (2008), a quantidade de borracha adicionada ao concreto influenciou em sua massa unitária, visto que um agregado mais leve substituiu o agregado

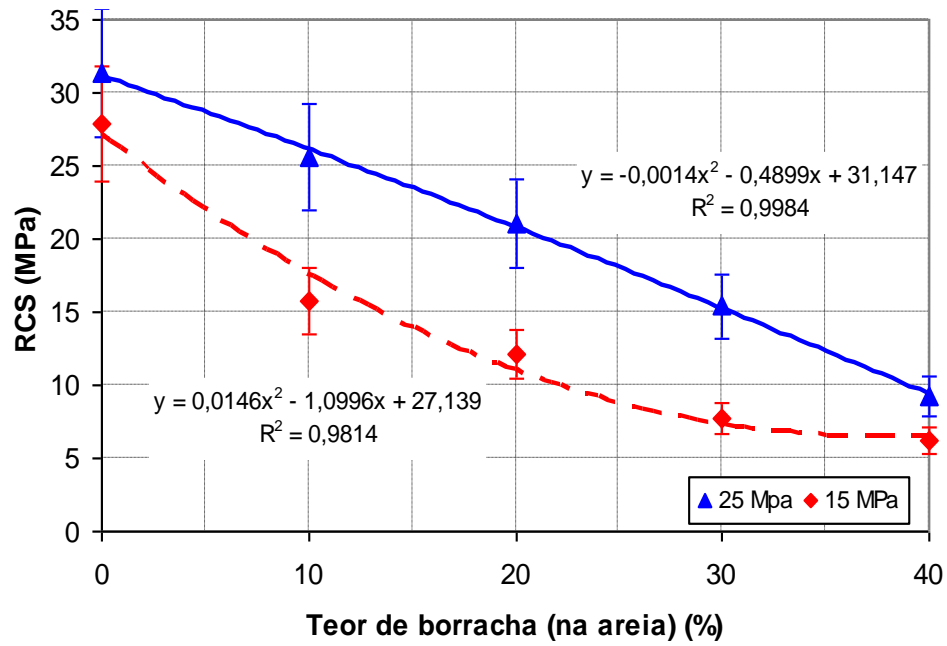
natural e quanto maior a quantidade de borracha adicionada mais leve a mistura se torna, como pode ser visto na Figura 1.



Fonte: Bruxel, 2009.

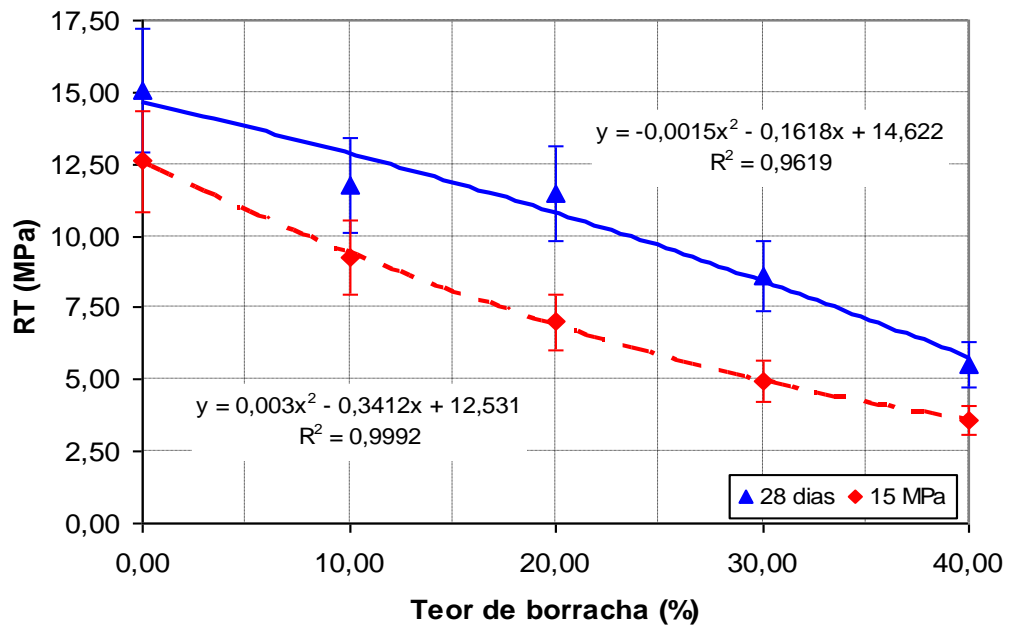
Figura 1: Relação entre o peso específico e os teores de borracha

Através dos resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração pode-se observar uma queda em ambas após a adição do resíduo, o que pode ser atribuído a falta de aderência entre as partículas de borracha e matriz de cimento. O maior teor de ar incorporado assim como a menor capacidade da borracha em resistir os esforços de compressão e de permitir maiores deformações também podem ser responsáveis pelos menores resultados destas propriedades mecânicas, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3.



Fonte: Bruxel, 2009.

Figura 2: Relação entre a resistência à compressão e os teores de borracha



Fonte: Bruxel, 2009.

Figura 3: Relação entre a resistência à tração e os teores de borracha

2.5 CLIMA

De acordo com Medina (1997), o clima pode ser definido como um conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam, durante um longo período, o estado médio da atmosfera e sua evolução em determinado lugar, resultando daí uma combinação de nebulosidade, umidade, temperatura, vento, pressão barométrica, etc.

Motta (1991) classifica o clima segundo alguns critérios e parâmetros que podem ser:

- Fatores estáticos ou geográficos: relevo, latitude, continentalidade ou maritimidade;
- Fatores dinâmicos: sistemas de circulação atmosférica;
- Temperaturas médias, máximas e mínimas normais.

Segundo Lamberts, Dutra & Pereira (1997), é importante o conhecimento das diferenças conceituais existentes entre tempo e clima. Tempo é a variação diária das condições atmosféricas, enquanto que clima é a condição média do tempo em uma dada região, baseada em medições. As variações climáticas são atribuídas a elementos de controle, tais como: proximidade à água (a água se aquece ou esfria mais rapidamente que a terra); altitude (a temperatura do ar tende a diminuir com o aumento da altitude); barreiras montanhosas e correntes oceânicas.

Para melhor compreensão do clima brasileiro, Lamberts, Dutra e Pereira (1997) acharam conveniente dividir o clima em três escalas distintas, porém indissociáveis: macroclima, mesoclima e microclima. Referindo-se ao macroclima, as variáveis são quantificadas em estações meteorológicas. Podem descrever as características gerais de uma região em termos de sol, nuvens, temperatura, vento, umidade e precipitação. O conhecimento dessas variáveis é fundamental para o projeto de edificações mais adequadas ao conforto do seu ocupante e mais eficientes em termos de consumo de energia. O mesoclima e microclima são escalas mais próximas ao nível da edificação. Alguns tipos de mesoclima podem ser identificados facilmente como, por exemplo: o litoral, o campo, as florestas, os vales, as cidades e as regiões montanhosas. É aqui que variáveis como a vegetação, a topografia, o tipo de solo e a presença de obstáculos naturais ou artificiais irão influenciar nas condições locais de clima. De forma semelhante, porém bem mais perto da edificação, tem-se o microclima, o

qual pode ser concebido e alterado. O estudo das variáveis desta escala é fundamental para o lançamento do projeto, pois uma série de particularidades climáticas do local pode induzir a soluções arquitetônicas mais adequadas ao bem-estar das pessoas e à eficiência energética.

2.5.1 Clima Brasileiro

O Brasil, pelas suas dimensões continentais é influenciado pelas configurações geográficas, altitude e dinâmica das correntes e massas de ar predominando assim uma diversificação climática bem ampla. Essas massas de ar assumem grande importância, pois atuam diretamente sobre as temperaturas e os índices pluviométricos, provocando as diferenciações climáticas regionais.

De todo o território brasileiro, 92% se situa na zona intertropical delimitado ao norte pela Linha do Equador e ao sul pelo Trópico de Capricórnio. A predominância de climas quentes, com temperaturas médias superiores a 20 °C se explicam por estar situado entre os trópicos e à baixas altitudes do relevo.

Para classificar um clima, devemos considerar a temperatura, a umidade, as massas de ar, a pressão atmosférica, correntes marítimas e ventos, entre muitas outras características.

Segundo Coelho (1990) no Brasil, existem inúmeras classificações climáticas, sendo uma delas feita por Wilhem Köppen. Essa classificação baseia-se fundamentalmente na temperatura, na precipitação e na distribuição de valores de temperatura e precipitação durante as estações do ano. Segundo sua classificação, o Brasil possui 6 tipos de climas:

Equatorial: clima quente e úmido, com pequena estação seca, temperaturas elevadas com médias de 25°C a 27°C e pluviosidade elevada com médias de 1.500 a 2.500 mm/ano;

Tropical: clima quente e úmido, chuvas de verão, temperatura média entre 19°C e 28°C e pluviosidade média inferior a 2000 mm/ano com duas estações bem definidas: o verão (chuvoso) e o inverno (seco);

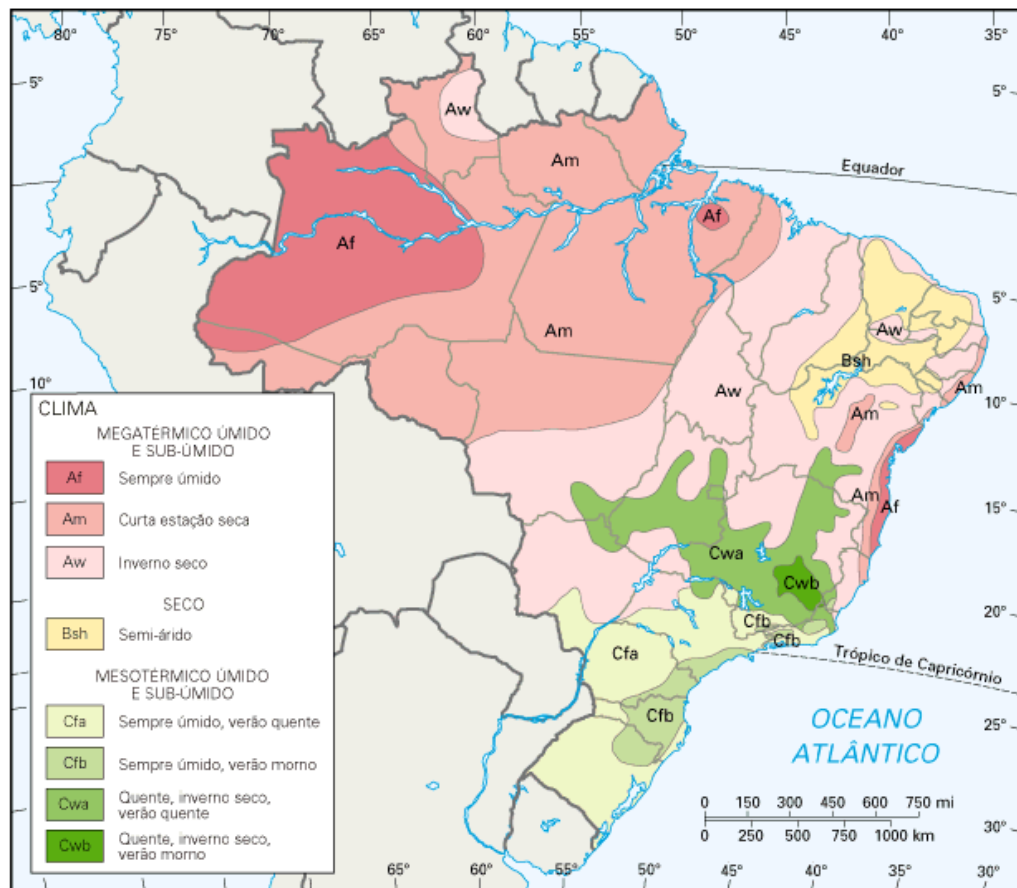
Semi-árido: clima árido ou semi-árido, quente com chuvas de inverno, médias anuais térmicas superiores a 25°C e pluviosidade média anual inferior a 1000 mm/ano com chuvas irregulares;

Tropical de altitude: clima subtropical ou temperado, verões quentes, chuvas de verão com médias térmicas entre 19°C e 27°C e pluviosidade média de 1500 mm/ano;

Subtropical: clima subtropical ou temperado, chuvas bem distribuídas, sempre úmido com médias térmicas entre 17°C e 19°C e pluviosidade média de 1500 mm/ano;

Tropical atlântico: as temperaturas variam entre 18° C e 26° C, com amplitudes térmicas crescentes conforme se avança para o sul. Chove cerca de 1.500 mm/ano. No litoral do Nordeste, as chuvas intensificam-se no outono e no inverno. Mais ao sul, são mais fortes no verão.

Na Figura 4 podemos visualizar os climas predominantes no Brasil:



Fonte: GUIA NET, 2009

Figura 4: Mapa das unidades climáticas do Brasil

2.5.2 Clima Rio Grande do Sul

2.5.2.1 Classificação

O clima no Rio Grande do Sul varia nas diversas regiões conforme a altitude e a aproximação da costa marítima, com estações do ano bem definidas, invernos rigorosos e verões amenos. Devido à sua latitude, apresenta diferenças em relação ao clima do resto do Brasil.

Enquadra-se na zona fundamental temperada e no tipo temperado úmido. Caracteriza-se por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A média de temperatura para o estado é de 18°C.

2.5.2.2 Aspectos Pluviométricos:

Das regiões geográficas do Globo, bem regadas por chuvas, o Sul do Brasil é a que apresenta distribuição espacial mais uniforme.

O regime pluviométrico é bastante regular e as chuvas são bem distribuídas durante o ano todo. Com efeito, ao longo de quase todo seu território a altura média da precipitação anual varia de 1.250 a 2.000 mm.

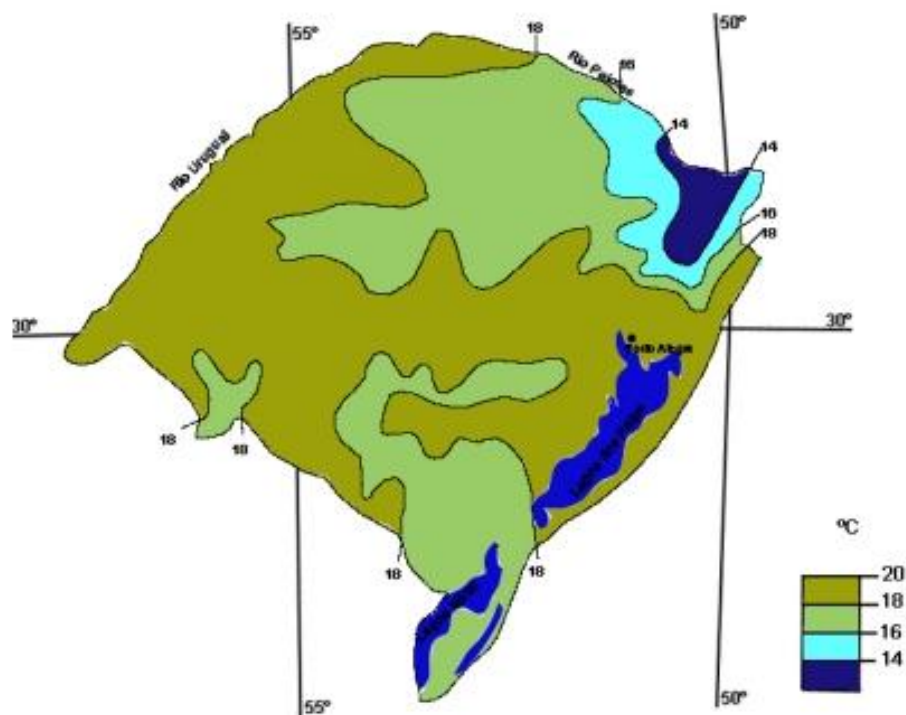
Na região sul do Brasil a quantidade de chuva anual é bastante variável, a presença de tempestades é mais frequente o que produz elevada intensidade de precipitações. O máximo pluviométrico acontece no inverno e o mínimo no verão em quase toda a região. Com relação à estiagem, é raro o fenômeno de secas prolongadas.

