

THIAGO FRANCISCO SILVA TRENTIN

**"Análise Estrutural de Tubos de Concreto
Armado com Resíduo de Borracha de Pneu"**

Ilha Solteira – SP
Novembro de 2014

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**"Análise Estrutural de Tubos de Concreto Armado
com Resíduo de Borracha de Pneu"**

THIAGO FRANCISCO SILVA TRENTIN

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Área do conhecimento: Estruturas

Ilha Solteira – SP
Novembro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T795a Trentin, Thiago Francisco Silva.
Análise estrutural de tubos de concreto armado com resíduo de borracha de pneu / Thiago Francisco Silva Trentin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
104 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2014

Orientador: José Luiz Pinheiro Melges

Co-orientador: Jorge Luís Akasaki

Inclui bibliografia

1. Concreto armado. 2. Tubos de concreto. 3. Resíduo de borracha de pneu.
4. Ensaio de compressão diametral.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise estrutural de tubos de concreto armado com resíduo de borracha de pneu

AUTOR: THIAGO FRANCISCO SILVA TRENTIN

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO
Departamento de Engenharia Civil / Escola Politécnica Da Usp

Prof. Dr. RODRIGO PIERNAS ANDOLFATO
Empresa Tecnobens Construções e Incorporações / Araçatuba - SP

Data da realização: 26 de novembro de 2014.

Dedico este trabalho aos meus avós José e Ana, e Nelson e Alzira, pelo exemplo de simplicidade, humildade e amor ao próximo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por mais uma conquista na minha vida. Agradeço por ter me dado força nos momentos difíceis e por ter me ajudado a ter perseverança e fé.

À minha família pelo apoio e por valorizarem meu trabalho e fazer parte dele. Agradeço em especial aos meus pais. Ao meu pai, Sebastião Valdir Trentin, meu exemplo e meu ídolo máximo, com quem aprendi desde pequeno a ser Engenheiro, a ter ética em todas as situações, e principalmente, a não desistir frente às dificuldades. Agradeço à minha mãe, Neila Maria da Silva Trentin, pelas palavras amigas nos momentos mais difíceis. Agradeço aos meus irmãos João e Pedro pelo carinho e pela amizade.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Prof. Dr José Luiz Pinheiro Melges pela cuidadosa orientação, sempre disposto a me auxiliar quando necessário.

Agradeço ao co-orientador e meu amigo Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki pela oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção (MAC), no qual muito pude aprender.

Agradeço ao Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho por ter permitido o uso das instalações do NEPAE para a realização dos ensaios experimentais e também pelas várias sugestões durante a execução dos mesmos.

Agradeço ao Prof. Dr. Renato Bertolino Junior por ter contribuído nas modelagens numéricas realizadas durante minha iniciação científica e por sempre me ajudar a encontrar a solução dos problemas.

À Tecnobens Construções e Incorporações Ltda. empresa que acreditou em meu potencial e que me ofereceu meu primeiro emprego.

Agradeço ao meu amigo e meu chefe, Engenheiro Civil Dr. Rodrigo Piernas Andolfato, que também exerceu o papel de meu orientador no que diz respeito à idealização de projetos estruturais e, além disso, me ensinou a enxergar que a pesquisa deve ter sempre cunho prático auxiliando a sociedade a ser diferente e melhor.

Agradeço a todo o corpo técnico da Tecnobens, pelo apoio, e por também terem participado de minha formação acadêmica. Em especial, ao Diretor Técnico Rogério Ramiro, aos projetistas Thales, Marsel e Rafael. Aos Engenheiros Mozart, Felipe, Leandro, Eduardo e Gabriela. Aos mestres de obras Giane, Rubens, Paulo e Rogério. Aos estagiários Paulo, Ana Paula, Amanda, Andreza e Maíra.

À construtora, CASO de São José do Rio Preto–SP, por ter gratuitamente confeccionado os tubos de concreto. Agradeço à Engenheira MsC. Ana Paula Fugii pelo apoio e pela orientação na confecção dos tubos.

Aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil da FEIS - UNESP, Gilson, Flávio, Mário e Ronaldo pela amizade, apoio e disposição para a realização e montagem do ensaio de compressão diametral dos tubos de concreto. Em especial também ao sr. Pascoalim que muito nos ajudou na montagem do ensaio, contribuindo com toda a sua valorosa experiência adquirida no Laboratório CESP de Engenharia Civil.

