

**Antonio Carlos dos Santos**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA  
OBTIDA A PARTIR DA RECICLAGEM DE PNEUS  
COM APLICAÇÃO EM PLACAS PRÉ-MOLDADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

**MACEIÓ, 2005**

**Antonio Carlos dos Santos**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA  
OBTIDA A PARTIR DA RECICLAGEM DE PNEUS  
COM APLICAÇÃO EM PLACAS PRÉ-MOLDADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima

Co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Aline da Silva Ramos Barboza

**MACEIÓ, 2005**

dos Santos, Antonio Carlos

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA OBTIDA A PARTIR DA RECICLAGEM DE PNEUS COM APLICAÇÃO EM PLACAS PRÉ-MOLDADAS. Maceió, 2005. 116p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Resíduo 2. Concreto 3. Borracha 4. tenacidade. I. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil.

*Dedico este trabalho a minha querida esposa Márcia Luzia, a minha avó, a meu avô (in memorian), minha mãe (in memorian) e a todos que contribuíram para o desenvolvimento do mesmo.*

## Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo meu existir, e por ter me concedido a graça de ter vivido tudo isso, mesmo com os obstáculos, mesmo com as dificuldades, mesmo com todos os contratemplos.

Agradeço a minha querida esposa, Márcia Luzia, por ter estado sempre perto de mim, sendo durante todo o tempo uma voz estimulante, invocativa e reconfortante. Agradeço-lhe ainda por seu olhar fidedigno e assistencial durante esta caminhada.

Aos orientadores Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Aline da Silva Ramos Barboza, pela dedicação demonstrada, pelos conhecimentos transmitidos, pelas críticas construtivas, pela revisão do texto e, sobretudo, pela palavra amiga incentivadora nas horas necessárias que foram decisivas para elaboração e conclusão desta Dissertação. Ao Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes pelo apoio e valiosas orientações. Ao Coordenador do Mestrado Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques pela sua competência para com o curso e sua atenção para com os alunos do programa.

Aos Professores Roberaldo Carvalho de Souza e Dilze Codá dos Santos Cavalcanti Marques, pela recomendação ao programa de pós-graduação e pelos conselhos e ensinamentos passados no período de graduação que jamais foram esquecidos. A todos os professores pelos relevantes conhecimentos transmitidos com amor, ética e profissionalismo, contribuindo, não apenas para a minha formação profissional; mas, também, para a minha formação como pessoa.

A todos os Colegas de Mestrado, pelo companheirismo, pela amizade, pelas brincadeiras e pelas ajudas fundamentais. Em especial ao colega EDVALDO MONTEIRO LISBÔA, pelo braço auxiliador ao longo do curso.

Aos funcionários do Núcleo de Pesquisa Tecnológica, pela ajuda indispensável para o desenvolvimento da pesquisa; em especial a Secretária Girley Vespaziano da Silva pelo relevante apoio e os técnicos Alexandre Nascimento de Lima e José Izidro pela ajuda participativa na maior parte dos experimentos.

## Créditos

A elaboração deste trabalho foi possível devido ao apoio de instituições e empresas, através de sugestões e apoio técnico financeiro. Assim são dignos de crédito:

Universidade Federal de Alagoas

- Centro de Tecnologia
- Núcleo de Pesquisa Tecnológica
- Departamento de Engenharia Estrutural

Britex Minerações Ltda.

através do Eng. Rafael Piatti.

Cimento NASSAU S. A.

através do Sr. Moraes.

IMCREL – Irmãos Moreira Extração Mineral Ltda,

através do Sr. Edenir.

Firestone Tyresoles,

através do Sr. José Malgueiro da Silva.

CAPES – através da bolsa de mestrado concedida.

FAPEAL – Através da concessão do Projeto de Pesquisa da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Aline da Silva Ramos Barboza.

# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>Resumo</b>	<b>xviii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 – Aspectos gerais da reciclagem	1
1.2 – As fibras de borracha de pneu	2
1.3 – Objetivos	5
1.4 – Apresentação	6
<b>Capítulo 2 – Revisão bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1 – As fibras utilizadas no concreto	7
2.2 – Caracterização da borracha	10
2.3 – Propriedades mecânicas	14
2.3.1 – Resistência à compressão	14
2.3.2 – Resistência à tração	14
2.3.3 – Módulo de elasticidade	16
2.3.4 – Resistência ao impacto	17
2.3.5 – Flexão de placas	20
2.4 – Durabilidade	21
2.5 – Trabalhabilidade	22
<b>Capítulo 3 – Avaliação do Comportamento do Concreto com Adição de Borracha</b>	<b>24</b>
3.1 – Caracterização dos materiais	24
3.1.1 – Coleta de materiais	24
3.1.2 – Análise granulométrica	26
3.1.3 – Outras propriedades da borracha	33
3.1.3.1 – Temperatura de fulgor	33

.3.1.3.2 – Massa unitária e massa específica	35
3.1.4 – Agregados	35
3.1.5 – Cimento	38
3.2 – Estudo da dosagem	39
3.2.1 – Determinação da dosagem de referência	39
3.2.2 – Estudo da dosagem do concreto com adição de borracha	41
3.2.3 – Ensaio iniciais – Propriedades mecânicas	42
3.2.4 – Análise dos resultados dos ensaios iniciais	43
3.2.5 – Definição do teor de borracha	47
3.3 – Ensaio de avaliação do comportamento do CAB	48
3.3.1 – Resistência à compressão, resistência à tração e módulo	49
3.3.2 – Ensaio de resistência ao impacto	51
3.3.3 – Ensaio de resistência à flexão	60
<b>Capítulo 4 – Análise dos resultados</b>	<b>63</b>
4.1 – Resistência à compressão	64
4.2 – Resistência à tração por compressão diametral	65
4.3 – Módulo de deformação longitudinal	65
4.4 – Resistência ao impacto	66
4.5 – Flexão de placas	66
<b>Capítulo 5 – Considerações finais</b>	<b>67</b>
<b>Referências</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>75</b>



## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Resíduo da recauchutagem _____	2
Figura 1.2 – O resíduo de borracha tem forma fibrilar _____	3
Figura 1.3 - Raspagem do pneu _____	4
Figura 1.4 – Fibras de borrachas aumentadas de 100 vezes _____	5
Figura 2.1 – Comportamento da resistência do concreto com a variação da temperatura para agregado calcário (NEVILLE – 1997) _____	13
Figura 2.2 – Gráfico tensão-deformação para o CAB em diversas dosagens (TOPÇU, 1994) _____	17
Figura 2.3 – Ensaio de flexão de placas (BARBOSA & DEBS – 2001) _____	20
Figura 2.4 – Esquema de ensaio de flexão de SEGRE (1999) _____	21
Figura 3.1 – Processo da raspagem _____	25
Figura 3.2 – Material no chão da fábrica _____	25
Figura 3.3 – Material sendo aspirado _____	25
Figura 3.4 – Material na câmara _____	26
Figura 3.5 – Material no tambor _____	26
Figura 3.6 – Distribuição granulométrica da borracha – AM1 _____	27
Figura 3.7 – Distribuição granulométrica da borracha – AM2 _____	28
Figura 3.8 – Material retido na peneira de abertura 4,76 mm _____	29
Figura 3.9 – Material retido na peneira de abertura 2,38 mm _____	29
Figura 3.10 – Material retido na peneira de abertura 2,00 mm _____	29
Figura 3.11 – Material retido na peneira de abertura 1,19 mm _____	30
Figura 3.12 – Material retido na peneira de abertura 0,84 mm _____	30
Figura 3.13 – Material retido na peneira de abertura 0,59 mm _____	30
Figura 3.14 – Material retido na peneira de abertura 0,30 mm _____	31
Figura 3.15 – Material retida na peneira de abertura 0,50 mm aumentado de 40 vezes _____	31
Figura 3.16 – Material retido na peneira de abertura 0,30 mm aumentada de 100 vezes _____	32
Figura 3.17 – Material retido na peneira de abertura 0,15 mm aumentada de 100 vezes _____	32
Figura 3.18 – Material retido na peneira de abertura 0,11 mm aumentada de 100 vezes _____	32
Figura 3.19 – Material no fundo aumentado de 100 vezes _____	33

Figura 3.20 – Material não-queimado	34
Figura 3.21 – Material queimado	34
Figura 3.22 – Material decantando	35
Figura 3.23 – Matéria com ar aprisionado	35
Figura 3.24 – Granulometria da areia com limites de norma	36
Figura 3.25 – Distribuição granulométrica da areia e da brita	37
Figura 3.26 – Corpo-de-prova	44
Figura 3.27 – Comportamento da resistência à compressão com o teor de borracha	44
Figura 3.28 – Comportamento da resistência à tração com o teor de borracha	45
Figura 3.29 – Comportamento do módulo com o teor de borracha	46
Figura 3.30 – Comportamento da resistência à compressão com teor de borracha (modificado)	46
Figura 3.31 – Comportamento da resistência à tração com teor de borracha (modificado)	47
Figura 3.32 – Comportamento do módulo com teor de borracha (modificado)	47
Figura 3.33 – Detalhe do ensaio de módulo	49
Figura 3.34 – Modo de ruptura do concreto de referência	50
Figura 3.35 – Modo de ruptura do CAB	50
Figura 3.36 – Gráfico tensão-deformação para o concreto de referência	51
Figura 3.37 – Gráfico tensão-deformação para o CAB	51
Figura 3.38 – Esfera de aço utilizada para provocar ensaio	52
Figura 3.39 – Aparato utilizado nos ensaios de impacto	52
Figura 3.40 – Placa não impactada	53
Figura 3.41 – Impacto com altura de queda 20 cm	53
Figura 3.42 – Impacto com altura de queda 30 cm	53
Figura 3.43 – Impacto com altura de queda 40 cm	54
Figura 3.44 – Impacto com altura de queda 50 cm	54
Figura 3.45 – Impacto com altura de queda 60 cm	54
Figura 3.46 – Impacto com altura de queda 70 cm	55
Figura 3.47 – Visão geral da placa ensaiada	55
Figura 3.48 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência – placa 01	56
Figura 3.49 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência – placa 02	57
Figura 3.50 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência – placa 03	58

Figura 3.51 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB – Placa 01	58
Figura 3.52 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB – placa 02	59
Figura 3.53 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB – Placa 03	60
Figura 3.54 – Detalhe geral do aparato e da prensa	61
Figura 3.55 – Detalhe do apoio	61
Figura 3.56 – Força de flexão-deformação, concreto de referência	62
Figura 3.57 – Força de flexão-deformação para o CAB	63

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Alguns tipos de fibras e suas propriedades _____	9
Tabela 2.2 – Proporções típicas de fibras para um concreto de peso normal _____	9
Tabela 2.3 – Intervalos de teores de fibras _____	9
Tabela 2.4 – Massa unitária e massa específica da borracha na literatura _____	11
Tabela 2.5 – Outras características da borracha, (HERNADES-OLIVARES – 2002) _____	13
Tabela 2.6 – Variações da resistência relativa com a temperatura _____	14
Tabela 2.7 – Comparação entre as perdas tração-compressão _____	15
Tabela 2.8 – Resultados dos ensaios de TOUTANJI (1995) _____	16
Tabela 3.1 – Composição granulométrica da amostra AM1 _____	27
Tabela 3.2 – Composição granulométrica da amostra AM2 _____	28
Tabela 3.3 – Propriedade característica do agregado _____	37
Tabela 3.4 – Composição granulométrica da areia e da brita _____	38
Tabela 3.5 – Características químicas do cimento _____	39
Tabela 3.6 – Características físicas do cimento _____	40
Tabela 3.7 – Dosagem do concreto segundo os procedimentos do ACI 211.1-91 _____	40
Tabela 3.8 – Dosagem do concreto após ajuste _____	41
Tabela 3.9 – Dosagem do concreto com borracha. _____	41
Tabela 3.10 – Dosagem do concreto com borracha em baixos teores _____	42
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas _____	43
Tabela 3.12 – Propriedades do concreto fresco com a relação tração-compressão _____	43
Tabela 3.13 – Dosagens do concreto após análise _____	49
Tabela 3.14 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas _____	50
Tabela 3.15 – Medidas do abatimento e ar-incorporado _____	50
Tabela 3.16 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 01 _____	56
Tabela 3.17 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 02 _____	57
Tabela 3.18 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 03 _____	57
Tabela 3.19 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 01 _____	58
Tabela 3.20 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 02 _____	59
Tabela 3.21 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 03 _____	59

Tabela 3.22 – Resultado final do ensaio de resistência ao impacto_____	60
Tabela 3.23 – Resultado final do ensaio de resistência à flexão_____	62
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios utilizados na análise com diferenças percentuais_____	63
Tabela 4.2 Resultados dos ensaios de flexão e impactos para análise_____	65

## Lista de Símbolos

%	Porcentagem
$\gamma_a$	Massa específica da água
$\gamma_{ab}$	Densidade absoluta específica da mistura de areia e brita no ensaio do esqueleto granular
$\gamma_{ar}$	Massa específica da areia
$\gamma_{br}$	Massa específica da brita
$\gamma_c$	Massa específica do cimento
$\gamma_{sp}$	Massa específica do superplastificante líquido
$\rho_u$	Massa unitária da mistura de areia e brita no ensaio do esqueleto granular
<	Menor
$\pm$	Mais ou menos
$\Sigma$	Somatório
$\leq$	Menor ou igual
$\geq$	Maior ou igual
a/c	Relação água/cimento
$A_{ar}$ (%)	Absorção da areia em porcentagem
$A_{br}$ (%)	Absorção da brita em porcentagem
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio
c	Espaçamento entre as armaduras
C	Massa de cimento
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup> /g	Centímetro quadrado por grama
d	Diâmetro do orifício inferior do Cone de Marsh
D (%)	Percentual do desvio em relação à média
$E_c$	Módulo de deformação estática

$f_c$	Resistência à compressão
$Fe_2O_3$	Óxido de ferro
$f_{tD}$	Resistência à tração na compressão diametral
g	Gramas
$g/cm^3$	Gramas por centímetro cúbico
g/ml	Gramas por mililitro
$H_{ar}$ (%)	Umidade da areia em percentagem
$H_{br}$ (%)	Umidade da brita em percentagem
$K_2O$	Óxido de potássio
kg	Quilograma
$kg/m^3$	Quilogramas por metro cúbico
m	Metro
$m^2/kg$	Metro quadrado por quilograma
$m^3$	Metro cúbico
MgO	Óxido de magnésio
$M_i$	Dimensões da peneira superior do agregado do grupo i
$M_{i-1}$	Dimensões da peneira inferior do agregado do grupo i
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
$Na_2O$	Óxido de sódio
°C	Graus centígrados
$P_a$	Massa de água
$P_{ac}$	Massa de água adicionada corrigida
$P_{ar}$	Massa de areia
$P_{br}$	Massa de brita
$P_t$	Massa total da mistura de areia e brita no ensaio do esqueleto granular
s	Segundo
SiO	Monóxido de silício
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
Vol	Volume de pasta ou argamassa que é introduzido no Cone de Marsh no ensaio

$V$ (%)	Volume de vazios da mistura de areia e brita em percentual no ensaio do esqueleto granular
$V_{ag}$	Volume de agregado
$V_{ar}$	Volume de areia
$V_{arg}$	Volume de argamassa
$V_{br}$	Volume de brita
$V_c$	Volume de concreto
$V_p$	Volume de pasta
$V_t$	Volume total de areia mais brita no ensaio do esqueleto granular
$\mu m$	Micrometro



## Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AL	Estado de Alagoas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATG	Análise Termogravimétrica
CP II-Z	Cimento Portland composto com Pozolana
CP	Corpo-de-Prova
EFNARC	European Federation of National Trade Associations
EN	European Norma
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais do NPT/UFAL
NBR NM	Norma Brasileira Registrada - Norma Mercosul
NBR	Norma Brasileira Registrada
NPT	Núcleo de Pesquisa Tecnológica
PF	Perda ao Fogo
CAB	Concreto com adição de Borracha.
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## Resumo

Observando-se que o concreto é o material mais consumido na construção civil e que nem sempre satisfaz todas as características exigidas, busca-se experimentar materiais que possam proporcionar a ele mais eficiência. Neste aspecto, com foco no descarte de resíduos provenientes da reciclagem de pneus, de forma a dar a este material um destino racional, no ambiente da Construção Civil, foi objetivo deste trabalho estudar o comportamento do concreto com adição de fibras de borracha produzidas na recauchutagem do pneu, aplicando à confecção de placas pré-moldadas para analisar o seu comportamento diante de esforços mecânicos. Os teores das adições foram aqueles usuais para fibras (1%, 2%, 3%). A bibliografia revelou que ocorre uma diminuição da resistência à compressão do concreto com tais adições, por outro lado, ocorre um aumento da tenacidade e da resistência ao impacto. Com a adição de fibras curtas, ou seja, com uma baixa relação comprimento/diâmetro, verificam-se ainda as mesmas perdas previstas na literatura sem ganhos significativos na tenacidade. Escolheu-se este tipo por representar uma pequena parcela e verificar se a sua separação poderia comprometer a sua utilização como resíduo. Foi estudado ainda o ponto de fulgor da borracha e observado que este ocorre em uma faixa de temperatura muito acima daquela em que o concreto tem suas propriedades ameaçadas. Considerou-se que estes resultados são satisfatórios, uma vez que a possibilidade de incluir fibras maiores pode aumentar a tenacidade e recuperar a perda observada.

Palavras-Chave: Resíduo, Concreto, Borracha, Tenacidade.

## Abstract

It was observed that the concrete is the most consumed material in the civil construction and not always satisfies all the demanded properties, its takes to researches that tries materials that can provide to the concrete more efficiency. This work, the discarding of residues procedures from the recycling of tires is focused, with the purpose to give to this material a rational destination, in the environment of the Civil Construction. The aim is to study the concrete behavior produced with rubber tire fiber addition, obtained by recycling of tire, and apply it on the confection of plates for to analyze the mechanical efforts behavior. The amongst of the additions are done in amongst usual for staple fibers. The bibliographical review disclosed that a reduction of the compressive strength when the rubber additions occurs. On the other hand, an increase of the ductility and the resistance for the impact occurs. The point of glow of the observed rubber was studied and it was observed that it occurs in a temperature range above of that one where the concrete has its deficit properties. With the short rubber fiber addition the same losses foreseen in literature without significant profits in the ductility are still verified. The rubber fibers chosen had been with low a relation length-diameter. This type for representing a small parcel and knowing that its separation can to add values that do not compensate its use as residue. Thus, it was considered that these results are satisfactory, a once that the possibility to include bigger rubbers fibers can increase the ductility.

Keywords: Waste, Concrete, Rubber, Ductility.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Aspectos gerais da reciclagem

O mundo contemporâneo se caracteriza por apresentar dois planos que, apesar de contraditórios, se encontram nas discussões sobre as questões econômicas da humanidade: o desperdício e o crescimento populacional. O desperdício vai de encontro à miséria que pode ser vista principalmente em países subdesenvolvidos, ou em desenvolvimento como o Brasil. O crescimento populacional se esbarra na ocupação desordenada do solo e na emissão sempre crescente de resíduos que são lançados na natureza. Diante destes fatos, a forma de utilização dos recursos naturais e a disposição do lixo na natureza precisam ser discutidas e gerenciadas. As ações estão sendo tomadas e, como exemplo, citam-se as resoluções do CONAMA.

No combate aos problemas supracitados, a reciclagem é uma das propostas que mais ganham estímulo. Hoje, no mercado, já existem vários produtos que são produzidos com materiais reciclados: papel higiênico, embalagens de alumínio, embalagens e subprodutos do aço e outros.

Apesar destes progressos, o acelerado desenvolvimento da sociedade leva, todos os dias, ao meio ambiente, um grande número de materiais que descaracterizam paisagens e polui os elementos vitais à sobrevivência do ser humano: o solo, o ar, a água.

Dentro da construção civil, é possível ver algumas formas de reciclagens de resíduos industriais que se consolidaram como materiais para aplicações específicas. Dentre estes materiais, pode-se citar a sílica ativa que passou de um resíduo da indústria de ferro-silício (LIMA, 1997) a um material fundamental na produção de concreto de alto desempenho. Outros produtos, como escória de alto-forno e cinza de casca de arroz, tomaram o mesmo rumo. Vários centros de pesquisa ainda estudam a utilização de outros resíduos em argamassas e concretos. Dentre eles, estão o resíduo da construção e demolição beneficiado, o resíduo da indústria de mármore e granito (LISBOA, 2004) e

as fibras de borracha de pneu provenientes da recauchutagem (PIERCE & BLACKWELL, 2002).

## 1.2 – As fibras de borrachas de pneu

O pneu é um dos produtos de maior consumo no mundo e um dos resíduos de mais difícil decomposição na natureza. Quando se tornam inservíveis são colocados em aterros onde podem permanecer por mais de 500 anos. Isto constitui um problema de engenharia. Neste contexto, a reciclagem surge como instrumento promotor do bem estar ecológico e social. A recauchutagem é uma das formas de reciclagem do pneu mais eficazes, pois pode prolongar a vida útil do pneu em até três vezes (PNEWS, 2002). Porém, também gera um resíduo (figura 1.1). Estudos revelaram que este material tem a forma fibrilar (figura 1.2), muito embora sua composição apresente certa heterogeneidade.



Figura 1.1 – Resíduo da recauchutagem.



Figura 1.2 – O resíduo de borracha tem forma fibrilar.

No Brasil, entre 110 milhões e 150 milhões de pneus velhos estão espalhados em aterros, terrenos baldios, rios e lagos (Ecologia Urgente, 2002). Segundo estimativa da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2002), a cada ano, dezenas de milhões de pneus novos são fabricados no País. Em 2001, foram 45 milhões – cerca de 15 milhões exportados e 30 milhões destinados ao consumo interno.

Segundo KAMIMURA (2002), os pneus para veículos de passeio são constituídos das seguintes partes:

**1 – Carcaça:** é a estrutura interna do pneu, com função de reter o ar sob pressão e suportar o peso do veículo. A carcaça é constituída por lonas de nylon, aço ou poliéster, dispostas diagonalmente nos pneus convencionais e radialmente nos pneus radiais, formando a parte resistente do pneu.

**2 – Flancos:** são constituídos de um composto de borracha de alto grau de flexibilidade, dispostos lateralmente, com o objetivo de proteger a carcaça contra os agentes externos.

**3 – Talões:** são constituídos internamente por arames de aço de grande resistência, unidos e recobertos por borracha. Sua finalidade é manter o pneu firmemente acoplado ao aro, impedindo-o de ter movimentos independentes.

**4 – Banda de rodagem:** é a parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo. Oferece grande resistência ao desgaste devido à sua composição de borracha e

agentes químicos especiais. Seus desenhos, criteriosamente estudados, visam proporcionar boa tração, estabilidade e segurança ao veículo.

A banda de rodagem, por estar em contato direto com o solo, sofre um desgaste mais rápido que as outras partes do pneu. Isto permite a sua recomposição, mantendo-se as outras partes para uma reutilização. A este procedimento dá-se o nome de recauchutagem ou recapeamento. Neste processo, a banda de rodagem sofre uma raspagem manual e por cilindros automatizados (ver figura 1.3). Assim, um resíduo de borracha constituído por um material grosseiro e por um material fino é gerado. O material fino, à primeira vista, parece pulverulento; porém, uma análise tátil visual prova tratar-se de fibras.

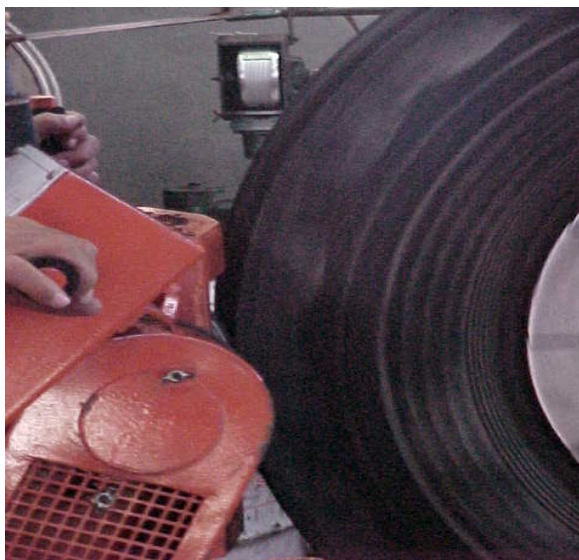


Figura 1.3 - Raspagem do pneu.

As perspectivas são favoráveis para a recauchutagem, uma vez que 281 milhões de pneus são descartados apenas nos Estados Unidos e 25% destes ainda têm como destino certo os aterros (SCRAPTIRENEWS, 1998 *apud* KAMIMURA, 2002). A resolução 258/99 do CONAMA que obriga às empresas fabricantes e importadoras de pneu a darem um fim racional aos pneus inservíveis deve elevar o preço do pneu novo e baratear o pneu recauchutado aumentando a procura por este produto, o que deve aumentar a geração de resíduo.

O resíduo da recauchutagem vem sendo experimentado em alguns centros de pesquisas do país como fibra no concreto, gerando um novo concreto chamado Concreto com Adição de Borracha - CAB. Isto acontece porque o mesmo apresenta uma forma fibrilar numa relação comprimento/diâmetro médio de 8 a 10. Esta relação indica uma fibra curta.

O resíduo proveniente da recauchutagem gera fibras de borracha com tamanhos e espessuras variadas, variando, também, a relação comprimento/diâmetro. Para efeito de fibra, aquela com baixa relação comprimento/diâmetro é menos interessante. De outra forma a retirada deste material pode ser desnecessária por ambos motivos: o percentual é pequeno e o processo de peneiramento pode não ser eficiente.

Assim, as fibras aqui utilizadas apresentam características peculiares em relação às fibras usuais. São fibras curtas com superfícies bastante irregulares (ver figura 1.4), possuem, ainda, pequenas dimensões, se assemelhando a um pó. As irregularidades da superfície são compostas de reentrâncias e tentáculos, o que dá ao material capacidade de se prender como as fibras usuais. Isto pode ser mais bem analisado quando se compara a massa unitária:  $0,30\text{kg/m}^3$ , com a massa específica:  $1,14\text{ kg/m}^3$ .

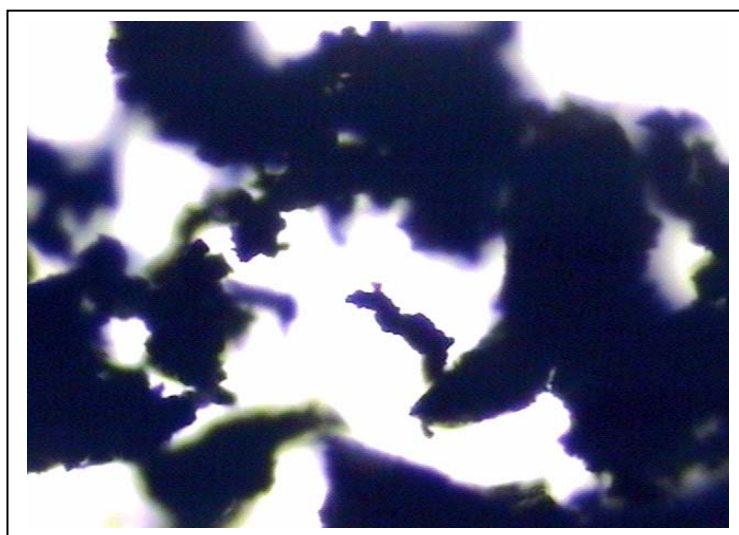


Figura 1.4 – Fibras de borrachas aumentadas de 100 vezes.

### **I.3 – Objetivos**

É objetivo deste trabalho avaliar o comportamento do concreto com adição de borracha, obtida a partir da reciclagem de pneus, com aplicações em placas pré-



moldadas, analisando-se as deformações sofridas por estes elementos estruturais sob esforços de flexão, bem como os danos sofridos diante de esforços de impactos.

## **1.4 – Apresentação**

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos, de modo a sintetizar toda a pesquisa e esclarecer os principais aspectos trabalhados, como segue:

**Capítulo 1** – No capítulo 1 buscou-se apresentar os aspectos gerais que envolvem o surgimento do CAB, dando um enfoque ao processo da recauchutagem e o resíduo que dela procede e definindo os objetivos do trabalho. Também, buscou-se apresentar uma idéia geral da fibra de borracha a ser utilizada.

**Capítulo 2** – No capítulo 2, apresentam-se as informações que se pode obter, na literatura, a respeito do CAB. Nesta parte do trabalho, ainda focalizou-se a utilização da borracha na pasta de cimento e em argamassa, bem como os métodos de ensaio utilizados.

**Capítulo 3** – No capítulo 3, faz-se um conjunto de experimentos que virão a caracterizar o resíduo de borracha encontrado na região, bem como o comportamento do CAB confeccionado com alguns dos materiais comumente comercializados em Maceió.

**Capítulo 4** – No capítulo 4 é feita uma análise dos resultados encontrados no capítulo anterior, dando significado aos números resultantes dos experimentos. Esta análise será feita por comparação entre os resultados do concreto de referência e os resultados do concreto com borracha.

**Capítulo 5** – No capítulo 5 faz-se o fechamento do trabalho, sintetizando algumas conclusões sobre a análise executada.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água. Porém, em algumas aplicações é desejável que ele tenha uma baixa massa unitária, alta resistência, ductilidade e resistência ao impacto. Embora seja o material mais usado na construção civil, ele nem sempre satisfaz a estes requisitos. A proposta de agregar borracha ao concreto surge com o intuito de contribuir com o desenvolvimento de algumas das propriedades citadas. Para isso, fez-se uma análise da bibliografia a respeito do CAB. Assim, se pode ter uma idéia das suas propriedades mecânicas, sua forma de dosagem e suas perspectivas de aplicação, como será visto a seguir.

#### 2.1 – As fibras utilizadas no concreto

Existe uma grande variedade de fibras que são utilizadas no concreto. Estas fibras são comercializadas em formas, tamanhos e materiais diferentes, que entre outros se podem citar: as fibras de aço, as fibras de vidro e as fibras de polipropileno, demonstrando baixos e altos módulos de elasticidade.

O objetivo de se adicionar fibras ao concreto é provocar uma costura entre as infinitas seções que compõe o sólido; combatendo, principalmente, as fissuras provocadas pela retração. Sob tensões aplicadas, essas fissuras se propagam rapidamente, sendo responsáveis pela ruptura do material.