2.5.2.3 Aspectos Térmicos

A temperatura no estado, apesar de sua diversificação espacial, exerce um papel unificador e uniformizador do clima regional. Isso não significa que os valores do comportamento da temperatura sejam semelhantes, mas que não há áreas intra-regionais muito distintas, como se verifica em outras regiões geográficas do Brasil.

Em diversas regiões do estado, as temperaturas podem chegar a extremos de máximo ou mínimo, como a -10°C no inverno e 40°C no verão. O mês mais quente é janeiro, com temperatura entre 25°C e 33°C e o mês mais frio é julho, com temperaturas mínimas que oscilam de $4,0^{\circ}\text{C}$ a $-2,7^{\circ}\text{C}$. As temperaturas mínimas estão entre as mais baixas do inverno do Brasil (HELLMANN, 2008).

Pode-se perceber através da Figura 5, que no geral as temperaturas ficam entre 16°C e 20°C na maior parte do estado.



Fonte: Hellmann, 2008

Figura 5: Comportamento da Temperatura

Segundo Motta (1991) as maiores e as menores taxas de irradiação solar diária ocorrem no Rio Grande do Sul. Os valores máximos (e mínimos) mostram-se crescentes (decrecentes), a partir do aumento da amplitude com a latitude causando assim a diferenciação entre as estações do ano, mais acentuadas no Sul e pouco evidentes no Norte.

2.5.2.4 Umidade Relativa:

O valor da umidade no Rio Grande do Sul é muito elevado, pois variam de 75% a 85%. Enquanto no verão e primavera os valores giram em torno de 68% a 85%, no outono e inverno estes se encontram entre 76% e 90%, sendo estável durante as diferentes estações do ano (HELLMANN, 2008).

2.6 TRANSMISSÃO DE CALOR

Incropera e Witt (2003) trazem uma definição simples, porém geral, em que a transferência de calor consiste na energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura.

Segundo Alvarenga e Máximo (1986) o termo *calor* deve ser usado para designar a energia em *trânsito*, isto é, enquanto ela está sendo transferida de um corpo para outro, em virtude de uma diferença de temperatura. A transferência de calor para um corpo acarreta um aumento na energia de agitação de seus átomos e moléculas, conseqüentemente um aumento da *energia interna* do corpo que provoca uma elevação de sua temperatura. Naturalmente, se um corpo está a uma temperatura mais elevada do que outro, ele pode transferir parte de sua energia interna para esse outro. Esta energia transferida é o calor que está passando de um corpo a outro, assim percebe-se que calor é energia e temperatura não.

A transmissão de calor pode ocorrer de três maneiras: *condução*, *convecção* e *irradiação*.

2.6.1 Transmissão de Calor por Condução

Segundo Incropera e Witt (2003) a condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, em um meio, devido às interações entre elas, ou seja, quando um campo térmico da origem a gradientes no interior de um material.

A condução é explicada pela teoria cinética: “As moléculas do corpo mais quente têm maior energia cinética. Assim, através de choques entre as moléculas, a energia se transfere do corpo mais quente para o mais frio” (CHIQUETTO e PARADA, 1992 *apud* HELLMANN 2008).

O valor da condutividade térmica é determinada experimentalmente no meio considerado e depende de outras propriedades, como temperatura e pressão. O sinal negativo é explicado pela segunda lei da termodinâmica, em que a transferência de calor é resultante de um gradiente térmico deve ser efetuada de uma região mais quente para outra mais fria.

2.6.2 Transmissão de Calor por Convecção

O modo de transferência de calor por convecção é composto por dois mecanismos: a transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular e pelo movimento global do fluido. Assim, a transferência de calor por convecção ocorre entre fluídos em movimento e uma superfície quando os dois se encontram a diferentes temperaturas (INCROPERA e WITT, 2003).

Descreve-se transferência de calor por convecção como sendo a transferência de energia que ocorre no interior de um fluído devido à combinação dos efeitos de condução e do movimento global do fluído. A convecção do calor foi estudada por Newton, que estabeleceu uma lei básica para descrevê-la, afirmando que o fluxo de calor transportado por convecção é

diretamente proporcional à diferença de temperaturas entre o sólido e o fluido longe da parede.

2.6.3 Transmissão de Calor por Irradiação

A radiação térmica é emitida por todos os corpos que possuem temperatura maior que o zero absoluto. Isso não significa, entretanto, que a quantidade de radiação térmica emitida seja sempre significativa. Nos processos de transporte de calor, depende da quantidade de calor a ser transportada simultaneamente pelos outros mecanismos.

Segundo Roma (2003) a troca de calor por radiação é um fenômeno de transporte, ligado às ondas eletromagnéticas, o que explica o fato de sua transmissão através do vácuo ser mais eficiente do que através de fluidos.

A constante σ é independente do material e dado pela lei de Planck. Essa equação é dada para o emissor ideal, ou seja, aquele que transmite energia radiante. Todas as demais superfícies emitem menos e a emissão térmica de muitas superfícies pode ser representada por:

$$q = \varepsilon \sigma T_{ab}^4 \quad (2.1)$$

onde:

ε emissividade da superfície, assume valor de zero a um;

T_{ab}^4 temperatura a;

σ constante;

Nem toda a radiação, que atua sobre uma superfície é absorvida, parte dela é refletida. O fator de absorção é usado para caracterizar absorção de energia. Assim, se a absorção de uma superfície for 0,85 serão absorvidos 85% da energia incidente.

2.7 FLUXO DE CALOR

A lei básica que relaciona o fluxo de calor e o gradiente de temperatura foi obtida com base em dados experimentais atribuídos a Joseph Fourier (1768 – 1830) na época da revolução industrial na Europa que também inventou a máquina a vapor.

A lei de Fourier é expressa pela seguinte equação:

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = -k \nabla \dot{T}(\vec{x}, t) \quad (2.2)$$

onde:

\vec{q} fluxo de calor;

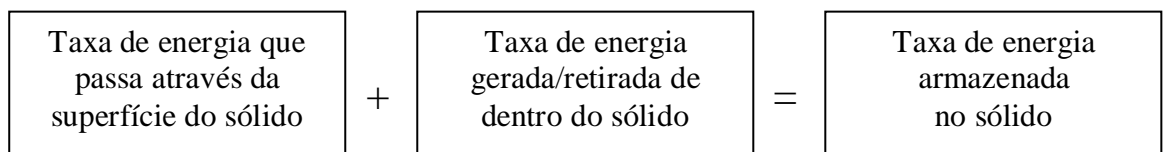
\dot{T} direção;

∇ gradiente de temperatura;

(\vec{x}) vetor posição;

k coeficiente de condutividade térmica.

Ao realizar o balanço de energia que passa em um sólido homogêneo e isotrópico, tem-se o modelo esquemático da Figura 6:



Fonte: Hellmann (2008)

Figura 6: Modelo de taxa de energia

A taxa de energia que passa pela superfície do sólido é a soma do fluxo de calor que passa por toda superfície e é dada por:

$$-\int_A \nabla q(\vec{x}, t) dA \quad (2.3)$$

A taxa de energia que é gerada no sólido é dada pelo somatório das fontes de calor no espaço e no tempo.

$$\int_V q(\vec{x}, t) dV \quad (2.4)$$

A taxa de energia armazenada no sólido depende da capacidade térmica do material (C_p), da massa específica (ρ) e da variação da temperatura em função do tempo $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$. Se o material não sofre mudança de fase, não há o efeito de energia latente, e a energia pode ser dada por

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.5)$$

onde:

C_p calor específico;

ρ massa específica;

$\frac{\partial T}{\partial t}$ variação da temperatura em função do tempo.

Substituindo as equações (2.3), (2.4) e (2.5) no balanço de energia e considerando V muito pequeno para desprezar as integrais, tem-se:

$$-\nabla \vec{q}(\vec{x}, t) + g(\vec{x}, t) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

Substituindo a Lei de Fourier em (2.1) tem-se:

$$\nabla [k \nabla T(\vec{x}, t)] + g(\vec{x}, t) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

Dividindo a equação (2.10), pelo coeficiente de condutividade térmica (k), sendo este constante, e fazendo $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$, onde α é o coeficiente de difusividade térmica, tem-se:

$$\nabla^2 T(\vec{x}, t) + \frac{1}{k} g(\vec{x}, t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Resolvendo a equação (2.8) para o caso unidimensional, conclui-se que a equação (2.9), é a Equação Diferencial da Transferência de Calor por Condução:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{k} g(\vec{x}, t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Se a fonte de calor $g(\vec{x}, t) = 0$ tem-se o problema homogêneo de condução de calor, que se expressa por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}; t > 0 \quad (2.10)$$

Em outras palavras, a equação do calor (2.10) estabelece que *em qualquer ponto do meio, a taxa de energia líquida transferida por condução para o interior de um volume unitário somado à taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação de energia térmica armazenada no interior desse volume.*

As propriedades físicas que determinam a utilização de inúmeros materiais são aquelas propriedades diretamente relacionadas com mudanças de temperatura. Essas propriedades são importantes para qualquer material, independentemente do seu uso.

Do ponto de vista dos cálculos térmicos, as três propriedades mais importantes são o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica.

Essas três propriedades relacionam-se entre si pela equação:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.11)$$

onde:

α difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$);

k condutividade térmica ($W m^{-1} o C^{-1}$);

ρ densidade ou massa específica ($K g m^{-3}$);

C_p calor específico ($J k g^{-1} o C^{-1}$).

Nesta equação, o denominador indica a capacidade do produto absorver calor, ao passo que o numerador indica a capacidade do produto transferir calor através dele.

A condutividade térmica é uma propriedade termofísica que descreve a taxa do fluxo de calor através do material, sob influência de um gradiente térmico. É importante para o estudo da transferência de calor, como por exemplo, a transferência de calor em camadas de pavimentos ou em paredes de edificações.

Segundo Mohsenin (1980 *apud* Hellmann 2008), os valores numéricos da condutividade térmica de materiais sólidos, granulares e porosos podem variar de acordo com a composição química, conteúdo de matéria fluida, estrutura física, estado, densidade, temperatura e teor de umidade do material.

Quando se compara as temperaturas de sol - ar e coeficiente de transferência de calor por convecção com as temperaturas obtidas variando o calor específico e condutividade térmica do material verifica-se que o primeiro caso tem maior influência na temperatura máxima do pavimento. Isso quer dizer que a variação da temperatura máxima é mais sensível à mudança da temperatura de sol - ar e do coeficiente de transferência de calor por convecção em relação ao calor específico e à condutividade térmica (TRAMONTINI, 2007).

A difusividade térmica expressa a variação da temperatura do material quando submetido a um processo de resfriamento ou aquecimento. O valor da difusividade térmica do material é afetado pela umidade, temperatura, porosidade e composição.

Na Tabela 1, encontram-se valores típicos de C , K , α para materiais da construção civil.

Tabela 1: Valores típicos de C , K , α para materiais da construção civil.

<i>Material</i>	$C (Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$	$K (Wm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$	$\alpha (m^2/s) \times 10^7$
Concreto de cimento Portland	1200	1,28-1,74	4,7
Argamassa de fibras naturais	1050	0,08-0,10	-
Argamassa de Gesso	1700	0,20-0,23	-
Bloco cerâmico	800-920	0,4-0,8	-
Madeira (pinho)	2720	0,11-0,14	-
Basalto	0,84	3,5	-

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

Para se proceder a análise racional de distribuição de temperatura em estruturas faz-se necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos materiais envolvidos, sendo essas determinadas nessa pesquisa.

Esta pesquisa é de caráter quantitativo, desenvolvendo um estudo baseado em experimentos laboratoriais.

3.2 Planejamento da Pesquisa

Para a concretização desta pesquisa foi elaborado um plano de atividades, onde primeiramente realizou-se uma revisão bibliográfica para sanar algumas dúvidas pertinentes sobre o assunto e assim proceder a escolha dos traços a serem utilizados na confecção dos corpos-de-prova (CP's). A pesquisa desenvolveu-se em duas partes: escolha dos traços e moldagem dos CP's e os ensaios térmicos.

Empregou-se dois traços de concreto 1:5,37 e 1:6,5 para a moldagem dos 40 CP's, com teores de substituição do agregado miúdo pela borracha de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% e os ensaios térmicos realizaram-se com três diferentes temperaturas, 0°, 25° e 50°C.

Os valores das propriedades térmicas de calor específico, condutividade e difusividade térmica foram determinados através da medida da temperatura em um intervalo de tempo, e com estes valores avaliou-se a influência do teor de adição e massa específica na variação dessas propriedades.

A Tabela 2 contém um resumo de como se procedeu à realização dos ensaios, mostrando os traços e teores de substituição utilizados para cada temperatura. Ao total foram realizados 120 ensaios térmicos.

Tabela 2: Variáveis estudadas

<i>Temperatura</i>	<i>Traço</i>	<i>Teor de substituição</i>				
0° C	6,52	0%	10%	20%	30%	40%
	5,375	0%	10%	20%	30%	40%
25° C	6,52	0%	10%	20%	30%	40%
	5,375	0%	10%	20%	30%	40%
50° C	6,52	0%	10%	20%	30%	40%
	5,375	0%	10%	20%	30%	40%

3.3 Materiais Utilizados

3.3.1 Cimento

O cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. O cimento consumido nesta pesquisa foi o da marca CAUÊ CP-II F32. No Quadro 2, se encontra a caracterização do cimento utilizado.

Finura na # 200	2,13 %
Massa específica	2,956 g/cm ³
Massa unitária solta	2,110 kg/dm ³
Finura Blaine	345 m ² /kg
Resistência à compressão axial	32,1 MPa

Quadro 2 – Caracterização do cimento Portland CP II F-32

3.3.2 Areia

Considerada como material de construção, areia é o agregado miúdo. Os diâmetros limites adotados para classificar um agregado como areia varia conforme o ponto de vista em que se encara a questão. A areia utilizada é proveniente do município de Santa Maria, RS.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de granulometria da areia.

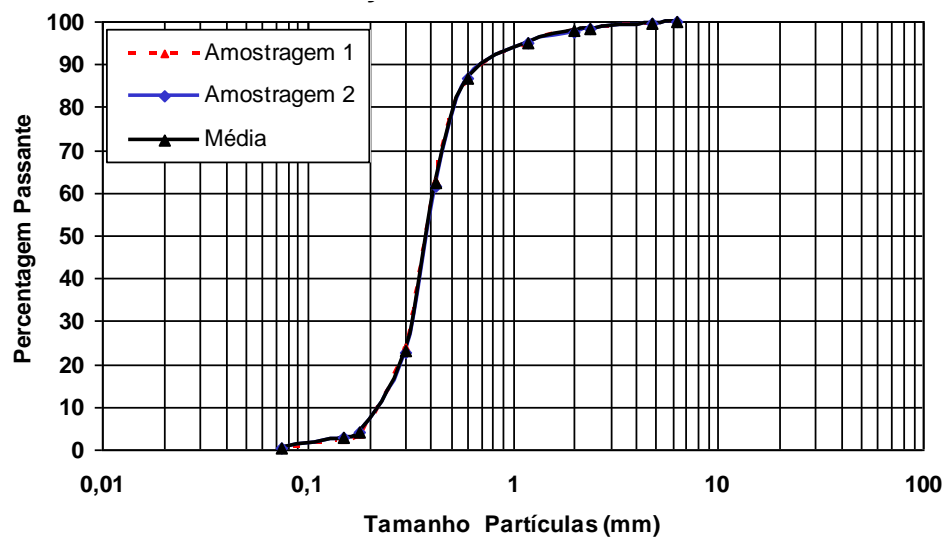


Figura 7: Distribuição granulométrica da areia

O Quadro 3 apresenta outras características da areia utilizada.

Massa específica	2,594 g/cm ³
Massa unitária solta	1,609 kg/dm ³
Diâmetro máximo	1,2 mm
Módulo de finura	1,57

Quadro 3 – Caracterização da areia utilizada

3.3.3 Brita

A pedra britada é o agregado obtido a partir de rochas compactas que ocorrem em depósitos geológicos, pelo processo industrial *cominuição*, ou fragmentação controlada da rocha maciça. A pedra brita consumida na pesquisa é de pedreiras da região de Ijuí, RS.

No Quadro 4, a caracterização da pedra brita consumida na pesquisa.