Agradeço aos meus amigos de iniciação científica, em especial ao Engenheiro Civil João Claudio e ao Engenheiro Civil MsC. João Victor, que auxiliaram na montagem dos ensaios de compressão diametral dos tubos. Agradeço meu grande amigo André Gomes que me auxiliou na interpretação dos resultados. Agradeço também aos meus colegas de graduação André Mantuan e Fernando Gilio que fizeram parte desse trabalho durante a iniciação científica.

*Onde houver ódio, que eu leve o amor;
Onde houver ofensa, que eu leve o perdão;
Onde houver discórdia, que eu leve a união;
Onde houver dúvida, que eu leve a fé;
Onde houver erro, que eu leve a verdade;
Onde houver desespero, que eu leve a esperança;
Onde houver tristeza, que eu leve a alegria;
Onde houver trevas, que eu leve a luz.*

Oração de São Francisco de Assis

TRENTIN, T. F. S. "**Análise Estrutural de Tubos de Concreto com Resíduo de Borracha de Pneu**". 2014. 98465 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

RESUMO

O concreto é um material que apresenta uma série de vantagens, como, por exemplo, boa durabilidade, baixa permeabilidade, resistência às condições atmosféricas e grande resistência frente aos esforços de compressão. Estas qualidades fizeram com que sua aplicação fosse difundida para a confecção de tubos de concreto destinados à captação e transporte de água da chuva uma vez que estes elementos são normalmente enterrados, e, deste modo, estão sujeitos a esforços de compressão e expostos à ação da água. No entanto, o concreto tem algumas limitações, como, por exemplo, baixa resistência à tração, elevado peso próprio, facilidade de fissuração e um comportamento frágil na ruptura. Assim, novos materiais passaram a ser estudados a fim de se encontrar novos componentes que pudessem minimizar as suas limitações. Um deles é o resíduo de borracha de pneu, que pode proporcionar ao concreto uma maior capacidade de deformação e também uma distribuição mais eficaz das tensões atuantes. Além disso, este resíduo também pode proporcionar um aumento da absorção de energia e uma diminuição da propagação de fissuras no estado endurecido. No entanto, vários estudos mostram que a inclusão de resíduos de borracha no concreto provoca uma diminuição da resistência mecânica à compressão, uma diminuição da trabalhabilidade das misturas e um aumento do teor de ar incorporado. Nesta pesquisa foi feita uma análise do comportamento estrutural de cinco tubos de concreto armado, sendo um deles sem adição de resíduo de borracha (traço TC), dois deles com uma quantidade de resíduos igual a 10 kg de borracha por metro cúbico de concreto (traço TR 10) e outros dois com uma quantidade de resíduo de 20 kg de borracha por metro cúbico de concreto (traço TR 20). Todos os tubos confeccionados tinham um diâmetro nominal de 60 cm e um comprimento efetivo de 150 cm. Para quantificar a resistência dos tubos foi utilizado o ensaio de compressão diametral, realizado conforme as recomendações da NBR 8890 (ABNT, 2007). Os deslocamentos diametrais na ponta e na bolsa foram medidos através da utilização de relógios comparadores. A força foi aplicada por um macaco hidráulico e sua magnitude foi medida por meio de uma célula de carga. Foram realizados, também, ensaios para a caracterização do concreto e testes de absorção de água utilizando-se de pedaços de concreto dos tubos rompidos (TC, TR 10 e TR 20) e de corpos de prova extraídos de dois tubos íntegros. (TC e TR 20). Foi observado que todos os tubos com resíduo de borracha de pneu seguiram o mesmo padrão de fissuração em relação ao tubo controle, porém, apresentando uma carga de fissura maior, retardando, deste modo, o início do processo de fissuração. Com relação à carga de ruína, os tubos com o traço TR 20 apresentaram valores ligeiramente menores que o do tubo TC, enquanto que, para os tubos com traço TR 10, foram observados valores ligeiramente maiores. Com relação aos resultados dos testes de absorção de água, todos os tubos apresentaram valores inferiores ao limite preconizado pela NBR 8890 (ABNT, 2007), além disso os tubos com resíduo tenham apresentado valores médio ligeiramente inferiores ao do traço controle.