Segundo MEHTA & MOTEIRO (1994), a introdução de fibras não melhorou significativamente a resistência à tração do concreto; mas melhorou o seu comportamento no estágio pós-fissuração. Ou seja, o concreto reforçado com fibras é mais tenaz e por isso mais resistente ao impacto. Muito embora a influência das fibras na resistência à tração dependa do tipo de fibra; percebe-se, de forma geral, que as fibras incorporadas ao concreto tornam-no menos frágil. A tabela 2.1 apresenta alguns tipos de fibras com suas propriedades físicas.

Como análise da tabela 2.1, pode-se destacar a fibra de polipropileno. A fibra de polipropileno é utilizada por SAVASTANO JR. et al (1999) com as seguintes caracte-

rísticas: densidade de 913 kg/m<sup>3</sup>, resistência de 0,25 GPa, módulo de elasticidade de 2,0 GPa e alongamento variando entre 22,3% e 26,0%. Na experimentação de concreto com fibra de borracha, HERNADEZ – OLIVARES et al (2002) utilizaram, também, fibras curtas de polipropileno com as seguintes propriedades: densidade de 910 kg/m<sup>3</sup>, resistência variando entre 0,56 GPa e 0,77 GPa e módulo de elasticidade de 3,5 GPa. SONG et al (2003) apresentaram fibras de polipropileno com densidade de 910 kg/m<sup>3</sup>, resistência de 0,41 GPa, módulo de elasticidade de 4,1 GPa.

Fazendo-se uma comparação entre os dados descritos no último parágrafo e a tabela 2.1, nota-se uma incoerência nos valores de alongamento, que na tabela 2.1 é visto com um valor de 8,0%; enquanto aqueles apresentados por SAVASTANO JR. et al (1999) variam entre 22,3% e 26,0%. Afora isto, os demais valores se encontram na mesma ordem de grandeza.

Na Região Nordeste as fibras de polipropileno são as mais utilizadas. Porém as fibras de aço apresentam maior variabilidade. Podem ser arredondadas, achatadas e onduladas. As arredondadas possuem diâmetros entre 0,25 mm e 0,75 mm. As achatadas têm seção transversal com espessura entre 0,15 mm e 0,40 mm, com largura variando entre 0,25 mm e 0,90 mm e relação de aspecto variando de 30 a 150. A relação de aspecto, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), é a razão entre o comprimento e o diâmetro médio. Para o presente trabalho será usado apenas relação comprimento-diâmetro ( $C/d$ ), por expressar uma maior proximidade com o que significa. Assim, SWAMY & MANGAT apud MEHTA & MONTEIRO (1994) demonstram que as fibras de aço com relação comprimento-diâmetro maior que 100 tendem a produzir empelotamento.

Empelotamento é a concentração de fibras pelo auto-entrelaçamento, formando emaranhados de fibras, sendo por isso também chamado de ninho. A tabela 2.2 abaixo apresenta as típicas proporções para um concreto de peso normal reforçado com fibras para algumas fibras comerciais, segundo o ACI committee 544 apud NAWY (1996).

Tabela 2.1 – Alguns tipos de fibras e suas propriedades (KARBUARE, 1998).

Tipo de Fibra	Resistência (GPa)	Módulo (GPa)	Alongamento (%)	Densidade
Acrílico	1,00	17 – 20	8,0 – 11,0	1,2
Asbesto	3,00-3,50	160 –190	2,0 – 3,0	2,6 – 3,5
Carbono	3,0 – 3,60	230 - 400	0,5 – 1,5	1,8 – 2,0
Vidro AR	2,50	70	3,6	2,8
Polietileno	0,20	5	8,0 – 10,0	1,0
Polivinil	0,10 – 0,15	20 – 25	8,0 – 11,0	1,1 – 1,4
Polipropileno	0,40 – 0,70	5 - 10	8,0	0,9
Aço	2,00	200	3,5	7,8

Tabela 2.2 – Proporções de fibras para um concreto de peso normal (NAWY, 1996).

Materiais	Características e proporções
Cimento	326-563 (kg/m <sup>3</sup> )
Relação a/c	0,4-0,6
% de areia no total de agregado	50%-100%
Tamanho máximo do agregado	9,5 mm
Ar incorporado	6%-9%
Conteúdo de fibra	0,5%-2,5% em V

Aço: 1% = 78,32 kg/m<sup>3</sup>, Vidro: 1% = 25,00 kg/m<sup>3</sup>, Nylon: 1% = 11,27 kg/m<sup>3</sup>

Fazendo-se a conversão do percentual de borracha de volume para peso, comparando-se com os valores de peso de cimento da tabela 2.2 chega-se a tabela 2.3, onde se verificam os intervalos de percentuais de fibras em relação ao peso de cimento:

Tabela 2.3 – Intervalos de teores de fibras em relação ao peso de cimento.

Fibra	Mínimo (%)	Máximo (%)
Aço	12	34
Vidro	4	11
Nylon	2	5

Segundo SAVASTANO JR. et al (2003), para fibras vegetais, a dosagem ideal deve possuir um teor de fibras em torno de 4% do volume da mistura. Para o polipropileno e o amianto o teor de fibras deve ficar em torno de 1% também em relação ao volume. Isto se faz necessário para que não se forme empelotamento. Em relação ao peso de cimento estes teores devem ser em torno de 13%.

Já as fibras de borracha são adicionadas em proporções à quantidade de agregados, ou em substituições aos agregados, tanto gráudo como miúdo. Assim, os CABs experimentados por TOPÇU (1994) e TOPÇU & AVCULAR (1996), tiveram teores de borracha de 15%, 30% e 45% do volume da mistura. TOUTANJI (1996) fez substituições do agregado gráudo em proporções de 25%, 50%, 75% e 100%. Em todos os casos é predominante a adição ser em relação ao volume da mistura, o que em função da massa específica da borracha resulta em grande variação na quantidade de borracha por metro cúbico de concreto. Nos trabalhos de TOPÇU (1994) e TOPÇU & AVCULAR (1996), onde o teor de borracha varia de 15% a 45% do volume da mistura, verifica-se que estes teores ficam variando de 27% a 81% do peso de cimento e de 4% a 12% em relação ao peso total de material seco.

BAUER et al (2000) adicionaram borracha à argamassa nos teores de 15%, 30% e 40%; e ao concreto em teores de 15% e 30% em relação ao peso de cimento. Embora estes autores mudem a forma de introduzir a borracha ainda continuam altos.

Comparando-se os trabalhos de TOPÇU (1994) e TOPÇU & AVCULAR (1996) com os de BAUER et al (2002), verifica-se que o teor de 15% nos primeiros se aproxima do teor de 30% no segundo. Nos trabalhos de AKASAKI et al (2002), a borracha é adicionada como fibra. Aqui já se observa um teor de borracha variando de 12,92% a 25,42% em relação ao volume da mistura. NIRSCHL et al (2003) utilizaram teores de fibras de borracha em torno 20% em volume significando aproximadamente 32% do peso de cimento. Para cada trabalho referido, houve uma preocupação em verificar os teores de fibras também em relação ao peso de cimento, isto se deu porque a utilização de dosagens em peso conduz a valores mais precisos.

## **2.2 – Características físicas das fibras de borracha.**

Por se tratar de material novo para compósito, a fibra de borracha não apresenta procedimentos normalizados para a sua caracterização como agregado para o concreto.

Porém alguns autores consolidaram procedimentos em características como: granulometria, massa unitária, massa específica.

BAUER et al (2002), utilizaram em seus trabalhos pneu moído em substituição ao agregado miúdo e graúdo, em cada caso o módulo de finura foi 5,63 e 7,47 respectivamente. O mesmo triturou a borracha deixando-a nas dimensões dos agregados aos quais substituiu. As borrachas obtidas foram chamadas de pneu moído I e pneu moído II, para substituir o agregado miúdo e para o agregado graúdo, respectivamente. É cabível que neste processo tenha sido utilizado um peneiramento, muito embora não ocorra citação. AKASAKI et al (2002) apresentaram o diagrama de distribuição granulométrica para a fibra de borracha. Para NAVARRO et al (2002), uma borracha comercial denominada M35, para uso em asfalto, possui diâmetro médio de 0,63 mm e uma larga distribuição de tamanho, tendo sido fracionada da seguinte forma: 0,1 mm 0,29 mm, 0,35 mm, 0,63 mm e 0,74 mm. NIRCHL et al (2003) fizeram estudos analisando a influência da granulometria, onde utilizaram borrachas passadas na peneira de abertura 0,8 mm, borrachas finas; e borrachas passadas na peneira de abertura 2,38 mm e retidas na peneira de abertura 0,80 mm. Por se tratar de fibras, verifica-se que o peneiramento como análise do tamanho ou diâmetro médio da fibra não tem eficiência absoluta, sendo necessário uma análise complementar.

A massa unitária e a massa específica foram encontradas em grande variabilidade nos diversos trabalhos. A tabela 2.4, a seguir, apresenta alguns valores encontrados na bibliografia:

Tabela 2.4 – Massa unitária e massa específica da borracha na literatura.

AUTOR	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )
TOPCU, 1994	0,410 – 0,472	0,650
TOUTANJI, 1995	-	0,610
HERNADES-OLIVARES, 2002	0,84	-
BAUER et al , 2002	0,50	1,09 – 1,12
NIRSCHL et al, 2003	0,27	1,35 – 1,40
AKASAKI et al, 2004	-	1,09
MENEGUINE e PAULON, 2004	0,395	0,548

HERNADES-OLIVARES et al (2002), estudando o comportamento estático e dinâmico do concreto com borracha de pneu, apresentaram números que, dão uma melhor compreensão da fibra de borracha em outros aspectos: comprimentos entre 0,85 mm e 2,15 mm, 4% de conteúdo retido na peneira 1,6 mm, 25 % de absorção d'água, 6,25% de umidade natural, impurezas de aço 0,05% em peso, temperatura de amolecimento 175°C e temperatura de combustão de 200°C. A tabela 2.5 a seguir traz outras propriedades.

Dentre as propriedades supracitadas, podem-se destacar as temperaturas de amolecimento e de combustão. A imagem da borracha sempre esteve relacionada ao fogo; logo, como o CAB vai se comportar diante de altas temperaturas, também deve ser uma preocupação de quem o estuda.

Dados de HERNADES-OLIVARES & BARLUENGA (2003), analisando o comportamento do concreto de alto-desempenho com adições de borrachas em percentuais de 3%, 5% e 8% volumetricamente (4,9%, 8,19% e 13,1% - peso de cimento), submetido ao fogo, demonstra que o CAB tem melhor desempenho em altas temperaturas. Em seus trabalhos foram utilizadas fibras com comprimento variando entre 0,85 cm e 2,15 cm e densidade de 0,84 g/cm<sup>3</sup>. Verificou-se que o teor de borracha com 3% (4,9% em relação ao cimento) foi considerada a dosagem ideal, uma vez que teve melhor comportamento que o concreto com 0% e a redução na resistência não é tão considerável. Ainda com HERNADES-OLIVARES & BARLUENGA (2003), os ensaios mostraram que à medida que a quantidade de borracha cresceu, o concreto apresentou menor deterioração. Estes pesquisadores executaram ensaios com placas de 20cm por 30cm com 5cm de espessura, onde apenas uma das faces fora submetida a uma temperatura máxima de 1300°C. Observou-se, assim, que as placas apresentaram uma curvatura após o ensaio e que esta curvatura foi tanto menor quanto maior a quantidade de borracha introduzida.

Para MEHTA & MONTEIRO (1994), uma das excepcionalidades do concreto é a sua capacidade de suportar, sem impor maiores danos para a edificação, a temperaturas acima de 700°C, em comparação a outros materiais. Ainda segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), sabe-se a que a água possui um considerável calor de vaporização. Assim enquanto houver água evaporável dentro do concreto, a temperatura se mantém constante, o que constitui uma proteção contra o fogo. Por isso, pode-se dizer que o e-

feito da temperatura no concreto depende do grau de hidratação. Pelo contrário, para estes autores, uma variação brusca da temperatura pode causar lascamento superficial em concreto de baixa permeabilidade, donde se verifica o melhor desempenho do CAB em altas temperaturas nos trabalhos de HERNADES-OLIVARES & BARLUENGA (2003) supracitado.

Tabela 2.5 – Outras características da borracha (HERNADES-OLIVARES, 2002).

Descrição	Quantificação
Módulo de Young em 100%	1,97 MPa
Módulo de Young em 300%	10 MPa
Módulo de Young em 500%	22,36 MPa
Resistência à tração	28,1 MPa
Deformação na ruptura	590%
Resiliência a 23°C	44%
Resiliência a 75°C	55%

De outro modo, para NEVILLE (1997), um concreto confeccionado com agregado calcário, submetido a uma temperatura de 150°C já perde cerca de 20% de resistência (ver figura 2.1). De maneira geral, as variações relativas podem ser vista na tabela 2.6 retirada de NEVILLE (1997). Esses resultados demonstram que independentemente da presença da borracha o concreto já teria uma perda com o aumento da temperatura.

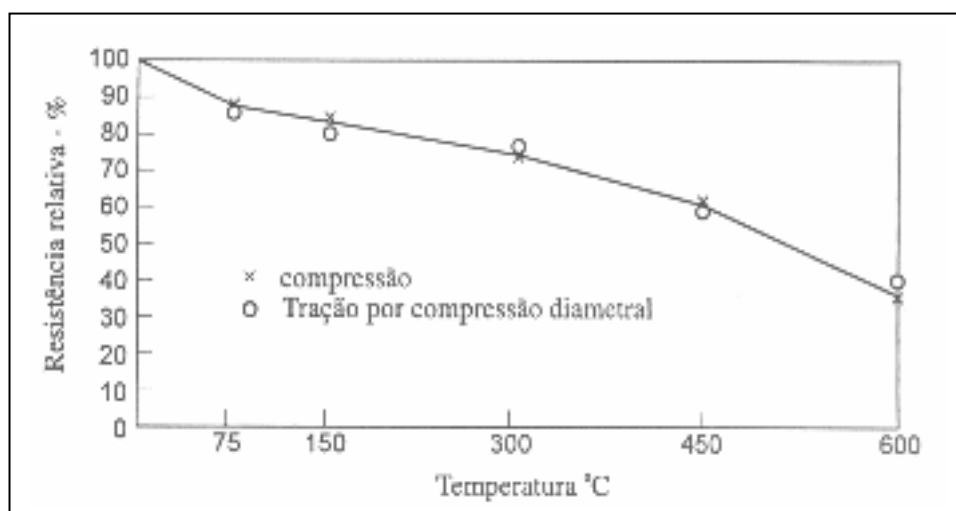


Figura 2.1 – Comportamento da resistência do concreto com a variação da temperatura para agregado calcário (NEVILLE, 1997).



Tabela 2.6 – Variações da resistência relativa com a temperatura.

Temperatura °C	20	200	400	600	800
Resistência relativa (%)	100	50-92	45-83	38-69	20-36

NAVARRO et al (2002) apresentaram em seus trabalhos um tipo de fibra de borracha proveniente da recauchutagem de pneu de caminhão, que demonstrou ter uma relação média  $C/d=6$ , diminuindo a medida que o comprimento da fibra diminuiu, chegando a  $C/d=2,9$  para  $C=0,74\text{mm}$  e  $C/d=1,2$  quando  $C=0,29\text{mm}$ ; porém relataram que o material não se torna esférico.

## 2.3 Propriedades mecânicas

### 2.3.1 Resistência à compressão

Dentre os estudos realizados com o CAB a preocupação prioritária foi com a resistência à compressão. De uma maneira geral, observa-se que a introdução de borracha ao concreto provoca uma diminuição da resistência à compressão. Segundo TOPÇU (1994), a resistência à compressão diminui em torno de 50%, se adicionada borrachas com granulometria fina e em torno de 60% se adicionado borrachas com granulometria grossa. Isto demonstra que a variação na resistência à compressão, também, depende da granulometria da borracha. Segundo TOPÇU & AVCULAR (1997) a razão para a redução da resistência pode ser atribuída a ambos fatos: a redução da quantidade de material sólidos com capacidade de suportar carregamento e a concentração de tensões na pasta ao redor dos agregados de borracha. Neste contexto, é bastante ressaltar que a borracha utilizada neste trabalho se enquadra como borracha fina.

### 2.3.2 Resistência à tração

A resistência à compressão é considerada índice de qualidade porque pode ser relacionada com outras propriedades: módulo de elasticidade, durabilidade, absorção d'água etc. A resistência à tração está dentre as principais propriedades que se relaciona com a resistência à compressão. Para MEHTA & MONTEIRO (1994), esta relação não é perfeita, pois se observa que ocorre uma diminuição da razão tração/compressão quando a compressão aumenta. Na tração direta, a razão tração/compressão está entre

10% e 11% quando se trata de concreto de baixa resistência. Para concreto de média resistência a resistência à tração é cerca de 8% a 9% da resistência à compressão; e para concretos de alta resistência a resistência à tração está em torno de 7% da resistência à compressão, ainda segundo MEHTA & MONTEIRO (1994).

Segundo TOPÇU (1994), observa-se maior capacidade de absorção de energia plástica nos ensaios de resistência à tração na flexão que o esperado, muito embora as perdas ainda tenham sido grandes. Assim, em seus trabalhos, para um concreto com borracha fina, tem-se perdas de 32%, 52% e 64%. Para concreto com borracha grossa tem-se que as perdas na resistência à tração são de 53%, 66% e 74%. Estes valores foram obtidos para introdução de borracha na proporção volumétrica de 15%, 30% e 45%, em um concreto que pela norma NBR 8953/ 1992 se enquadra como um concreto de classe C20. ELDIN & SENOUCCI (1994), reportam perdas médias de 85% na resistência à compressão, enquanto as perdas médias na resistência à tração foram de 50%. A resistência à tração diminui à medida que se aumenta a quantidade de borracha. Nos trabalhos de TOPÇU (1994), as maiores perdas foram para as adições volumétricas de 45% de borracha. Estas perdas percentuais podem ser vistas na tabela 2.7.

Ao se analisar estes dados, vê-se que a resistência à flexão teve maiores perdas. É claro que ao se avaliar os resultados deve-se levar em conta a forma como a borracha foi introduzida: neste caso 15%, 30% e 45% em relação ao volume. A borracha utilizada nesta pesquisa é de pneu triturado granularmente e peneirado separando nas devidas graduações a serem peneiradas. As graduações são: 0 - 1 (mm) borracha fina e 1 - 4 (mm) borracha grossa.

Tabela 2.7 – Comparação entre as perdas tração-compressão, segundo TOPÇU (1994).

Tipo de borracha	Ensaio de compressão	Ensaio de Flexão
Fina	37%	64%
Grossa	57%	74%

TOUTANJI (1995) fez substituições de agregados graúdos nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100% em relação ao volume. Os ensaios apresentaram resultados que podem ser vistos na tabela 2.8 a seguir:

Tabela 2.8 – Resultados dos ensaios de TOUTANJI (1995).

Quantidade de Borracha (%)	Compressão (MPa)	Tração na Flexão (MPa)
0	31,9	3,8
25	19,6	3,5
50	13,8	3,1
75	9,9	2,8
100	7,5	2,4

As perdas percentuais foram de 38,56%, 56,74%, 68,97% e 76,49% para as substituições de 25%, 50%, 75% e 100% respectivamente em relação ao concreto de referência, para a resistência à compressão. Para a resistência à tração, as perdas foram de 7,89%, 18,42%, 26,32% e 36,84%. A relação tração/compressão pode ser vista como sendo de 11,91%, 17,86%, 22,46%, 28,28% e 32,00%. Como se pode ver, a relação tração/compressão aumenta à medida que aumenta a quantidade de borracha. Com isso pode-se concluir que o fato de se ter perdas excessivas na resistência à compressão, não acarreta os mesmos níveis de perdas em outras propriedades.

### 2.3.3 Módulo de Elasticidade

Pelos trabalhos de TOPÇU (1994), observando-se os gráficos da figura 2.2 de tensão-deformação, vê-se que a tensão máxima ocorre em torno de 3,5%, com a adição de borracha; muito embora os concretos confeccionados com borracha fina tenham apresentado maior rigidez que aqueles confeccionados com borracha grossa. Neste gráfico, NC significa concreto normal (normal concrete), FR significa borracha fina (fine rubber), CR, borracha grossa (coarse rubber) e os valores 15, 30 e 45 são os percentuais de borracha substituída.

Segundo TOPÇU & AVCULAR (2002), a variação média nos valores do módulo de elasticidade é de 7% para os concretos com 15%, 30% e 45% de adição de borracha fina; mesmo quando analisados para diferentes agregados. Já quando utilizada borracha grossa a variação média é de 15% para os mesmos percentuais utilizados, também se verificando com diferentes agregados.

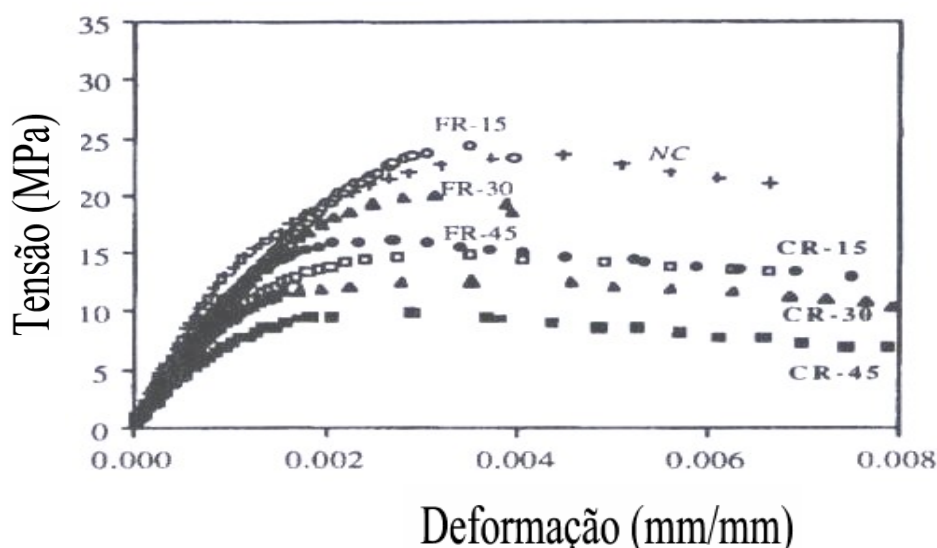


Figura 2.2 – Gráfico tensão-deformação para CAB em diversas dosagens (TOPÇU, 1994).

A maior dificuldade para a aplicação do concreto em pavimento rodoviário é o seu comportamento rígido e sua retração que provoca fissuras nas primeiras idades (HERNADEZ – OLIVARES et al, 2002). Segundo estes autores, o pavimento em concreto é barulhento devido ao alto módulo de YOUNG e a baixa viscosidade plástica. Assim, para eles, as fissuras plásticas podem ser evitadas com porções de fibras curtas de polipropileno (0,1%). Porém, o pavimento ainda se mantém muito rígido. Deste modo, propuseram a adição de fibras de borrachas de pneus inservíveis. Com isso, observaram que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da quantidade de borracha. É observado, ainda, que quando a tensão máxima é atingida, as fibras de borracha colaboram para evitar a propagação das fissuras. Desta forma, aumenta a energia absorvida pela deformação, aumentando a tenacidade, diminuindo a sonoridade.

### 2.3.4 – Resistência ao Impacto

Para TOPÇU (1994), uma das formas de aplicação do CAB é em estruturas que são submetidas ao impacto. Isto é possível por que se observa que o CAB tem grande capacidade de absorver energia. TOPÇU & AVCULAR (1997) verificaram o comportamento do CAB sob esforços de colisão. Em seus ensaios, um corpo-de-prova cilíndrico com dimensões de 20 cm de altura por 10 cm, recebeu impacto de um martelo de 65 kg caindo de uma altura de 650 mm, até a ruptura do elemento ensaiado. O ensaio foi

efetuado para concretos com 0%, 15%, 30% e 45%. O CAB com 15% de borracha apresentou mais eficiência, mesmo quando comparado com o concreto sem borracha.

O ensaio de resistência ao impacto é tido como um ensaio atípico por FERREIRA JR. (1992), muito embora a resistência ao impacto seja uma das principais propriedades a serem analisadas nos estudos de materiais compósitos. Como exemplo, cita-se o trabalho de KOBUKI et al (2002), que trata da influência da resistência ao impacto na fratura interlaminar de compósitos de fibra de vidro reforçado com polímeros. BAHEI-EL-DIN et al (2002), em seus estudos sobre os campos de deformação de impacto induzido em compósitos celulares em 3D, puderam concluir que sistemas porosos podem dissipar mais energia de impacto que sistemas não porosos.

Durante um impacto, uma força é aplicada num tempo infinitamente pequeno. Assim, é fundamental que o material que compõe o elemento impactado tenha capacidade de sofrer deformações localizadas antes de transferir o esforço ao resto da estrutura. Esta deformação pode ser elástica ou plástica. Na deformação elástica há a recomposição da região do impacto, enquanto na plástica a região de impacto fica danificada. Em ambos os casos este mecanismo funciona como um amortecedor, absorvendo a energia cinética do elemento impactante.

É usual dividir a discussão sobre a resistência ao impacto em duas categorias: de baixa resistência e de alta resistência (THANOMSILP & HOGG, 2002). Sob baixa resistência, o compósito é danificado mais ainda possui capacidade de desenvolver suas funções primárias. A posição e a natureza das fissuras que ocorrem numa dada placa são bastante dependentes da geometria do elemento ensaiado. Quando uma placa é submetida à baixa energia de impacto, ocorrem fora do plano de impacto, deformações de flexão. Isto induz ambas as tensões: cisalhante ao centro e tração e compressão no fundo e no topo respectivamente. A relação comprimento/espessura rege a grandeza dessas tensões.

Segundo BAO *et al* (2002), a técnica de ensaio de resistência ao impacto de contato com esfera é usual para a avaliação da fragilidade de materiais cerâmicos. Os mesmos produziram testes de impacto, deixando uma bola de aço cair livremente sobre a superfície de uma amostra. Neste caso, a velocidade de impacto depende da altura inicial.

FERREIRA JR. (1992), através de seu ESTUDO TÉCNICO 96 para a ABCP, apresenta um ensaio que consiste na queda de uma esfera de massa conhecida sobre o centro de um elemento prismático, dimensões de 30 cm por 30cm com 7,5 cm de espessura, assentado sobre um colchão de areia. O resultado é a energia em Joules necessária para provocar fissuras. KAZMIERCZAR *et al* (2002), fazendo-se uso do projeto de 2:02.10.084 – Piso Cerâmico: Determinação da Resistência ao Impacto, Método de Ensaio da ABNT, estudaram a viabilidade de resíduos de contraforte termoplásticos provenientes da indústria coureiro-calçadista. Observou-se que na pesquisa supracitada, utilizaram-se placas confeccionadas com um compósito formado por uma matriz de gesso e resíduos de contraforte. Fundamentalmente, para cada teor de contraforte adicionado, confeccionaram-se três placas.

Este ensaio consiste na determinação da resistência ao impacto de um corpo-de-prova, submetido a sucessivas quedas de uma de uma esfera de aço, observando-se o surgimento de fissuras. O impacto é provocado a cada 5 cm, tendo como altura inicial 15 cm e altura máxima 200 cm. O ensaio acaba quando for observada fissura no fundo ou quando é atingida a altura máxima. A energia de impacto é dada em Joules, segundo a equação 2.1 a seguir:

$$E_i = mgh_i \quad (2.1)$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = mg \sum_{i=1}^n h_i \quad (2.2)$$

Onde:

$E_i$  é a energia de impacto em J para cada impacto;

$E$  é a energia de impacto total, em J, para cada elemento ensaiado;

$m$  é a massa da esfera de impacto em kg;

$g$  é a aceleração de gravidade em ( $m/s^2$ );

$h$  é a altura em cada impacto provocado em cm;

$n$  é o número máximo de impactos provocados; e

$i$  é o índice do impacto.

### 2.3.5 – Flexão de placas

A ASTM C78-94 apresenta os procedimentos de ensaio de flexão de placas, onde os elementos de ensaios têm dimensões de 25 cm de comprimento, 5 cm de largura por 2,5 (cm). O método de ensaio é semelhante àquele realizado para flexão de prismas, sendo que a velocidade é reduzida à metade. Este ensaio foi utilizado por KAZMIERCZAR *et al* (2002), também para verificar o comportamento de compósito de gesso com resíduos de contraforte termoplásticos provenientes da indústria coureiro-calçadista. Foram moldados, neste caso, três corpos-de-prova para cada teor de resíduo.

Com o objetivo de estudar a argamassa com vermiculita e látex como material para almofada de ligações entre elementos pré-moldados, BARBOZA *et al* (2001) estudaram a resistência à flexão de placas com 47 cm de comprimento, 17 cm de largura e 10 cm de espessura. Aqui se usou distância entre apoios de 44 cm e as cargas foram aplicadas no terço médio, provocando flexão pura. A figura 2.3 ilustra o ensaio de flexão feito por BARBOSA *et al* (2001).

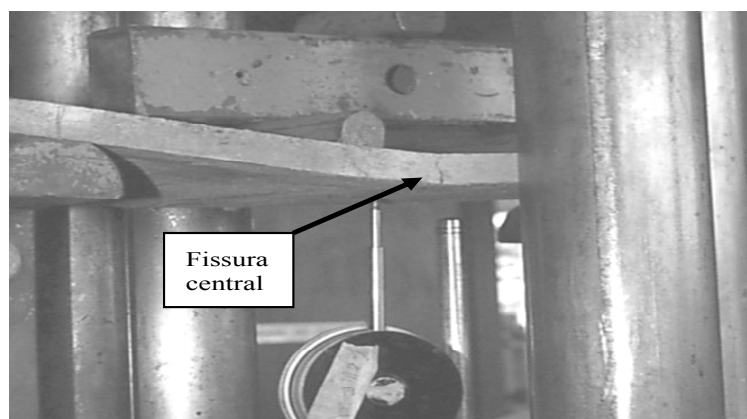


Figura 2.3 – Ensaio de flexão de placas (BARBOZA *et al*, 2001).