Massa específica	2,940g/cm ³
Massa unitária solta	1,554 kg/dm ³
Diâmetro máximo	19 mm
Módulo de finura	6,76
Absorção	1,16 %

Quadro 4 – Caracterização da brita utilizada

3.3.4 Água

A água utilizada é proveniente da rede hidráulica do Laboratório de Engenharia Civil da Unijuí.

3.3.5 Borracha

As raspas de borracha são provenientes de recapadoras da cidade de Ijuí. Para uma caracterização do perfil granulométrico dessas raspas foi realizado o ensaio de granulometria, (Figura 8) onde pode ser observado qual o melhor tamanho de borracha a ser utilizado nas moldagens.

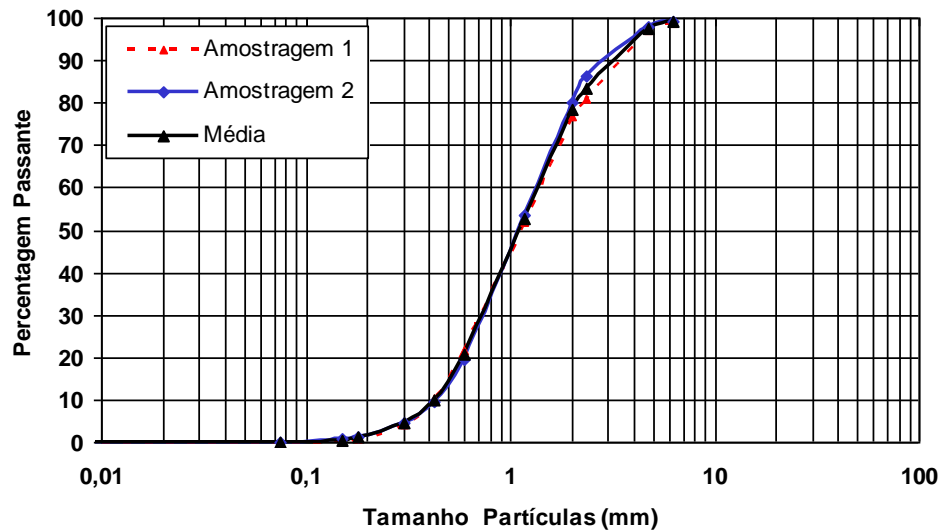


Figura 8: Distribuição granulométrica da borracha

Para a realização da pesquisa decidiu-se por adotar a substituição volumétrica do agregado miúdo (areia) pela escória de borracha (SPECHT, 2004). A escória de borracha foi peneirada e empregado o material passante na peneira #10 (<2mm), garantindo assim que os perfis granulométricos se assemelhassem.

3.3.6 Concreto

Para a moldagem dos CP's utilizou-se dois traços de concreto 1:5,37 e 1:6,5, como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3.

O traço 1:6,52, é melhor explicado na Tabela 3, onde mostra a quantidade de cada material utilizado na moldagem dos corpos-de-prova. O fator a/c inicial deste traço é de 0,61 podendo variar para a obtenção do *Slump Test* de 8 ± 1 cm.

Já o traço 1:5,375 está exemplificado na Tabela 4, tendo como fator a/c inicial 0,70, este também variando devido ao *Slump Test* de 8 ± 1 cm.

As tabelas mostram ainda que a quantidade de areia em kg diminuída em cada traço não corresponde à mesma quantidade de borracha acrescentada, pois a substituição de um material por outro é volumétrica.

Tabela 3: Traço 1-6,52 para moldagem em concreto

Traço 1-6,52							
<i>Substituição</i>	<i>Traço</i>	<i>0%(Kg)</i>	<i>10%(Kg)</i>	<i>20%(Kg)</i>	<i>30%(Kg)</i>	<i>40%(Kg)</i>	<i>Qtidade Total (Kg)</i>
Cimento	1	6,015	6,015	6,015	6,015	6,015	30,075
Areia	2,89	17,38	15,63	13,91	12,16	10,44	69,52
Brita	3,63	21,83	21,83	21,83	21,83	21,83	109,15
R. Borracha		0	0,77	1,53	2,3	3,06	7,66

Tabela 4: Traço 1-5,375 para moldagem em concreto

Traço 1-5,375							
<i>Substituição</i>		<i>0%(Kg)</i>	<i>10%(Kg)</i>	<i>20%(Kg)</i>	<i>30%(Kg)</i>	<i>40%(Kg)</i>	<i>Qtidade Total (Kg)</i>
Cimento	1	7,09	7,09	7,09	7,09	7,09	35,45
Areia	2,25	15,95	14,36	12,75	11,16	9,58	63,8
Brita	3,485	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	123,55
R. Borracha		0	0,7	1,41	2,11	2,81	7,03

Nas tabelas 5 e 6 vemos a quantidade de agregados e a quantidade de borracha usada em relação a 1 m³ de concreto, utilizando os mesmos traços de concretos acima descritos.

Tabela 5: Quantidade de agregados para 1 m³ de concreto no traço 1 - 6,52

Traço 1-6,52						
<i>Substituição</i>	<i>m³ concreto(kg)</i>	<i>0%(Kg)</i>	<i>10%(Kg)</i>	<i>20%(Kg)</i>	<i>30%(Kg)</i>	<i>40%(Kg)</i>
Agregado	1924,73	1924,73	1839,43	1754,1	1668,79	1583,49
R. Borracha		0	37,62	75,25	112,87	150,49

Tabela 6: Quantidade de agregados para 1 m³ de concreto no traço 1 - 5,37

Traço 1-5,37						
<i>Substituição</i>	<i>m³ concreto(kg)</i>	<i>0%(Kg)</i>	<i>10%(Kg)</i>	<i>20%(Kg)</i>	<i>30%(Kg)</i>	<i>40%(Kg)</i>
Agregado	1851,24	1851,24	1778,61	1705,98	1633,36	1560,74
R. Borracha		0	32,03	64,06	96,09	128,12

3.4 Procedimentos Laboratoriais

Moldaram-se 4 corpos-de-prova em concreto nas dimensões de 10 x 20 cm, para cada teor de adição de borracha, totalizando 40 corpos-de-prova. A moldagem seguiu os parâmetros da NBR-5738. E com a realização do *Slump Test* (abatimento de cone) durante estas, mediu-se a trabalhabilidade do concreto, definido-a em 8 ± 1 cm. A moldagem foi realizada nos Laboratórios de Engenharia Civil da UNIJUÍ.

Na realização da determinação das propriedades térmicas do concreto com borracha, a parte experimental da pesquisa realizou-se no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática da Unijuí, onde fez-se o aquecimento e monitoramento das temperaturas em função do tempo.

Para a execução destes ensaios, os CP's foram cortados ficando com um tamanho de 10 cm de altura x 10 cm de largura. Os ensaios realizaram-se com três diferentes temperaturas 0° , 25° e 50° C, simulando condições climáticas extremas de nossa região. Fez-se dois furos nas amostras: um no centro, onde inseriu-se uma resistência para o aquecimento, furo a 1 cm do centro, onde inseriu-se um termopar para a coleta de temperatura como mostra a Figura 9 (a). O espaço em aberto nos furos, depois de inserido o termopar, foi preenchido com sobra do próprio material. A disposição da fonte de calor e dos termopares (T1, T2, T3 E T4) podem ser visualizados na Figura 9(b) e na Figura 10 como foi feito nos ensaios.

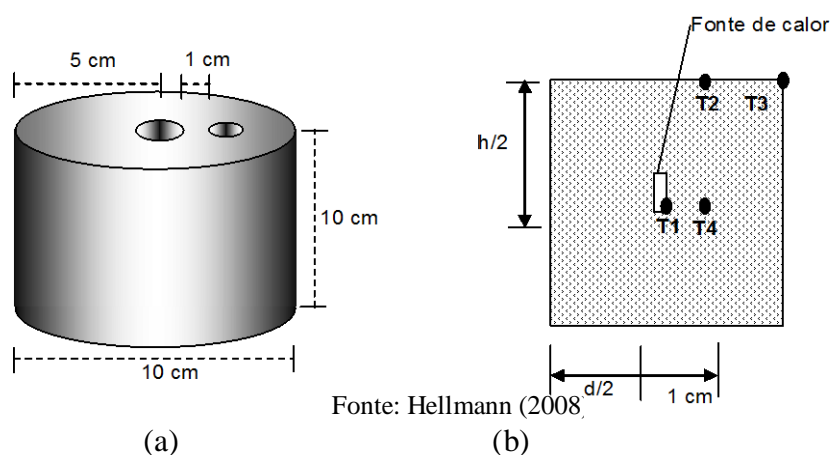


Figura 9: Esquema ilustrativo dos corpos-de-prova
 (a) estrutura das amostras
 (b) distribuição dos termopares e fonte de calor

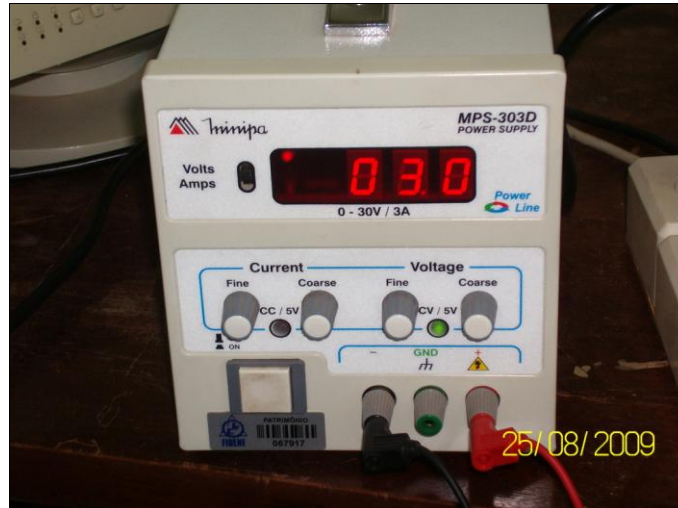
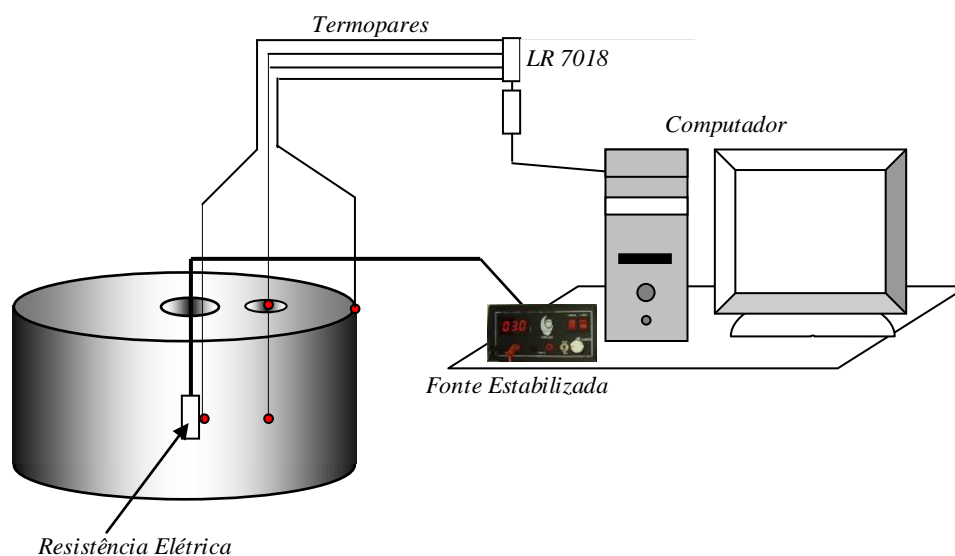


Figura 11: Fonte Estabilizada

Para a calibração dos termopares foi utilizado um termômetro calibrado pelo Laboratório da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC - RS).

A Figura 12 ilustra a montagem do equipamento utilizado para se obter a variação da temperatura em função do tempo. A resistência elétrica foi aquecida pela fonte estabilizada a uma voltagem de 3,0 volts e a aquisição dos dados foi feita eletronicamente pelo sistema termopares-placas A/D e computador, como pode se ver na Figura 13.



Fonte: Hellmann (2008)

Figura 12: Esquema ilustrativo da montagem dos equipamentos



Figura 13: Sistemas de termopares instrumentado em CP.

3.5 Análise dos Dados

Os dados obtidos com os ensaios realizados foram analisados através de procedimentos exclusivamente experimentais de Hellmann (2008), os valores das propriedades térmicas são determinados através da medida da temperatura em um intervalo de tempo. A massa e o calor específicos foram determinados diretamente a partir de suas definições. A condutividade térmica foi calculada através de um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990) e a difusividade térmica pelo método do Problema Inverso.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, são apresentados os resultados obtidos com os experimentos para os cálculos das propriedades térmicas de Calor Específico (C_p), Condutividade Térmica (k) e Difusividade Térmica (α) dos corpos-de-prova estudados.

Para a análise dos resultados utilizaram-se, além de interpretação dos dados tabulados e dos gráficos, técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada uma das variáveis controláveis nas variáveis de resposta, sendo que o nível de significância para as análises foi de 0,05, ou seja, ao se aceitar as hipóteses de que há influências significativas entre um fator controlável e a variável resposta, há, no máximo, uma probabilidade de 0,5% desta hipótese não ser verdadeira.

4.1. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico foi determinado diretamente a partir de sua definição, através da utilização de programas no MATLAB 7.1 (Anexo I).

Os resultados do calor específico são referentes às amostras de concreto convencional (0 % de adição de borracha) e de concretos com adição de borracha nos teores de 10, 20, 30 e 40%, em três diferentes temperaturas.

Nas Tabelas 7, 8, 9, 10, 11 e 12 são apresentados os resultados do calor específico obtidos para cada uma das amostras de concreto com borracha, conforme seu traço e sua temperatura de ensaio.

Tabela 7: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 0°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
602	0	2415,22	0,4272	547,870
603	0	2441,34	0,4326	785,230
604	0	2413,35	0,4390	717,030
605	0	2432,28	0,4333	715,260
640	10	2175,55	0,4877	493,671
641	10	2235,29	0,4492	985,980
642	10	2228,06	0,5117	616,940
650	10	2126,59	0,5066	1015,820
651	20	2151,11	0,4100	828,890
652	20	2203,08	0,4443	778,200
653	20	2142,25	0,4444	617,770
654	20	2122,83	0,5016	1032,440
718	30	2030,21	0,4848	839,503
719	30	1997,88	0,4517	811,104
720	30	1972,90	0,4117	1168,090
721	30	2082,80	0,1851	885,370
814	40	1920,21	0,4049	894,250
815	40	1950,32	0,1552	1200,010
816	40	1912,27	0,4332	853,410
817	40	1935,65	0,4052	793,170

Tabela 8: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 0°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
802	0	2517,39	0,440	471,140
803	0	2500,71	0,463	641,250
804	0	2526,67	0,471	546,200
805	0	2483,28	0,455	726,360
840	10	2420,05	0,537	802,947
841	10	2334,79	0,441	824,720
842	10	2389,74	0,441	670,910
843	10	2422,68	0,155	668,357
828	20	2299,47	0,139	713,746
829	20	2305,44	0,330	1031,458
830	20	2324,89	0,289	976,827
831	20	2349,68	0,396	1245,099
852	30	2288,44	0,334	1003,940
853	30	2244,57	0,394	1328,458
856	30	2237,35	0,227	883,518
857	30	2214,05	0,265	703,658
868	40	2092,50	0,027	601,736
869	40	2098,71	0,349	925,250
870	40	2097,64	0,287	931,240
871	40	2030,03	0,215	935,818

Tabela 9: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 25°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
602	0	2415,22	0,1076	523,66
603	0	2441,34	0,3940	1281,41
604	0	2413,35	0,4513	1103,98
605	0	2432,28	0,4064	1402,47
640	10	2175,55	0,4012	576,56
641	10	2235,29	0,4613	840,22
642	10	2228,06	0,4322	712,64
650	10	2126,59	0,4211	1888,48
651	20	2151,11	0,4469	1064,47
652	20	2203,08	0,4152	1336,59
653	20	2142,25	0,3976	687,47
654	20	2122,83	0,4320	677,83
718	30	2030,21	0,4546	621,38
719	30	1997,88	0,4339	579,82
720	30	1972,90	0,3988	1197,67
721	30	2082,80	0,4402	1250,63
814	40	1920,21	0,3970	1068,32
815	40	1950,32	0,5059	510,66
816	40	1912,27	0,3022	443,65
817	40	1935,65	0,0862	860,95