Palavras-chave: Tubos de concreto armado, resíduo de borracha de pneu, ensaio experimental, ensaio de absorção de água.

TRENTIN, T. F. S. "**Structural analysis of reinforced concrete pipes with tire rubber residue**". 2014. 98465 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

ABSTRACT

The concrete material has a number of advantages like durability, low permeability, weather resistance and high compressive strength. These qualities have led its application to the rainwater collection, since the pipes are usually buried, and, thus, are subjected to compressive forces and exposed to the action of water. However, the concrete has some limitations, as, for example, low resistance to tensile stress, high self-weight, ease of cracking and a brittle behavior in rupture. Thus, many materials are being studied in order to be used as a new concrete component, seeking to minimize its disadvantages. One of them is the tire rubber residue. This residue is a fibrous material that takes a long time to decompose and increases the amount of trash in landfills, but it may give a greater deformation capacity and also a more effective distribution of stresses to the concrete. Furthermore, the tire rubber residue can provide an increase in energy absorption and a decrease in the propagation of cracks in the hardened state. However several studies show that the inclusion of tire rubber residue in the concrete causes a decrease in the mechanical strength to compression, a decrease in the workability of the mixtures and an increase of the content of entrained air. This work deals with the analysis of the structural behavior of five reinforced concrete pipes: one without the addition of tire rubber residue (designated as TC); two of them with an content of residue equal to 10 kg of residue per cubic meter of concrete (designated as TR 10); and the last two with a quantity of 20 kg per cubic meter of concrete (designated as TR 20). All the pipes had a nominal diameter of 60 cm and an effective length of 150 cm. In order to quantify the strength of the pipes, the diametral compression tests were performed according to the recommendations of the NBR 8890 (ABNT, 2007). The diametral displacements at the hub and at the spigot were monitored by the use of two dial gauge indicators. The applied force by an hydraulic jack was measured using a cell load. It was observed that all the pipes with the tire rubber residue followed the same pattern of cracking of the control pipe, but having a higher crack load, delaying the onset of the cracking process. It was observed that the force required to provoke the collapse of the pipes with the TR 20 mixture were lightly lower than to the pipe made with the TC mixture, while the ones made with the TR 10 mixture were slightly higher. Water absorption tests using pieces of concrete from the ruptured pipes (TC, TR 10 and TR 20) and also with specimens extracted from two non-tested pipes (TC and TR 20) were done. All the pipes had a content of the water absorption less than the limit fixed by the NBR 8890 (ABNT, 2007). Furthermore the pipes with tire rubber residue have shown lower absorption value than the control pipes.

Keywords: Reinforced Concrete pipe; tire rubber residue; experimental test, water absorption test

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tubulação de esgoto sanitário	23
Figura 2.2 – Travessia em Rodovia Rural.....	23
Figura 2.3 – Corte do Terreno para confecção de galeria de água pluvial.....	23
Figura 2.4 – Tubulação de água pluvial após ser instalada	23
Figura 2.5 – Ensaio de compressão diametral	24
Figura 2.6 – Fissuração do Tubo.....	25
Figura 2.7 – Ruptura do Tubo	25
Figura 2.8 – Distribuição de pressões nos tubos de concreto	26
Figura 2.9 – Distribuição das pressões idealizadas para o cálculo do Fator de Equivalência ...	26
Figura 2.10 – Processo de adensamento através de giro de compressão axial.....	30
Figura 2.11 – Processo de adensamento através de compactação do tubo por meio de vibração do molde central	30
Figura 2.12 – Diagrama carga-descolocamento	34
Figura 2.13 – Abertura de fissuras nas seções do topo e da base	35
Figura 2.14 – Abertura de fissuras nas seções laterais do tubo	36
Figura 2.15 – Principais variáveis geométricas envolvidas na resistência mecânica	38
Figura 2.16 – Comparação entre o comportamento de três diferentes tipos de fibra	40
Figura 2.17 – Fissuras observadas no concreto tracionado	41
Figura 2.18 – Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão	42
Figura 2.19 – Mecanismo de controle de fissuras	43
Figura 2.20 – Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo.....	44
Figura 2.21 – Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo.....	44
Figura 2.22 – Processo de remoldagem do pneu.....	45
Figura 2.23 – Composição de pneus radiais para automóveis	46
Figura 3.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo	50
Figura 3.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo	53
Figura 3.3 – Peneiramento do Resíduo de Borracha de Pneu	54
Figura 3.4 – Resíduo de borracha que é retida pela peneira de 6,3 mm de abertura.....	55
Figura 3.5 – Resíduo de borracha que é retida pela peneira de 2,38 mm de abertura.....	55
Figura 3.6 – Resíduo de borracha que é retida pela peneira de 1,19 mm de abertura.....	56
Figura 3.7 – Processo de mistura do resíduo após o peneiramento	58
Figura 3.8 – Detalhe da montagem das armaduras transversais e longitudinais	57
Figura 3.9 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração das armaduras.....	57
Figura 3.10 – Seções transversais retangulares onde atuam os momentos fletores.....	60
Figura 3.11 – Posicionamento da armadura na seção tubular.....	61