Analisando a reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento, SEGRE (1999) fez ensaios de flexão de elementos prismáticos de 49 mm de comprimento e seção transversal de 10 mm x 9 mm, apoiada em cutelos distanciados de 40 mm. Em função da espessura da placa, não é considerável ruptura fora do terço médio. A figura 2.4 mostra o esquema de ensaio deste trabalho, onde se verifica que foi provocado um entalhe no meio do elemento flexionado que objetivou induzir a fissura para o ponto entalhado. A autora relata que a pasta contendo borracha tratada em solu-

ção alcalina de NaOH e borracha sem tratamento obteve melhora significativa, quando comparadas à pasta de controle. Isto significa que mesmo que algumas propriedades do concreto sejam prejudicadas, existem formas de melhoramento.

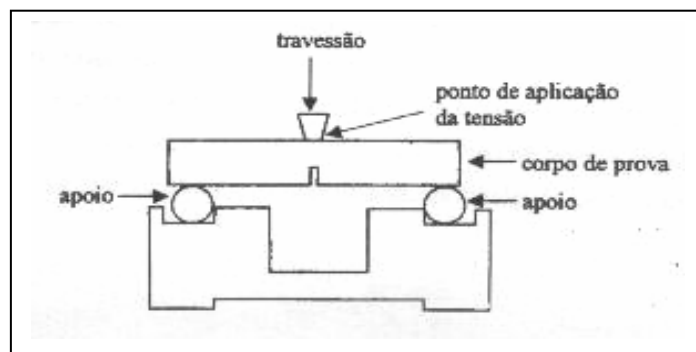


Figura 2.4 – Esquema de ensaio de flexão de SEGRE (1999).

O mercado de artefatos de Maceió apresenta uma grande variedade de placas para piso. Porém, as placas de 50 cm por 20 cm e 3 cm são dominantes, sendo as adotadas para este trabalho.

## 2.4 – Durabilidade

Existem diversos fatores que influenciam a durabilidade do concreto. O principal deles é a relação água/cimento ( $a/c$ ). Uma alta taxa  $a/c$  produz no concreto uma malha de vazios interligados que servem de vias de acesso e condução interna para agentes que deterioram a estrutura molecular do concreto. A absorção d'água é um dos índices de qualidade do concreto. Com ela é possível avaliar a tendência à deterioração gradativa que o concreto pode sofrer. A ABNT apresenta duas formas de se medir a absorção d'água do concreto: absorção por capilaridade (NBR, 9779) e absorção por imersão (NBR, 9778). Além disso, a quantificação da absorção também é muito importante para se avaliar a eficiência de qualquer adição ao concreto. Muito embora, esta absorção de água pelo concreto possa ser apenas minimizada e jamais abolida.

Para BAUER et al (2002), a diferença percentual entre a quantidade de água absorvida entre o concreto de referência e o CAB com 15% de borracha foi 7% negativos. Para o concreto contendo 30%, a diferença percentual foi de 25% negativos. Este percentual negativo indica uma absorção menor por parte do CAB. Logo, isto significou



uma diminuição na quantidade de água absorvida, à medida que o teor de borracha aumentou. Sob imersão, o CAB foi menos eficiente que o concreto convencional, apresentando uma diferença entre os valores percentuais de 28% e 90% para os CAB com 15% e 30% de borracha, respectivamente. Isto significa dizer que em meio saturado a durabilidade do concreto pode ser menor.

Investigando a estabilidade da borracha incorporada ao concreto, HUYNH & RAGHAVAN (1997) fizeram testes com fibras de borracha em soluções alcalinas com pH entre 10 e 12, para determinado intervalo de tempo, assim discorreram o seguinte:

1. As fibras de borracha sofreram poucas mudanças quando mergulhadas em meio com alta alcalinidade. A pequena mudança sofrida foi proporcional à pequena variação no pH da solução.
2. Houve uma redução na capacidade de resistir a esforços de tração após quatro meses em solução química.
3. Não foi apresentada mudança na microestrutura quando observada através de micrografia computadorizada.

Conclui-se, assim que o CAB tem potencial de aplicação, porém nos casos específicos deve-se analisar ainda o comportamento da borracha em meios ácidos e sulfatados.

## **2.5 – Trabalhabilidade**

O conceito de trabalhabilidade está intimamente ligado à facilidade de manipulação. Neste contexto, a forma de se medir a trabalhabilidade pode transmitir uma idéia contraditória, pois um concreto que serve para moldar uma viga não serve para pavimentar uma pista de rolamento. Pois, enquanto neste exige-se um concreto de consistência seca, naquele exige-se um concreto de consistência fluida. Ou seja, depende da forma de adensamento empregada.

Como um ensaio universal da trabalhabilidade, o ensaio de abatimento do tronco de cone, foi muito empregado na medição da trabalhabilidade do CAB. Intuitivamente, espera-se que haja uma diminuição na trabalhabilidade do concreto quando se adiciona a borracha, em função do atrito interno que a borracha vai provocar. Principalmente para as fibras, uma vez que para MEHTA & MONTEIRO (1994), independentemente do tipo de fibra, a perda na trabalhabilidade é inversamente proporcional à concentração

volumétrica de fibras no concreto. Porém, com utilização de aditivos pode minimizar os efeitos do atrito que a borracha introduz. Nos experimentos de BAUER *et al* (2002), verifica-se um aumento na trabalhabilidade de 17% quando se adicionam 15% de borracha, comparando-se com o concreto de referência. Já quando são adicionados 30% de borracha não se verifica variação na trabalhabilidade de concreto em relação ao concreto de referência. AKASAKI *et al* (2002) demonstraram que uma variação no teor de fibras de borracha de 13% para 25% ocorre uma diminuição na trabalhabilidade de até 33% mesmo quando a relação água/cimento é aumentada de 0,69 para 0,81.

## Capítulo 3

# Avaliação do Comportamento do Concreto com Adição de Borracha

Verificou-se que uma das principais preocupações dos pesquisadores, para com o CAB foi caracterizar as suas propriedades mecânicas. Verificou-se, ainda, que existe um cuidado com as propriedades das fibras de borracha, ou com a granulometria da borracha a ser inserida no concreto. Assim, busca-se neste capítulo, apresentar a metodologia e os procedimentos utilizados para investigar o CAB, bem como a fibra de borracha utilizada. Inicialmente foi efetuada uma caracterização dos elementos constituintes do concreto, incluindo a borracha a ser adicionada. Fez-se, em seguida, um estudo da dosagem escolhida, onde foram executados ensaios chamados de ensaios iniciais. Numa etapa subsequente, foi desenvolvida uma experimentação para avaliar o CAB com a dosagem escolhida, procurando verificar os resultados obtidos nos ensaios iniciais. Estes ensaios foram chamados de ensaios de confirmação.

### 3.1 – Caracterização dos materiais

#### 3.1.1 – Coleta de materiais

No processo de recauchutagem, para receber a nova capa de borracha, o pneu sofre uma raspagem através de um cilindro de aço corrugado (figura 3.1). Este material se espalha pelo chão da fábrica (figura 3.2), que em seguida é recolhido através de uma mangueira de sucção (figura 3.3), para uma câmara (figura 3.4) onde é mantido até juntar quantidade suficiente para ser-lhe dado um destino. Os resíduos que ficam nas regiões onde a mangueira não alcança são recolhidos manualmente e armazenados em tambores (figura 3.5).

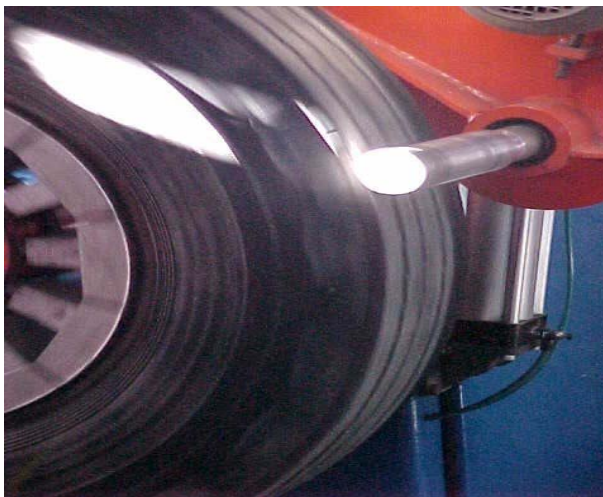


Figura 3.1 – Processo da raspagem.



Figura 3.2 – Material no chão da fábrica.



Figura 3.3 – Material sendo aspirado.



Figura 3.4 – Material na câmara.



Figura 3.5 – Material no tambor.

Como pode ser visto nas figuras 3.2, 3.4 e 3.5, dentro da fábrica, o material pode estar ocupando três locais diferentes, no chão da fábrica, em tambores que ficam no pátio e numa câmara com entrada lateral. Assim, escolheu-se pegar em dois locais: no chão do pátio da fábrica e na câmara, pois nestes locais pode-se efetuar a coleta com facilidade. Desta forma procedeu-se a coleta.

### **3.1.2 – Análise granulométrica**

Com este material formaram-se duas amostras: uma amostra AM1 proveniente do chão do pátio e uma amostra AM2 proveniente da câmara. Com cada uma das amostras fizeram-se uma análise granulométrica obtendo-se a tabela 3.1 e o gráfico da figura 3.6 para a amostra AM1 e a tabela 3.2 juntamente com o gráfico da figura 3.7 para a amostra AM2.

Tabela 3.1 – Composição granulométrica da amostra AM1.

Peneira	Abertura (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
4	4,76	31,43	31,43
8	2,38	14,29	45,71
9	2,00	8,57	54,28
14	1,19	22,86	77,14
20	0,84	8,57	85,71
28	0,59	8,57	94,28
48	0,2*	5,71	100
fundo	0,00	0,00	100

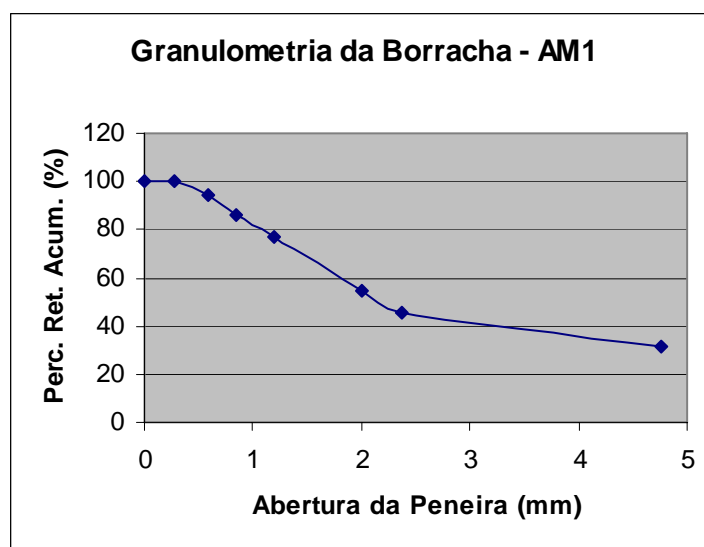


Figura 3.6 – Distribuição granulométrica da borracha – AM1

Tabela 3.2 – Composição granulométrica da amostra AM2.

Peneira	Abertura (mm)	Retido (%)	Acumulado (%)
4	4,76	17,65	17,65
8	2,38	5,88	23,56
9	2,00	2,94	26,47
14	1,19	20,59	47,06
20	0,84	23,53	70,59
28	0,59	11,76	82,35
48	0,29	17,65	100
fundo	0,00	0,00	100

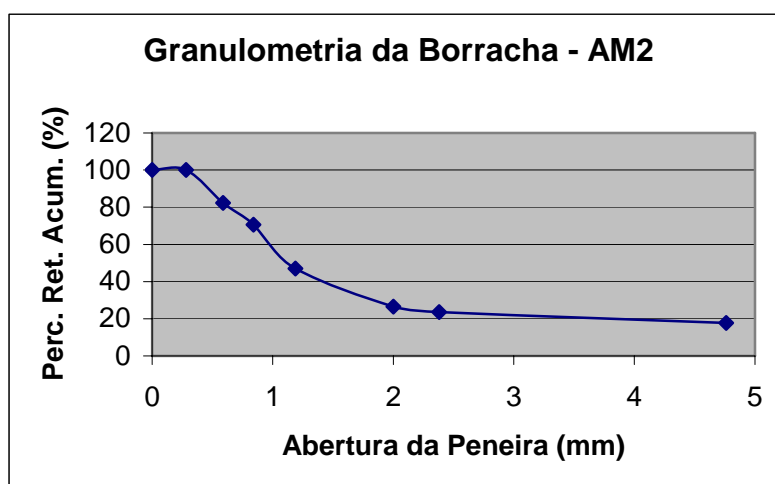


Figura 3.7 – Distribuição granulométrica da borracha – AM2

Observando-se os gráficos da análise granulométrica, verifica-se que há uma maior quantidade de material retido na peneira 48 de abertura 0,28mm (17,65%) para a amostra AM2, que para a amostra AM1: 5,71%. Assim, constata-se que o material da câmara é mais fino que o do chão da fábrica. Fazendo-se uma análise da forma, verifica-se que as fibras de borracha possuem uma relação comprimento/diâmetro (relação de aspecto)  $C/d = 8$ . Esta relação se faz importante para complementar à análise granulométrica tendo em vista tratar-se de fibras.

Outra forma de complementar a análise granulometria é a análise fotográfica, que resultou na figura 3.8 (material retido na peneira de abertura 4,76 mm), figura 3.9

(material retido na peneira de abertura 2,38 mm), figura 3.10 (material retido na peneira de abertura 2,00 mm), figura 3.11 (material retido na peneira de abertura 1,19 mm), figura 3.12 (material retido na peneira de abertura 0,84 mm), figura 3.13 (material retido na peneira de abertura 0,59 mm) e figura 3.14 (material retido na peneira de abertura 0,29 mm).



Figura 3.8 – Material retido na peneira de abertura 4,76 mm.



Figura 3.9 – Material retido na peneira de abertura 2,38 mm.



Figura 3.10 – Material retido na peneira de abertura 2,00 mm.





Figura 3.11 – Material retido na peneira de abertura 1,19 mm.



Figura 3.12 – Material retido na peneira de abertura 0,84 mm.



Figura 3.13 – Material retido na peneira de abertura 0,59 mm.

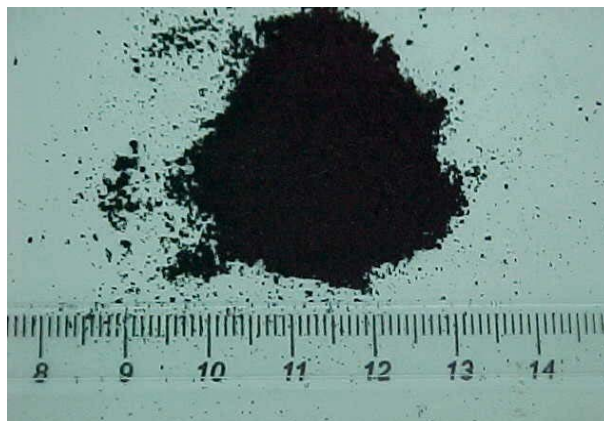


Figura 3.14 – Material retido na peneira de abertura 0,30 mm.

Fez-se, ainda, uma análise de fotografia microscópica, com um maior detalhamento da granulometria, utilizando-se o microscópio NIKON ECLIPSE E200 do Laboratório de Derivados da Cana de Açúcar (LDCA) do Departamento de Engenharia Química, situado no Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT). Para a análise microscópica, fez-se o espalhamento do material em uma lâmina de vidro, formando uma película. A imagem é projetada em tela de vídeo e congelada para ser investigada previamente. Estando na situação desejada, faz-se a fotografia, armazenando diretamente no computador acoplado.

Com isso, geraram-se as seguintes figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19.



Figura 3.15 – Material retida na peneira de abertura 0,50 mm aumentado de 40 vezes.

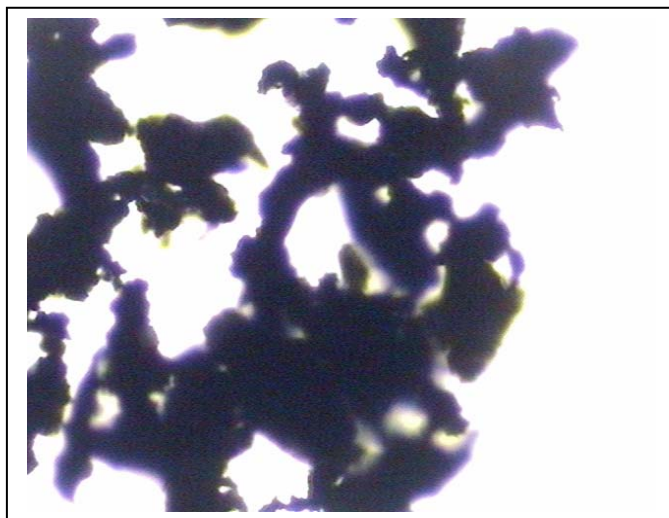


Figura 3.16 – Material retido na peneira de abertura 0,30 mm aumentada de 100 vezes.

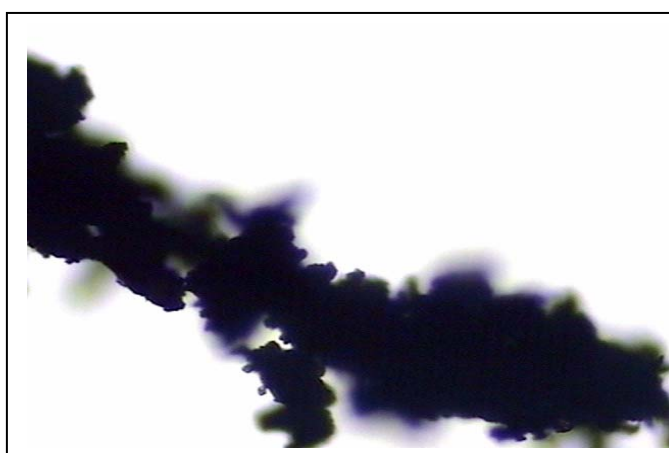


Figura 3.17 – Material retido na peneira de abertura 0,15 mm. aumentada de 100 vezes.

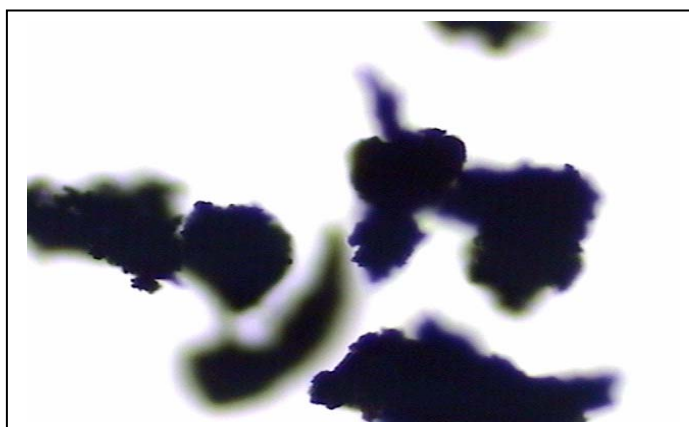


Figura 3.18 – Material retido na peneira de abertura 0,11 mm aumentada de 100 vezes.

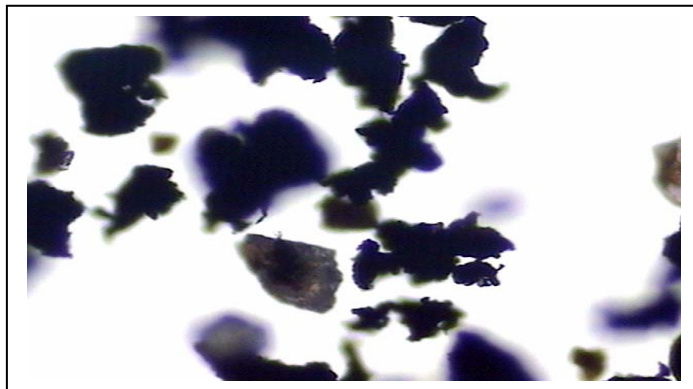


Figura 3.19 – Material no fundo aumentado 100 vezes.

Isto permitiu observar-se que o material passante na peneira de abertura 0,59 mm também é bastante heterogêneo nos tamanhos e nas formas, se aproximando de um pó. Porém, esta parcela do resíduo pode prejudicar a sua análise como fibra, por isso adotou-se trabalhar apenas com estes materiais.

### **3.1.3 – Outras propriedades da borracha**

#### **3.1.3.1 – Temperatura de fulgor**

Uma das preocupações importantes para o concreto com adições de borracha se refere ao seu comportamento quando submetido a altas temperaturas, para avaliar a possibilidade de um processo de combustão ser desencadeado. Neste caso, a fibra escolhida foi avaliada em relação a sua temperatura de fulgor.

A temperatura de fulgor foi obtida mantendo-se três amostras (am1, am2 e am3), com massa de aproximadamente 45 g cada, a uma temperatura de 100°C por uma hora, em estufas diferentes. Em seguida, fez-se variar a temperatura de cada uma de 10°C em 10°C até a temperatura de 140°C. A cada variação, as amostras passavam uma hora na temperatura atingida, e ao fim do período analisava-se a textura e o cheiro exalado. Após 4 h, a amostra am1 foi mantida a temperatura de 140°C. Fez-se variar ainda a temperatura das outras duas amostras para 150°C e 160°C onde se manteve a temperatura da amostra am2 constante. A amostra am3 teve ainda a sua temperatura variada para 170°C e 180°C onde foi mantida constante. Sempre, em cada temperatura atingida a amostra passava 1 h e, ao final do período era verificada a sua textura.

A amostra am1, submetida a 140°C durante 18 h, não apresentou alteração em sua textura nem apresentou cheiro de alteração química. A amostra am2, submetida à temperatura de 160°C durante 16 h, apresentou amolecimento, mas não apresentou cheiro que representasse alteração química. Ao resfriar sua textura voltou ao normal. Assim,

definiu-se a temperatura de amolecimento como sendo de 160°C. A amostra am3, submetida à temperatura de 180°C durante 14 h, apresentou textura de material carbonizado, demonstrando queima total. Verificou-se que nem a estufa, nem o recipiente da amostra apresentaram fuligem, comuns a queima de borracha, demonstrando, assim, que a combustão se deu de forma lenta, sem a formação de chamas. Visualmente o material queimado não apresentou diferença em relação ao material não-queimado (ver figuras 3.20 e 3.21); porém uma análise tátil mostra que a amostra se torna áspera e quebradiça. Definiu-se, então, que a temperatura de fulgor se encontra entre 160°C e 180°C.



Figura 3.20 – Material não-queimado.



Figura 3.21 – Material queimado.

### 3.1.3.2 – Massa unitária e massa específica.

A massa unitária da borracha foi determinada pela NBR 7251 – agregado em estado solto, determinação da massa unitária, chegando-se a um valor igual a  $0,3 \text{ kg/dm}^3$ . A massa específica foi determinada seguindo os procedimentos descritos na antiga norma NBR 9776/1987 – agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Porém, no lugar da água, utilizou-se a querosene, num volume de  $(400,0 \pm 0,5) \text{ dm}^3$  e as amostras foram de 23,98 g e 22,73 g de massa. Optou-se por utilizar a querosene porque a sua baixa massa específica ( $0,786 \text{ g/cm}^3$ ) permite a total decantação do material suspenso (ver figura 3.22). Da mesma forma do ensaio com areia, a borracha demonstrou aprisionamento de ar no bulbo inferior (figura 3.23). Logo, com uma agitação contínua e demorada, buscou-se eliminar as bolhas de ar até a total estabilização do nível, obtendo-se o valor médio para a massa específica de  $1,14 \text{ g/cm}^3$ .



Figura 3.22 – Material decantando.



Figura 3.23 – Material com ar aprisionado.

### 3.1.4 – Agregados

Como agregado miúdo utilizou-se a areia de rio lavada, quartzosa, comumente comercializada em Maceió, sendo proveniente do Município de Murici/AL e extraído do Rio Mundaú. Suas características físicas determinadas foram as seguintes: massa

específica e massa aparente (NM 64:1996), absorção d'água (NM 30:2000) composição granulométrica (NM 48:2001), materiais pulverulentos (NBR 7219/1987), impurezas orgânicas (NBR NM 49:2001) e teor de torrões de argila e materiais friáveis (NBR 7218/1987).

Como agregado graúdo, utilizou-se a pedra britada de origem granítica comercializada em de Maceió como brita 0, proveniente de uma jazida e pedreira localizada no Município de Rio Largo/AL. Suas características físicas determinadas foram as seguintes: massa específica e massa aparente (NM 53:2002), absorção d'água (NM 64:1996), massa unitária no estado solto e compactado seco (NBR 7810/1983), índice de forma pelo método do paquímetro (NBR 7809/1983), composição granulométrica (NM 48:2001) e teor de torrões de argila e materiais friáveis (NBR 7218/1987).

As amostras foram especificadas segundo a NBR 7211/1983 e obtidas segundo a NBR NM 26:2001 – Amostragem de agregados – procedimentos e NBR NM 27:2001 – Redução de amostras de campo de agregados para ensaio em laboratório.

Verificou-se que a areia se enquadrou como areia média e que a brita não se enquadrou como nenhuma daquelas normalizadas, sendo assim chamada de brita 12,5 mm. As propriedades caracterizadas, com as respectivas normas estão resumidas na tabela 3.3. Pode-se ainda destacar a distribuição granulométrica da areia em enquadramento nos limites da norma (figura 3.24); além da distribuição granulométrica da areia comparando-se com a da brita no gráfico da figura 3.25 e na tabela 3.4 a seguir:

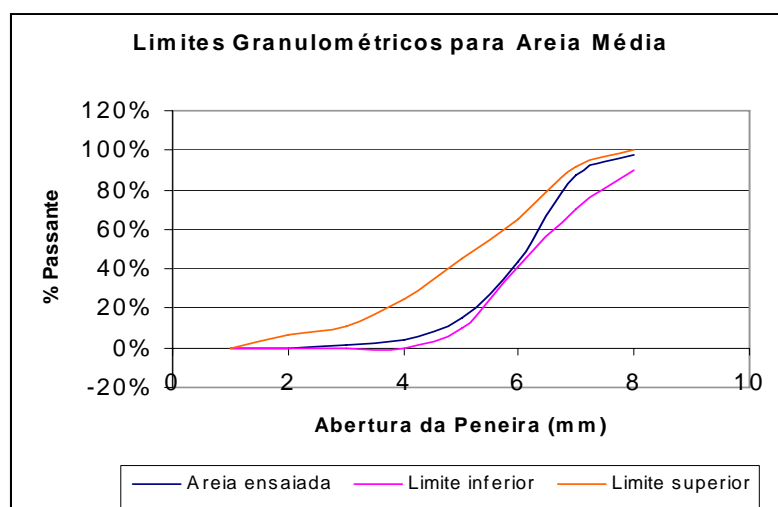


Figura 3.24 – Distribuição granulométrica e enquadramento da areia como média.

Tabela 3.3 – Propriedade característica do agregado.

Propriedade	Areia	Brita
Massa específica (kg/cm <sup>3</sup> ) (NM 52:2003) e (NM 53:2002)	2,611	2,650
Massa unitária no estado solto (kg/cm <sup>3</sup> ) (NM 52:2003) (NBR 7810/1983)	1,449	1,381
Massa unitária no estado compactado seco (kg/cm <sup>3</sup> ) (NBR 7810/1983)	-	1,456
Absorção d'água (%) (NM 30:2000) (NM 64:1996)	0,60	0,82
Teor de material pulverulento (%) (NBR 7219/1987)	1,32	0,59
Impurezas orgânicas húmicas (ppm) (NBR 7220/1987)	250	-
Índice de forma (NBR 7809/1983)	-	2,21
Diâmetro máximo (mm) (NM 48:2001)	2,4	12,5
Graduação granulométrica (NBR 7211/1983)	média	-
Módulo de finura (NM 48:2001)	2,492	6,105

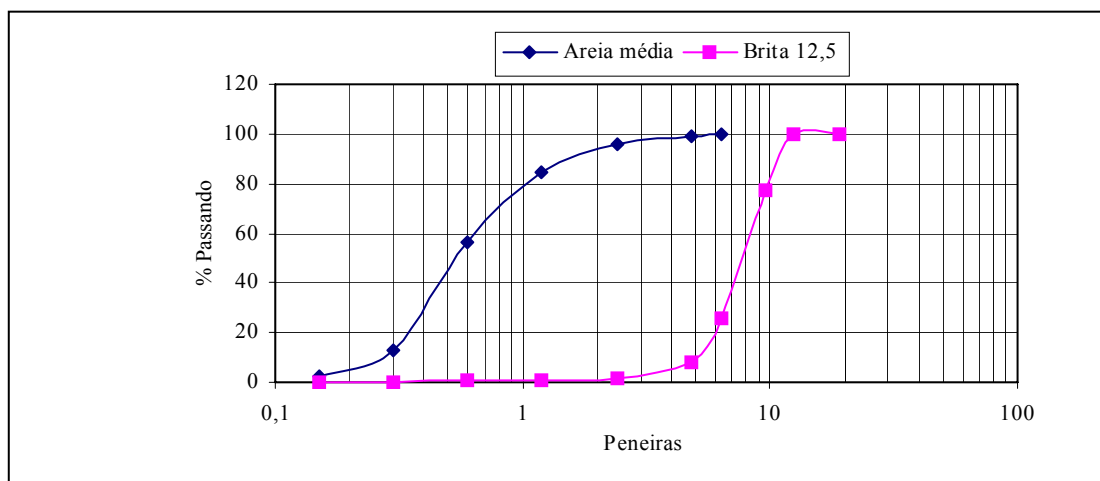


Figura 3.25 – Distribuição granulométrica da areia e da brita.



Tabela 3.4 – Composição granulométrica da areia.

Peneira # (mm)	Areia		Brita	
	% Retida	% R. Ac.	% Retida	% R. Ac.
12.5	0,0	0,0	0,4	0,4
9.5	0,0	0,0	22,0	22,4
6.3	0,0	0,0	51,7	74,1
4.8	1,0	1,0	17,5	91,6
2.4	3,0	4,0	7,0	98,6
1.2	11,0	15,0	0,5	99,1
0.6	28,0	43,0	0,3	99,4
0.3	44,0	87,0	0,2	99,6
0.15	11,0	98,0	0,2	99,8
Fundo	2,0	100,	0,2	100,0
Soma	100,0	349,0	100,0	785,0
Módulo de finura:	2,49		6,105	
Diâmetro máximo:	2.4 mm		12,5 mm	

### 3.1.5 – Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP II-Z-32, cujas especificações foram obtidas junto ao fabricante, sendo apresentadas nas tabelas 3.5 (características químicas) e 3.6 (características físicas), ambas obtidas junto ao fabricante. Este cimento foi escolhido por ser muito comum as obras usuais no mercado da construção civil de Maceió.