Tabela 10: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 25°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
802	0	2517,39	0,500	569,82
803	0	2500,71	0,427	401,04
804	0	2526,67	0,604	600,93
805	0	2483,28	0,439	589,69
840	10	2420,05	0,431	2255,50
841	10	2334,79	0,439	473,77
842	10	2389,74	0,412	1266,02
843	10	2422,68	0,448	475,89
828	20	2299,47	0,382	603,91
829	20	2305,44	0,402	1698,34
830	20	2324,89	0,420	1062,93
831	20	2349,68	0,599	870,68
852	30	2288,44	0,441	822,02
853	30	2244,57	0,505	1954,38
856	30	2237,35	0,335	1041,64
857	30	2214,05	0,414	710,76
868	40	2092,50	0,342	436,70
869	40	2098,71	0,068	672,95
870	40	2097,64	0,366	750,22
871	40	2030,03	0,467	950,97

Tabela 11: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 50°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
602	0	2415,22	0,4425	703,13
603	0	2441,34	0,1312	420,42
604	0	2413,35	0,0876	475,95
605	0	2432,28	0,4047	377,11
640	10	2175,55	0,3791	880,71
641	10	2235,29	0,4633	1010,21
642	10	2228,06	0,2754	417,18
650	10	2126,59	0,3606	728,88
651	20	2151,11	0,1831	541,15
652	20	2203,08	0,3918	665,14
653	20	2142,25	0,3738	439,02
654	20	2122,83	0,2514	806,14
718	30	2030,21	0,4281	386,73
719	30	1997,88	0,2698	416,29
720	30	1972,90	0,3700	528,59
721	30	2082,80	0,4360	744,65
814	40	1920,21	0,3046	428,86
815	40	1950,32	0,2707	679,32
816	40	1912,27	0,3377	502,51
817	40	1935,65	0,4938	969,77

Tabela 12: Resultados do Calor Específico para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 50°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Calor Específico (Jkg⁻¹°C⁻¹)</i>
802	0	2517,39	0,184	323,55
803	0	2500,71	0,351	463,64
804	0	2526,67	0,017	529,96
805	0	2483,28	0,281	300,81
840	10	2420,05	0,510	674,89
841	10	2334,79	0,435	1206,52
842	10	2389,74	0,856	489,54
843	10	2422,68	0,223	538,62
828	20	2299,47	0,152	542,47
829	20	2305,44	0,515	779,54
830	20	2324,89	0,407	652,78
831	20	2349,68	0,509	460,72
852	30	2288,44	0,392	384,91
853	30	2244,57	0,440	640,35
856	30	2237,35	0,132	464,99
857	30	2214,05	0,550	1124,28
868	40	2092,50	0,411	496,53
869	40	2098,71	0,411	369,68
870	40	2097,64	0,509	620,83
871	40	2030,03	0,307	525,55

A Figura 14 gerada pelo MATLAB mostra o ajuste de curva e os pontos onde foram coletados os dados experimentais de temperatura em função do tempo (1000 segundos).

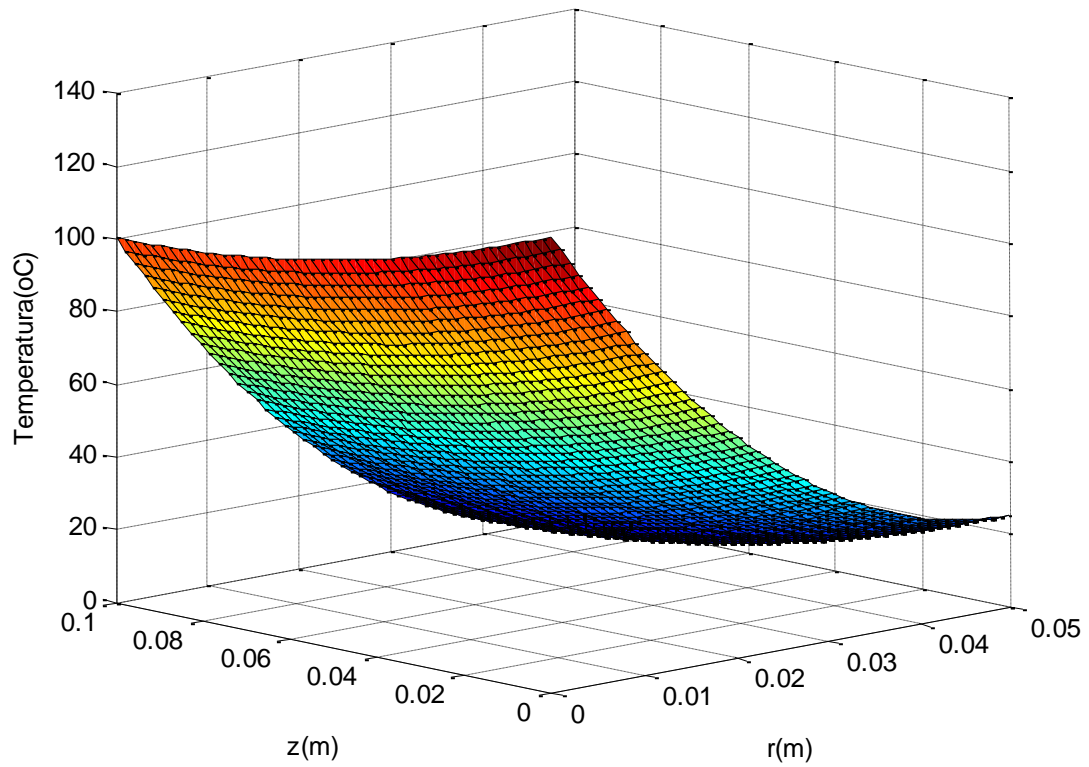


Figura 14: Domínio de integração e os pontos da coleta das temperaturas para a temperatura de 0°C.

As Figuras 15 e 16 apresentam o calor específico em relação aos teores de adição de borracha.

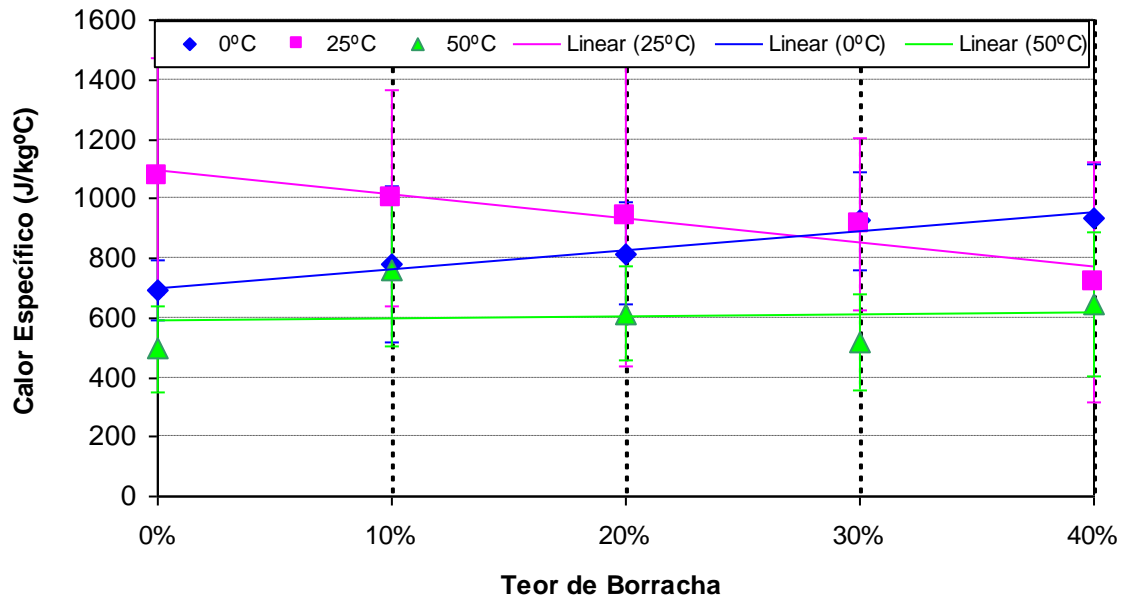


Figura 15: Relação do calor específico do traço 1-6,5 em função da variação do teor de borracha

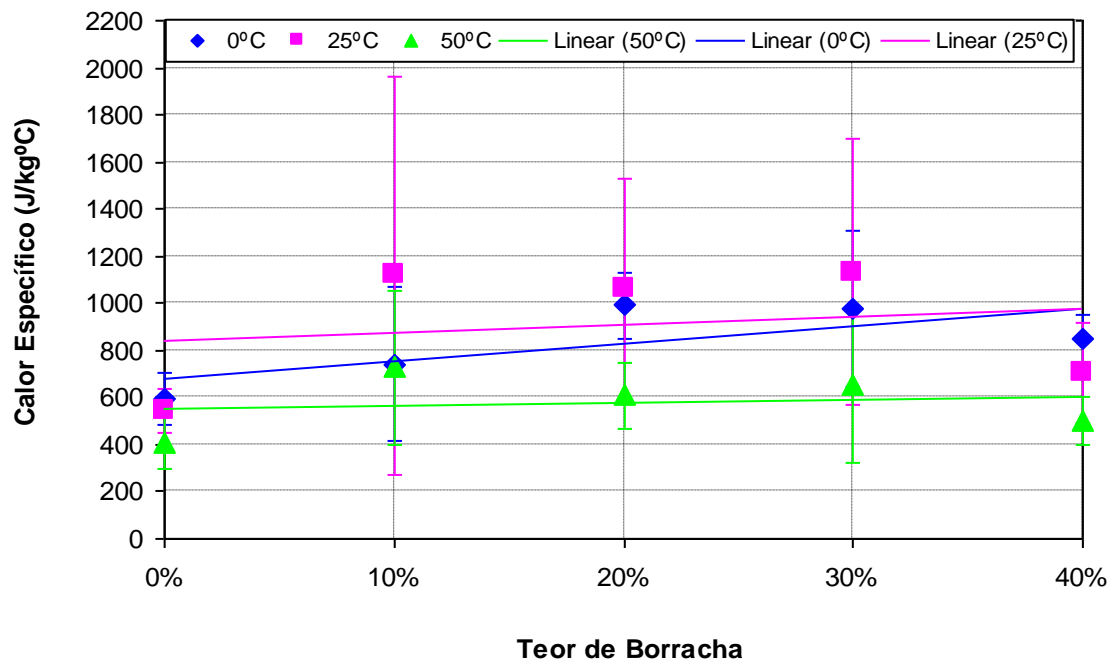


Figura 16: Relação do calor específico do traço 1-5,37 em função da variação do teor de borracha

Observa-se nos gráficos que as misturas contendo adição de borracha possuem um comportamento diferenciado do concreto convencional, isto pode estar associado a natureza das medidas realizadas que podem levar a discrepâncias de valores, conforme demonstrado pelas barras de erro incorporadas às Figuras ou ao fato que o calor específico da borracha pode implicar em mudanças nas propriedades térmicas do material.

Contemplando os dados obtidos pelos gráficos deduziu-se no traço 1-6,5, para a temperatura de 0°C encontra-se um aumento do calor específico na ordem de 35,27% no teor de adição de borracha 40%. Para a temperatura de 25°C, o maior valor *para Cp* encontrado corresponde a 0% de adição de borracha. Aos 50°C, este valor é de 53,64% pra 10% de adição.

Para o traço 1-5,37 o aumento de calor específico é de 66,33% com o teor de 20% de adição de borracha, para a temperatura de 0°C. Aos 25°C este valor vai para 209,52% com 10% de adição de borracha. Para 50°C o valor fica em torno de 61,59% para 30% de adição.

A partir dos dados aferidos foi realizada uma análise estatística, utilizando o *software* StatSoft Statistica (versão 8 MR-3), para indicar a influência das variáveis independentes na variável de resposta (variável dependente).

Ao analisarmos os resultados apurados pela análise estatística para o calor específico em função do teor de borracha (TB), teor de cimento (TC), fator a/c (a/c), Slump Test e temperatura (TEMP), encontrou-se a seguinte equação para o calor específico:

$$C_p = 2828,35 - 2446,76 a/c - 4,75 TEMP \quad (1)$$

para um R² ajustado de 0,1385 e um erro padrão de estimativa de 929,19.

Com base na equação 1, pode-se afirmar que os fatores que mais influenciam na variável dependente são a temperatura e o fator a/c.

Focalizando essa análise estatística para o *Cp* com relação às diferentes temperaturas, para a temperatura de 0°C descobre-se a seguinte equação:

$$C_p = 2292,98 + 6,87 TB \quad (2)$$

com um R^2 ajustado de 0,2427 e um erro padrão de estimativa de 906,51.

Para a temperatura de 25°C, tem-se a equação:

$$C_p = 2292,98 - 60,59 a/c \quad (3)$$

com um R^2 ajustado de 0,6713 e um erro padrão de estimativa de 2224,44.

E para a temperatura de 50°C, encontra-se a equação:

$$C_p = 2292,98 \quad (4)$$

com um R^2 ajustado de 0,2323 e um erro padrão de estimativa de 213,12.

Então observa-se que para a temperatura de 0° C (equação 2), a variável independente que mais se destaca é o teor de borracha, para a temperatura de 25°C (equação 3) quem se sobressai é o fator a/c e para a temperatura de 50°C (equação 4) não há variável que se destaque.

O erro de medida no cálculo do calor específico é significativo, pois ao calcular o ΔT usamos o ajuste de parâmetros de uma superfície, que geralmente apresenta baixo coeficiente de correlação (R^2).

A influência do teor de borracha (ao menos para os teores estudados) no C_p pode ser considerada mínima e portanto negligenciável, para os objetivos da engenharia.

4.2. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Para a realização dos cálculos da condutividade térmica utilizou-se um algoritmo proposto por Shiozawa e Campbell (1990), através da utilização de programa no MATLAB 7.1 (Anexo II).

Os resultados da condutividade térmica são referentes a amostras de concreto convencional (0 % de adição de borracha) e de concretos com adição de borracha nos teores de 10, 20, 30 e 40%, em três diferentes temperaturas: 0°, 25° e 50°C.

Nas Tabelas 13, 14, 15, 16, 17 e 18 são apresentados os resultados da condutividade obtidos para cada umas das amostras de concreto com borracha, conforme seu traço e sua temperatura de ensaio.