Figura 3.12 – Discretização da seção média em elementos lineares utilizando-se o programa Ftool.....	63
Figura 3.13 – Carga aplicada ao modelo	64
Figura 3.14 – Momento fletor em kN.cm.....	65
Figura 3.15 – Detalhamento das armaduras circulares transversais (“principais”)	66
Figura 3.16 – Detalhamento das armaduras longitudinais (“secundárias”)	67
Figura 3.17 – Fixação das espiras.....	68
Figura 3.18 – Fixação das armaduras longitudinais	68
Figura 3.19 – Armação Finalizada.....	68
Figura 3.20 – Colocação dos agregados	69
Figura 3.21 – Detalhe do misturador	69
Figura 3.22 – Detalhe das Esteiras.....	70
Figura 3.23 – Lançamento do concreto no núcleo vibratório	70
Figura 3.24 – Tubo deformado	70
Figura 3.25 – Cura dos tubos de concreto.....	70
Figura 3.26 – Adensamento dos corpos de prova.....	71
Figura 3.27 – Cura dos corpos de Prova	71
Figura 3.28 – Posicionamento no pórtico.....	72
Figura 3.29 – Detalhe do posicionamento do relógio comparador na ponta	72
Figura 3.30 – Detalhe da colocação do relógio comparador na bolsa	73
Figura 3.31 – Detalhe do sistema de aquisição de dados	73
Figura 3.32 – Corpos de prova extraído do tubo após o ensaio de compressão diametral	73
Figura 3.33 – Corpo de prova extraído do tubo integro.....	73
Figura 3.34 – Pedacos dos tubos rompidos colocados na estufa.....	74
Figura 3.35 – Corpos de prova extraídos de tubo integros.....	74
Figura 4.1 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TC.....	79
Figura 4.2 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 10.1	80
Figura 4.3 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 10.2	80
Figura 4.4 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 20.1	81
Figura 4.5 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 20.2.....	81
Figura 4.6 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - Comparativo.....	82
Figura 4.7 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TC	83
Figura 4.8 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 10.1.....	83
Figura 4.9 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 10.2.....	84
Figura 4.10 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 20.1.....	84
Figura 4.11 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 20.2.....	85
Figura 4.12 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - Comparativo.....	85
Figura 4.13 – Curva Carga x Tempo - TUBO TC	86
Figura 4.14 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 10.1	86
Figura 4.15 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 10.2	87