Ainda utilizou-se o aditivo superplastificante FLUISTEK HAGEN da HAGEN do Brasil. Este aditivo apresentou densidade de  $1,18 \text{ kg/dm}^3$  de cor castanho-escuro, com utilização por peso de cimento de 0,5% a 0,8%.

Tabela 3.5 – Características químicas do cimento, dados do fabricante.

Especificação	Resultado de ensaio (%)
Perda ao fogo – PF	3,68
Dióxido de silício – SiO <sub>2</sub>	22,17
Óxido de alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5,64
Óxido de ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,11
Óxido de cálcio total- Cal	56,28
Óxido de magnésio – MgO	4,54
Anidrido sulfúrico – SO <sub>3</sub>	2,90
Óxido de sódio – Na <sub>2</sub> O	0,10
Óxido de potássio – K <sub>2</sub> O	1,89
Anidrido carbônico – CO <sub>2</sub>	2,49
Resíduo insolúvel – RI	9,52
Óxido de cálcio livre – Cal livre	0,79

## 3.2 – Estudo da dosagem

### 3.2.1 – Determinação da dosagem de referência

A dosagem do concreto de referência foi obtida para um concreto de classe C30, segundo os procedimentos do ACI 211.1-91, pelos passos sugeridos por NEVILLE (1997). Dentre os parâmetros de dosagem foi exigida uma trabalhabilidade 200 mm de abatimento, para uma melhor moldagem de elementos de 30 mm de espessura. Observou-se que o consumo de cimento foi bastante elevado. Porém, para GIOVANETTI (1989), para um concreto com trabalhabilidade acima de 150 mm, é exigido um consumo de finos acima de 400 kg/m<sup>3</sup>. Este consumo de cimento poderia ser diminuído com a utilização de um filer, porém seria mais uma variável a ser analisada, fugindo da proposta inicial. As proporções podem ser vistas na tabela 3.7. Observou-se que com esta dosagem o concreto ficou com um peso de 2324,61 kg/m<sup>3</sup>. Assim, verifica-se que com esta massa unitária o concreto ficou como um concreto convencional, ou concreto de peso normal; pois para NEVILLE (1997), um concreto é considerado de peso normal se a sua massa unitária fica entre 2200 kg/m<sup>3</sup> e 2600 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.6 – Características físicas do cimento, dados do fabricante.

Especificação	Resultado de ensaio
Finura – peneira 75 $\mu$ m	3,3%
Finura – peneira 150 $\mu$ m	13,3%
Massa específica	3,04 g/cm <sup>3</sup>
Área específica	371 m <sup>2</sup> /kg
Água da pasta de consistência normal	29,9%
Tempo de início de pega	190 min
Tempo de fim de pega	255 min
Expansibilidade de Lê Chatelier a quente	0,5 mm
Resistência à compressão (1 dia)	15,9 MPa
Resistência à compressão (3 dia)	24,0 MPa
Resistência à compressão (7 dia)	27,8 MPa
Resistência à compressão (28 dia)	34,5 MPa

Tabela 3.7 – Dosagem do concreto segundo os procedimentos do ACI 211.1-91

Material	kg/m <sup>3</sup>	kg/kg
Cimento	485,1	1,00
Areia	764,71	1,61
Brita	846,8	1,75
Água	228,0	0,47
Ar aprisionado	2,5%	-

Como o objetivo do trabalho é estudar o comportamento do concreto com borra-cha por comparação com um concreto de referência e não com o concreto de uma classe de concreto específica, o ajuste se deu pela trabalhabilidade, onde se fez variar o fator água/cimento (a/c) de modo a proporcionar a trabalhabilidade desejada: entre 180 mm e 220 mm no ensaio de abatimento do tronco de cone. As proporções se encontram na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Dosagem do concreto após ajuste.

Material	kg/m <sup>3</sup>	kg/kg
Cimento	478,15	1,00
Areia	753,74	1,58
Brita	834,65	1,75
Água	239,07	0,50

### 3.2.2 – Estudo da dosagem do concreto com adição de borracha

O estudo da dosagem das adições de borracha se deu seguindo-se dois métodos: analisando o comportamento do concreto diante de valores extremos: 0,4% e 4,0% em relação ao peso total de material seco, com as proporções descritas na tabela 3.9 e analisando-se o comportamento do concreto com borracha nos teores de 1%, 2% e 3% (tabela 3.10) em relação ao peso de cimento, com igual teor de aditivo. Estes teores foram adotados porque os teores máximo e mínimo, para o nylon, que melhor se aproxima da borracha, para o ACI committee 544 apud NAWY (1996), ficaram nesta ordem de grandeza (entre 2% e 5% do peso de cimento). No entanto, decidiu-se trabalhar com os teores de 0,4% e 4,0% para se ter uma escala bem definida: um fator de 10. Ao fim, fez-se um confronto dos resultados para observar o comportamento geral.

Tabela 3.9 – Dosagem do concreto com borracha .

Material	CB 0,4% (kg/m <sup>3</sup> )	CB 4,0% (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	474,31	441,53
Areia	747,69	696,02
Brita	827,96	770,74
Água	242,55	220,76
Borracha	8,92	83,03
Aditivo	0,00	2,21

Tabela 3.10 – Dosagem do concreto após ajuste

Material	CAB 1% (kg/m <sup>3</sup> )	CAB 2% (kg/m <sup>3</sup> )	CAB 3% (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	476,15	474,17	472,21
Areia	750,59	747,47	744,36
Brita	831,17	827,71	824,28
Água	238,08	237,09	236,10
Borracha	4,64	9,7027	13,81
Aditivo	1,11	1,11	1,10

### 3.2.3 – Ensaios iniciais – Propriedades mecânicas

Para esta etapa foram utilizadas as seguintes normas NM 101:1996 – Concreto, ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos; NBR 8522 – Concreto, determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação; NM 008:1994 – Argamassa e Concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Foram moldados 12 corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, distribuído da seguinte forma: 6 para resistência à compressão, 4 para módulo de elasticidade e dois para resistência à tração na compressão diametral. Os ensaios foram executados aos 28 dias e os resultados, em valores médios, para resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de deformação longitudinal são descritos na tabela 3.11. O abatimento de tronco de cone e o teor de ar incorporado, juntamente com a relação tração compressão são descritos na tabela 3.12. A discussão dos resultados através dos percentuais, inclusive da resistência à tração em relação à compressão, se encontram na seção 3.2.4 deste capítulo. Os gráficos do comportamento da força com a deformação, dos ensaios de resistência à compressão, se encontram no apêndice.

Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas.

Concreto	Compressão (MPa)		Tração (MPa)		Módulo (MPa)	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
Referência	30,50	0,95	4,00	0,46	24927	441,33
CAB 0,4%*	18,60	0,16	1,90	0,03	19667	538,25
CAB 4,0%*	10,80	0,30	1,80	0,14	12902	642,32
CAB 1,0%**	27,00	0,89	3,30	0,17	23135	1267,52
CAB 2,0%**	21,10	0,64	2,40	0,06	21767	902,75
CAB 3,0%**	15,80	1,84	1,80	0,17	18066	1200,5

Tabela 3.12 – Propriedades do concreto fresco com a relação tração-compressão.

Concreto	Abatimento (mm)	Ar -Incorporado (%)	Tração / Compressão (%)
Referência	200	3,0	13
CAB 0,4%*	180	3,4	10
CAB 4,0%*	195	2,7	17
CAB 1,0%**	195	2,2	12
CAB 2,0%**	190	2,5	11
CAB 3,0%**	180	2,8	11

\* Percentuais em relação ao peso de material seco.

\*\* Percentuais em relação ao peso de cimento.

### 3.2.4 – Análise dos resultados da experimentação inicial

#### Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto de referência obtida foi menor do que a da dosagem para o qual fora projetado. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de que se observou a formação de vazios nos corpos-de-prova (ver figura 3.26), o que indica que a forma de adensamento pode não ter sido eficiente.

Quando se adicionou borracha nos teores de 0,4% e 4,0% em relação ao peso de material seco, observou-se uma redução de 32,55% e 60,76% em relação ao concreto de referência. Observou-se, também, redução percentual de 2,12%, 23,48% e 42,70% para os concretos com 1%, 2% e 3% de borracha em relação ao peso de cimento. Através

destes dados, observa-se um comportamento não-linear da variação da resistência à compressão em relação ao teor de borracha, uma vez que a diferença percentual é maior para os pequenos teores e menor para os maiores teores. Fez-se uma conversão dos teores de 0,4% e 4,0% em relação ao peso total, para peso de cimento. Assim estes teores ficaram como sendo de 1,74% e 17,14%. Com isso fez-se uma análise geral do comportamento da resistência à compressão. Os resultados foram plotados no gráfico de figura 3.27. Nele se verifica que o CAB com 1,74% de borracha é um ponto saliente à curva.



Figura 3.26 – Corpo-de-prova utilizado.

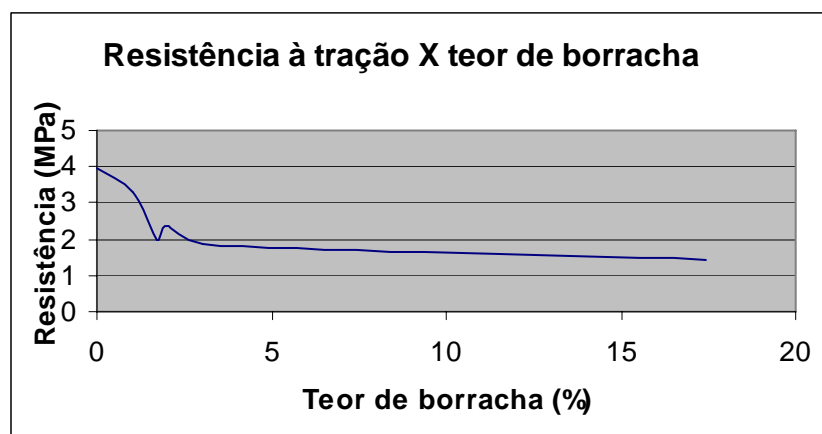


Figura 3.27 – Comportamento da resistência à compressão com o teor de borracha.

### Resistência à tração

As diferenças percentuais foram de 53,36% e 65,97% para os CABs 0,4% e 4,0% do peso total de material seco, respectivamente. Estes dados revelam pouca conformação com aqueles da resistência à compressão, principalmente pelo CAB de 0,4%.

A análise feita com o teor de borracha de 1%, 2% e 3%, em relação ao peso de cimento, demonstrou 21,23%, 43,38% e 55,34%, respectivamente, que significam também perdas maiores que os da resistência à compressão. Também foi feita uma análise geral do comportamento da resistência à tração, com a conversão dos teores de 0,4% e 4,0% de peso de material seco, para peso de cimento, resultando no gráfico da figura 3.28. Nele se verificou algo semelhante ao visto no gráfico da resistência à compressão, uma saliência no ponto do teor 1,74% do peso de cimento (0,4% do peso do material seco).

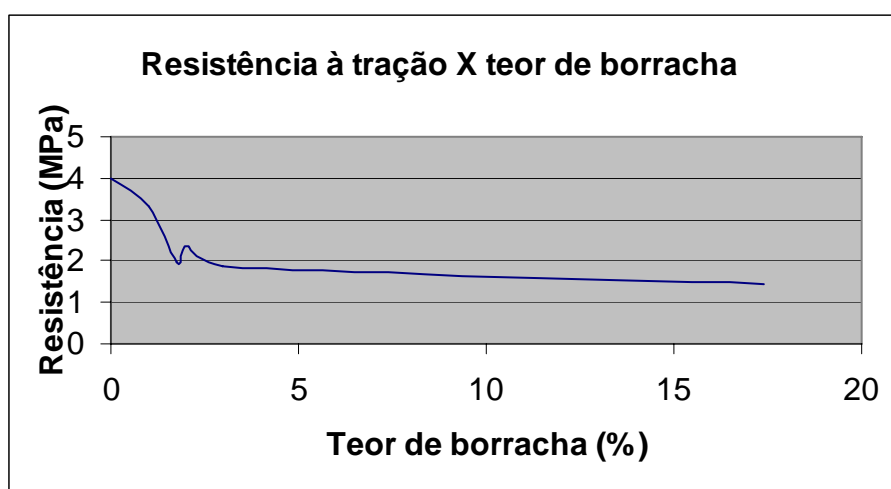


Figura 3.28 – Comportamento da resistência à tração com o teor de borracha.

### Módulo de deformação longitudinal

Para o CAB 0,4% e 4,0% as perdas no módulo foram de 28,27% e 52,94%, enquanto para os CABs com 1%, 2% e 3% as reduções foram de 15,63%, 20,62% e 34,11%. A análise geral feita com a conversão dos teores em relação ao peso total de material seco para teores em relação ao peso de cimento mostrou que a saliência verificada no comportamento da resistência a compressão e no comportamento da resistência à tração, também é verificada no comportamento do módulo de deformação longitudinal (figura 3.29). Assim, optou-se por descartar o concreto com teor de 1,74% do peso de cimento (0,4% do peso de material seco) resultando nos gráficos das figuras 3.30, 3.31 e 3.32 abaixo. Para facilitar a indicação destes gráficos, optou-se por diferenci-los dos primeiros pela palavra, modificado.



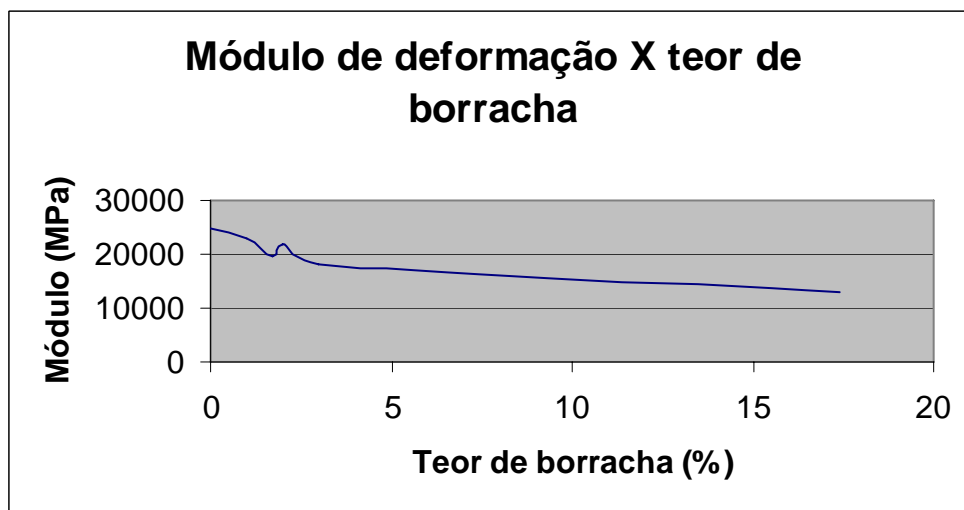


Figura 3.29 – Comportamento do módulo com o teor de borracha.

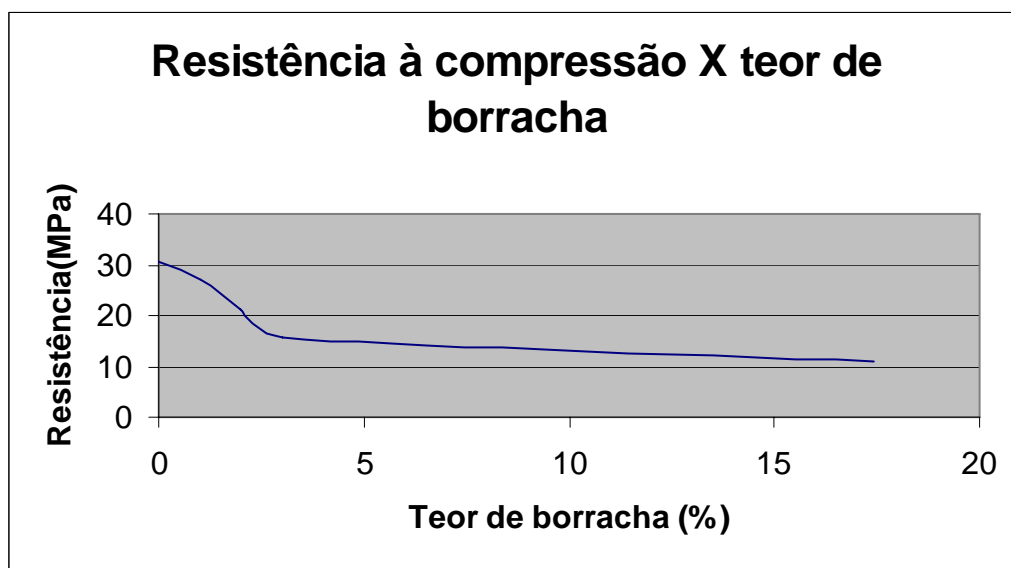


Figura 3.30 – Comportamento da resistência à compressão com teor de borracha (modificado).

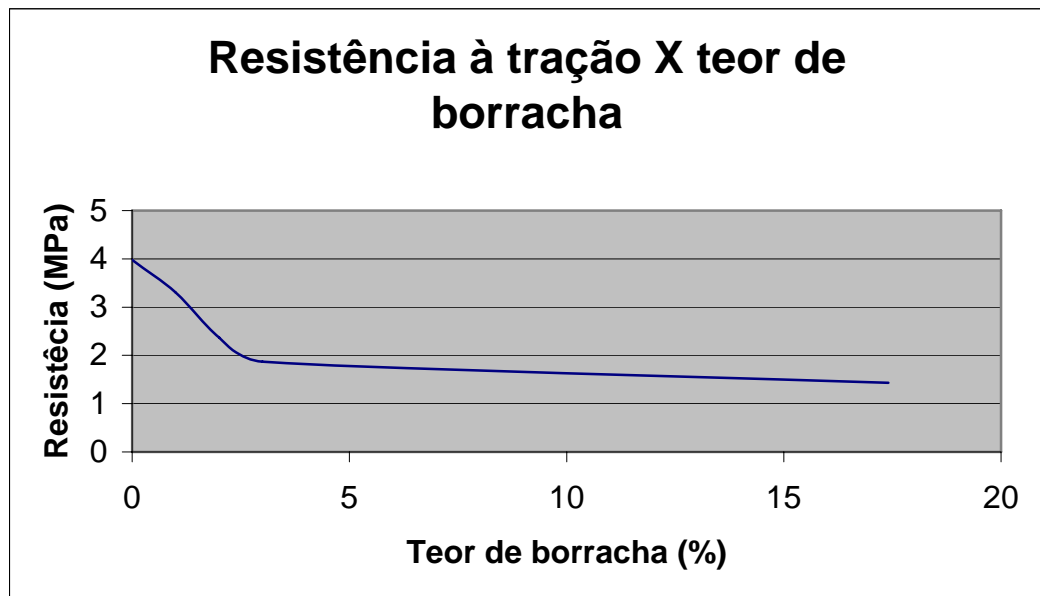


Figura 3.31 – Comportamento da resistência à tração com teor de borracha (modificado).

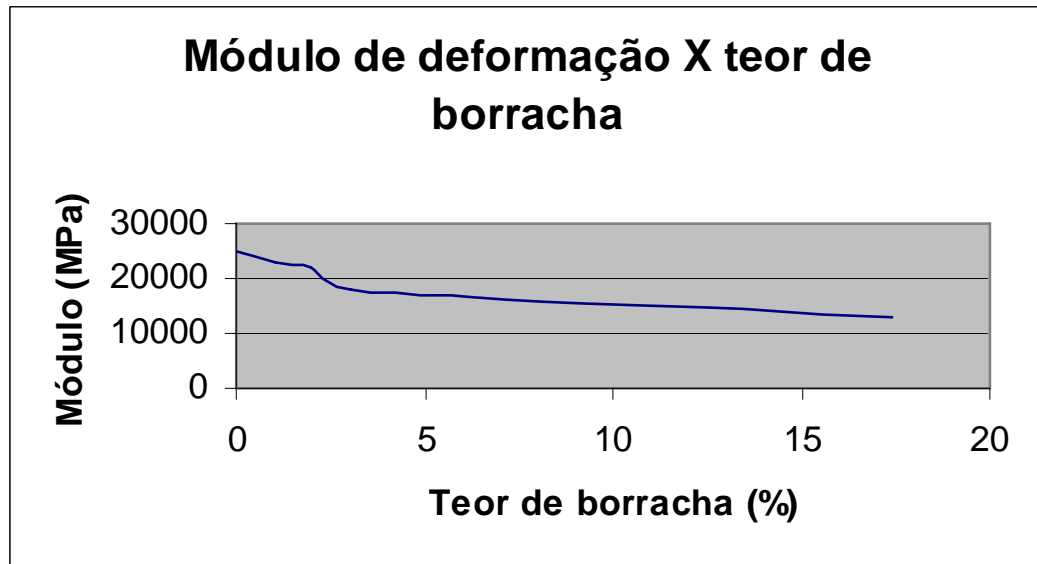


Figura 3.32 – Comportamento do módulo com teor de borracha (modificado).

### 3.2.5 – Definição do teor de borracha

Mediante o fato que causou a diminuição da resistência à compressão abaixo do esperado para o concreto de referência, decidiu-se alterar a forma de adensamento, passando a adensar o concreto com o vibrador mecânico.

Observa-se nos gráficos tensão x deformação (apêndice E), para o concreto com 2% de borracha em relação ao peso de cimento, que não houve ruptura brusca. Ao passo que teores maiores também não apresentaram ruptura brusca, mas apresentaram perdas maiores nas propriedades mecânicas do concreto. Sendo assim, a partir dos resultados obtidos, definiram-se as análises posteriores para o teor de 2% em relação ao peso de cimento como sendo o mais eficiente. A utilização de aditivo foi descartada, uma vez que a trabalhabilidade atingida esteve dentro da faixa planejada.

### **3.3 – Ensaios de avaliação do comportamento do CAB**

Nesta etapa buscou-se analisar as propriedades mecânicas do concreto com borracha e sem borracha para comparação. Para tanto foram preparadas duas misturas: uma sem borracha, concreto de referência; e outra com 2% de borracha em relação ao peso de cimento: CAB. As propriedades analisadas foram: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação longitudinal, resistência à tração na flexão de placas e resistência ao impacto. As três primeiras propriedades a serem analisadas seguem os procedimentos das normas já citadas nos ensaios iniciais. Os ensaios realizados nesta etapa serão chamados, apenas de ensaios de confirmação; pois visam confirmar os resultados obtidos nos ensaios iniciais.

O detalhe do ensaio de módulo de deformação pode ser visualizado na figura 3.33. O ensaio de resistência à tração na flexão seguiu procedimentos semelhantes aos da norma de flexão, diferindo na velocidade de carregamento e na espessura do elemento flexionado. O ensaio de resistência ao impacto seguiu os procedimentos do projeto de norma 2:02.10.084 – Piso Cerâmico: Determinação da Resistência ao Impacto, Método de Ensaio; com pequenas mudanças, como será vista a diante. Em cada mistura preparada, foram moldados 12 corpos-de-prova cilíndricos, três placas para ensaio de flexão e três placas para ensaio de impacto. As dosagens utilizadas são descritas na tabela 3.13 a seguir:



Figura 3.33 – Detalhe do ensaio de módulo.

Tabela 3.13 – Dosagens do concreto após análise.

Material	Referência (kg/m <sup>3</sup> )	CAB 2% (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	478,15	474,17
Areia	753,73	747,47
Brita	834,65	827,71
Água	242,55	237,09
Borracha	0,00	9,25

### 3.3.1 – Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação.

Os resultados dos ensaios de determinação das propriedades mecânicas podem ser visto na tabela 3.14 em valores médios com seus respectivos desvios-padrão. A tabela 3.15 exibe os valores do abatimento do tronco de cone e do ar-incorporado medido no estado fresco. O comportamento do CP após o ensaio de resistência à compressão do concreto de referência é mostrado na figura 3.34, onde se verifica uma ruptura do tipo colunar. A figura 3.35 mostra que, após a ruptura, o CP do CAB mostrou uma ruptura do tipo cisalhante. Para o ensaio de resistência a tração na resistência compressão dia-

metral, verificou-se a típica ruptura ao longo da geratriz que não se diferenciou para ambos os concretos.

Tabela 3.14 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas.

Concreto	Compressão (MPa)		Tração (MPa)		Módulo (MPa)	
	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.	Média	Desv. P.
Referência	34,8	0,6	4,3	0,4	31100	5132
CAB 2,0%	23,8	0,8	3,6	0,3	25443	1744

Tabela 3.15 – Medidas do abatimento e ar-incorporado.

Concreto	Abatimento (mm)	Ar-incorporado (%)
Referência	195	2,4
CAB 2,0%	180	2,9



Figura 3.34 – Modo de ruptura do concreto de referência.



Figura 3.35 – Modo de ruptura do CAB.

O gráfico da figura 3.36 mostra o comportamento da carga com a deformação sofrida pelo corpo-de-prova do concreto de referência. Nele se verifica a ruptura brusca do elemento ensaiado, constatando a fragilidade do concreto. Na figura 3.37 se encontra o gráfico típico do elemento de ensaio para o concreto com borracha, onde se verifica

que, após a carga máxima o elemento não rompe bruscamente. Os Apêndices G e H mostram outros gráficos do ensaio de resistência à compressão.

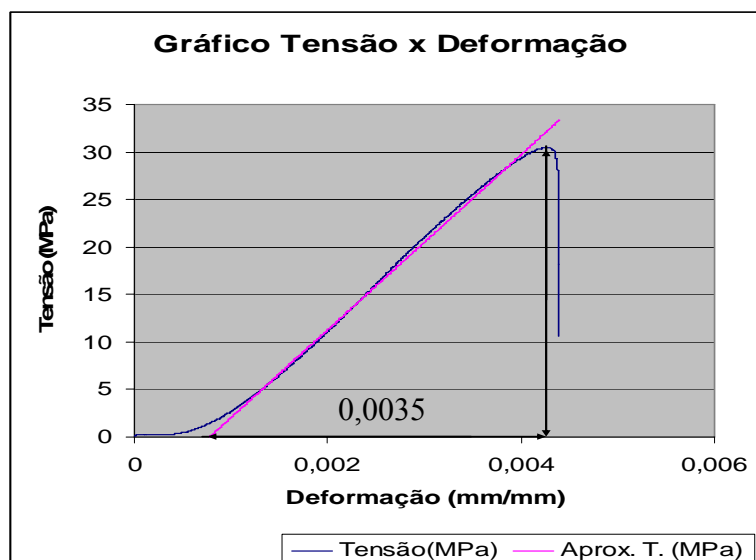


Figura 3.36 – Gráfico força-deformação para o concreto de referência.

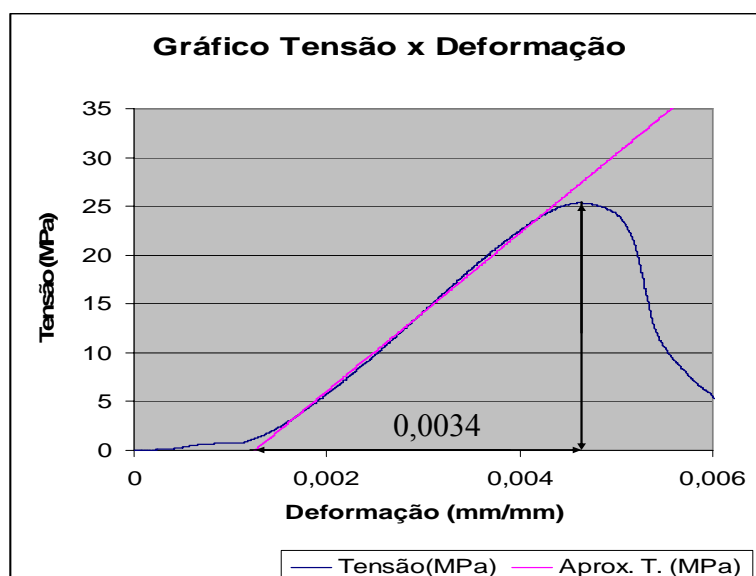


Figura 3.37 – Gráfico força-deformação para o CAB.

### 3.3.2 – Ensaio de resistência ao impacto

Como foi dito, o ensaio seguiu o projeto de norma da ABNT; porém, não foi utilizado colchão de areia como indicado no projeto; pois o colchão de areia dificulta a centralização. O ensaio consistiu em provocar impacto em um elemento de placa de 15

cm x 15 cm com 3 cm de espessura, com uma esfera de aço de massa 1386,3 g (figura 3.38) e 70 mm de diâmetro, através de um aparato constituído por uma haste metálica com 1,20 m. A base do aparato é formada por uma plataforma metálica apoiada em pés nivelantes (ver figuras 3.39). Fez-se variar a altura de queda de 10 cm em 10 cm a partir de 20 cm da face do elemento de ensaio. A cada queda provocada, foi verificado se havia ocorrido o aparecimento de fissuras na face oposta a face impactada, medindo-se o tamanho do dano obtido em cada impacto.

O dano causado em cada impacto foi medido pelo diâmetro da região impactada, através de duas medidas perpendiculares, tendo como resultado final o diâmetro médio. Para que a região fosse mais bem definida, fez-se um círculo em volta de cada região. O processo evolutivo do dano de impacto, para o concreto com borracha, pode ser verificado nas figuras: 3.40 – preparação do conjunto para início do ensaio, 3.41 – impacto com altura de queda 20 cm, 3.42 – impacto com altura de queda 30 cm, 3.43 – impacto com altura de queda 40 cm, 3.44 – impacto com altura de queda 50 cm, 3.45 – impacto com altura de queda 60 cm, 3.46 – impacto com altura de queda 70 cm e ruptura e 3.47 – visão geral da placa no último impacto provocado. Em termos morfológicos não se percebe diferenças entre os danos causados nos elementos confeccionados com concreto convencional e o CAB.