Tabela 13: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 0°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹ °C⁻¹)</i>
602	0	2415,22	0,9000	3,5624
603	0	2441,34	0,8970	5,0111
604	0	2413,35	0,9049	4,6484
605	0	2432,28	0,9017	4,5340
640	10	2175,55	0,9830	5,6430
641	10	2235,29	0,9399	8,3255
642	10	2228,06	0,9820	5,7531
650	10	2126,59	0,9510	6,2920
651	20	2151,11	0,9148	5,7096
652	20	2203,08	0,9342	5,5731
653	20	2142,25	0,9110	3,7509
654	20	2122,83	0,9652	6,3571
718	30	2030,21	0,9948	8,6217
719	30	1997,88	0,9316	4,4670
720	30	1972,90	0,9454	6,0479
721	30	2082,80	0,9590	5,4430
814	40	1920,21	0,9282	5,0244
815	40	1950,32	0,9822	7,4422
816	40	1912,27	0,9327	4,5534
817	40	1935,65	0,9274	4,3172

Tabela 14: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 0°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
802	0	2517,39	0,9268	7,0105
803	0	2500,71	0,9313	5,0278
804	0	2526,67	0,9508	5,6515
805	0	2483,28	0,9313	5,4649
840	10	2420,05	0,9273	9,2946
841	10	2334,79	0,9305	5,6894
842	10	2389,74	0,9119	6,2408
843	10	2422,68	0,9511	5,3231
828	20	2299,47	0,9274	4,3304
829	20	2305,44	0,9225	5,8742
830	20	2324,89	0,9329	6,1196
831	20	2349,68	0,9271	7,0694
852	30	2288,44	0,9528	5,9884
853	30	2244,57	0,9307	7,5443
856	30	2237,35	0,9191	5,0092
857	30	2214,05	0,9820	6,9999
868	40	2092,50	0,9304	3,9075
869	40	2098,71	0,9479	6,1253
870	40	2097,64	0,9159	5,5605
871	40	2030,03	0,9171	4,9747

Tabela 15: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 25°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
602	0	2415,22	0,902	1,9546
603	0	2441,34	0,900	2,6656
604	0	2413,35	0,899	2,9636
605	0	2432,28	0,896	2,5484
640	10	2175,55	0,898	1,9722
641	10	2235,29	0,897	2,1594
642	10	2228,06	0,906	2,5043
650	10	2126,59	0,891	2,7291
651	20	2151,11	0,894	2,3509
652	20	2203,08	0,886	2,4375
653	20	2142,25	0,915	2,3029
654	20	2122,83	0,908	2,2441
718	30	2030,21	0,918	2,1036
719	30	1997,88	0,913	1,8689
720	30	1972,90	0,885	2,5600
721	30	2082,80	0,884	2,4136
814	40	1920,21	0,894	2,2416
815	40	1950,32	0,935	2,1205
816	40	1912,27	0,938	2,2146
817	40	1935,65	0,910	2,4833

Tabela 16: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 25°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
802	0	2517,39	0,9468	2,8646
803	0	2500,71	0,9108	2,1656
804	0	2526,67	0,9388	2,5039
805	0	2483,28	0,8938	2,1434
840	10	2420,05	0,8821	2,7640
841	10	2334,79	0,8941	1,8760
842	10	2389,74	0,8823	2,4380
843	10	2422,68	0,9193	2,2513
828	20	2299,47	0,9226	2,5933
829	20	2305,44	0,9474	2,7067
830	20	2324,89	0,8864	2,5663
831	20	2349,68	0,9348	2,6996
852	30	2288,44	0,9195	2,5565
853	30	2244,57	0,9024	2,9239
856	30	2237,35	0,9251	2,8364
857	30	2214,05	0,9147	2,2408
868	40	2092,50	0,9467	2,4776
869	40	2098,71	0,9158	2,4451
870	40	2097,64	0,9463	2,5505
871	40	2030,03	0,9095	2,6850

Tabela 17: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 50°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
602	0	2415,22	0,8712	1,4610
603	0	2441,34	0,8953	1,4319
604	0	2413,35	0,8995	1,4599
605	0	2432,28	0,895	1,2998
640	10	2175,55	0,8655	1,4472
641	10	2235,29	0,8843	1,6574
642	10	2228,06	0,8948	1,3328
650	10	2126,59	0,9009	1,4633
651	20	2151,11	0,8991	1,4753
652	20	2203,08	0,8723	1,4179
653	20	2142,25	0,8938	1,3729
654	20	2122,83	0,8743	1,4852
718	30	2030,21	0,9028	1,2889
719	30	1997,88	0,8963	1,4356
720	30	1972,90	0,8904	1,3073
721	30	2082,80	0,8766	1,4172
814	40	1920,21	0,8988	1,2224
815	40	1950,32	0,8964	1,5074
816	40	1912,27	0,8924	1,2471
817	40	1935,65	0,9153	1,5269

Tabela 18: Resultados da Condutividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 50°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Condutividade Térmica (Wm⁻¹ °C⁻¹)</i>
802	0	2517,39	0,8915	1,4644
803	0	2500,71	0,8771	1,4727
804	0	2526,67	0,8924	1,5054
805	0	2483,28	0,8905	1,3900
840	10	2420,05	0,8722	1,4414
841	10	2334,79	0,8697	1,5198
842	10	2389,74	0,8991	1,5539
843	10	2422,68	0,8904	1,4790
828	20	2299,47	0,8971	1,4289
829	20	2305,44	0,8731	1,4816
830	20	2324,89	0,8911	1,4833
831	20	2349,68	0,9008	1,4039
852	30	2288,44	0,9063	1,4525
853	30	2244,57	0,8795	1,3045
856	30	2237,35	0,8827	1,4308
857	30	2214,05	0,8800	1,5150
868	40	2092,50	0,8796	1,2714
869	40	2098,71	0,8900	1,1979
870	40	2097,64	0,8865	1,3210
871	40	2030,03	0,9057	1,4477

As Figuras 17 e 18 apresentam a condutividade térmica em relação aos teores de adição de borracha.

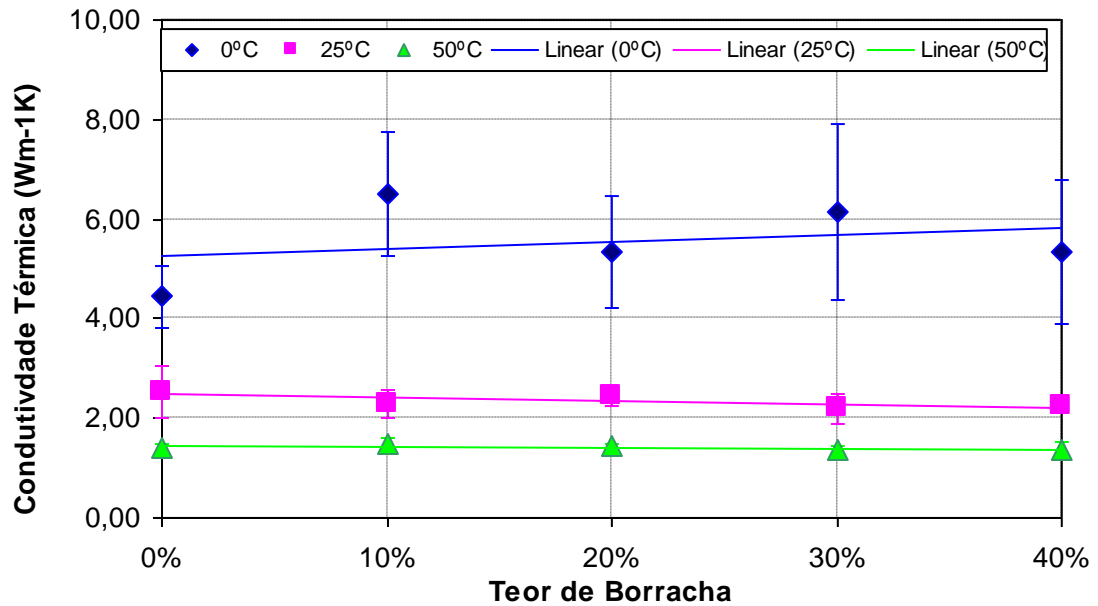


Figura 17: Relação entre a condutividade térmica do traço 1-6,5 e a variação do teor de borracha

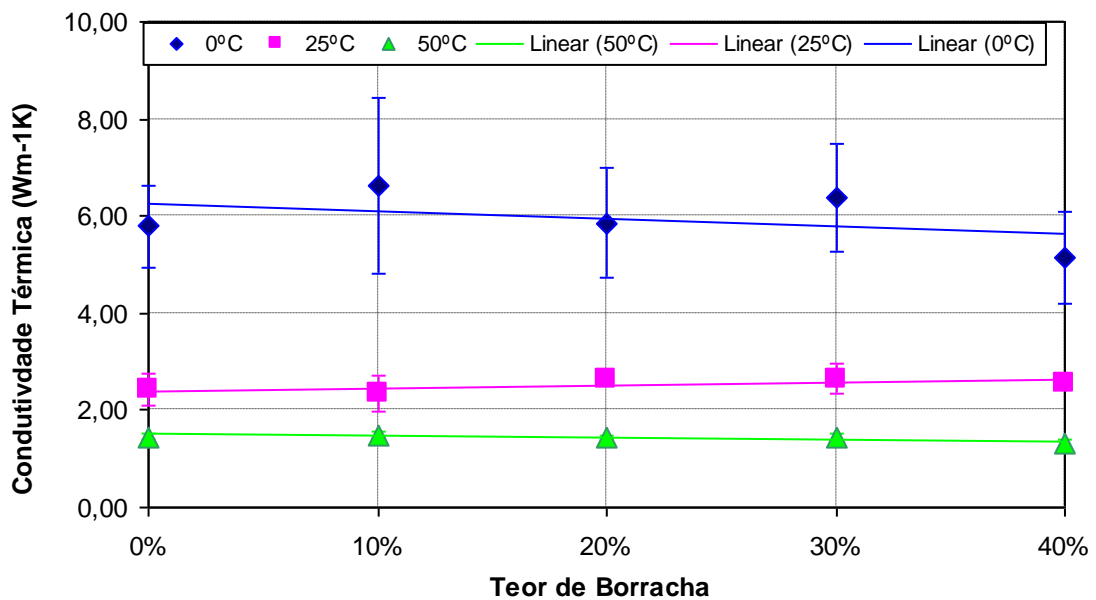


Figura 18: Relação entre a condutividade térmica do traço 1-5,37 e a variação do teor de borracha

Com relação aos gráficos pode-se perceber que as amostras, apresentam comportamento semelhante, para as 3 temperaturas estudadas e para os 5 teores de adição de borracha.

Contemplando os dados obtidos pelos gráficos deduziu-se no traço 1-6,5, para a temperatura de 0°C encontra-se um aumento da condutividade térmica na ordem de 46,39% no teor de adição de borracha 10%. Para a temperatura de 25°C, o maior valor para k encontrado corresponde a 0% de adição de borracha. Aos 50°C, este valor é de 4,96% pra 10% de adição.

Para o traço 1-5,37 o aumento da condutividade térmica é de 15,54% com o teor de 10% de adição de borracha, para a temperatura de 0°C. Aos 25°C este valor vai para 9 % com 20% de adição de borracha. Para 50°C o valor fica em torno de 2,74% para 10% de adição.

Isso demonstra que para a condutividade independente do traço escolhido, o maior valor geralmente será encontrado com 10% de adição de borracha.

Ao analisarmos os resultados apurados pela análise estatística para a condutividade térmica em função do teor de borracha (TB), teor de cimento (TC), fator a/c (a/c), Slump Test e temperatura (TEMP), obteve-se a seguinte equação para condutividade:

$$k = 3,8292 - 0,0867 TEMP \quad (5)$$

para um R^2 ajustado de 0,1385 e um erro padrão de estimativa de 929,19.

Com base nessa equação 5, pode-se afirmar que o fator que mais influencia na variável dependente é a variação da temperatura.

Focalizando essa análise estatística para o k em relação às diferentes temperaturas, para a temperatura de 0°C descobre-se a seguinte equação:

$$k = -0,6437 \quad (6)$$

com um R^2 ajustado de 0,0284 e um erro padrão de estimativa de 6,71.

Para a temperatura de 25°C, tem-se a equação:

$$k = 3,9891 \quad (7)$$

com um R^2 ajustado de 0,100 e um erro padrão de estimativa de 0,2702.

E para a temperatura de 50°C, encontra-se a equação:

$$k = 8,0225 - 0,5402 TC - 0,014 TB - 2,9501 a/c \quad (8)$$

com um R^2 ajustado de 0,4610 e um erro padrão de estimativa de 1,7149.

Então percebe-se que para a temperatura de 0° C (equação 6) e 25°C (equação 7) não há variável que se destaque, mas para a temperatura de 50°C (equação 8) quem prevalece são o teor de cimento, teor de borracha e fator a/c , mostrando que para temperaturas altas a matriz de concreto é mais importante devido à interação de suas partículas, do que propriamente o teor de borracha.

4.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Para a realização dos cálculos da difusividade térmica utilizou-se o método do Problema Inverso, através da equação do calor em coordenadas cilíndricas, com a utilização de programa no MATLAB 7.1 (Anexo III).

Os resultados da difusividade térmica são referentes as amostras de concreto convencional (0 % de adição de borracha) e de concretos com adição de borracha nos teores de 10, 20, 30 e 40%, em três diferentes temperaturas: 0°, 25° e 50°C.

Nas Tabelas 19, 20, 21, 22, 23 e 24 são apresentados os resultados da difusividade obtidos para cada uma das amostras de concreto com borracha, conforme seu traço e sua temperatura de ensaio.

Tabela 19: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 0°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Difusividade Térmica (m²/s) x 10⁻⁷</i>
602	0	2415,22	0,6181	3,9999
603	0	2441,34	0,8826	1,0888
604	0	2413,35	0,8931	3,6060
605	0	2432,28	0,9685	1,0888
640	10	2175,55	0,4594	9,9599
641	10	2235,29	0,5448	3,2096
642	10	2228,06	0,9041	3,9999
650	10	2126,59	0,9703	15,1200
651	20	2151,11	0,4986	10,3600
652	20	2203,08	0,9453	22,5600
653	20	2142,25	0,9250	2,6000
654	20	2122,83	0,8456	48,0400
718	30	2030,21	0,8862	4,9200
719	30	1997,88	0,8701	4,4000
720	30	1972,90	0,9468	4,4000
721	30	2082,80	0,8865	15,1600
814	40	1920,21	0,0451	1,9999
815	40	1950,32	0,3457	38,7600
816	40	1912,27	0,9898	1,0000
817	40	1935,65	0,3757	4,3172

Tabela 20: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 0°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Difusividade Térmica (m²/s) x 10⁻⁷</i>
802	0	2517,39	0,8273	1,0888
803	0	2500,71	0,7889	10,0000
804	0	2526,67	0,7481	16,0000
805	0	2483,28	0,7365	10,0000
840	10	2420,05	0,5868	17,7200
841	10	2334,79	0,5678	4,0000
842	10	2389,74	0,5840	4,0000
843	10	2422,68	0,8600	10,0000
828	20	2299,47	0,4978	4,0000
829	20	2305,44	0,8948	4,0000
830	20	2324,89	0,8061	4,0000
831	20	2349,68	0,3287	10,0000
852	30	2288,44	0,9693	10,0000
853	30	2244,57	0,2217	10,0000
856	30	2237,35	0,5394	3,9999
857	30	2214,05	0,9587	16,0000
868	40	2092,50	0,5209	4,0000
869	40	2098,71	0,7682	16,0000
870	40	2097,64	0,7762	3,9999
871	40	2030,03	0,5774	4,0000

Tabela 21: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 25°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Difusividade Térmica (m²/s) x 10⁻⁷</i>
602	0	2415,22	0,9737	1,9600
603	0	2441,34	0,9269	1,4800
604	0	2413,35	0,9383	2,1200
605	0	2432,28	0,9775	1,4800
640	10	2175,55	0,8326	1,0800
641	10	2235,29	0,8486	0,8840
642	10	2228,06	0,8220	3,8240
650	10	2126,59	0,9735	1,0800
651	20	2151,11	0,6425	1,4720
652	20	2203,08	0,6422	1,4720
653	20	2142,25	0,9220	3,6280
654	20	2122,83	0,7256	3,0800
718	30	2030,21	0,8900	5,4400
719	30	1997,88	0,8401	2,9200
720	30	1972,90	0,9159	0,4560
721	30	2082,80	0,8937	0,4560
814	40	1920,21	0,9192	0,4560
815	40	1950,32	0,6414	2,4400
816	40	1912,27	0,8415	5,4400
817	40	1935,65	0,8925	1,8800

Tabela 22: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 25°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Difusividade Térmica (m²/s) x 10⁷</i>
802	0	2517,39	0,7818	8,8560
803	0	2500,71	0,7819	6,4680
804	0	2526,67	0,7176	4,8399
805	0	2483,28	0,4411	1,6920
840	10	2420,05	0,9328	1,0000
841	10	2334,79	0,9492	1,8000
842	10	2389,74	0,9651	1,0000
843	10	2422,68	0,8673	4,8760
828	20	2299,47	0,8294	3,2840
829	20	2305,44	0,9746	1,0000
830	20	2324,89	0,7275	1,4800
831	20	2349,68	0,7274	4,8399
852	30	2288,44	0,9377	4,6800
853	30	2244,57	0,8631	6,4680
856	30	2237,35	0,8591	3,4000
857	30	2214,05	0,9588	1,1600
868	40	2092,50	0,9562	2,1200
869	40	2098,71	0,9579	3,2400
870	40	2097,64	0,8440	7,2640
871	40	2030,03	0,3078	5,6719

Tabela 23: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-6,5 na temperatura de 50°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Difusividade Térmica (m²/s) x 10⁻⁷</i>
602	0	2415,22	0,3750	0,6088
603	0	2441,34	0,9562	0,8084
604	0	2413,35	0,8358	0,6088
605	0	2432,28	0,3492	1,0080
640	10	2175,55	0,9008	0,6089
641	10	2235,29	0,8583	0,4092
642	10	2228,06	0,7464	0,6088
650	10	2126,59	0,8470	1,2076
651	20	2151,11	0,8930	1,0088
652	20	2203,08	0,6430	0,4001
653	20	2142,25	0,8785	0,4001
654	20	2122,83	0,6474	0,4001
718	30	2030,21	0,5272	1,4000
719	30	1997,88	0,9127	2,0006
720	30	1972,90	0,9068	2,0010
721	30	2082,80	0,8931	0,8008
814	40	1920,21	0,3006	0,8000
815	40	1950,32	0,8839	1,6400
816	40	1912,27	0,9694	0,2870
817	40	1935,65	0,8052	0,2280

Tabela 24: Resultados da Difusividade Térmica para as amostras de concreto no traço 1-5,37 na temperatura de 50°C

<i>Número da amostra</i>	<i>Teor de Adição (%)</i>	<i>Massa Específica (kg/m³)</i>	<i>R²</i>	<i>Difusividade Térmica (m²/s) x 10⁷</i>
802	0	2517,39	0,6343	0,7292
803	0	2500,71	0,4451	1,0800
804	0	2526,67	0,8890	0,7209
805	0	2483,28	0,8946	0,7209
840	10	2420,05	0,9889	0,7209
841	10	2334,79	0,9160	0,3610
842	10	2389,74	0,7488	1,0809
843	10	2422,68	0,8829	0,7209
828	20	2299,47	0,6984	1,8001
829	20	2305,44	0,6824	1,6400
830	20	2324,89	0,8580	0,3696
831	20	2349,68	0,8970	2,5270
852	30	2288,44	0,9518	3,2464
853	30	2244,57	0,9710	0,3610
856	30	2237,35	0,9342	0,3610
857	30	2214,05	0,9428	0,7209
868	40	2092,50	0,8068	0,7209
869	40	2098,71	0,4686	0,6004
870	40	2097,64	0,5101	0,6803
871	40	2030,03	0,9735	2,0600

Na Figura 19 têm-se exemplo da temperatura calculada pelo problema direto, para o valor de difusividade térmica estimada pelo problema inverso e os valores de temperatura medidos.