Figura 4.16 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 20.1	87
Figura 4.17 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 20.2	87
Figura 4.18 – Curva Carga x Tempo - Comparativo.....	88
Figura 4.19 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 10.1.....	89
Figura 4.20 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 10.2	90
Figura 4.21 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 20.1.....	90
Figura 4.22 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 20.2.....	90
Figura 4.23 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 10.1 ...	91
Figura 4.24 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 10.2 ...	91
Figura 4.25 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 20.1 ...	92
Figura 4.26 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 20.2 ...	92
Figura 4.27 – Utilização da lâmina padrão para o levantamento da carga de fissura.....	95
Figura 4.28 – Utilização da lâmina padrão para o levantamento da carga de fissura nas laterais.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Carga mínima de Ruptura: Tubos de concreto simples	27
Tabela 2.2 – Carga mínima de Ruptura: Tubos de concreto armado	27
Tabela 2.3 – Dimensões e folgas usadas na fabricação dos tubos	29
Tabela 2.4 – Índices de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento.....	31
Tabela 3.1 – Caracterização do cimento CP V – ARI MAX	50
Tabela 3.2 – Composição granulométrica do agregado miúdo.....	51
Tabela 3.3 – Índices de caracterização da areia	51
Tabela 3.4 – Composição granulométrica do agregado graúdo	52
Tabela 3.5 – Índices de caracterização do agregado graúdo	53
Tabela 3.6 – Características do aço	57
Tabela 3.7 – Composição dos traços utilizados como referência	58
Tabela 3.8 – Composição dos traços com resíduo de borracha de pneu: TR-10 e TR-20	59
Tabela 3.9 –Parâmetros utilizados no cálculo.....	61
Tabela 3.10 – Detalhamento das armaduras	66
Tabela 3.11 – Características geométricas dos tubos a serem analisados.....	69
Tabela 4.1 – Resistência a compressão axial dos corpos de prova.....	75
Tabela 4.2 – Resistência a tração por compressão diametral	76
Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade	76
Tabela 4.4 – Ensaio de absorção 1 – CPs provenientes de pedaços de concreto dos tubos rompidos.....	77
Tabela 4.5 – Ensaio de absorção 2 – CPs extraídos de tubos integros	78
Tabela 4.6 – Equações das retas tangentes as curvas “carga vs deslocamento diametral”	89
Tabela 4.7 – Cargas e deslocamentos críticos	93
Tabela 4.8 – Cargas de fissura e de ruptura com a utilização da lâmina padrão	96
Tabela 4.9 – Cargas de fissura e de ruptura tendo como referência a carga F_{cr}^*	97

SUMÁRIO

1.	Introdução	17
1.1	Objetivos.....	19
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivo específico.....	18
1.2	Justificativa	20
2.	Revisão bibliográfica	21
2.1	Saneamento básico.....	21
2.2	Tubos de concreto inseridos no contexto da drenagem urbana.....	23
2.3	Aspecto do projeto de tubulações de concreto.....	25
2.4	Produção de tubulações de concreto.....	31
2.5	Análise estrutural de tubos de concreto	33
2.6	Características do concreto com fibras	39
2.7	Resíduo de borracha de pneu	46
3.	Programa experimental.....	50
3.1	Materiais e equipamentos.....	50
3.1.1	Cimento.....	50
3.1.2	Agregado miúdo	50
3.1.3	Agregado graúdo	53
3.1.4	Água	54
3.1.5	Resíduo de borracha de pneu	55
3.1.6	Armaduras	58
3.2	Método.....	59
3.2.1	Dosagem dos concretos	59
3.2.2	Mistura dos materiais	59
3.2.3	Dimensionamento das armaduras.....	61
3.2.4	Montagem das armaduras	68
3.2.5	Dimensões dos tubos de concreto	69
3.2.6	Processo produtivo dos tubos	70
3.2.7	Moldagem dos corpos de prova (cp)	72
3.2.8	Ensaio realizados nos corpos de prova 10cm x 20 cm	72
3.2.9	Ensaio de compressão diametral	73
3.2.10	Ensaio de absorção	74

4.	Análise e discussão dos resultados	76
4.1	Resultados dos traços de concreto	76
4.1.1	Ensaio de compressão axial.....	76
4.1.2	Ensaio de tração por compressão diametral.....	76
4.1.3	Ensaio de módulo de elasticidade.....	77
4.1.4	Resultados obtidos no ensaio de absorção	78
4.2	Resultados do ensaio de compressão diametral	80
4.2.1	Curvas “carga vs deslocamento na ponta”	80
4.2.2	Curvas “carga vs deslocamento na bolsa”	83
4.2.3	Curvas “carga vs tempo”	87
4.2.4	Gráficos comparativos entre as forças críticas.....	89
4.2.5	Gráficos comparativos entre deslocamentos críticos	91
4.2.6	Critérios para o estabelecimento da carga de fissura e ruptura	96
5.	Considerações finais e conclusões	99
6.	Recomendações para futuras pesquisas	100
7.	Referências.....	102

1 INTRODUÇÃO

A instalação de galerias de águas pluviais, aliadas à uma série de medidas de planejamento urbano, é fundamental para o controle de enchentes e de doenças de veiculação hídrica, como também é de grande importância na minimização do impacto causado pelo homem ao meio ambiente (TUCCI, 2005).