Figura 3.38 – Esfera de aço utilizada para provocar ensaio.



Figura 3.39 – Aparato utilizado nos ensaios de impacto.



Figura 3.40 – Preparação do conjunto para início do ensaio.



Figura 3.41 – Impacto com altura de queda 20 cm.

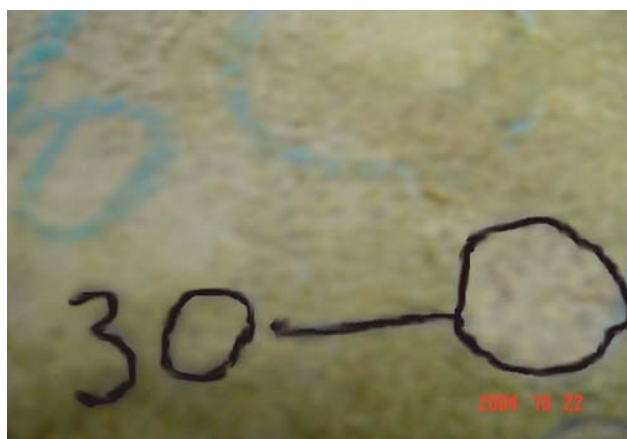


Figura 3.42 – Impacto com altura de queda 30 cm.



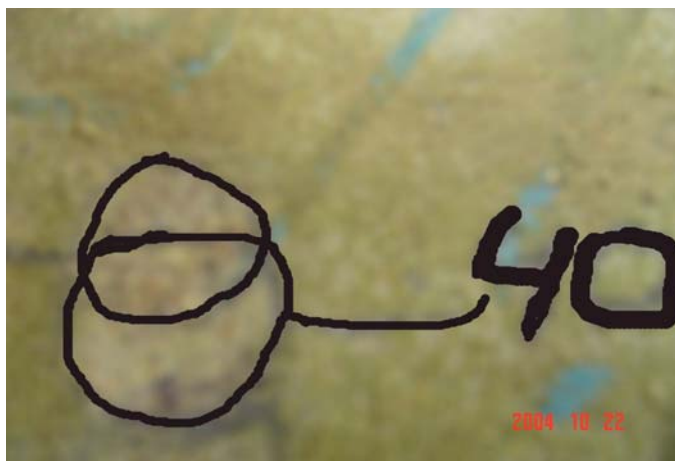


Figura 3.43 – Impacto com altura de queda 40 cm.

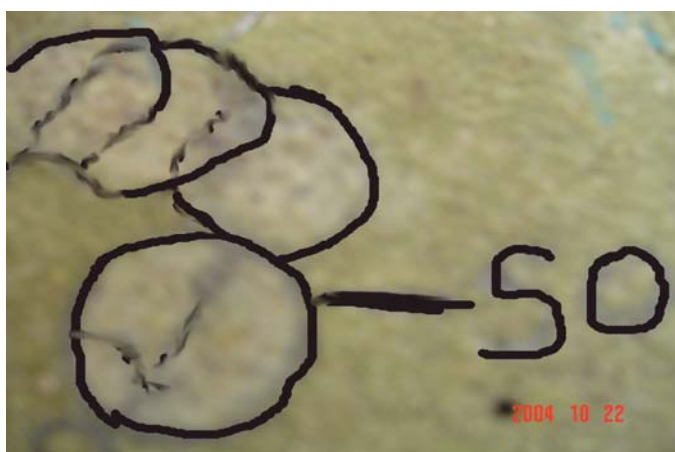


Figura 3.44 – Impacto com altura de queda 50 cm.



Figura 3.45 – Impacto com altura de queda 60 cm.

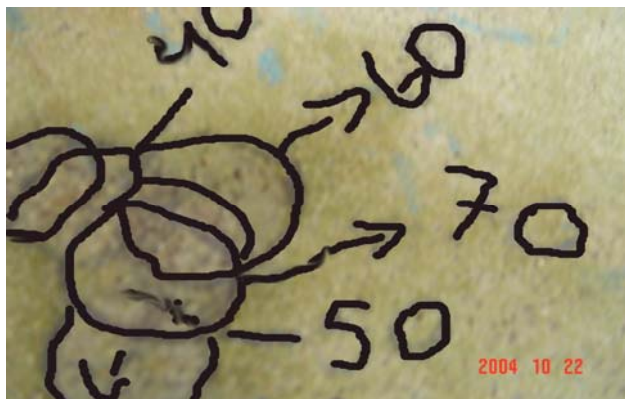


Figura 3.46 – Impacto com altura de queda 70 cm.



Figura 3.47 – Visão geral da placa ensaiada.

Para cada mistura preparada, foram moldadas três placas, das quais se geraram tabelas contendo a altura de queda, as medidas dos diâmetros causados pelo impacto, o diâmetro médio e a energia de queda para cada impacto causado calculado através das equações 2.1 e 2.2. Os resultados são descritos abaixo na seguinte seqüência: tabela 3.16 – ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 01; tabela 3.17 – ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 02; tabela 3.18 – ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 03; tabela 3.19 – ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 01; tabela 3.20 – ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 02; tabela 3.21 – ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 03.

Para cada tabela, gerou-se um gráfico que relaciona a altura de queda com o diâmetro médio obtido com o impacto. Estes gráficos podem ser visto a seguir na seguinte

seqüência: figura 3.48 – ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência placa 01; figura 3.49 – ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 02; figura 3.50 – ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 03; figura 3.51 – ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 01; figura 3.52 – ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 02; figura 3.53 – ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 03. Finalizando-se o procedimento, obtém-se a energia de impacto média para cada ensaio, calculado segundo a equação 2.2, obtendo-se a tabela 3.22 para posterior comparação entre os resultados de cada mistura.

Tabela 3.16 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 01.

Altura de queda (cm)	Medida 01 (mm)	Medida 02 (mm)	Média (mm)	Energia de queda (J)
20	7,5	8,0	7,8	28
30	10,0	9,3	9,7	42
40	9,5	9,5	9,5	56
50	10,0	14,0	12,0	70
60	10,0	14,0	12,0	84

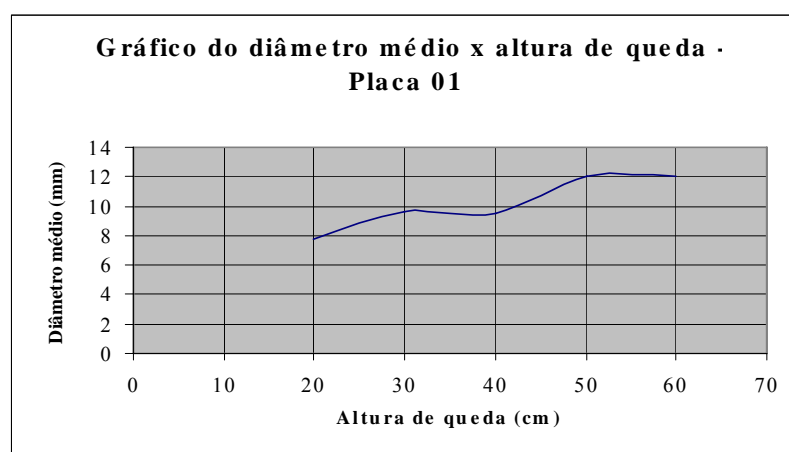


Figura 3.48 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência placa – 01.

Tabela 3.17 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 02.

Altura de queda (cm)	Medida 01 (mm)	Medida 02 (mm)	Média (mm)	Energia de queda (J)
20	7,0	8,0	7,5	28
30	8,0	7,5	7,8	42
40	10,0	9,5	9,8	56
50	9,5	10,5	10,0	70
60	10,5	9,0	9,8	84
70	12,0	11,0	11,5	98

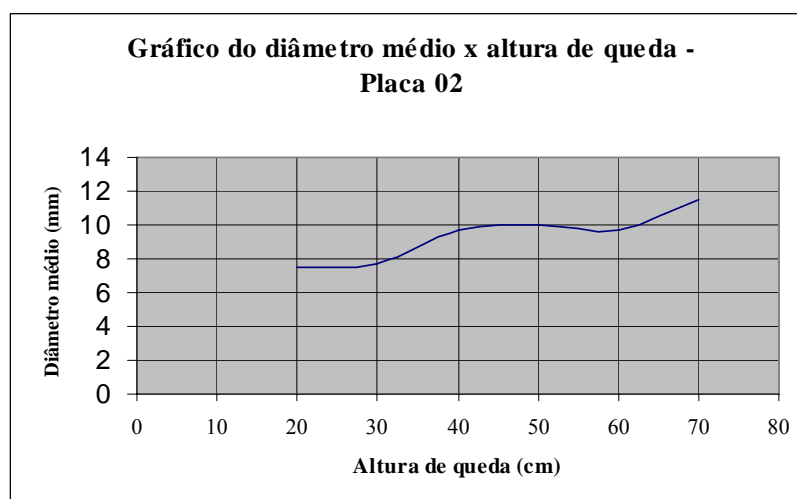


Figura 3.49 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência – placa 02.

Tabela 3.18 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 03.

Altura de queda (cm)	Medida 01 (mm)	Medida 02 (mm)	Média (mm)	Energia de queda (J)
20	8,5	8,0	8,3	28
30	7,5	8,5	8,0	42
40	11,5	9,0	10,3	56
50	10,0	11,5	10,8	70
60	10,0	11,5	10,8	84

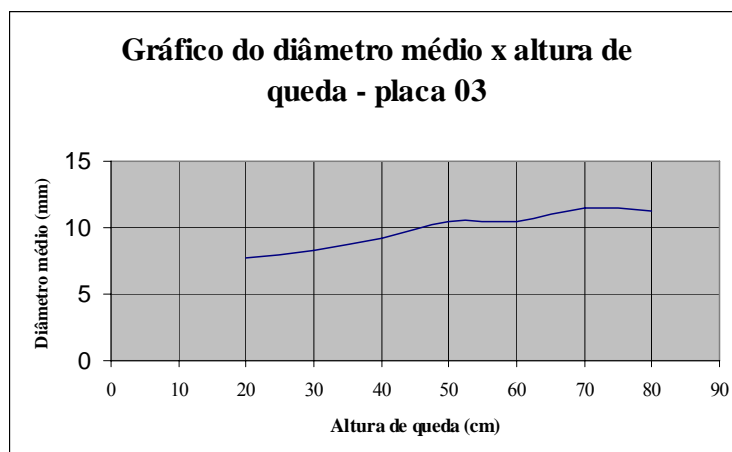


Figura 3.50 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência – placa 03.

Tabela 3.19 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 01.

Altura de queda (cm)	Medida 01 (mm)	Medida 02 (mm)	Média (mm)	Energia de queda (J)
20	10,0	10,5	10,3	28
30	10,0	10,0	10,0	42
40	11,5	11,0	11,3	56
50	11,5	12,0	11,8	70
60	15,0	14,5	14,8	84
70	13,5	11,0	12,3	98
80	13,5	11,0	12,3	112

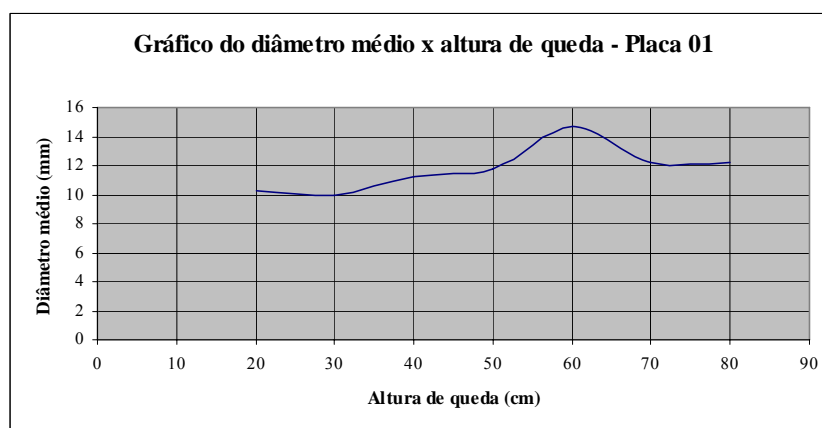


Figura 3.51 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB – Placa 01.

Tabela 3.20 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB, placa 02

Altura de queda (cm)	Medida 01 (mm)	Medida 02 (mm)	Media (mm)	Energia de queda (J)
20	8,50	9,00	8,75	28
30	8,50	8,50	8,50	42
40	10,50	11,00	10,75	56
50	11,00	11,50	11,25	70
60	10,50	12,00	11,25	84
70	10,50	12,00	11,25	98

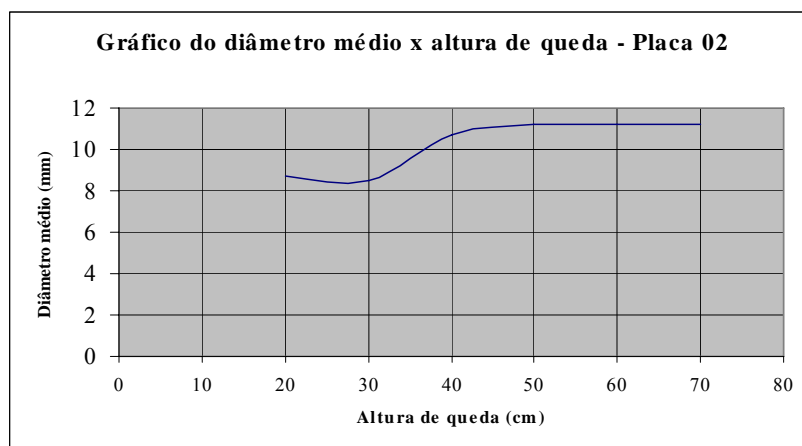


Figura 3.52 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB – placa 02.

Tabela 3.21 – Ensaio de resistência ao impacto do concreto de referência, placa 03.

Altura de queda (cm)	Medida 01 (mm)	Medida 02 (mm)	Média (mm)	Energia de queda (J)
20	8,50	8,00	8,25	28
30	7,50	8,50	8,00	42
40	11,50	9,00	10,25	56
50	10,00	11,50	10,75	70
60	10,00	11,50	10,75	84

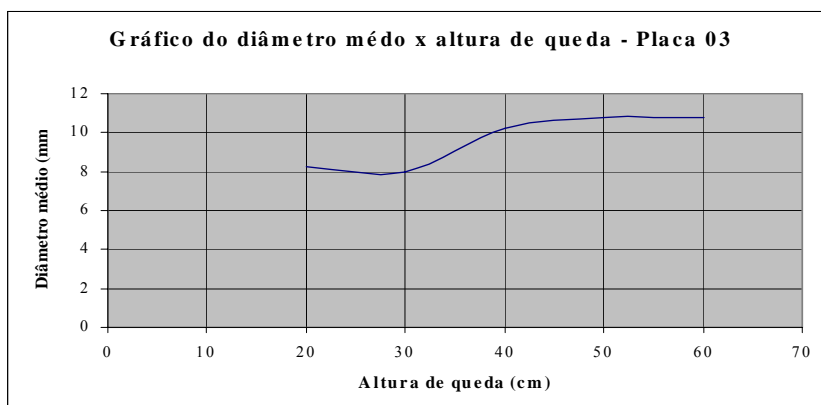


Figura 3.53 – Ensaio de resistência ao impacto do CAB – Placa 03.

Tabela 3.22 – Resultado final do ensaio de resistência ao impacto.

Placa	Energia de impacto (J)	
	Referência	CAB
01	280,0	490,0
02	378,0	378,0
03	490,0	280,0
Média	382,7	382,7

### 3.3.3 – Ensaio de resistência à flexão

Para os ensaios de flexão foram utilizadas placas com dimensões de 20cm por 50cm e com 3cm de espessura. As placas do ensaio de resistência à flexão foram moldadas no mesmo instante em que foram moldadas as placas de resistência ao impacto e os corpos-de-prova para ensaio de caracterização das propriedades mecânicas. Para cada mistura foram moldadas três placas, as quais, foram submetidas a carregamento em máquina universal de ensaio com uma velocidade de carregamento de 0,25mm/min. Os procedimentos são semelhantes ao descritos na norma NM 55:1996. Para o ensaio, utilizou-se um aparato para adaptação do elemento de ensaio à prensa (ver figuras 3.54, 3.55). É importante ressaltar que a linha da fissura ocorrera de forma bastante discreta, imperceptível à lente da câmera fotográfica. Isto se deu por que em ambos os casos a ruptura não causou danos visíveis ao elemento ensaiado. Outro aspecto foi uma semelhança entre a configuração da fissura do concreto emborrachado com o não-emborrachado. Em cada ensaio obteve-se a carga máxima de ruptura e a deflexão do

pistão de carregamento na carga de ruptura. As figuras 3.56 e 3.57 apresentam o comportamento típico da força de flexão x deslocamento para o concreto de referência e para o CAB, respectivamente; mostrando que, nestas proporções, a diferença é significativa. Outros gráficos se encontram no apêndice G e H, respectivamente. A tabela 3.23 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à flexão para cada mistura, além da tensão de tração calculada, confirmando os resultados vistos no gráfico e permitindo a comparação.



Figura 3.54 – Detalhe geral do aparato e da prensa.



Figura 3.55 – Detalhe do apoio.



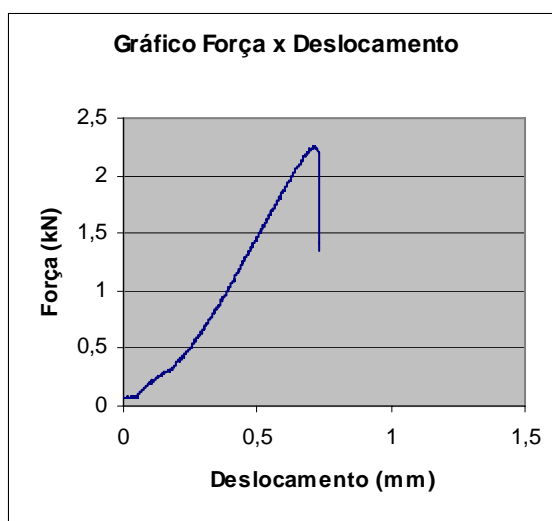


Figura 3.56 – Gráfico de flexão-deformação, concreto de referência.

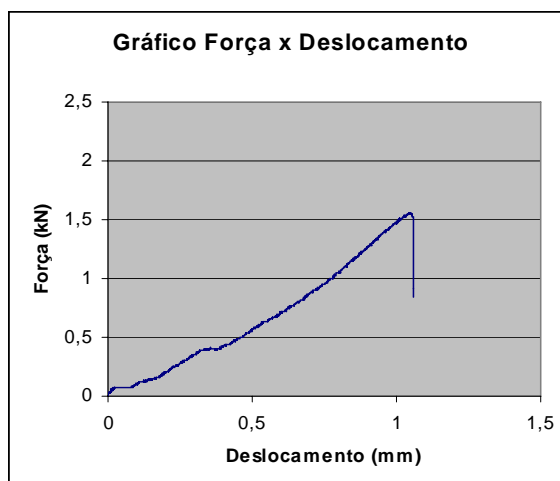


Figura 3.57 – Gráfico de flexão-deformação para o CAB.

Tabela 3.23 – Resultado final do ensaio de resistência à flexão.

Placa	Referência			CAB		
	Força (kN)	Tração (MPa)	Deslocamento (mm)	Força (kN)	Tração (MPa)	Deslocamento (mm)
01	2,33	5,83	0,49	1,56	3,90	1,05
02	2,25	5,63	0,71	1,57	3,93	1,06
03	2,34	5,85	0,86	1,51	3,78	1,02
Média	2,35	5,77	0,67	1,54	3,87	1,04

## Capítulo 4

### Análise dos Resultados

A tabela 4.1 abaixo apresenta os resultados dos ensaios iniciais e dos ensaios de confirmação para as propriedades mecânicas de resistência à compressão, tração e módulo de deformação do concreto de referência e do CAB com o teor de 2% de borracha, em relação ao peso de cimento, que serão utilizados na análise. Também, são apresentadas as diferenças percentuais para tais valores. Os percentuais foram obtidos da seguinte forma: faz-se a diferença entre os valores do concreto de referência e divide-se pelo maior dos dois (valores em linha). Este mesmo procedimento é repetido para o CAB. Em seguida, faz-se a diferença entre os resultados do concreto de referência e do CAB, dividindo-se pelo maior dos dois valores (valores em coluna).

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios utilizados na análise com diferenças percentuais.

	Ensaio iniciais	Ensaio de confirmação	Diferença (%)
	Compressão		
Referência	30,5 MPa	34,8 MPa	12,36%
CAB	21,1 MPa	23,8 MPa	11,34 %
Diferença (%)	30,81 %	31,61 %	
	Tração		
Referência	4,0 MPa	4,3 MPa	6,97%
CAB	2,4 MPa	3,6 MPa	33,33 %
Diferença (%)	40,00 %	16,28 %	
	Módulo de deformação longitudinal		
Referência	24927 MPa	31100 MPa	19,85%
CAB	21767 MPa	25443 MPa	14,44%
Diferença (%)	12,68 %	18,19 %	

A tabela 4.2 apresenta os resultados dos dois ensaios de impacto e flexão e suas diferenças percentuais obtidas como citado acima. Nas tabelas os percentuais são mostrados em valores brutos (como calculados). Na análise procura-se arredondar de modo a facilitar a linguagem.

Tabela 4.2, Resultados dos ensaios de flexão e impactos para análise.

	Energia de impacto	Força	Tração	Deslocamento
Referência	382,7 J	2,35 kN	5,77 MPa	0,67 mm
CAB	382,7 J	1,54 kN	3,87 MPa	1,04 mm
Diferença (%)	0,0%	33,04%	32,93%	35,58%*

\* Essa diferença percentual foi tomada em relação à deformação do CAB por ser valor maior.

Em cada um destes experimentos objetivou-se, inicialmente, a caracterização das propriedades mecânicas do concreto. Na parte de estudo com a dosagem escolhida, verificou-se também o comportamento do concreto diante de esforços de impacto e de flexão. A análise dos resultados procura seguir a mesma ordem. Primeiro, confrontando-se os resultados das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios iniciais com aqueles obtidos nos ensaios de confirmação para ambos os teores (0,0% e 2,0%) isoladamente. Depois, confrontando-se os resultados do CAB com os do concreto de referência nas propriedades mecânicas tradicionais só com os resultados obtidos nos ensaios de confirmação. Finalizando, confrontam-se os resultados dos ensaios de impacto e de flexão para os dois concretos.

#### 4.1 – Resistência à compressão

Analisando os resultados do concreto de referência nos ensaios de confirmação (resistência 34,8 MPa) e comparando com aqueles obtidos nos ensaios iniciais (resistência 30,5 MPa), verifica-se uma significativa diferença: 12%. Considerando-se um desvio padrão de 3 MPa, para um concreto de classe C30 de acordo com a NBR 8953/1987, e baseando-se no que foi proposto por HELENE & TERZIAN (1992), a resistência  $f_{cj}$  seria igual a 34,95 MPa. Assim, com uma resistência média de 34,80 MPa o concreto dos ensaios de confirmação se aproximou mais daquele para o qual fora projetado. Isto significou que a atenção dada ao processo de adensamento teve eficácia.

Para o CAB dos ensaios dos ensaios de confirmação (resistência 23,8 MPa) em comparação com o CAB dos ensaios iniciais (resistência 21,1 MPa), esta diferença (11,3%) foi muito próxima da diferença vista no concreto de referência. Como esta seguiu a mesma ordem de grandeza, demonstra que os dados apresentam coerência e que a metodologia aplicada tem confiabilidade. Além disso, verificou-se que a configuração superficial dos elementos de ensaio do CAB foi semelhante.

Comparando-se a resistência obtida para o CAB com a resistência do concreto de referência nos ensaios de confirmação, verifica-se uma perda percentual de 31,6%. Esta perda foi semelhante àquela obtida nos ensaios do estudo da dosagem: 30,8%. Em aspectos qualitativos, observa-se que o CAB apresentou uma ruptura suave, com possibilidade de execução de todo ramo descendente da curva tensão x deformação (ver apêndice), permitindo a total deterioração do CP. Por outro lado, o concreto de referência apresentou ruptura brusca.

#### **4.2 – Resistência à tração por compressão diametral**

Como na resistência a compressão, a resistência à tração do concreto de referência apresentou um aumento quando comparados os valores nos ensaios iniciais em relação aos ensaios de confirmação: 7%. Este aumento pode ter ocorrido pelos mesmos motivos visto nos ensaios de resistência à compressão.

Quando se comparam os resultados do CAB nos ensaios iniciais com os ensaios de confirmação, verifica-se um aumento de 33,3%. Um aumento quase cinco vezes maior que aqueles vistos no concreto de referência.

Confrontando-se os resultados do concreto de referência com o CAB nos ensaios de confirmação, verifica-se uma perda de 16,3% da resistência a tração. Isto demonstra que houve uma proximidade entre os resultados do CAB e do concreto de referência, uma vez que nos ensaios do estudo da dosagem a perda percentual foi de 40%.

A similaridade observada na análise do comportamento da resistência à compressão não foi observada na resistência à tração, pois as diferenças percentuais foram distintas umas das outras.

### **4.3 – Módulo de deformação longitudinal**

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, também se verificou um aumento nos resultados dos ensaios iniciais para os ensaios de confirmação. No concreto de referência o aumento foi de 20%. No CAB o aumento foi de 14%.

Do concreto de referência para o CAB, nos ensaios de confirmação, verificou-se uma perda de 18%. Este valor é um pouco maior que aquele observado nos ensaios iniciais: 13%. Não se pode dizer que as diferenças percentuais sejam da mesma ordem de grandeza; porém não se verificam discrepância como aquelas que foram vistas nos valores percentuais da resistência à tração na compressão diametral.

### **4.4 – Resistência ao impacto**

Para cada placa ensaiada, gerou-se um gráfico de altura de queda em função do diâmetro médio do dano causado no impacto. Em termos qualitativos, verificou-se uma tendência de estabilização do diâmetro do dano causado pela queda da esfera nas placas de CAB; enquanto os danos provocados no concreto de referência demonstraram uma tendência de crescimento. Uma análise visual permitiu verificar que não há mudanças significativas na morfologia da superfície dos elementos impactados, tanto do CAB, como do concreto de referência. Aliado a isto, o resultado numérico foi igual em ambos os casos.

### **4.5 – Resistência à flexão**

Na resistência a flexão, verificou-se que o concreto de referência teve uma carga de ruptura maior que a do CAB. Esta diferença entre os dois tipos de concreto foi avaliada como de 33%. O gráfico força-deformação na flexão em cada ensaio demonstra uma semelhança no comportamento, porém, através dos mesmos pode-se verificar que a deformação de ruptura no CAB foi maior que no concreto de referência. Esta diferença pode ser avaliada em torno de 35%.

A resistência à flexão apresentou um aumento de 25%, quando se comparam aos resultados da resistência à tração na compressão diametral para o concreto de referência. Para o CAB essa diferença é de 7%. Entre o concreto de referência e o CAB, analisando apenas a resistência à tração na flexão, a diferença foi de 33%, como esperado, igual à diferença entre as cargas de ruptura obtidas.

## Capítulo 5

### Considerações finais

Os ensaios de caracterização demonstraram que as fibras advindas do processo de recauchutagem são heterogêneas, porém a predominância é de fibras com uma relação  $C/d$  entre 8 e 10. Ainda existe um pequeno percentual de material com cerca de 5% passante na peneira de abertura 0,6 mm que possuem relação  $C/d$  mais baixa, com acentuada irregularidade de forma e de superfície, demonstrando reentrâncias, assemelhando-se a um pó. Na utilização de todo o resíduo como fibra, este material pode causar efeitos negativos e a sua separação agregar valores que não compensem a utilização do resíduo. Assim, definiu-se a sua experimentação para que se fosse analisado os seus efeitos isoladamente.

A análise da temperatura de fulgor revelou que as temperaturas de amolecimento e de combustão ocorrem em uma faixa em que o concreto já tem suas propriedades deficientes.

Verificou-se que o comportamento da quantidade de borracha em relação às propriedades mecânicas é não-linear. Pode-se dizer isso porque se observou que para pequenos níveis do teor de borracha, ocorrem altos níveis de variação nas propriedades mecânicas, quando se varia a quantidade de borracha. De outra forma, para altos níveis de dosagem, ocorrem baixos níveis de variação nas propriedades mecânicas, mesmo que a variação na quantidade de borracha seja a mesma do caso anterior. Assim chegou-se a uma dosagem de 2% em relação ao peso de cimento como sendo a ideal.

As perdas percentuais nas propriedades mecânicas de resistência a compressão, resistência tração e módulo de elasticidade eram esperados. Porém, pode-se observar que a borracha atribuiu ao concreto a capacidade de romper sem que houvesse movimentos bruscos no pistão de carregamento, pois o concreto ficou com mais ductilidade. Além disso, uma adição de 2% em relação ao peso de cimento pode deixar um concreto (não necessariamente concreto de alto-desempenho) em condições de ser utilizado como estrutural, embora outros parâmetros técnicos ainda mereçam ser analisados. Os

gráficos de força-deformação do concreto de referência demonstraram que este apresenta uma deformação na força máxima próxima de 0,2 mm. Já para o CAB, os gráficos demonstram que em 0,2 mm a resistência ainda está em ascensão.

A diminuição provocada no módulo de elasticidade pode ser considerada favorável; pois para HERNADEZ-OLIVARES & BARLUENGA (2003), a diminuição do módulo proporciona uma diminuição da sonoridade e mais conforto em pavimentos rígidos. Além disso, para o boletim técnico IBRACON (2001), a propriedade preponderante é a resistência à tração na flexão que precisa estar entre 3 MPa e 5 MPa, que é uma faixa de valores na qual se encontra os valores de resistência à tração na flexão encontrado neste trabalho (ver tabela 3.23). A redução média do concreto para o CAB foi de 33% passando de 5,76 MPa (referência) para 3,87 MPa.

É bastante ressaltar que se fez a escolha do tipo de fibra, preocupando-se com o efeito negativo que esta poderia causar em meio às fibras maiores. Verificou-se que em termos de tenacidade o aumento não foi significativo. Porém observou-se um aumento na deformação de ruptura de flexão do concreto e uma tendência de estabilização nos danos causados pelo impacto. Isto leva a crer que aumentando o tamanho das fibras os resultados que dependem da tenacidade podem ser melhorados. Assim, podem-se considerar estes resultados satisfatórios.