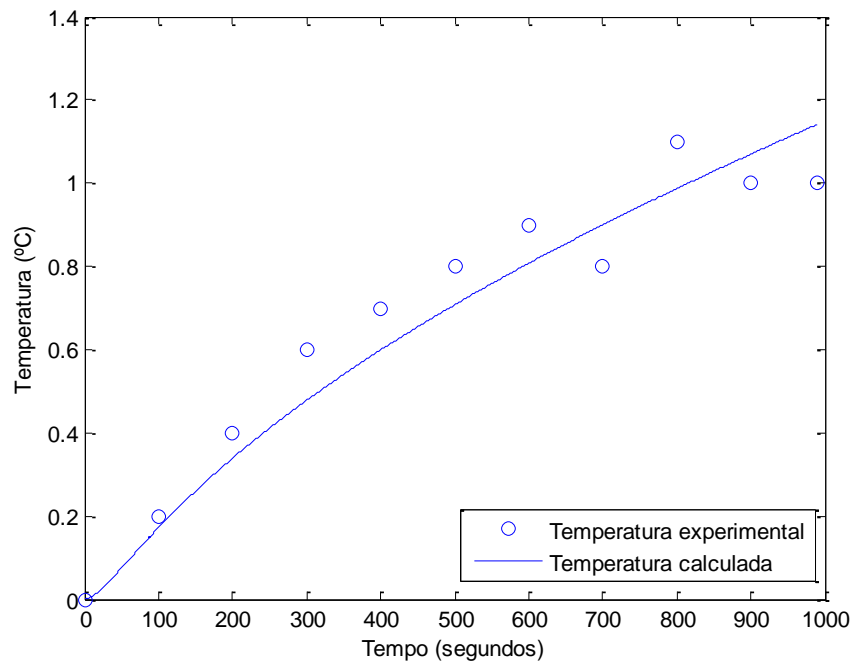


Figura 19: Curvas da temperatura calculada e temperatura experimental em função do tempo

As Figuras 20 e 21 apresentam a difusividade térmica em relação aos teores de adição de borracha.

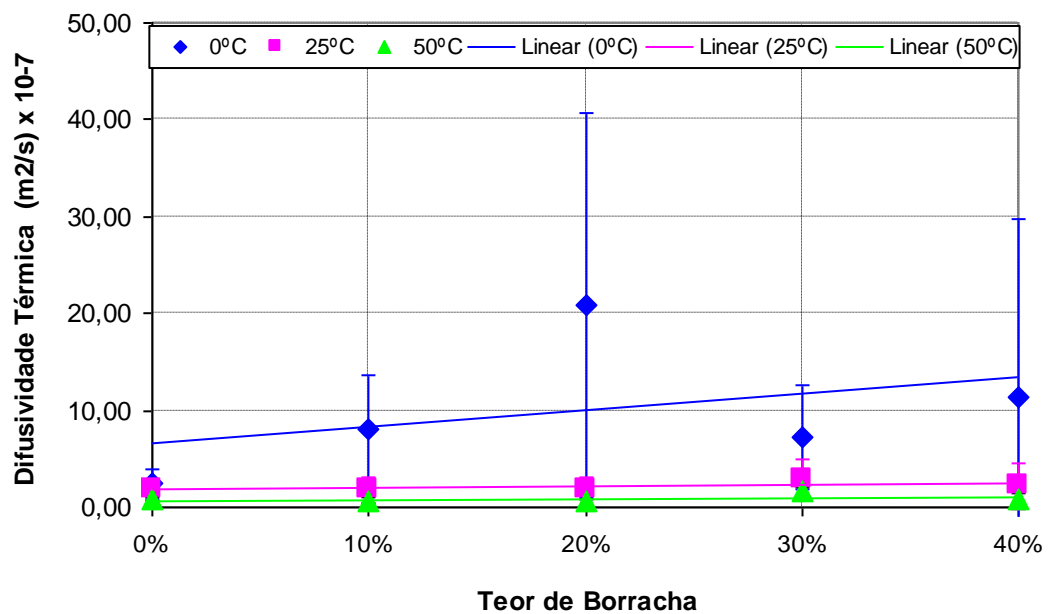


Figura 20: Relação entre a difusividade térmica do traço 1-6,5 e a variação do teor de borracha

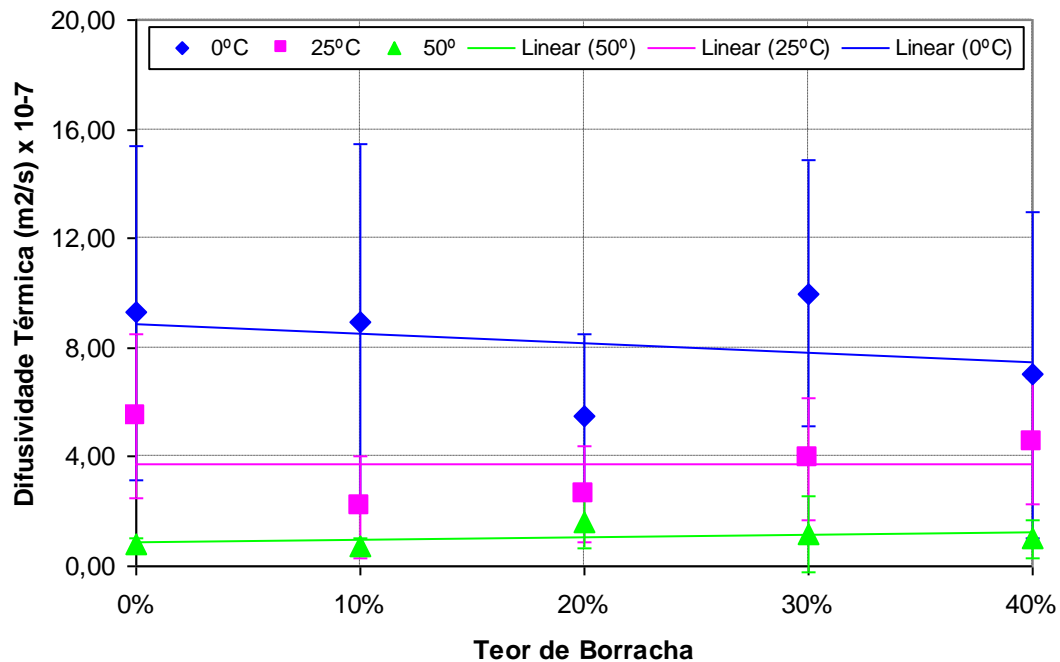


Figura 21: Relação entre a difusividade térmica do traço 1-5,37 e a variação do teor de borracha

Contemplando os dados obtidos pelos gráficos deduziu-se no traço 1-6,5, para a temperatura de 0°C encontra-se um aumento da difusividade térmica na ordem de 852% no teor de adição de borracha 20%. Para a temperatura de 25°C, o maior valor para α encontrado corresponde a 44,88% para o teor de adição de borracha de 40%. Aos 50°C, este valor é de 103,94% pra 30% de adição.

Para o traço 1-5,37 o aumento da difusividade térmica é de 7,87% com o teor de 30% de adição de borracha, para a temperatura de 0°C. Aos 25°C o maior valor para α encontrado corresponde 0% de adição de borracha. Para 50°C o valor fica em torno de 95,06% para 20% de adição.

Por ter sido encontrado para a temperatura de 0°C, um valor totalmente discordante com o restante dos dados aferidos e um desvio padrão igualmente grande supõe-se que possa ter ocorrido neste ponto um problema de ordem experimental na medição da temperatura durante os ensaios ou o problema pode ser com as amostras deste teor de substituição que podem não ser homogêneas, problema este ocasionado durante sua moldagem e cura.

Ao analisarmos os resultados apurados pela análise estatística para a difusividade térmica em função do teor de borracha (TB), teor de cimento (TC), fator a/c (a/c), Slump Test e temperatura (TEMP), obteve-se a seguinte equação para condutividade:

$$\alpha = 10,054 - 0,1623 \text{ TEMP} \quad (9)$$

para um R² ajustado de 0,2318 e um erro padrão de estimativa de 5,8425.

Com base nessa equação 9, pode-se afirmar que o fator que mais influencia na variável dependente é a variação da temperatura.

Focalizando essa análise estatística para o α em relação às diferentes temperaturas, para a temperatura de 0°C descobre-se a seguinte equação:

$$\alpha = 33,7665 \quad (10)$$

com um R² ajustado de - 0,0675 e um erro padrão de estimativa de 10,0145.

E para a temperatura de 25°C, encontra-se a equação:

$$\alpha = -17,5745 + 1,76 \text{ TC} + 19,28 \text{ a/c} \quad (11)$$

com um R² ajustado de 0,2388 e um erro padrão de estimativa de 1,8512.

E para a temperatura de 50°C, encontra-se a equação:

$$\alpha = 1,7979 \quad (12)$$

com um R² ajustado de 0,6891 e um erro padrão de estimativa de 3,5330.

Então observou-se que para a temperatura de 0° C (equação 10) e 50°C (equação 12) não há variável que se destaque, para a temperatura de 25°C (equação 11) quem sobressai é o teor de cimento e o fator a/c, justamente pela interação da matriz de concreto.

4.4. RESUMO DOS RESULTADOS

Nas Tabelas 25, 26 e 27 apresenta-se um resumo dos resultados para as variáveis dependentes e as variáveis independentes

Tabela 25: Resumo dos resultados obtido para o Calor Específico

Temperatura 0°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	$C(Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$	<i>Teor</i>	$C(Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$
0%	691,35	0%	596,24
10%	778,10	10%	741,73
20%	814,33	20%	991,78
30%	926,02	30%	979,89
40%	935,21	40%	848,51
Temperatura 25°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	$C(Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$	<i>Teor</i>	$C(Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$
0%	1077,88	0%	540,37
10%	1004,48	10%	1117,79
20%	941,59	20%	1058,96
30%	912,37	30%	1132,20
40%	720,89	40%	702,71
Temperatura 50°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	$C(Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$	<i>Teor</i>	$C(Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1})$
0%	494,15	0%	110,37
10%	759,24	10%	328,90
20%	612,86	20%	138,34
30%	519,06	30%	331,40
40%	645,12	40%	103,62

Tabela 26: Resumo dos resultados obtido para a Condutividade Térmica

Temperatura 0°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	<i>K (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>	<i>Teor</i>	<i>K (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
0%	4,44	0%	5,79
10%	6,50	10%	6,64
20%	5,35	20%	5,85
30%	6,14	30%	6,39
40%	5,33	40%	5,14
Temperatura 25°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	<i>K (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>	<i>Teor</i>	<i>K (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
0%	2,53	0%	2,42
10%	2,30	10%	2,33
20%	2,46	20%	2,64
30%	2,19	30%	2,64
40%	2,25	40%	2,54
Temperatura 50°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	<i>K (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>	<i>Teor</i>	<i>K (Wm⁻¹°C⁻¹)</i>
0%	1,41	0%	1,46
10%	1,48	10%	1,50
20%	1,44	20%	1,45
30%	1,36	30%	1,43
40%	1,38	40%	1,31

Tabela 27: Resumo dos resultados obtido para a Difusividade Térmica

Temperatura 0°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^{-7}$	<i>Teor</i>	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^{-7}$
0%	2,45	0%	9,27
10%	8,07	10%	8,93
20%	20,89	20%	5,50
30%	7,22	30%	10,00
40%	11,44	40%	7,00
Temperatura 25°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^{-7}$	<i>Teor</i>	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^{-7}$
0%	1,85	0%	5,46
10%	1,82	10%	2,17
20%	1,91	20%	2,65
30%	2,97	30%	3,93
40%	2,20	40%	4,57
Temperatura 50°C			
<i>Traço 1-6,5</i>		<i>Traço 1-5,37</i>	
<i>Teor</i>	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^{-7}$	<i>Teor</i>	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)} \times 10^{-7}$
0%	0,76	0%	0,81
10%	0,71	10%	0,72
20%	0,55	20%	1,58
30%	1,55	30%	1,17
40%	0,74	40%	1,02

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica em relação aos teores de adição de borracha.