Segundo El Debs (2003), as tubulações geralmente são enterradas e os condutos estão normalmente expostos a diversas ações, como, por exemplo, as pressões verticais do solo, as cargas verticais produzidas pelo tráfego na superfície, a carga devido ao próprio fluido no interior do tubo, bem como os dos fluidos presentes no solo. As tubulações também podem sofrer as ações indiretas, devido a recalques da base do conduto e a deslocamentos relativos entre a lateral e o eixo do tubo.

O material concreto apresenta uma série de vantagens, como durabilidade, baixa permeabilidade, resistência as intempéries e resistência a compressão. Estas qualidades fizeram com que a sua aplicação na captação de águas pluviais fosse difundida, uma vez que os condutos geralmente são enterrados, e dessa maneira, estão sujeitos a esforços de compressão e expostos à ação da água.

O concreto é um dos materiais mais usados nas obras de engenharia e se encontra em constante estudo. Sua grande aplicação se deve às seguintes vantagens: elevada durabilidade e versatilidade em assumir formas diferentes, sendo, por isso, utilizado de diversos modos, quer seja em peças estruturais e não estruturais (MARQUES, 2005).

Ao contrário da madeira e do aço comum, a capacidade do concreto de resistir à ação da água, sem deterioração significativa, faz dele um material ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar a água (METHA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Chama Neto (2004), no estabelecimento do traço deve-se levar em conta que o concreto para a confecção de tubos é um concreto de consistência seca, ou seja, de terra úmida, e não um concreto plástico.

Porém, o concreto apresenta algumas limitações, como, por exemplo, a baixa resistência aos esforços de tração, o peso próprio elevado, e o comportamento frágil na ruptura. Dessa forma, estudam-se novos materiais que possam ser incorporados ao concreto no intuito de minimizar as suas deficiências.

Um desses materiais é o resíduo de borracha de pneu, o qual pode proporcionar ao concreto uma maior capacidade de deformação e um aumento de sua tenacidade, diminuindo, deste modo, a propagação de fissuras no estado endurecido (TRIGO, 2008).

No entanto, o desempenho que o resíduo de borracha de pneu pode proporcionar às estruturas de concreto deve ser verificado, uma vez que, em várias pesquisas, existe a menção de que a inclusão do resíduo de borracha no concreto provoca uma diminuição da resistência mecânica à compressão, uma diminuição da trabalhabilidade das misturas e um aumento do teor de ar incorporado.

Deste modo, propõe-se, neste trabalho, um estudo de modelos experimentais de modo a avaliar o comportamento estrutural de tubos de concreto armado, sem e com resíduo de borracha de pneu, submetidos ao ensaio de compressão diametral, conforme as recomendações da norma técnica ABNT NBR 8890:2007.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal dessa pesquisa é o estudo do comportamento estrutural de tubos de concreto armado, com e sem adição de resíduo de borracha de pneu, quando submetidos ao ensaio de compressão diametral recomendado pela ABNT NBR 8890:2007.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar por meio do ensaio de compressão diametral se a incorporação do resíduo de borracha de pneu em tubos de concreto armado é uma alternativa estruturalmente e ecologicamente viável;
- Avaliação do comportamento estrutural dos tubos, estabelecendo-se as cargas de fissura das seções do topo e das laterais por meio da construção de curvas "Carga vs. Deslocamento diametral";
- Verificar se o resíduo de borracha de pneu pode melhorar o tubo no quesito da absorção;

1.2 Justificativa

Os materiais que compõem a estrutura dos pneus são de difícil decomposição e a sua disposição final é um problema complexo. Para que se possa realmente resolver a questão, é necessário mudar a sua destinação final, utilizando-se uma melhor tecnologia de tratamento disponível, ambientalmente segura e economicamente viável. Com esta mudança, poder-se-á gerenciar melhor o problema e assim garantir um reuso dos componentes do pneu na cadeia produtiva. (JORGE et. al., 2004)

Trigo (2008) e Fazzan (2011) estudaram a inclusão do resíduo de borracha de pneu em lajes de concreto armado. Os autores mostraram que o uso do resíduo de borracha de pneu não prejudicou o comportamento estrutural dessas lajes. O resíduo melhorou algumas características do compósito, proporcionando, por exemplo, um aumento da tenacidade, uma diminuição da retração e uma distribuição mais eficaz dos esforços.