### **Sugestões para futuras pesquisas:**

Dando continuidade aos estudos sobre o reaproveitamento do resíduo na produção de concreto, pode-se utilizar como sugestões os seguintes temas:

- A utilização teste teor de borracha para as fibras passantes em peneiras de aberturas maiores.
- A utilização deste teor de borracha em um tipo de fibra de borracha selecionado através de peneiramento e buscando uma homogeneização dos tamanhos das fibras.
- Estudo do concreto com borracha em almofadas para ligações de elementos de concreto pré-moldado.
- Estudo da utilização do concreto com borracha em outros elementos estruturais que são submetidos a esforços de impacto como prismas divisores de rodovias e protetores de postes e de pilar de viadutos.

- Estudo comparativo do comportamento do concreto de uma determinada classe de resistência com um concreto com adições de borracha com a mesma resistência para avaliação dos custos adicionais e da tenacidade adquirida.
- Estudo do concreto com adições de borrachas submetidas a um melhoramento químico a base de NaOH ou outras substâncias com características semelhantes.



## Referências

AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F. & NIRSCHL, G. C. (2002); Análise Experimental da Resistência à Compressão do Concreto com Borracha Vulcanizada; Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto em CD ROM.

AKASAKI, J. L.; SERNAROS, P.; REYES, B.; TRIGO, A. P. M. (2004); Avaliação do Concreto com Borracha de Pneu com Relação ao Concreto Convencional. Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto em CD ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 (1983) Agregado para concreto. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 10004 (1987) Resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 11578 (1991) Cimento Portland composto. Especificação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 13956 (1997) Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassas e pasta de cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 5738 (1994) Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Método de ensaio. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 5739 (1994) Concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 6156 (1983) Máquina de ensaio de tração e compressão. Verificação. Método de ensaio. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 6508 (1984) Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 7221 (1987) Agregados. Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 7222 (1994) Argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 7809 (1983) Agregado graúdo. Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ NBR 7810 (1983) Agregados em estado compactado seco. Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro.

- \_\_\_\_\_ NBR 8522 (2003) Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_ NBR 9479 (1996) Câmaras úmidas para cura de corpos-de-prova de cimento e concreto. Especificação. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 248 (2003) Determinação da composição granulométrica.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 26 (2001) Agregados – Amostragem.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 27 (2001) Agregados - Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 30 (2001) Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 43 (2003) Cimento Portland. Determinação da pasta de consistência normal.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 46 (2003) Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 49 (2001) Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 52 (2003) Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 53 (2003) Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.
- \_\_\_\_\_ NBR NM 67 (1998) Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
- \_\_\_\_\_ NM 45 (2002) Agregados - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios.
- BAO, Y.; SU, S.; YANG, J.; FAN, Q. (2002); Prestressd Ceramics and of Impact Resistance; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.
- BARBOZA, A. S. R.; SOARES, A. M. M. & DEBS, M., K. (2001); A New Material to Be Used as Bearing Pad in Precast Concrete Connections, <http://www.periodicos.capes.gov.br/> , acesso em: 5 de agosto. 2003.
- BAUER, R. J. F.; TOKUDOME, S. & GRADET, A. (2002); Estudo de Concreto com Pneu Moído; Anais do 43<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto em CD ROM.
- BAHEI-EL-DIN, Y. A.; ZIKRY, M. A. RAJENDRAN, A. M. (2002); Impact-induced Deformation Fields in 3D Cellular Woven Composites; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

Ecologia Urgente notícias, <http://www.ecologiaurgente.com.br/>, acesso em: 20 de abril 2002.

FERREIRA JR. S. (1992); Concretos Especiais para Pavimento: Uso de Látex, Microsílica e Fibras de Aço; Estudo Técnico 96, ABCP.

GIOVANETTI, E. (1989); Princípios Básicos sobre Concreto Fluido; IBRACON / PIMI; São Paulo – SP.

HELENE, P. & TERZIAN, P. (1992), Manual de Dosagem e Controle do Concreto. Brasília: Pini.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G. (2003); Fire Performance of Recycled Rubber-Filled High-Strength Concrete; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G.; BOLLATI, M. & WITOSZEK, B. (2002); Static and Dynamic Behaviour of Recycled Tyre Rubber-Filled Concrete; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

HUNH, H. & RAGAVAN, D. (1997); Durability of Simulated Shredded Rubber in Highly Environments; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

KAMIMURA, E. (2002) Potencial de Utilização dos Resíduos de Borracha de Pneus pela Indústria da Construção Civil. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/Sc.

KARBUARE, V. M. (1998); Use of Composite Material in Civil Infrastructure; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

KAZMIERCZAK, C. S. et al (2003); Resíduos de Contrafortes Termoplásticos Provenientes da Indústria Coureiro-Calçadista; Coletânea HABITARE; Volume 4; p. 124-175.

LIMA, F. B. (1997); Pilares de Concreto de Alto Desempenho: Fundamentos e Experimentação. Tese (Doutorado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

LISBOA, E. M. (2004); Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, J. M. (1994); Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.

NAVARRO, F. J. et al (2002); Rheological Characteristics of Tire Rubber-Modified Bitumens; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

NAWY, E. G. (1996); Fundamentals of High Strength high Performance Concrete; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

NEVILLE, A. M. (1997) Propriedades do Concreto. São Paulo: Pini.

NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L. & FIORITI, C. F. (2003); Influência da Granulometria das Fibras de Borracha Vulcanizada em Dosagens de Concreto; Anais do 44<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto em CD ROM.

NM – ISO – 3610-1 (1996) Peneiras de ensaio. – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1 – Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.

NOTÍCIAS GOODYEAR, Revista (2003); Ano VI, n 17.

PIERCE, C. E. & BLACKWELL, M. C. (2002); Potential of Scrap Tires Rubber as Lightweight Aggregate in Flowable fill; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

PNEWS, Revista (2002); n. 34; Associação Brasileira dos Recauchutadores, Reformadores e Remoldadores – ABR.

RESOLUÇÃO 258/99; Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

RODRIGUES, P. F. (1998); Parâmetros de Dosagem do Concreto, Estudo Técnico 67, ABCP.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G. & COUTTS, R. S. P (2002); Mechanically Pulped Sisal as Reinforcement in Cement in Cementitious Matrices; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G. & COUTTS, R. S. P (2003); Potential of Alternative Fibre Cements as Building Material for Developing Areas; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

SAVASTANO JR., H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A. M.; PEMENTEL, L. (1999); Plant Fibre Reinforced Cement Components for Roofing; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

SEGRE, N.; MONTEIRO, P. J. M. & SPOSITO, G. (2002); Surface Characterization of Recycled Tire Rubber to Be Used in Cement Paste Matrix; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

SEGRES, N. & JOEKES, I. (1999); Use of Tire Rubber as Addition to Cement Paste; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

SEGRE, N. C. (1999); Reutilização de Borracha de Pneus Usados como Adição em Pasta de Cimento. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo/SP.

SONG, P. S.; WANG, S. H.; SHEN, B. C. (2003); Strength Properties of Nylon and Polypropylene fiber reinforced concretes; <http://www.periodicos.capes.gov.br>, acesso em: 10 de junho. 2004.

TOPÇU, I. B. (1994); The Properties of Rubberized Concrete; <http://www.periodicos.capes.gov.br>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

TOUTANJI, H. A. (1995); The Use of Rubber of Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

TOPÇU, I. B. & AVCULAR, N. (1997); Collision Behaviours of Rubberized Concrete; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

TOPÇU, I. B. & AVCULAR, N. (1997); Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de agosto. 2003.

THANOMSILP, C.; HOGG, P. J. (2002); Penetration Impact resistance of Hybrid Composites Based on Commingled Yarn Fabrics; <http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 10 de março 2004.

# APÊNDICE

## Apêndice A – Ensaios iniciais: gráficos do concreto de referência.

### Ensaios de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	29,20
-------------------	-------

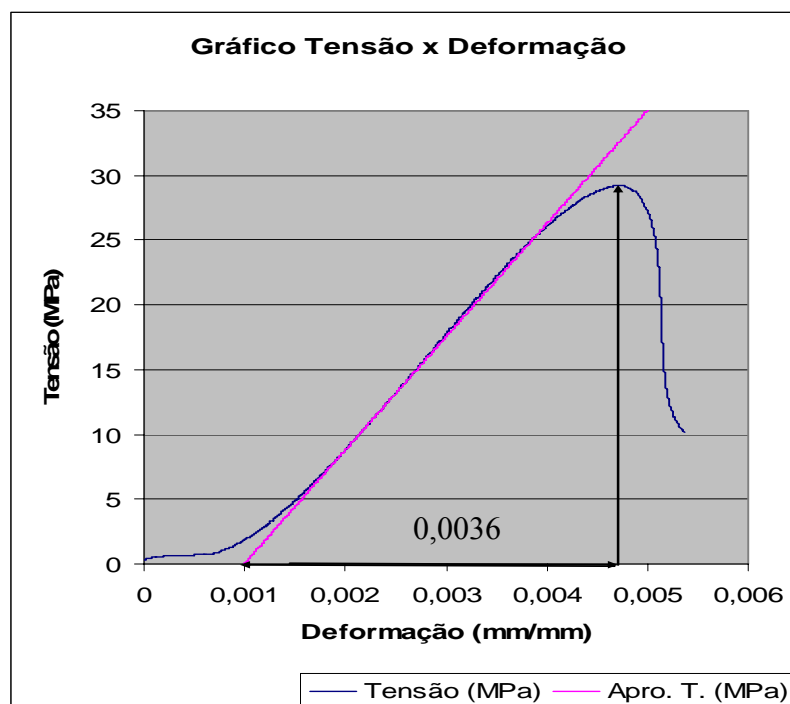


Figura A.1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.

## Apêndice A – Ensaios iniciais: gráficos do concreto de referência.

### Ensaios de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	31,93
-------------------	-------

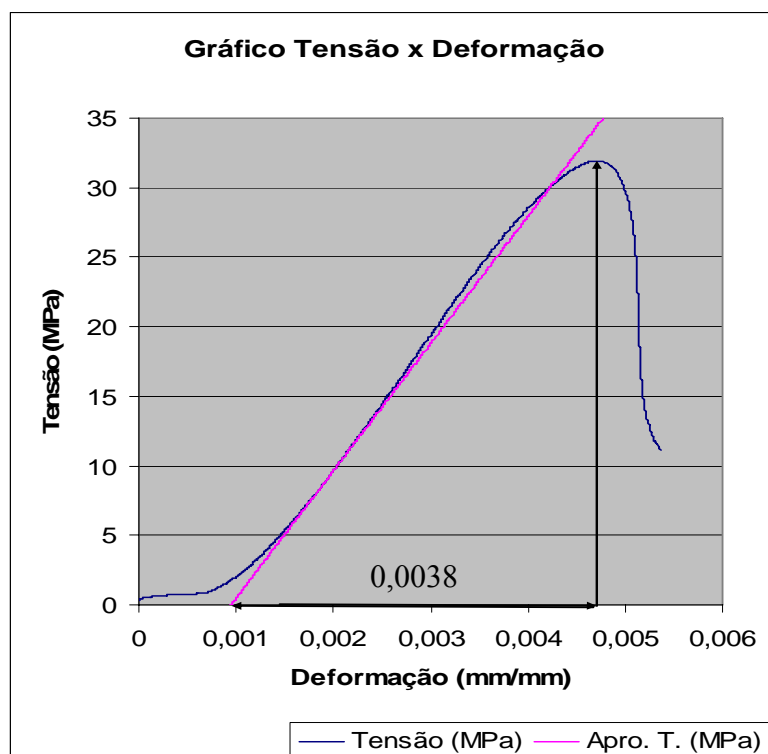


Figura A.2 – Gráfico tensão x deformação, elemento 02.



## Apêndice A – Ensaios iniciais: gráficos do concreto de referência.

### Ensaios de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	29,81
-------------------	-------

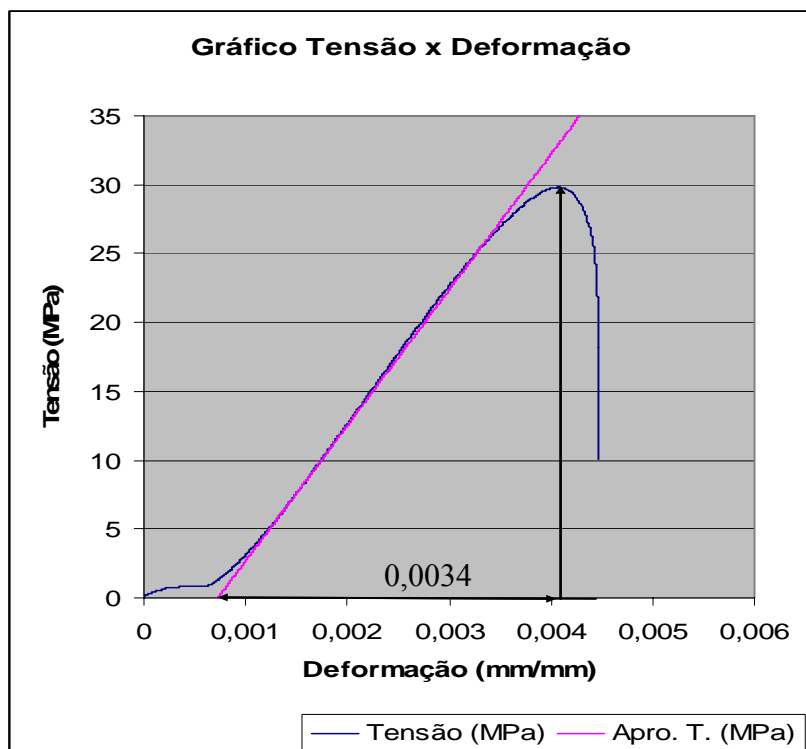


Figura A.3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice A – Ensaio iniciais: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	31,12
-------------------	-------

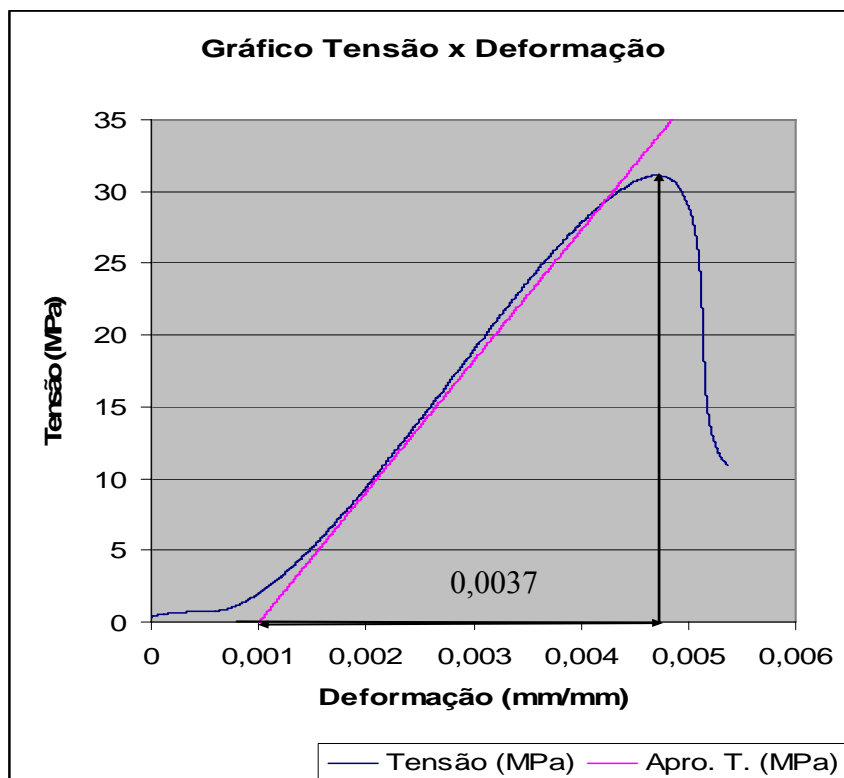


Figura A.4 – Gráfico tensão x deformação, elemento 04.

## Apêndice B – Ensaios iniciais: gráficos do concreto com 0,4% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	17,19
-------------------	-------

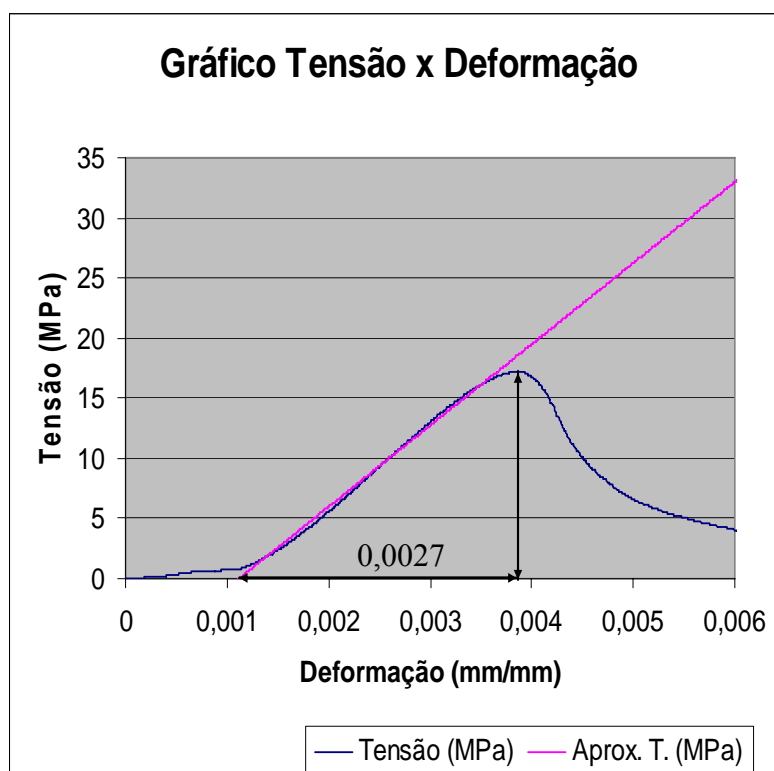


Figura B.1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.

## Apêndice B – Ensaios iniciais: gráficos do concreto com 0,4% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	18,52
-------------------	-------

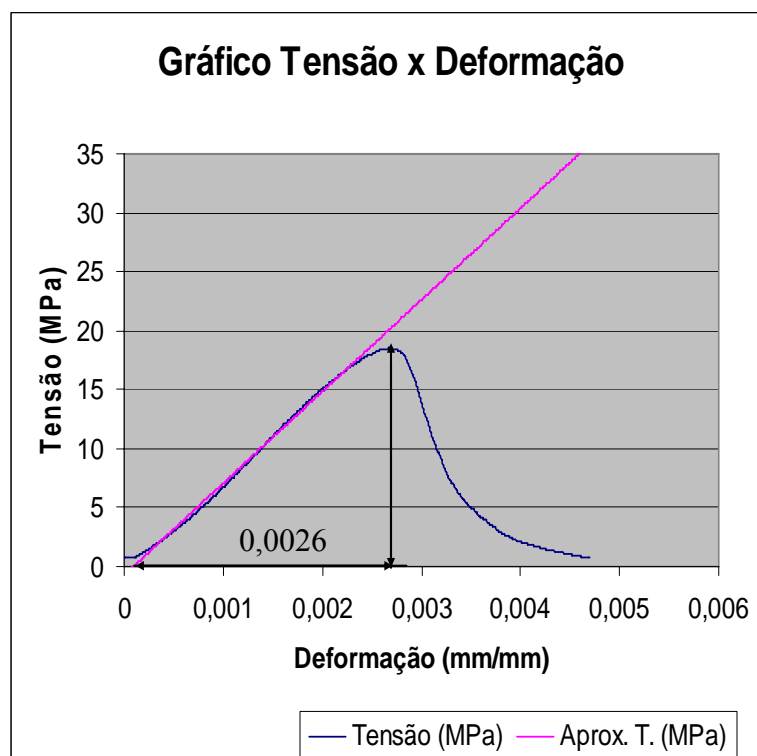


Figura B.2 – Gráfico tensão x força-deformação, elemento 02.

## Apêndice B – Ensaios iniciais: gráficos do concreto com 0,4% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	16,95
-------------------	-------

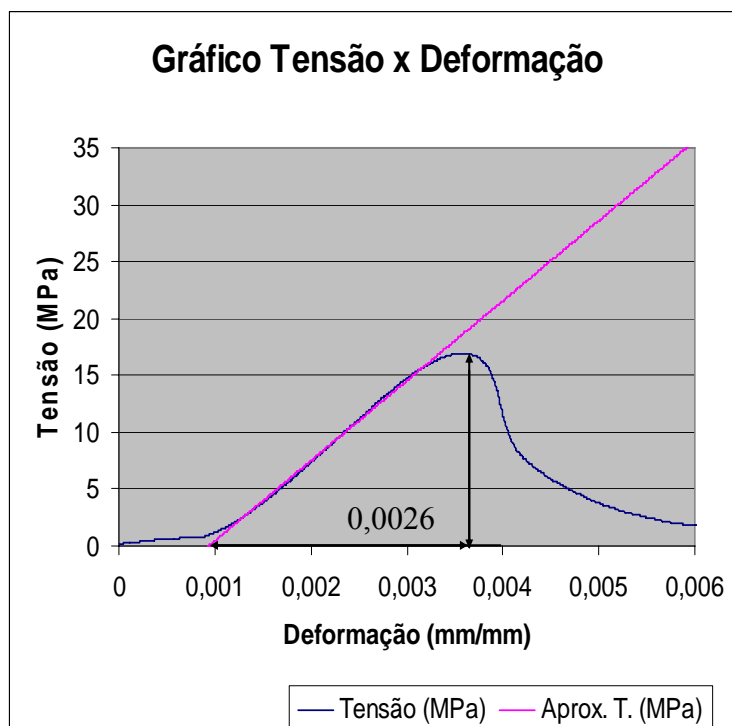


Figura B.3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice B – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 0,4% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	18,72
-------------------	-------

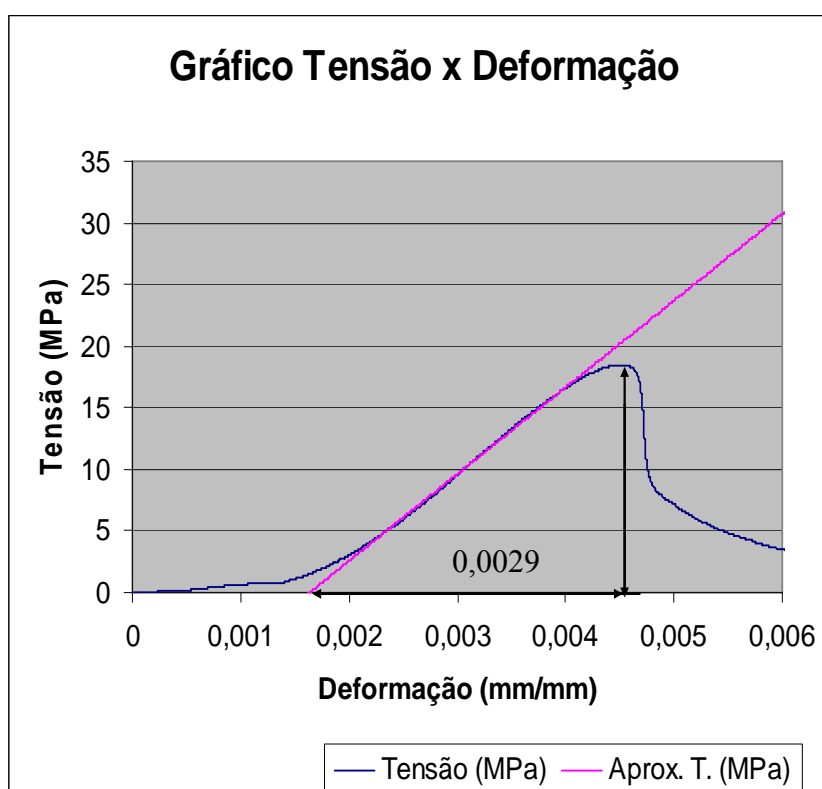


Figura B.4 – Gráfico tensão x deformação, elemento 04.

## Apêndice B – Ensaios iniciais: gráficos do concreto com 0,4% de borracha em relação ao peso de material seco.

Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	16,95
-------------------	-------

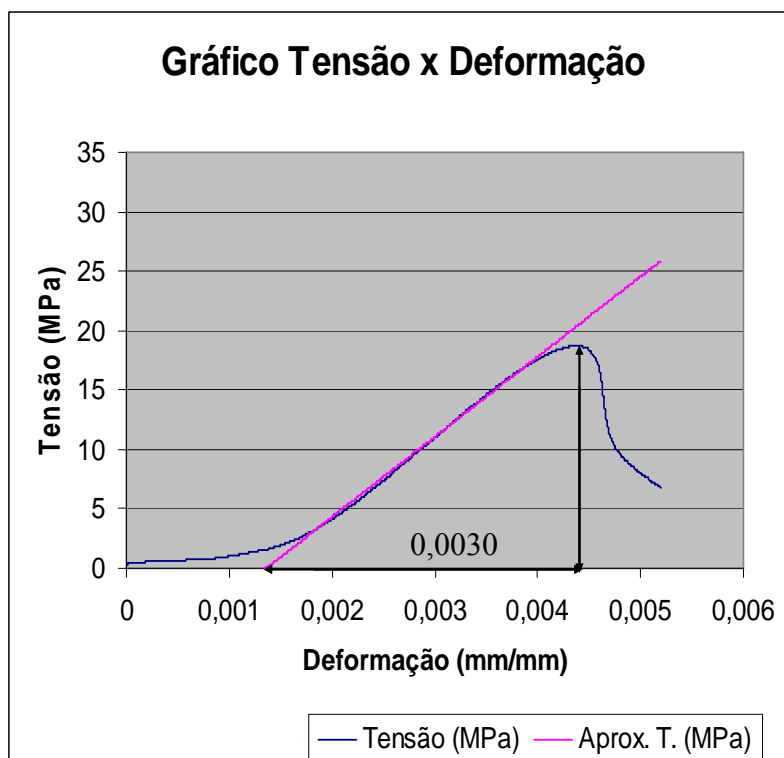


Figura B.5 – Gráfico tensão x deformação, elemento 05.

## Apêndice C – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 4,0% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	10,62
-------------------	-------

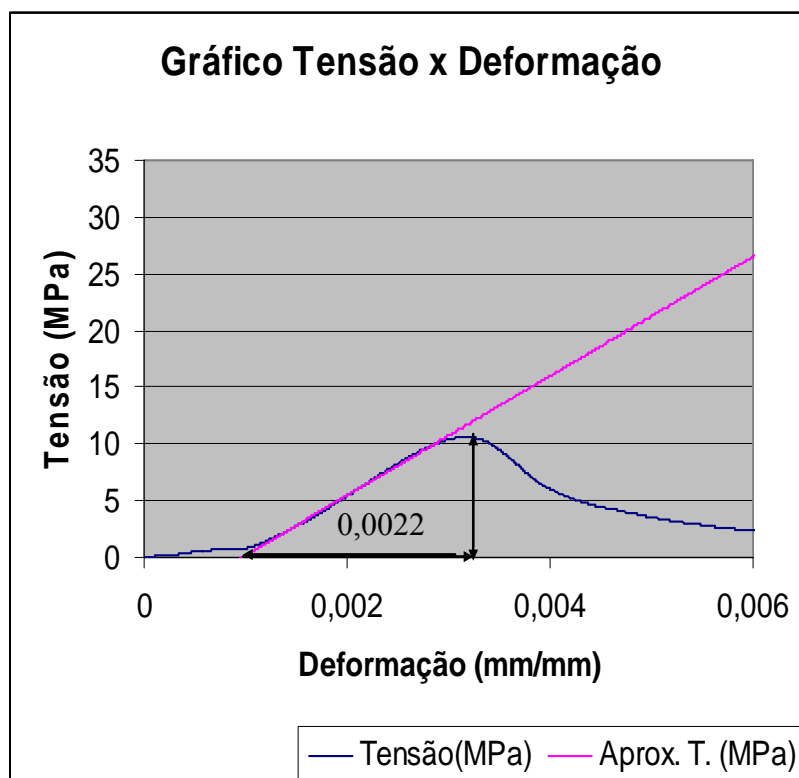


Figura C.1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.



## Apêndice C – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 4,0% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	10,09
-------------------	-------

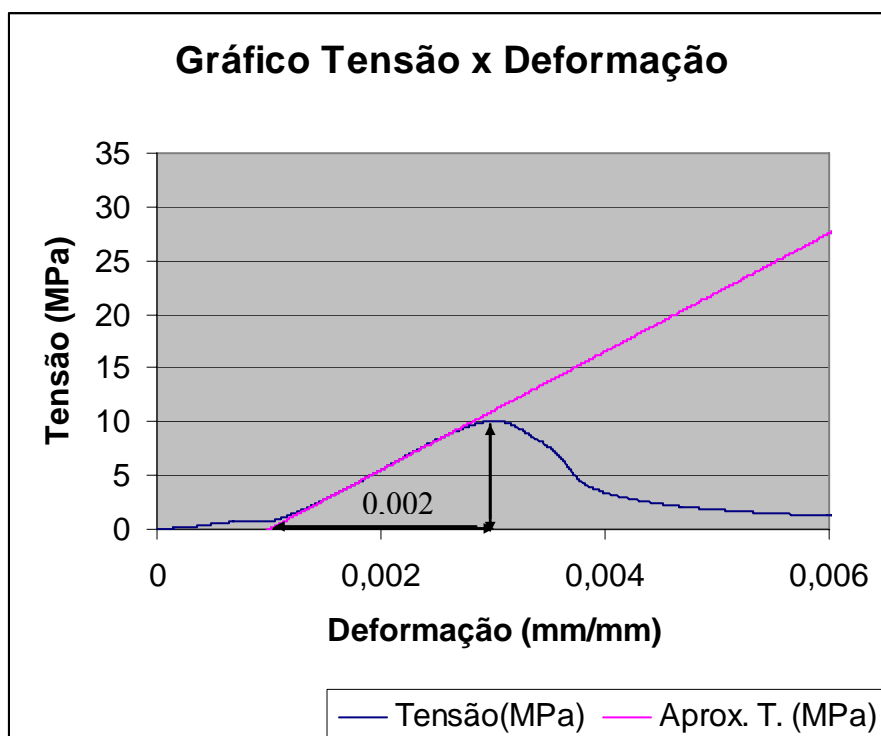


Figura C.2 – Gráfico tensão x deformação, elemento 02.