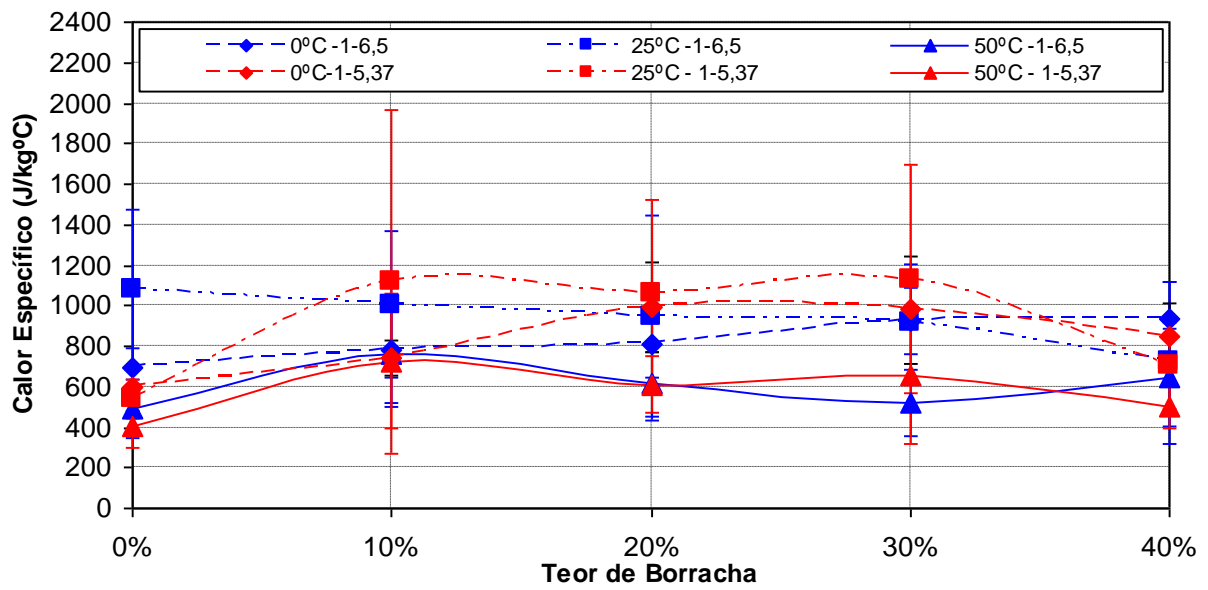


Figura 22: Relação entre o calor específico nas 3 temperaturas e a variação do teor de borracha

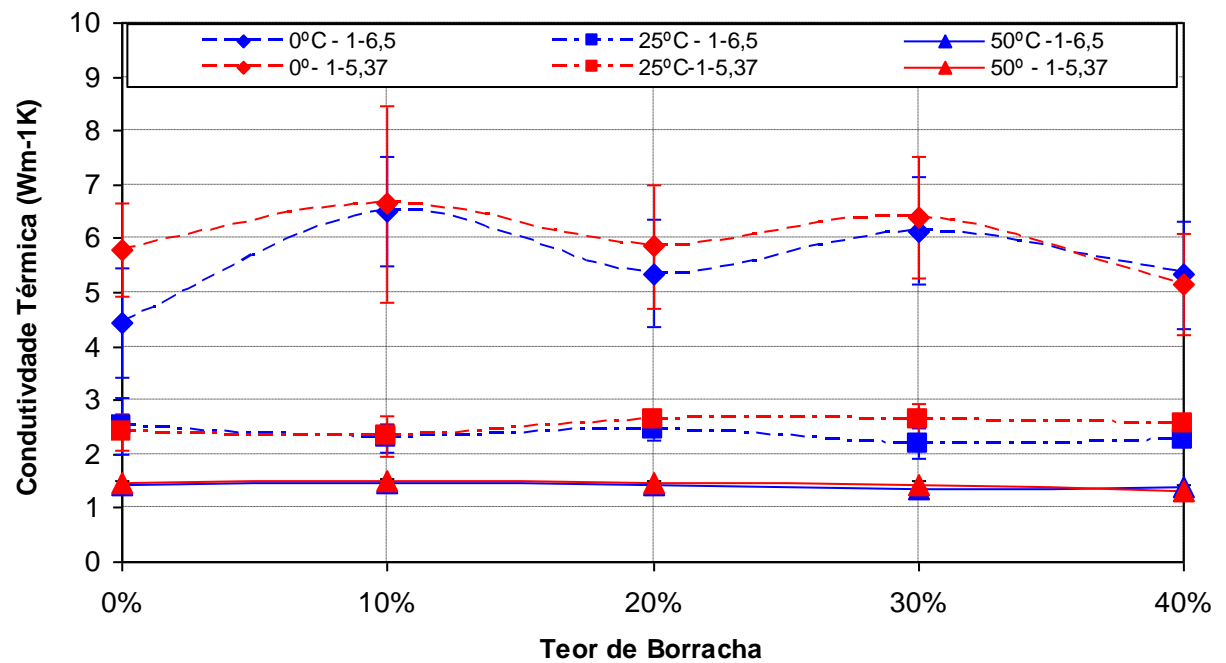


Figura 23: Relação entre a condutividade térmica 3 temperaturas e a variação do teor de borracha

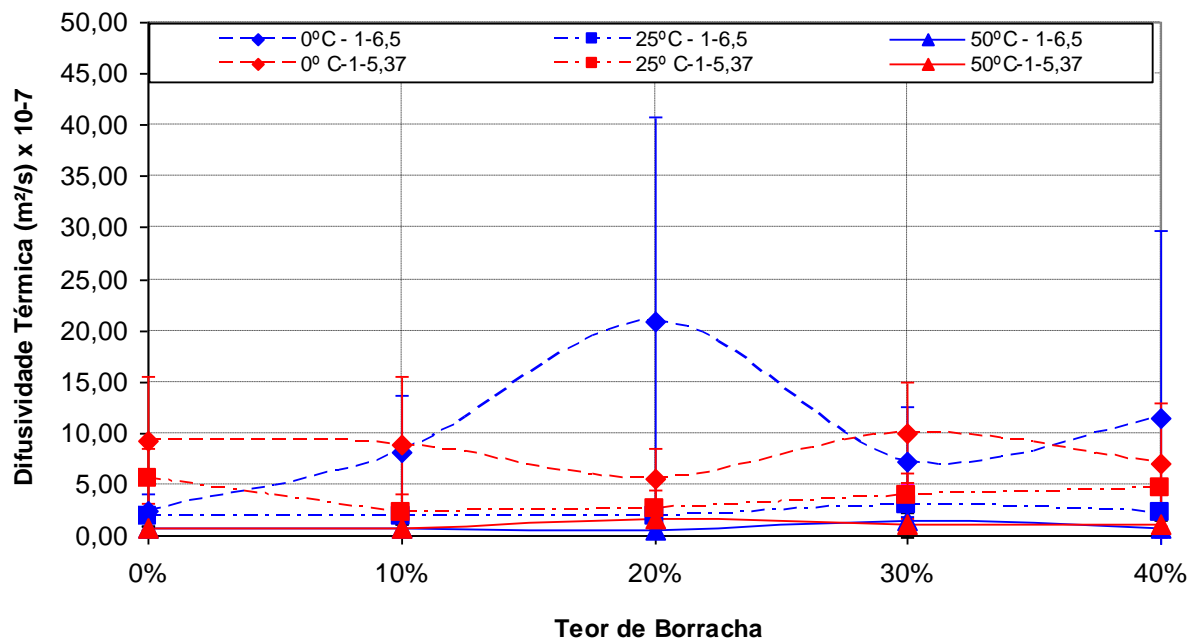


Figura 24: Relação entre a difusividade térmica 3 temperaturas e a variação do teor de borracha

Então pode se afirmar que a temperatura é a variável independente que mais influencia na determinação das propriedades térmicas, e que quanto menor sua temperatura, maiores seus resultados, sendo a sua variação mais importante do que a variação do teor de adição de borracha, contrariamente ao que se esperava.

O teor de borracha somente foi importante para os resultados no calor específico na temperatura de 0°C, onde em ambos os traços quanto maior a adição maior os valores encontrados.

Tanto para a condutividade quanto para a difusividade térmica quem se sobressai é o teor de cimento e fator a/c das amostras, comprovando que a adição de borracha em concretos não permite que ocorram grandes transferências de calor no seu meio.

A adição de borracha faz com que em temperaturas extremas haja uma ligeira diminuição da condutividade e difusividade térmica, isto pela borracha ser considerada um bom isolante térmico.

O que pode-se verificar pelos resultados encontrados é que os teores de borracha utilizados não são suficientes para impedir a transferência de calor. Mesmo com a variação da quantidade de borracha, a mistura dela no concreto é heterogênea, permitindo que existam espaços em que a borracha não esteja uniformemente distribuída.

Portanto uma alternativa seria a realização destes ensaios em amostras com teores maiores de adição de borracha, permitindo uma distribuição mais homogênea desta no concreto e conseqüentemente um aumento do numero de vazios, que diminuirá a transferência de calor.

Outra alternativa para estudar a transferência de calor em concretos com borracha seria a de uma estrutura tipo sanduíche como pode ser visto na Figura 25, onde existiriam duas camadas de concreto convencional ou concreto com pouca adição de borracha e a camada central de concreto com grande adição de borracha. Com essa distribuição, quando o calor quando chegasse ao centro da amostra, encontraria alto índice de vazios com ar incorporado e grande quantidade de borracha, que atuaria como isolante térmico, não permitindo a passagem de calor.

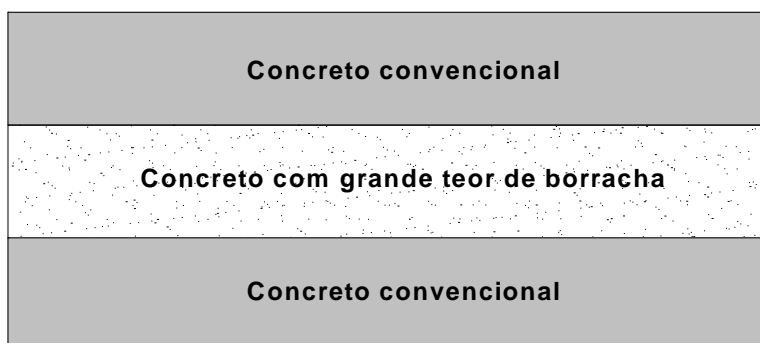


Figura 25: Estrutura tipo sanduíche

Diferentemente do que se esperava ao inicio desta pesquisa, não será a quantidade de borracha acrescentada ao concreto que influenciará no resultado e sim a temperatura que este será exposto. Portanto pode se afirmar que este material pode ser utilizado junto ao concreto promovendo assim a reciclagem de um material danoso a natureza e aliando suas

propriedades isolantes ao concreto na busca por um melhor condicionamento térmico da edificações.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

A preocupação com a sustentabilidade vem fazendo com que a construção civil desenvolva métodos construtivos visando a reutilização de resíduos urbanos. Com esta premissa houve interesse em desenvolver um trabalho que contemplasse o estudo das propriedades térmicas em concretos com adição de borracha, como uma forma de aliar um benefício ambiental com a melhoria de um material importantíssimo para a construção civil.

Esta pesquisa, de caráter experimental, estudou as propriedades térmicas de concretos com diferentes teores de adição de borracha. Utilizou-se 40 amostras de concreto, com dois traços diferentes e teores de adição de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de borracha. As propriedades estudadas foram calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica.

Os resultados obtidos nos ensaios em laboratório, analisados e interpretados no capítulo anterior, permitiram chegar às seguintes conclusões:

Para o calor específico a influência do teor de borracha (ao menos para os teores estudados) pode ser considerada mínima e que através da análise estatística sabe-se que os fatores que mais relevantes são a temperatura e o fator a/c .

Na condutividade térmica os maiores valores foram encontrados nas amostras com 10% de adição, e através de análise estatística verificou-se que o teor de borracha, teor de cimento, fator a/c e Slump Test não trazem influências significativas para o valor de k .

A difusividade térmica calculada pelo método do Problema Inverso, apresenta a temperatura como variável dependente mais importante.

A adição de borracha faz com que em temperaturas extremas haja uma ligeira diminuição da condutividade e difusividade térmica, isto porque a borracha é considerado um

bom isolante térmico, o que leva a concluir que os teores de borracha utilizados não são suficientes para impedir a transferência de calor, devendo então ser testados teores maiores.

Ao final deste trabalho, pode-se dizer que os objetivos propostos foram alcançados, e que os resultados aqui encontrados permitem o conhecimento do comportamento da borracha em concretos nos teores estudados, visando sua utilização como material de construção civil e contribuindo para estudos posteriores dos efeitos térmicos.

5.2.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para continuidade da pesquisa, indicam-se:

- a utilização dos valores encontrados para modelar a transferência de calor em estruturas de concreto;
- realização dos ensaios térmicos, em amostras com maiores teores de adição de borracha, que os utilizado;
- analisar a resistência tipo “fio quente” nos valores medidos;
- estudar a transferência de calor em uma estrutura tipo sanduíche, composta por duas camadas de concreto convencional e uma camada central de concreto com grande adição de borracha.

6. BIBLIOGRAFIA

ALBUQUERQUE, A. C.; ANDRADE, M. A. S. **Concreto com Borracha de Pneu: Uma Revisão Bibliográfica**. 44o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 2002.

ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A., **Curso de Física**. Vol.2 São Paulo: HARBRA, 1986.

AMBIENTE BRASIL. **Estatísticas da Reciclagem**. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./residuos/index.php3&conteudo=./residuos/estatisticas.html>. Acesso em: 22/04/2009.

AMBIENTE BRASIL. **Reciclar**. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/reciclar.html>. Acesso em: 15/04/2009.

AMBIENTE BRASIL. **Reciclagem de pneus**. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/reciclagem/pneus.html>. Acesso em: 14/04/2009.

BAUER, R. J. F., TOKUDOME, S. and GADRET, A. D. **Estudo de Concreto com Pneu Moído**. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu - PR, 2001. **Anais...** Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001. (CD-ROM).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Nº 258**, de 26 de agosto de 1999. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>. Publicado em 2003. Acessado em: 04/04/2008.

BRUXEL, D. F. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos de cimento Portland com adição de borracha reciclada**. In: XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica, 2009, Joinville - SC. Anais ... Joinville, 2009. (CD-ROM).

CENTRO DE INFORMAÇÕES SOBRE RECICLAGEM E MEIO AMBIENTE, Recicloteca.

Borracha e o Pneu. Disponível em:
<http://www.recicloteca.org.br/Default.asp?Editoria=5&SubEditoria=19>. Acesso em:
05/04/2008.

COELHO, M. A., **Geografia do Brasil**. Vol.3 São Paulo: Moderna, 1990.

COSTA, E. C., **Arquitetura ecológica**. Condicionamento térmico natural. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982.

DYNAMIS, **Reciclagem de Pneus Usados**. Disponível em:
<http://www.dynamismecanica.com.br/artigo002.php>. Acesso em: 14/04/2009.

GUIA NET. **Brasil – Clima**. Disponível em:
<http://www.guianet.com.br/brasil/mapaclima.htm>. Acesso em: 21/04/2009.

HELLMANN, L., **Determinação de propriedades térmicas de materiais de pavimentação**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., BARLUENGA, G., BOLLATI, M. and WITOSZEK, B. **Static and dynamic behavior of recycled tire rubber-filled concrete**. Cement and Concrete Research, 32, 2002, pp.1587–1596.

HUYNH, H., RAGHAVAN, D. **Durability of Simulated Shredded Rubber Tire in Highly Alkaline Environments**. Advn Cem Bas Mat, 1997, pp.138-143.

INCROPERA, F. P; De WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de calor e de massa**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. Traduzido por: Carlos Alberto Biolchini da Silva. Departamento de Engenharia Mecânica, UERJ. Tradução de: Fundamentals of heat and mass transfer. 698 p.

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

MARQUES, M. L. et al. **Avaliação do comportamento da argamassa adicionada de diferentes granulometrias de borracha após o tratamento com NaOH.** In:47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife. Anais... CBC, 2005. p 268-279

MEDINA, J., **Mecânica dos Pavimentos.** UFRJ. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, Critérios de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas.** 1991. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

NOSSO QUINTAL. **O que é sustentabilidade e que diabos tem a ver comigo?.** Disponível em: <http://nossoquintal.org/2007/10/16/o-que-e-sustentabilidade-e-o-que-diabos-isso-tem-a-ver-comigo/>. Acesso em: 14/04/2009.

NUNES, R., **O Caminho para uma Sociedade Sustentável.** Disponível em: <http://www.ecologiaurbana.com.br/sustentabilidade/os-caminhos-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 14/04/2009.

NUNES, R., **O que é Sustentabilidade?.** Disponível em: <http://www.ecologiaurbana.com.br/sustentabilidade/o-que-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 14/04/2009.

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO. **Metodologias e Técnicas de Minimização de Resíduos Sólidos Urbanos.** – Rio de Janeiro; ABS – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. 65 il.

ROMA, W. N. L., **Fenômeno de Transporte para Engenharia.** São Paulo: RiMa, 2003.

ROSA, D.S.; MORENO Jr, A.L.; MARTINS, T.C.; Avaliação da granulometria na incorporação de pneus pós-consumo em compósitos de concreto. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, São Paulo, v. 26, nº 2, p: 103-110, 2007.

ROSTAMI, H.; LEPORE, J.; SILVESTIM, T.; ZANDI, I., Use of Recycled Rubber Tires in Concrete. In: **Proc. Int. Conf. Concrete 2000: Economic and Durable Construction through**. Excellence University of Dundee, UK, 1993.

SIBDIQUE R. e NAIK, T. R. **Properties of concrete containing scrap-tire rubber** – an overview. Waste Management, 2004.

SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G. S., **Soil Thermal Conductivity “Remote Sensing Reviews”**. 1990, Vol. 5(1), pp. 301-310.