Queiroz (2012) estudou a incorporação do resíduo de borracha de pneu em tubos de concreto simples. Os resultados dessa pesquisa mostraram que todos os tubos apresentaram resistência superior ao limite especificado pela norma ABNT NBR 8890: 2007.

Logo, a justificativa central dessa pesquisa consistiu em estudar a inclusão do resíduo de borracha de pneu em tubos de concreto armado com armadura superior a mínima, uma vez que, como mostrado anteriormente o resíduo pode ser utilizado em lajes de concreto armado e em tubos de concreto simples.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Saneamento Básico

Saneamento básico está relacionado com os serviços de abastecimento de água potável, de coleta e tratamento de esgoto, de manejo das águas pluviais urbanas e de coleta de resíduos sólidos, e de controle de pragas e de agentes patogênicos. O saneamento básico é feito com vistas a garantir a saúde, a segurança e o bem-estar da população, evitando as ameaças decorrentes da presença de contaminantes, detritos, resíduos, patógenos ou substâncias tóxicas em geral. Para que o saneamento cumpra sua função é necessário considerar a qualidade das redes e dos serviços oferecidos à população e que repercutem no nível de eficiência e de resposta à demanda existente nesse setor (IBGE, 2011).

Com o crescimento das grandes cidades e das construções permanentes de casas, aumentaram as quantidades de esgoto, lixo e outros materiais que eram depositados nas ruas. Muitas cidades, como Paris e Londres, tentaram o uso de fossas sépticas com resultados desastrosos, porque as fossas vieram a se tornar áreas de reprodução de agentes patogênicos. Essa condição permaneceu até o início do século XIX, quando sistemas de distribuição de água tornaram possível o uso da água para conduzir os dejetos das grandes cidades, tornando-as mais limpas e criando melhores condições de saúde e de estética (ACPA, 1980 apud Chama Neto, 2004).

O serviço drenagem urbana compreende essencialmente a coleta, o escoamento e a drenagem das águas das chuvas por equipamentos urbanos compostos por redes de drenagem subterrânea e superficial, bueiros, bocas de lobo, sarjetas, dispositivos dissipadores de energia e para controle de vazão, e a posterior disposição dos efluentes em pontos de lançamento ou corpos receptores que o objetivam o escoamento rápido das águas por ocasião das chuvas, prevenindo inundações, visando à segurança (IBGE, 2011).

O correto dimensionamento de um sistema de galerias de águas pluviais, tanto do ponto de vista estrutural quanto da sua capacidade de vazão, a sua correta instalação e o controle tecnológico do concreto usado em sua construção, aliadas a uma série de medidas de planejamento urbano, são de fundamental importância para o controle de enchentes e de doenças de veiculação hídrica, como também é de grande importância na minimização do impacto causado pelo homem ao meio ambiente (TUCCI, 2005).

Nesse contexto, o desenvolvimento urbano é responsável por alterar alguns componentes do ciclo hidrológico natural como, por exemplo, a diminuição da cobertura vegetal e o aumento da impermeabilização do solo por meio de ruas, calçadas e pátios.

Tucci (2005) defende uma gestão sustentável do escoamento pluvial, tanto proveniente das enchentes naturais da várzea quanto os da urbanização. Ele recomenda não somente o aumento da eficiência do escoamento por meio de condutos e canais drenando áreas inundadas, mas também a adoção de medidas não-estruturais previstas no plano diretor do município, como, por exemplo, alerta de inundação, zoneamento urbano, não ocupação de áreas de risco, utilização de pavimento drenante e adoção seguro contra inundações entre outras medidas.