## Apêndice C – Ensaios iniciais: gráficos do concreto com 4,0% de Borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	10,14
-------------------	-------

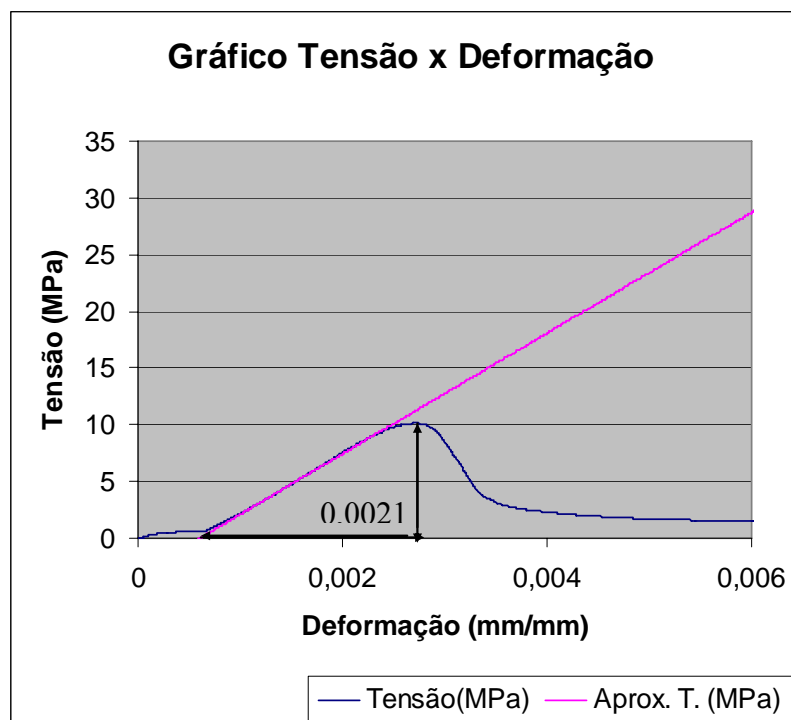


Figura C.3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice C – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 4,0% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	10,84
-------------------	-------

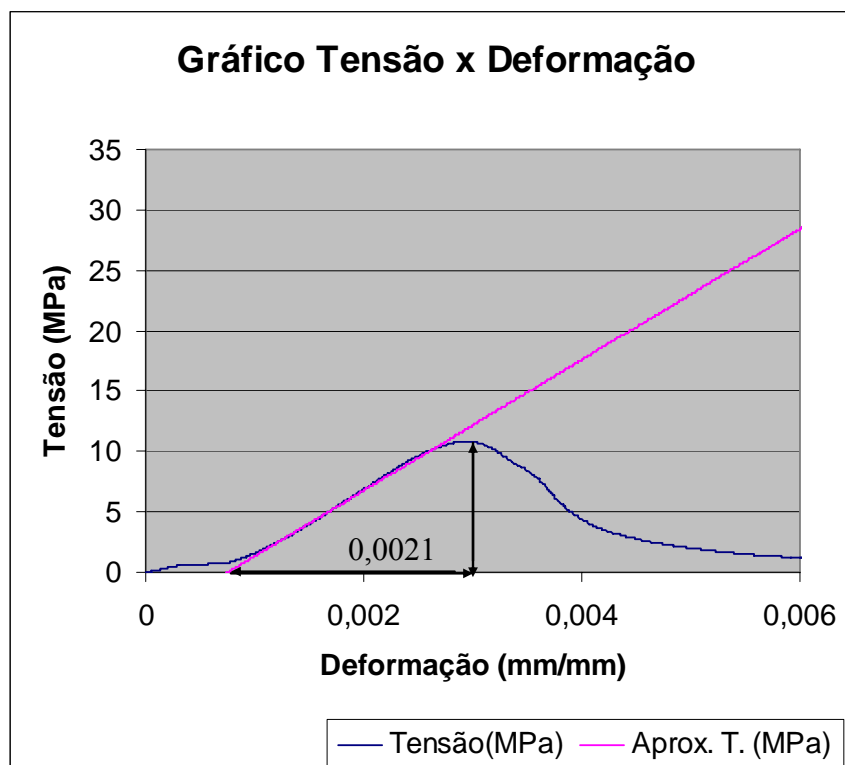


Figura C.4 – Gráfico tensão x deformação, elemento 04.

## Apêndice C – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 4,0% de borracha em relação ao peso de material seco.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	10,73
-------------------	-------

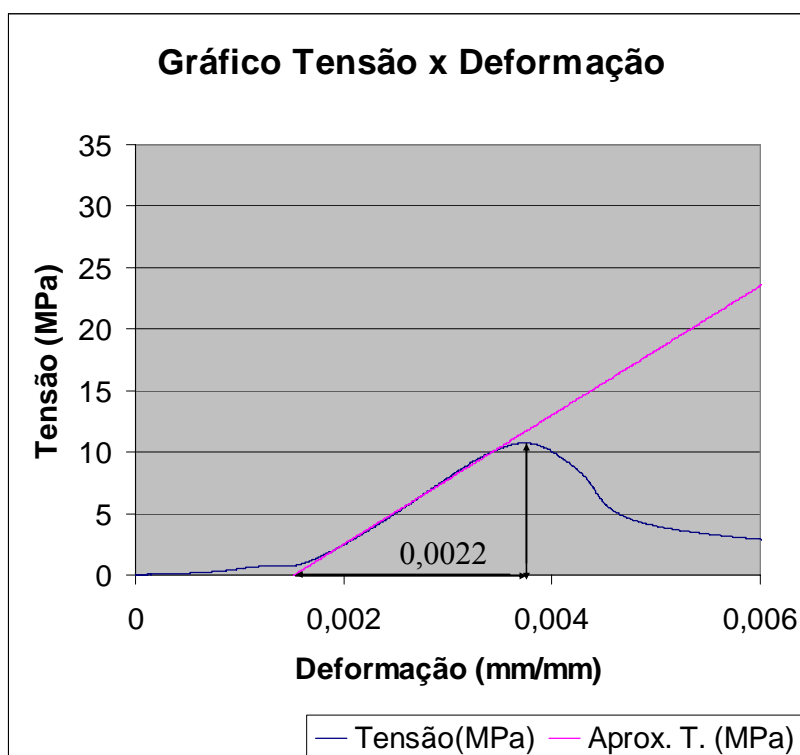


Figura C.5 – Gráfico tensão x deformação, elemento 05.

## Apêndice D – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 1,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	25,38
-------------------	-------

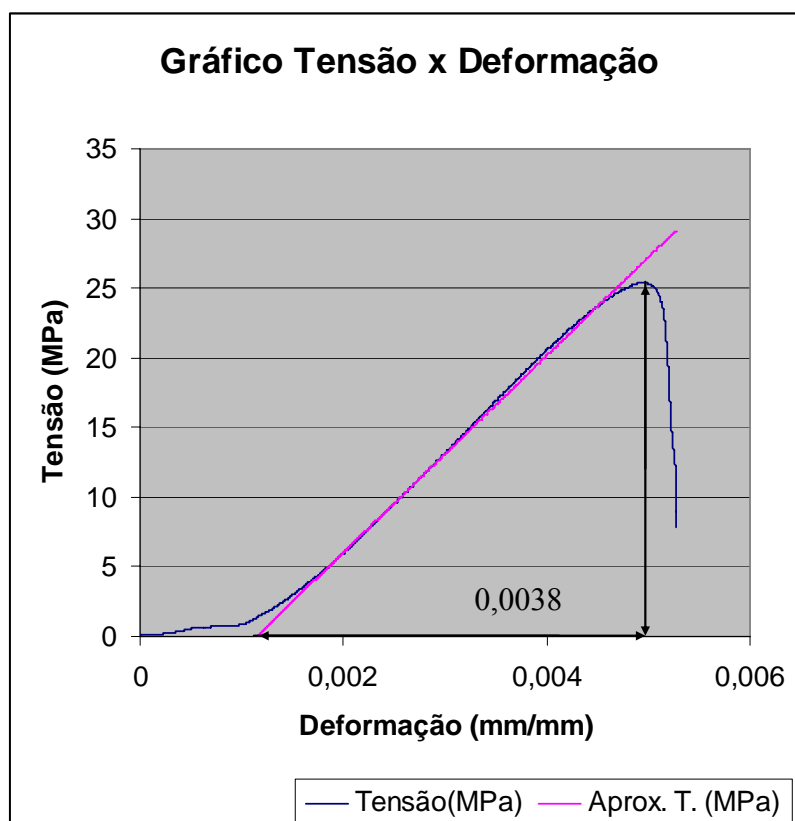


Figura D 1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.

## Apêndice D – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 1,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	28,04
-------------------	-------

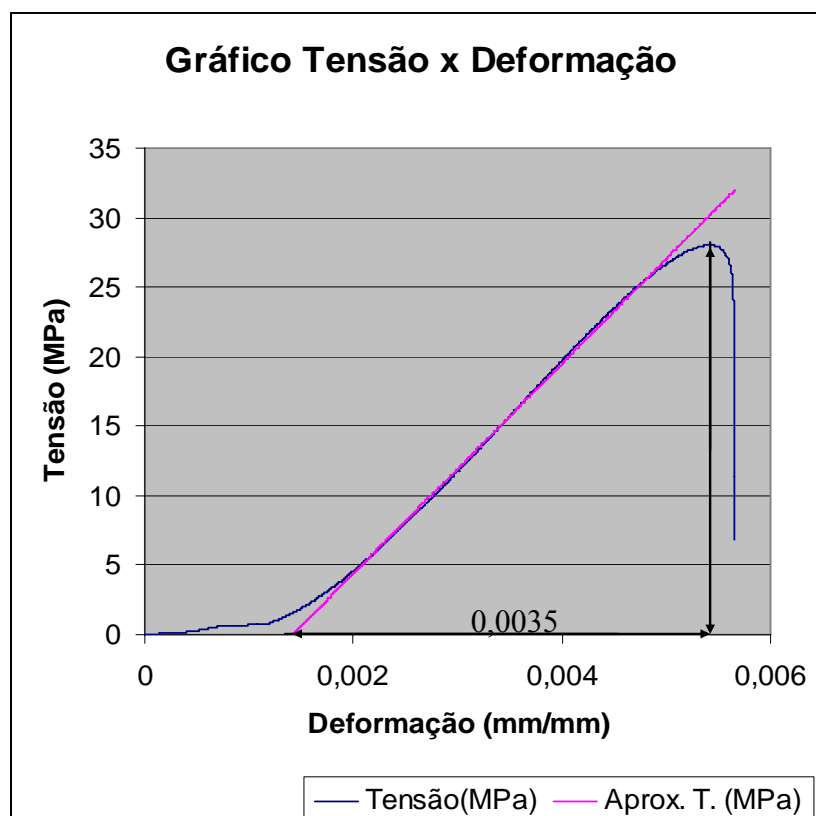


Figura D.2 – Gráfico tensão x deformação, elemento 02.

## Apêndice D – Ensaios iniciais: gráficos do concreto com 1,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	27,31
-------------------	-------

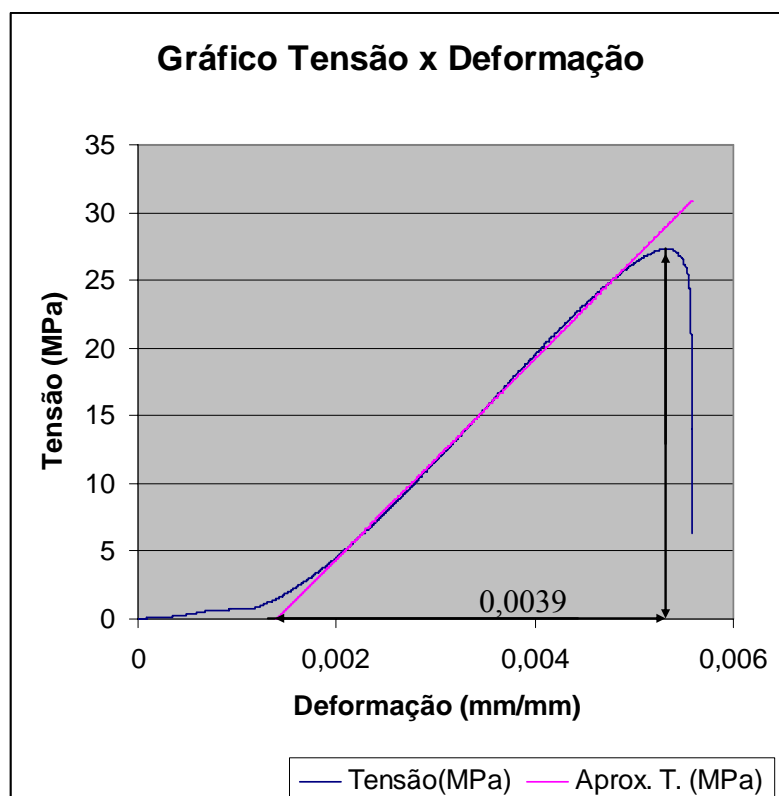


Figura D.3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice D – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 1,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	25,94
-------------------	-------

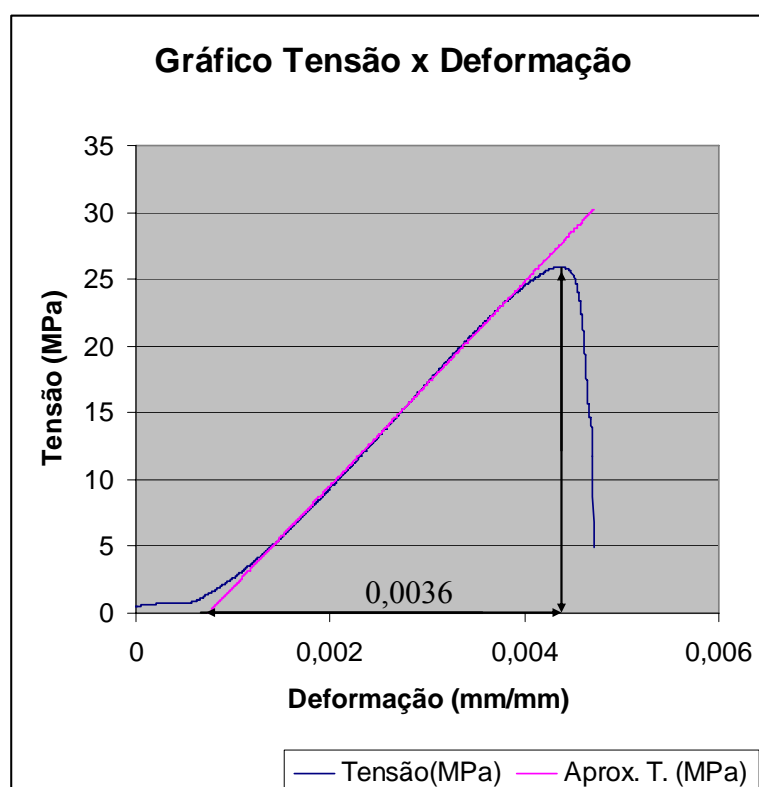


Figura D.4 – Gráfico tensão x deformação, elemento 04.



## Apêndice D – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 1,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	26,12
-------------------	-------

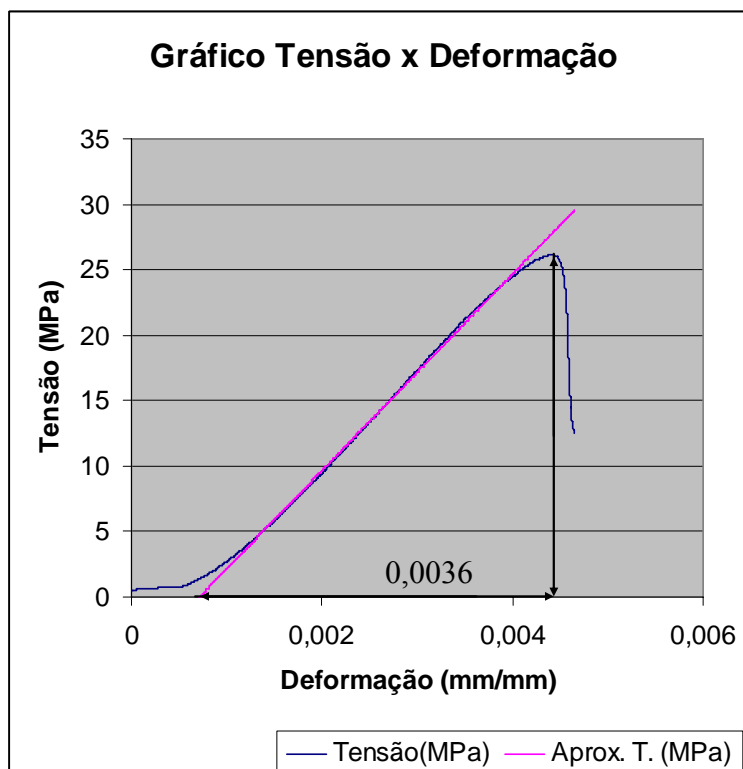


Figura D.5 – Gráfico tensão x deformação, elemento 05.

## Apêndice E – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 2,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	20,93
-------------------	-------

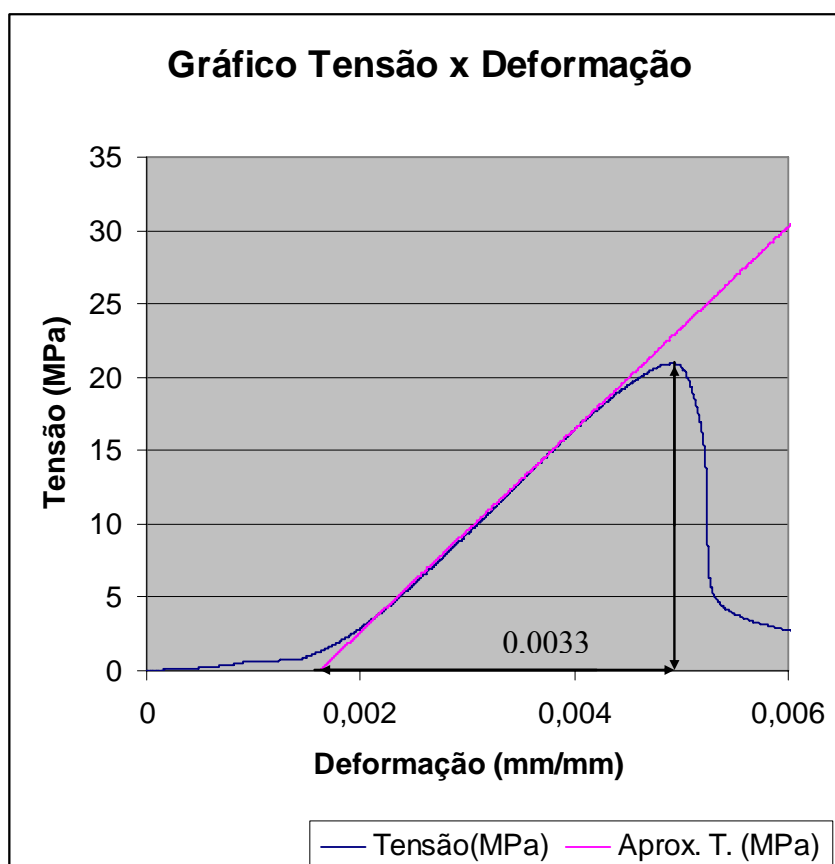


Figura E.1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.

## Apêndice E – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 2,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	21,30
-------------------	-------

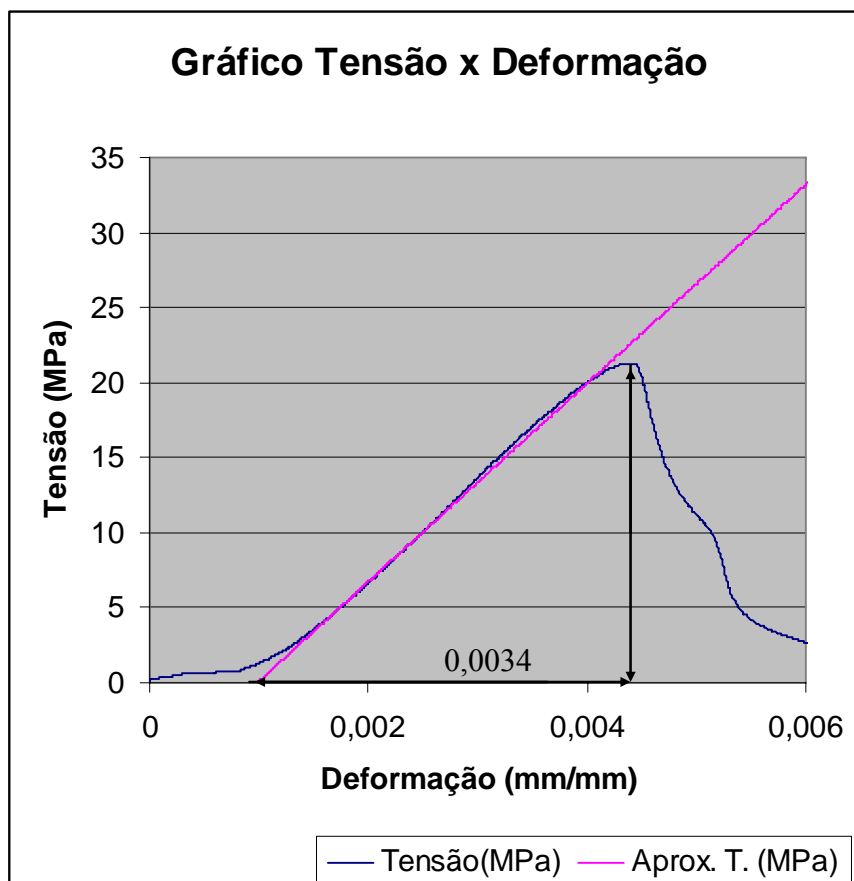


Figura E.2 – Gráfico força-deformação, elemento 02.

## Apêndice E – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 2,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	21,35
-------------------	-------

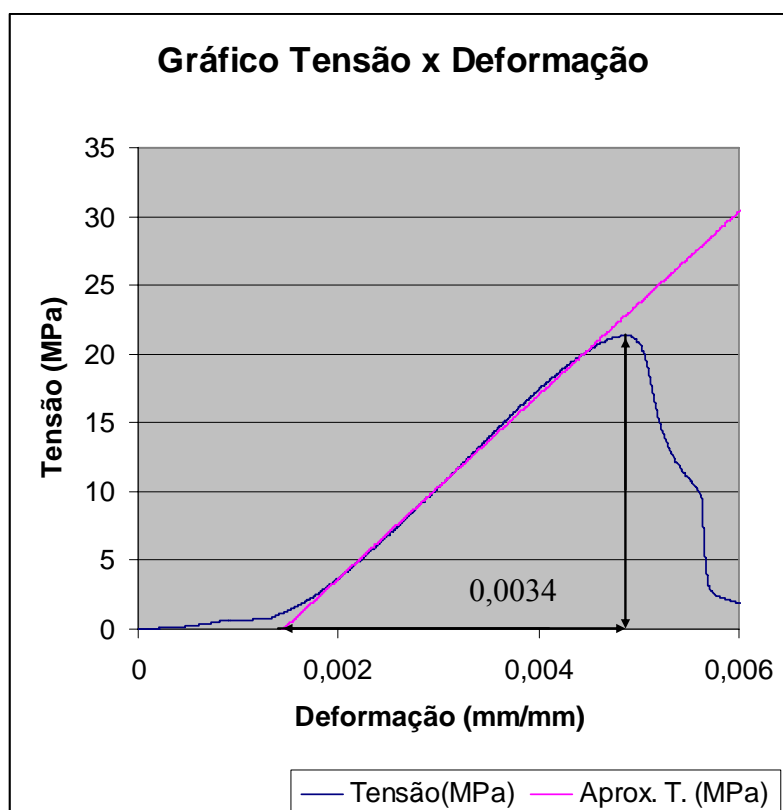


Figura E.3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice E – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 2,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	19,51
-------------------	-------

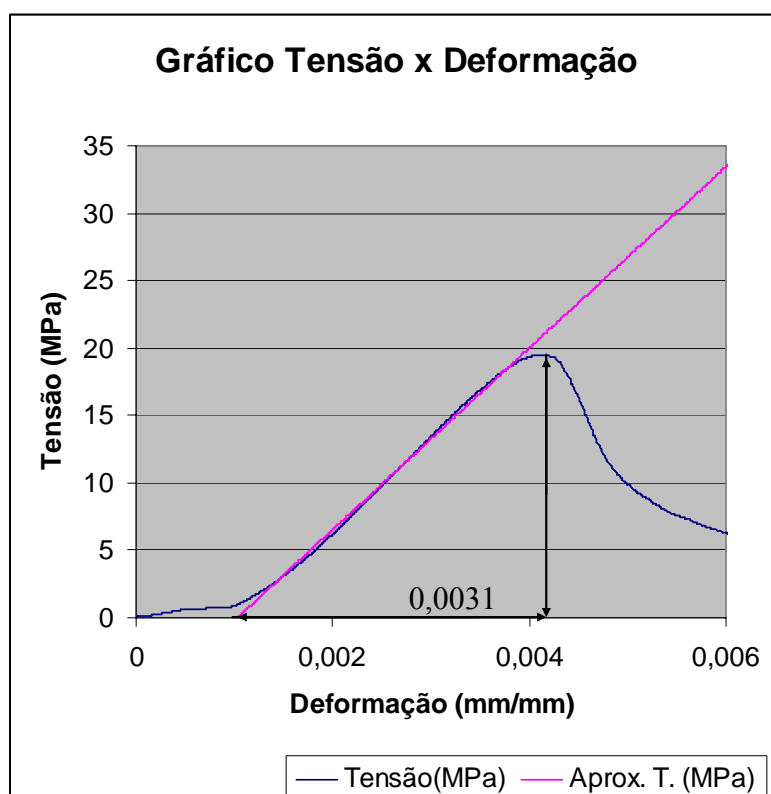


Figura E.4 – Gráfico tensão x deformação, elemento 04.

## Apêndice E – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 2,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	22,01
-------------------	-------

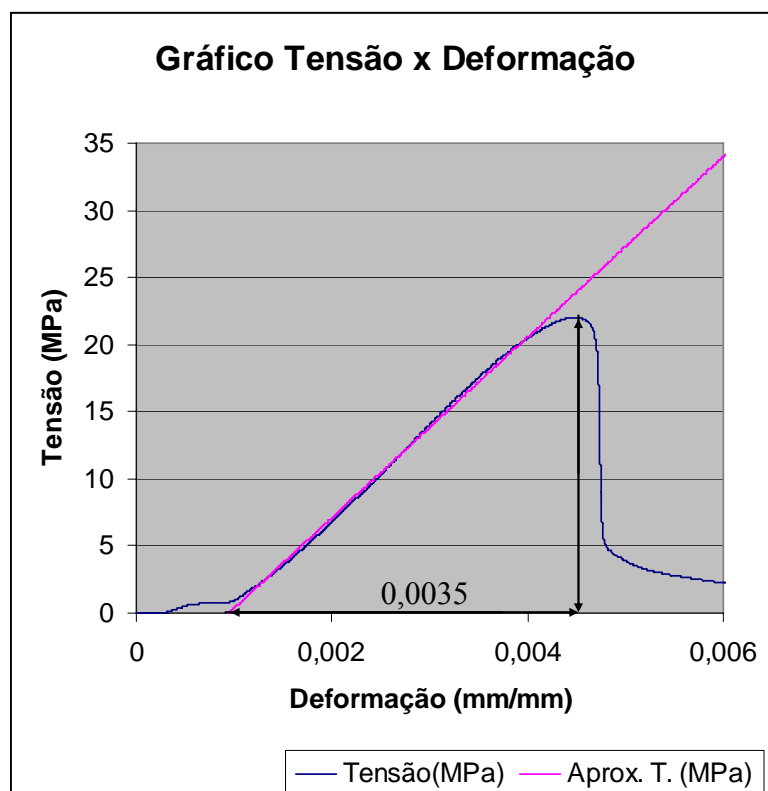


Figura E.5 – Gráfico tensão x deformação, elemento 05.

## Apêndice F – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 3,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	16,24
-------------------	-------

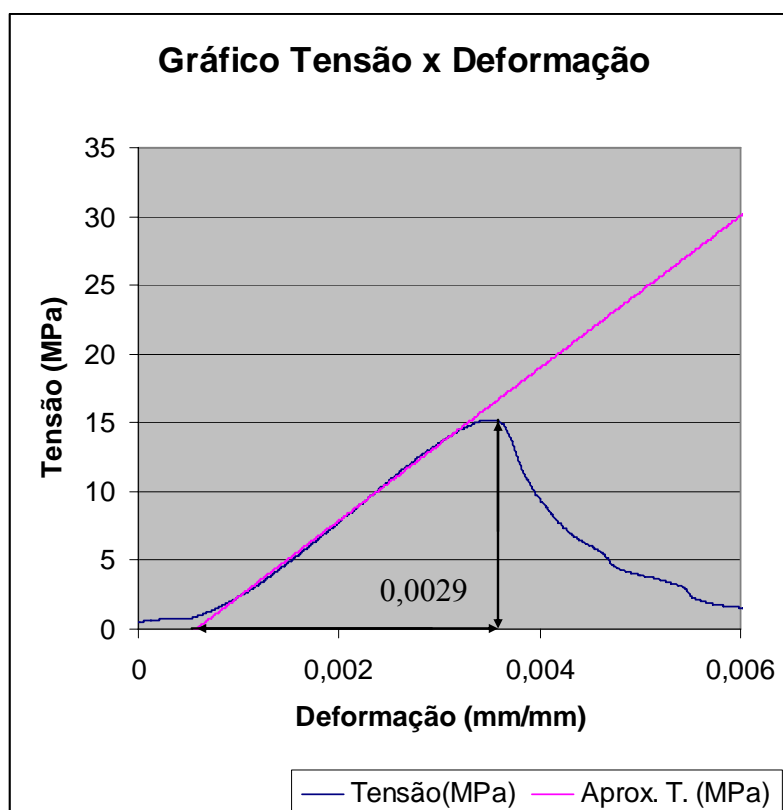


Figura F. 1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.