SILVA, J. P. S., **Asfalto borracha: a alternativa ecológica para reutilização de pneus usados**. Disponível em: <http://www.universia.com.br/materia/img/ilustra/2005/dez/artigos/ASFALTO%20BORRACAHA.doc>. Acessado em: 05/04/2008.

SPECHT, L. P., **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 281 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

TRAMONTINI, R. **Modelagem matemática da transferência de calor em pavimentos rígidos e flexíveis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí, 2007.

TOPGYN. **Clima no Rio Grande do Sul**. Disponível em: http://www.topgyn.com.br/conso01/rio_grande_sul/index.php. Acesso em: 14/04/2009.

WIKIPÉDIA. **Reciclagem**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Reciclagem>. Acesso em: 23/04/2009.

WIKIPÉDIA. **Sustentabilidade**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Sustentabilidade>. Acesso em: 23/04/2009.

ANEXO I

Programa do Calor Específico

```

%=====CÁLCULO DO CALOR ESPECÍFICO =====
%AJUSTA OS PARÂMETROS DA FUNÇÃO  $Z(x,y)=A(x-R)^2+B(y-H/2)^2$ 
clear;clc;
format long

%=====DADOS EXPERIMENTAIS=====
%Temperatura em 4 pontos para tempo = 1000s
%Premissa= T em t=0 é zero para todos os pontos
%===== MEXER=====
Te(1)= 4.8
Te(2)= 1
Te(3)= 0.9;
Te(4)= 1;

%=====
R=0.05; %em m
H=0.1*2; % em m
n=50; %no. de pontos
x=linspace(0,R,n);
y=linspace(0,H/2,n);
A=10000;
B=10000;
for i=1:n
    for j=1:n;
        T(i,j)=A*(x(i)-R)^2+B*(y(j)-H/2)^2+Te(3);
    end
end
figure(1);
[X,Y]=meshgrid(x,y);
surf(X,Y,T);
xlabel('r (m)');
ylabel('z (m)');
zlabel('Temperatura (oC)');

%-----Cálculo dos coeficiente A e B-----
ne=4; % número de dados experimentais
m=100; %número de divisões (chutes)
am=0; %=====MEXER=====
aM=1000; %=====MEXER=====
da=(aM-am)/m;
bm=0; %=====MEXER=====
bM=100; %=====MEXER=====
db=(bM-bm)/m;
for ii=1:m %para o a
    a(ii)=am+(ii-1)*da;
    for i=1:m %no. de tentativas b
        b(i)=bm+(i-1)*db;
        Som=0;
        for k=1:ne % no. de dados em x
            if (k==1)
                r=0;
                z=0;
            end
            if (k==2)
                r=0.01; z=H/2;
            end
        end
    end
end

```

```

        if (k==3)
            r=R; z=H/2;
        end
        if (k==4)
            r=0.01; z=0;
        end
        Ya(k)=a(ii)*(r-R)^2+b(i)*(z-H/2)^2+Te(3); %T calculada
        Er=(Te(k)-Ya(k))^2;
        Som=Som+Er;
    end %do k
    ETB(ii,i)=Som; %vetor com os m erros
end % do i
end % do ii

Menor=1.0e+090 ;
iiot=1;
ibot=1;

for ii=1:m
    for i=1:m
        if (Menor > ETB(ii,i))
            Menor=ETB(ii,i);
            iot=i;
            iiot=ii;
        else
            Menor=Menor;
            iot=iot;
            iiot=iiot;
        end
    end
end

iiot
iot
aot=a(iiot)
bot=b(iot)

%-----Gráfico-----
for i=1:n
    for j=1:n
        Ycc(i,j)=aot*(x(i)-R)^2+bot*(y(j)-H/2)^2+Te(3);
    end
end
figure(2);
[X,Y]=meshgrid(x,y);
surf(X,Y,Ycc);
xlabel('r (m)');
ylabel('z (m)');
zlabel('Temperatura (oC)');

%-----CÁLCULO DO R2-----
%Cálculo do K para o domínio de dados experimentais
for k=1:ne % no. de dados em x
    if (k==1)
        r=0; z=0;
    end
    if (k==2)
        r=0.01; z=H/2;
    end
end

```

```

        if (k==3)
            r=R; z=H/2;
        end
        if (k==4)
            r=0.01; z=0;
        end
        Yot(k)=aot*(r-R)^2+bot*(z-H/2)^2+Te(3); %T calculada
    end %do k

SOM=0;
for i=1:ne
    SOM=SOM+Te(i);
end
Mm=SOM/ne;
SQE=(Yot-Te)*(Yot-Te)';
SQT=0;
for i=1:ne
    SQT=SQT+(Te(i)-Mm)^2;
end
R2=1-SQE/SQT

%Para o calculo da Integral - Para Tm (temperatura média)
h=H/2;
Tm=(aot*h*R^3+bot*h^3*R)/3+Te(3)*h*R;
Tmf=Tm/(R*h)

%===== CALOR ESPECÍFICO =====
m=1.92126;%massa (kg)          =====MEXER=====
R=2.2; %resistência (ohms);
V=3; % voltagem (volts);
dt=1000; %variação do tempo(segundos);
P=V^2/R; %potencia (watts)
Q=P*dt; %quantidade de calor (Joule)
c=Q/(m*Tmf) %calor especifico (J/kg°C)

%=====CÁLCULO VIA GEMOTRIA=====
T4=(2*Te(2)+Te(3)+Te(4))/4;
T5=Te(2);
T6=(Te(2)+T4)/2;
T7=(Te(3)+T4)/2;
T8=(T4+T5)/2;
T9=(Te(4)+T4)/2;

V1=pi*(R/2)^2*H/4;
V3=pi*R^2*H/4;

TG=(V1*(T9+T6)+V3*(T7+T8))/(2*(V1+V3));
cg=Q/(m*TG) %calor especifico (J/kg°C)

```


ANEXO II

Programa da Condutividade Térmica

```

%===== CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA - MÉTODO DE CAMPBELL=====
%===DADOS EXPERIMENTAIS=====
clear all;
clc;
n=11; %número de dados
t=[1.1;100;200;300;400;500;600;700;800;900;990]; %tempo

%===== temperatura===== Temperatura T1= termopar prox. da fonte
%=====MEXER=====

T1=[0; 14.9; 17; 18.1; 18.6; 18.6;18.9; 19.2; 19.2; 19.2; 19.6];
for i=1:n
    T1(i)=T1(i)-T1(1);
end

%===CÁLCULO DO K===
te=t;
Te=T1;
Rr=0.0025; % raio da resistência, m
Hr=0.025; % altura da resistência,m
Ten=3 ; % volt
Res=2.2; %ohm

AT=2*pi*Rr*(Hr+Rr);
q=Ten^2/(Res*Hr);%(Res*AT); %calor por unidade de área, W/m

dt=te(n);
for i=1:n
    x(i)=log(te(i));
    A(i,1)=x(i);
    A(i,2)=1;
    Y(i)=Te(i);
end
S=inv(A'*A)*A'*Y';
k=q/(4*pi*S(1))
%=====
m=50;
tc=linspace(x(1),x(n),m); % tempos
for i=1:m
    Tc(i)=S(1)*tc(i)+S(2);
end

figure(1);%T x t
plot(x,Y,'ok',tc,Tc,'k');
xlabel('ln(t) (s)');
ylabel('Variação de Temperatura(°C)');
legend('T exp','T ajust');
%-----CÁLCULO DO R2-----
for i=1:n
    Tcc(i)=S(1)*x(i)+S(2); % potência
end
SOM=0;
for i=1:n
    SOM=SOM+Y(i);
end

```

```
Mm=SOM/(n);
SQT=0;
for i=1:n
    SQT=SQT+(Y(i)-Mm)^2;
end
SQE=(Tcc-Y)*(Tcc-Y)';
R2=1-SQE/SQT

figure(2);%T x t
plot(te,Te,'ok');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Variação de Temperatura(°C)');
legend('T exp');
```

ANEXO III

Programa da Difusividade Térmica

```

% ===== Difusividade =====
%TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COORDENADAS CARTESIANAS - MÉTODO EXPLÍCITO -
% calcula a difusividade térmica ótima com base nos dados exper. de T(t)
% usa os coeficientes de ajuste do programa Dadosexp
clc;
clear;
format long;
m=11; % número de dados
%=====DADOS EXPERIMENTAIS===== Tp=Termopar T4=1cm da fonte
te=[0;100;200;300;400;500;600;700;800;900;990]; %segundo
%=====MEXER=====
Tp=[0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.8];
Tam=[0; 0.1; 0.1; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.4; 0.4; 0.5; 0.5];

%=====coeficientes do ajuste dos dados experimentais
nd=50; % no. de chutes
am=1; % coef. do expoente da exp % =====MEXER =====
aM=9; % =====MEXER =====
da=(aM-am)/nd;
bm=0.0005; % b é o tempo tm % =====MEXER =====
bM=0.05; % =====MEXER =====
db=(bM-bm)/nd;

for j=1:m
    T(1,j)=Tp(j);
    T(2,j)=Tam(j);
end

for kk=1:2 %laço geral
    for j=1:m
        Te(j)=T(kk,j);
    end
    A1(kk)=Te(m)-Te(1);
    for i=1:nd %para o a
        a(i)=am+(i-1)*da;
        for j=1:nd %no. de tentativas b
            b(j)=bm+(j-1)*db;

            Som=0;
            for k=1:m % no. de dados
                Ta(k)=A1(kk)*(1-exp(-b(j)*te(k)))^a(i)+Te(1);
                Er=(Te(k)-Ta(k))^2;
                Som=Som+Er;
            end %do k
            ETB(i,j)=Som; %vetor com os m erros
        end % do i
    end % do j

    Menor=1.0e+090 ;
    iot=1;
    jot=1;

    for i=1:nd
        for j=1:nd

```

```

        if (Menor > ETB(i,j))
            Menor=ETB(i,j);
            iot=i;
            jot=j;
        else
            Menor=Menor;
            iot=iot;
            jot=jot;
        end
    end
end

aot=a(iot);
bot=b(jot);

%-----Cálculo de T(t)-----
tc=linspace(0,te(m),100);

iiot(kk)=iot;
jjot(kk)=jot;
aaot(kk)=aot;
bbot(kk)=bot;

%-----Cálculo do R2 método não linear --
for i=1:m
    Tecc(i)=A1(kk)*(1-exp(-bot*te(i)))^aot+Te(1);    %não linear p/ m pontos
end

S=0;
for i=1:m
    S=S+Te(i);
end
Tm=S/m;
SQE=(Tecc-Te)*(Tecc-Te)';
SQT=0;
for i=1:m
    SQT=SQT+(Te(i)-Tm)^2;
end
R2Te(kk)=1-SQE/SQT;
end % do kk

iiot
jjot
aaot
bbot
R2Te
%-----Gráfico-----
for i=1:100
    Ttp(i)=A1(1)*(1-exp(-bbot(1)*tc(i)))^aaot(1)+Tp(1);
    Tamb(i)=A1(2)*(1-exp(-bbot(2)*tc(i)))^aaot(2)+Tam(1);
end
figure(1);
plot(te,Tam,'or',te,Tp,'ob',tc,Tamb,'r',tc,Ttp,'b');
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Temperatura (°C)');
legend('T amb exp','Tp exp','T amb ajust','Tp ajust');

%=====PROBLEMA DIRETO=====
ATamb=A1(2);
bTamb=bbot(2);

```

```

aTamb=aaot(2);
ATp=A1(1);
bTp=bbot(1);
aTp=aaot(1);

%-----DEFINIÇÃO DA MALHA -----
M=20; % no. de pontos em x, varia com j
L=0.05; % raio do cilindro,m
dx=L/(M-1);
%nt=fix(0.01/dx); %número de dx para gráfico em r=0.01m
tempo=te(m);%tempo total em SEGUNDOS

%-----Dados da fonte de calor
R=2.2; %resistência (ohms);
V=3; % voltagem (volts);
dt=700; %variação do tempo(segundos);
P=V^2/R; %potencia da resistência(watts)
hR=0.186; % comprimento da resistência,m
rR=0.011; %raio da resistência,m
AL=2*pi*rR*hR; %área lateral da resistência
AT=2*pi*rR^2+AL;
q=P/AT; %fluxo de calor , Watt/m2

%-----CONDIÇÕES INICIAIS e FRONTEIRA -----
dt=0.5; %0.99*dx^2/(2*aa);
nn=fix(tempo/dt);

kt=4.1053 ;%12.0076;% condutividade térmica, W/mK
%=====MEXER
rr=0.01; % posição do termopar (m)
p=fix(0.01/dx); % posição do termopar em no. de dx
ti=linspace(0,te(m),nn); % tempo para o PI

%=====PROBLEMA INVERSO=====
na=25;% número de alfas testados
am=0.0000001; %intervalo inferior
%=====MEXER
aM=0.0000005; %intervalo superior
%=====MEXER
da=(aM-am)/na; % tamanho do intervalo

for j=1:na
    for i=1:M
        T(i)=Tp(1); %condição inicial para toda a malha
    end
    aa=da*(j-1)+am;
    %-----SOLVE-----
    for kk=1:nn %1o. for, tempo
        tt=dt*(kk-1); %tempo do problema direto
        T(1)=q*dx/kt+T(2);%CONDIÇÃO EM x=0,
        T(M)=ATamb*(1-exp(-bTamb*tt))^aTamb+Tam(1); % condição em x=L
        for i=2:M-1 %2o. for, direção Z
            AE=aa*dt/dx^2;
            AW=aa*dt/dx^2;
            AP0=1-2*dt*aa/dx^2;
            TN(i)=AE*T(i+1)+AW*T(i-1)+AP0*T(i);
        end % fim do 3o. for, i
        for il=2:M-1 %envelhecimento da TN

```



```

Tc(kk)=T(p); % para o gráfico,
if (abs(tt-te(np))<=dt)
    if (te > tt)
        for i=2:M-1
            Tx(np,i)=T(i);%(T(i+1)-T(i))*(te-tt)/dt+T(i);
        end
    else
        for i=2:M-1
            Tx(np,i)=T(i+1);%(T(i-1)-T(i))*(te-tt)/dt+T(i);
        end
    end
    Tx(np,1)=Tx(np,2);
    Tx(np,M)=Tx(np,M-1);
    np=np+1;
end
end % fim do 1o. for, kk, temporal

figure(2) % gráficos com função do tempo
plot(te,Tp,'ob',ti,Tc,'b');
xlabel('Tempo (segundos)');
ylabel('Temperatura (°C)');
legend('Temperatura experimental','Temperatura calculada');
title('Amostra de Concreto Asfáltico com ligante CAP');
x=linspace(0,L,M); % tempo para o PI
for i=1:M
    T1(i)=Tx(1,i);
    T2(i)=Tx(2,i);
    T3(i)=Tx(3,i);
    T4(i)=Tx(4,i);
    T5(i)=Tx(5,i);
    T6(i)=Tx(6,i);
    T7(i)=Tx(7,i);
    T8(i)=Tx(8,i);
end
y=p*dx;

figure(3) % gráficos com função do espaço
plot(y,Tp(1),'ok',y,Tp(2),'ob',y,Tp(3),'om',y,Tp(4),'og',y,Tp(5),'oy',y,Tp(6),
'or',y,Tp(7),'oc',y,Tp(8),'ok',x,T1,'k',x,T2,'b',x,T3,'m',x,T4,'g',x,T5,
'y',x,T6,'r',x,T7,'c',x,T8,'k');
xlabel('X (m)');
ylabel('Temperatura (°C)');
legend('te=0 s','te=100s','te=200 s','te=300s','te=400 s','te=500s','te=600
s','te=700 s','ts=0 s','ts=100s','ts=200 s','ts=300s','ts=400
s','ts=500s','ts=600 s','ts=700 s');

%-----Cálculo do R2 --
for i=1:nn
    YN(i)=ATp*(1-exp(-bTp*ti(i)))^aTp+Tp(1); %dados experimentais ajustados
end

S=0;
for i=1:nn
    S=S+YN(i);
end
Tm=S/nn;
SQT=0;

```

```
for i=1:nn
    SQT=SQT+(YN(i)-Tm)^2;
end
SQE=(Tc-YN)*(Tc-YN)';
R2ot=1-SQE/SQT
DIFUSPI=aot
```