## Apêndice F – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 3,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	15,90
-------------------	-------

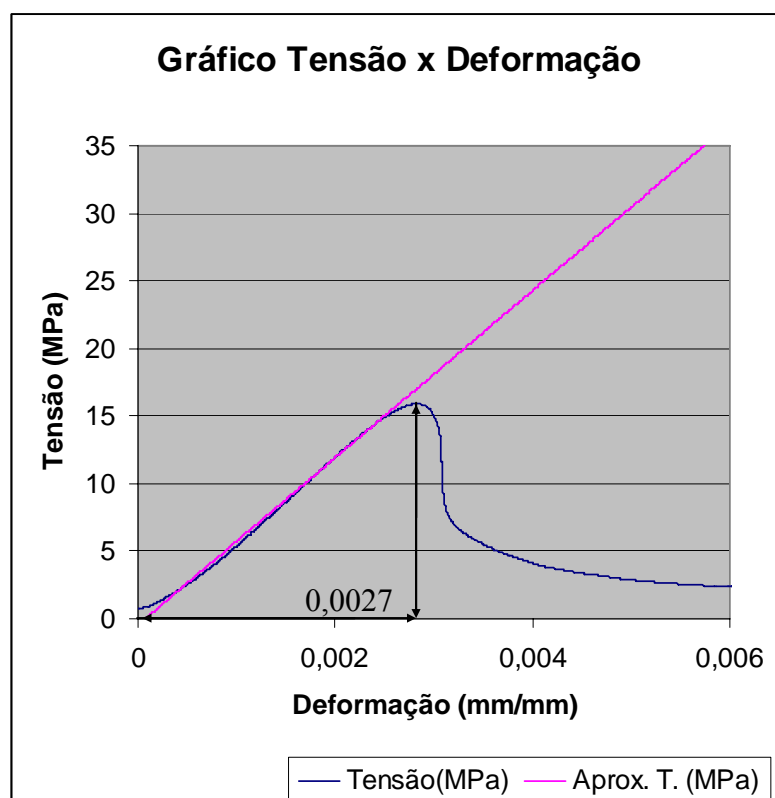


Figura F. 2 – Gráfico tensão x deformação, elemento 02.



## Apêndice F – Ensaio iniciais: gráficos do concreto com 3,0% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	15,22
-------------------	-------

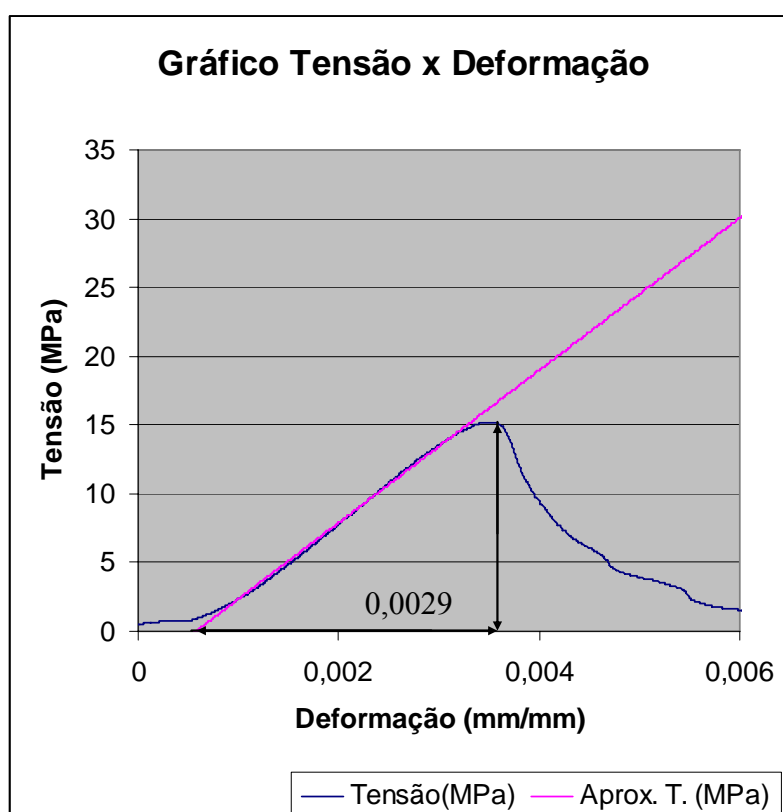


Figura F. 3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice G – Ensaios de comparação: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	34,45
-------------------	-------

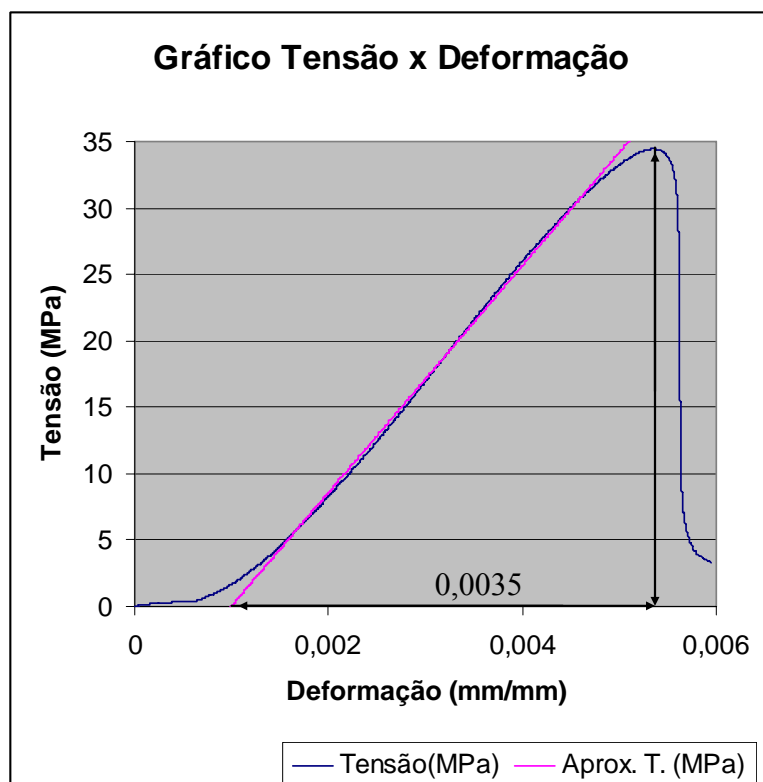


Figura G. 1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.

## Apêndice G – Ensaio de comparação: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	34,61
-------------------	-------

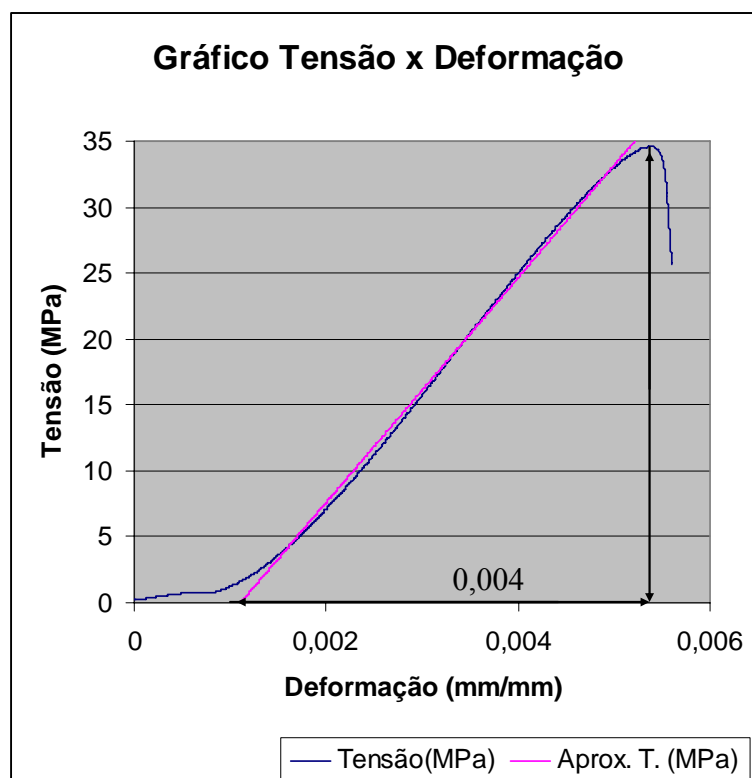


Figura G. 2 – Gráfico tensão x deformação, elemento 02.

## Apêndice G – Ensaios de comparação: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à compressão

Resistência (MPa)	30,50
-------------------	-------

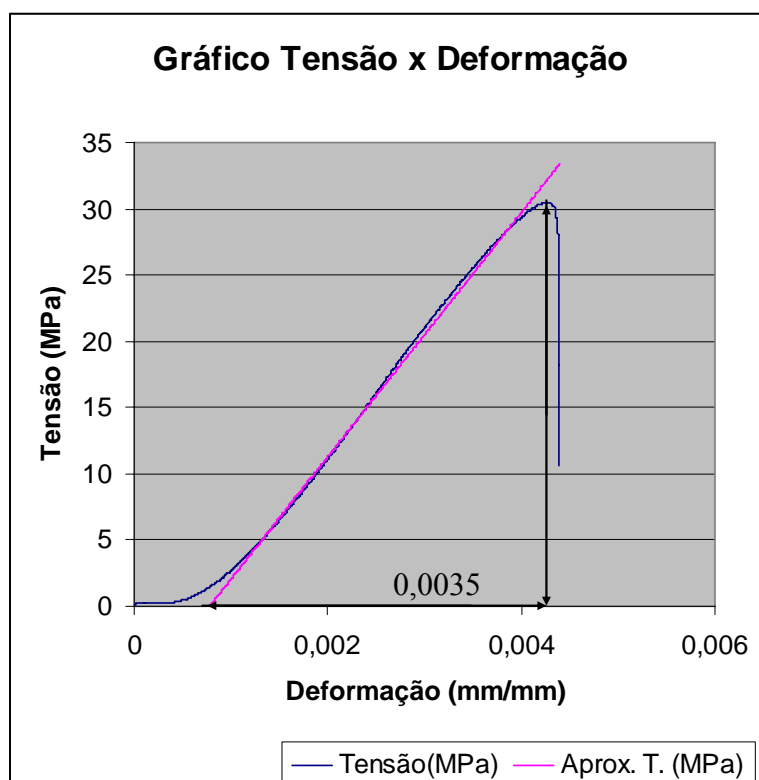


Figura G. 3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice G – Ensaio de comparação: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à tração na flexão

Resistência (MPa)	5,63
-------------------	------

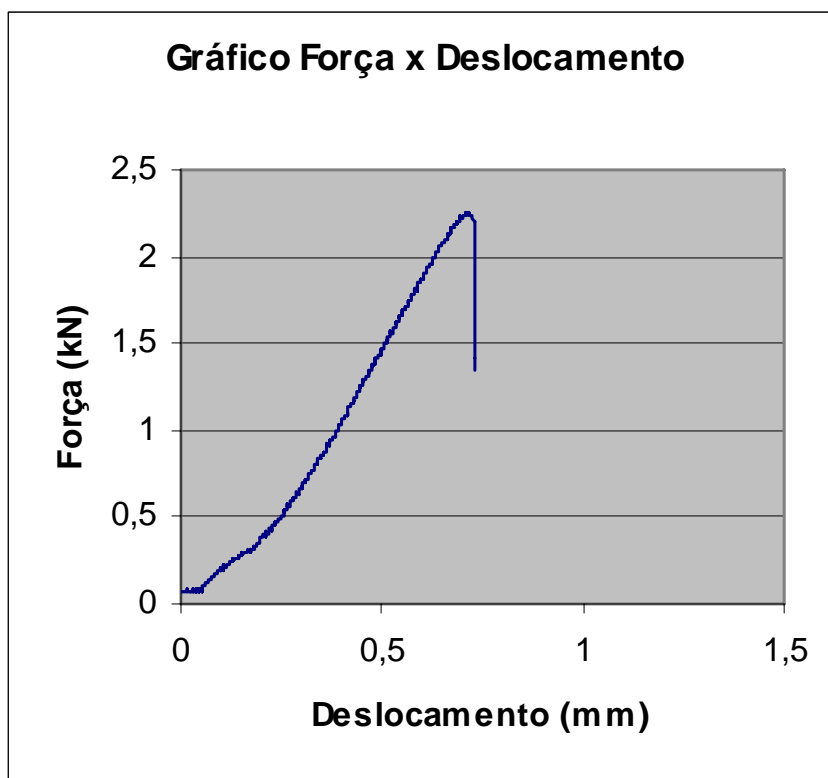


Figura G. 4 – Gráfico força x deslocamento, elemento 01.

## Apêndice G – Ensaio de comparação: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à tração na flexão

Resistência (MPa)	5,07
-------------------	------

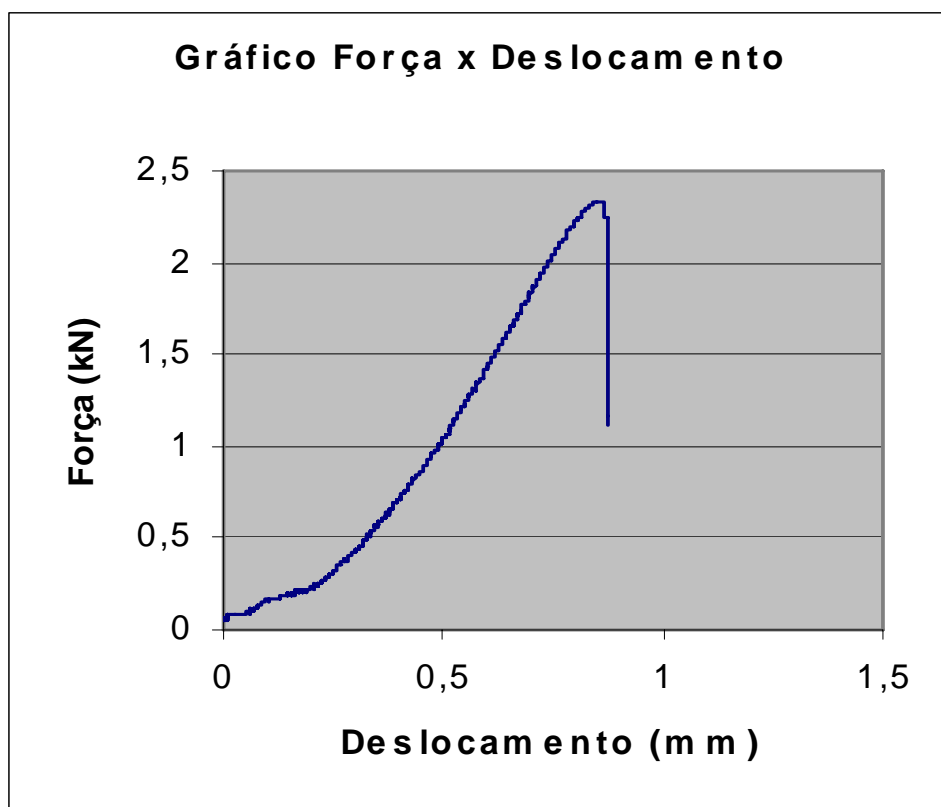


Figura G. 5 – Gráfico força x deslocamento. elemento 02.

## Apêndice G – Ensaios de comparação: gráficos do concreto de referência.

### Ensaio de resistência à tração na flexão

Resistência (MPa)	5,82
-------------------	------

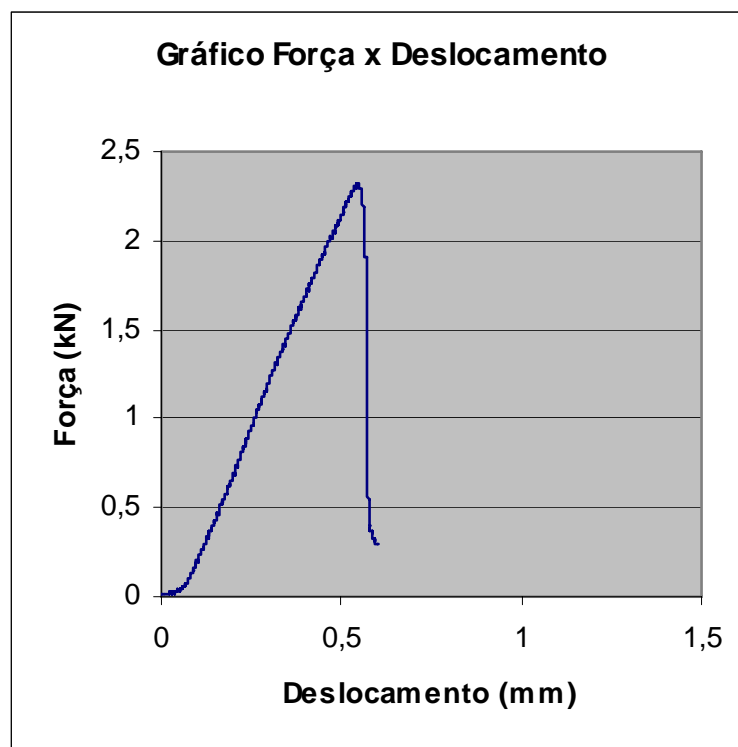


Figura G. 6 – Gráfico força x deslocamento, elemento 03.

## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	25,36
-------------------	-------

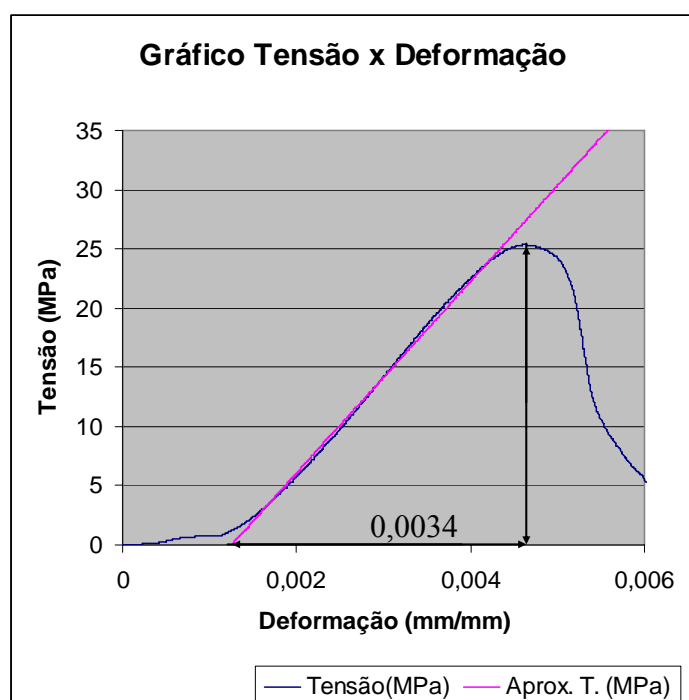


Figura H. 1 – Gráfico tensão x deformação, elemento 01.



## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	21,32
-------------------	-------

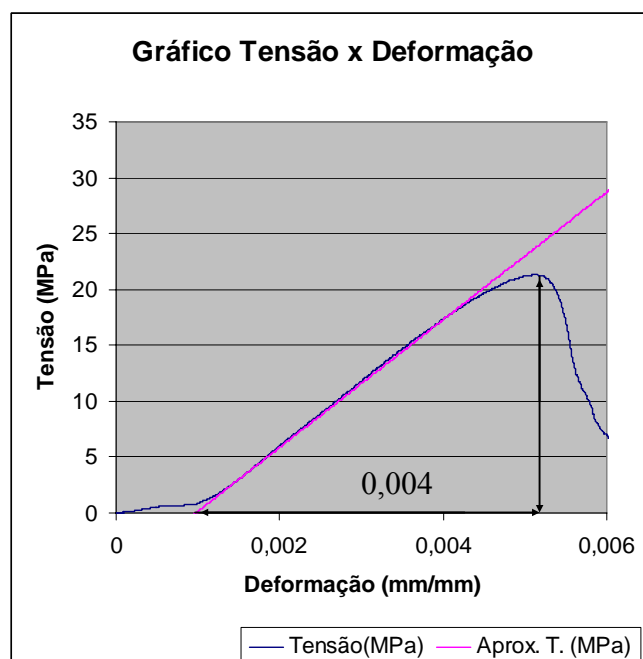


Figura H. 2 – Gráfico tensão x deformação. elemento 02.

## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	23,78
-------------------	-------

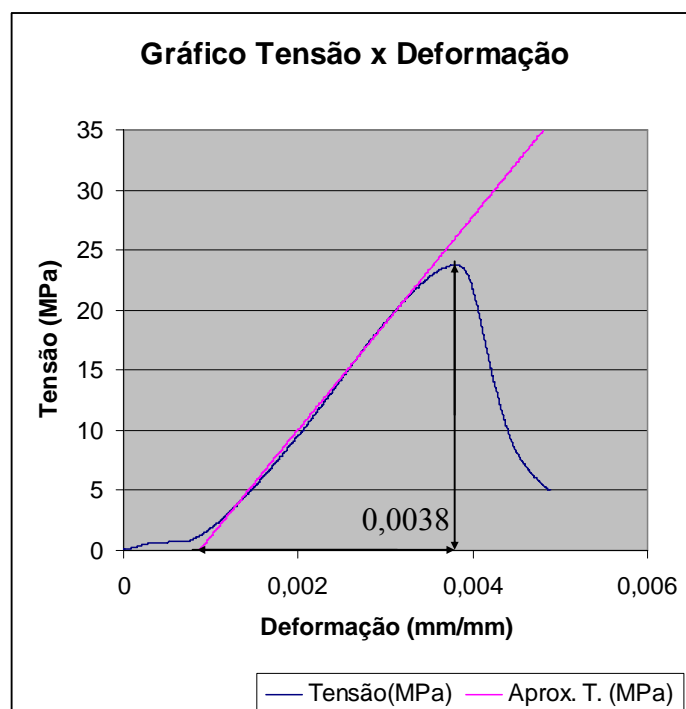


Figura H. 3 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.

## Apêndice H – Ensaio de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	19,85
-------------------	-------

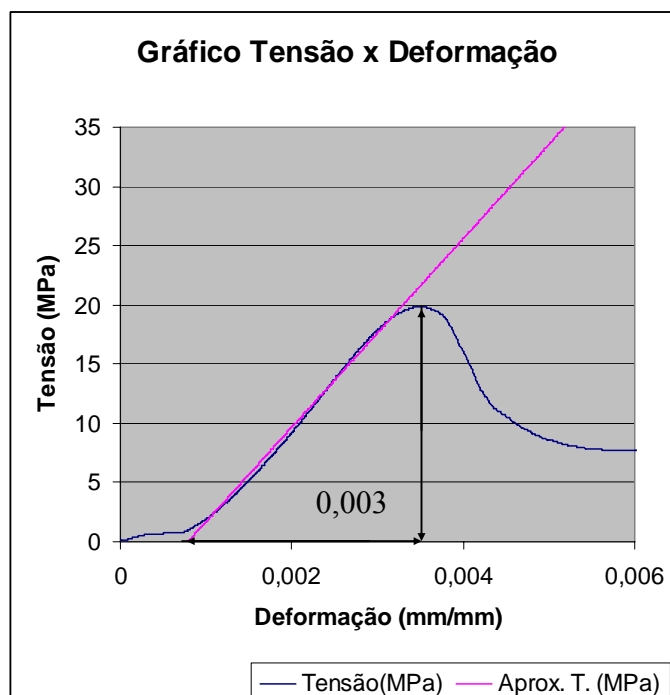


Figura H. 4 – Gráfico tensão x deformação, elemento 04.

## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

### Ensaio de resistência à compressão.

Resistência (MPa)	22,21
-------------------	-------

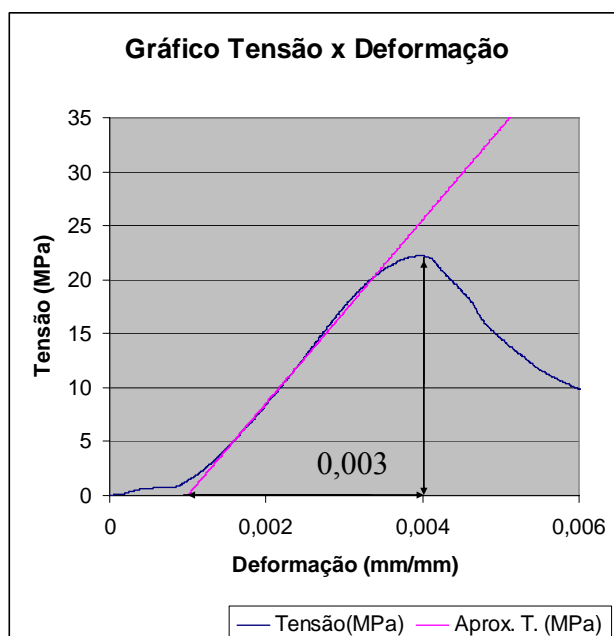


Figura H. 5 – Gráfico tensão x deformação, elemento 05.

## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

Ensaio de resistência à tração na flexão.

Resistência (MPa)	3,89
-------------------	------

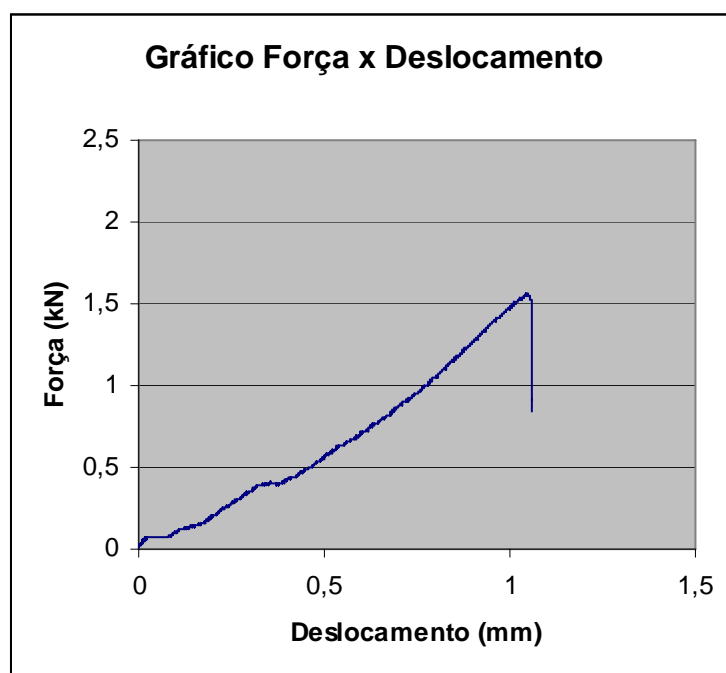


Figura H. 6 – Gráfico força-deformação, elemento 01.

## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

Ensaio de resistência à tração na flexão.

Resistência (MPa)	3,93
-------------------	------

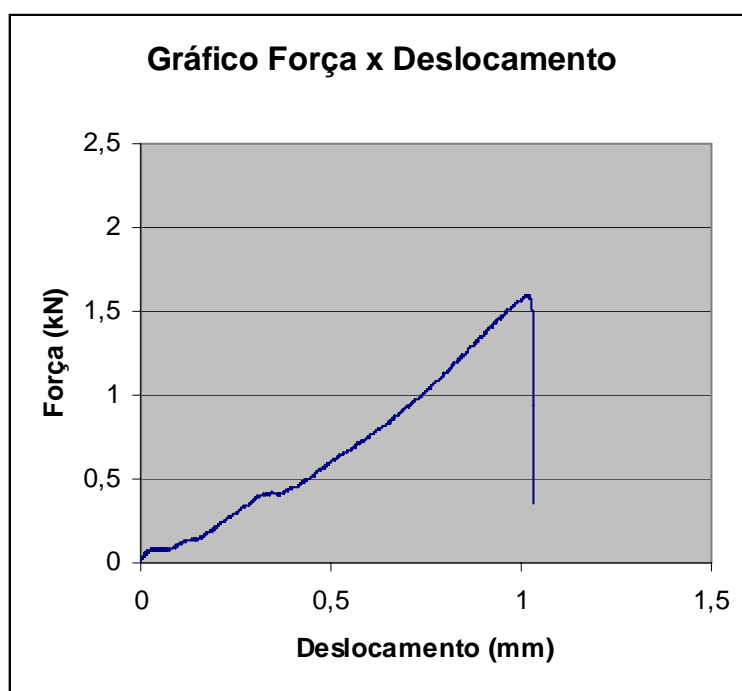


Figura H. 7 – Gráfico tensão x deformação, elemento 02.

## Apêndice H – Ensaios de comparação: gráficos do concreto com 2,% de borracha em relação ao peso de cimento.

Ensaio de resistência à tração na flexão.

Resistência (MPa)	3,78
-------------------	------

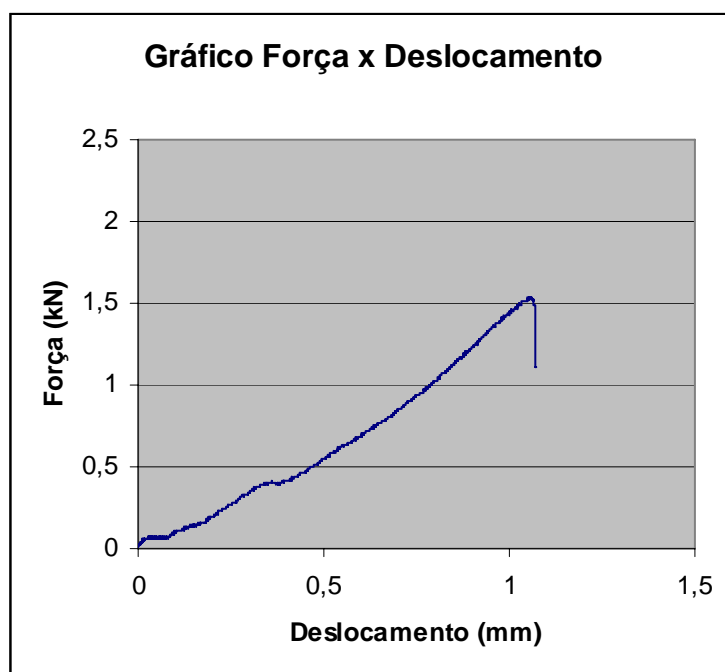


Figura H. 8 – Gráfico tensão x deformação, elemento 03.