Para tentar contornar tal problemática, no ano de 2007, foi aprovada a Lei nº 11.445, de 5/1/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico no País e determina, no seu art. 52, a elaboração do Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), sob a coordenação do Ministério das Cidades. Este plano irá definir diretrizes nacionais para o saneamento básico, sendo nele estabelecidos os objetivos e metas nacionais e macrorregionais e estratégias de governo, em busca da universalização desse sistema e do aperfeiçoamento na gestão dos serviços em todo o País, para um horizonte de 20 anos (ABTC, 2013).

O Plansab conta com investimentos estimados de 508 bilhões de reais a serem aplicados entre 2013 e 2033. O plano propõe metas nacionais e regionalizadas de curto, médio e longo prazo, para a maior abrangência dos serviços de saneamento básico. O plano nacional deve abranger o

abastecimento de água, o esgotamento sanitário, o manejo de resíduos sólidos e de águas pluviais, além de tratar das ações da União relativas ao saneamento nas áreas indígenas, nas reservas extrativistas e nas comunidades quilombolas. (PORTAL BRASIL, 2013)

2.2 Tubos de Concreto Inseridos no Contexto da Drenagem Urbana

Para a construção da rede de drenagem adequada aos problemas de infraestrutura, foi necessário que os condutos apresentassem resistência, durabilidade e impermeabilidade. Assim, a escolha de um material que possuísse essas características foi de suma importância.

No período compreendido entre 1800 e 1880, o surgimento da indústria de tubos de concreto em função das exigências do ponto de vista de saúde pública por água e tratamento dos dejetos, e necessidades na área de transportes, irrigação e drenagem (ACPA, 1980 apud CHAMA NETO, 2004).

Atualmente no Brasil, os fabricantes de tubos de concreto produzem tubos simples para águas pluviais, em diâmetros que variam de 200 a 600 mm e tubos de concreto armado em diâmetros que variam de 200 a 2000 mm, de maneira que os mesmos atendam as exigências prescritas pela norma brasileira NBR 8890/2003 (Chama Neto, 2004).

Segundo Fugii (2008), os tubos de concreto podem ser utilizados para diversas finalidades, dentre elas: esgoto sanitário (figura 2.1); travessias de rodovias (figura 2.2) e sistema de drenagem (figuras 2.3 e 2.4).

Figura 2.1 – Tubulação de Esgoto Sanitário



Fonte: FUGII (2008)

Figura 2.2 – Travessia em Rodovia Rural



Fonte: FUGII (2008)

Figura 2.3 – Corte do Terreno para confecção de galeria de água pluvial



Fonte: Próprio autor

Figura 2.4 – Tubulação de água pluvial após ser instalada



Fonte: Próprio autor

No ano de 2001 foi criada a ABTC – Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto – a qual visa organizar o setor, unir os fabricantes de tubos, e, principalmente, trabalhar na busca contínua da melhor qualidade dos tubos, esclarecendo os consumidores, prefeituras e empresas de saneamento, sobre as características e detalhes técnicos de produção e aplicação dos tubos de concreto, através da edição de publicações técnicas, promoção de cursos, seminários, palestras e participações em eventos, em parceria com a Associação Brasileira de Cimento Portland. (ABTC, 2013).

2.3 Aspecto do Projeto de Tubulações de Concreto

O grande potencial dos tubos pré-moldados de concreto no panorama nacional e internacional faz com que seja indispensável o constante aperfeiçoamento no procedimento de projeto de tubos. Os tubos de concreto estão diretamente ligados à área de saneamento que é sempre alvo de elevados investimentos de órgãos governamentais (FIORANELLI, 2005).

Devido à dificuldade da análise dos esforços presentes no tubo e das pressões aplicadas ao redor deste, a norma ABNT NBR 8890 (2007) padroniza o ensaio de compressão diametral aplicado em tubos de concreto. O ensaio de compressão diametral em tubos de concreto armado objetiva a determinação dos valores efetivos da carga de fissura e de ruptura do tubo. Para tubos de concreto com fibras metálicas, a ABNT NBR 8890:2007 estabelece que a tubulação deva ser submetida a ciclos de carregamentos, visando conhecer a sua carga isenta de dano. Esta, por sua vez, conforme pode ser vista na tabela A-4 da referida norma, corresponde à carga mínima de fissura no caso dos tubos convencionalmente armados. A figura 2.5 mostra o ensaio de compressão diametral.

Figura 2.5 – Ensaio de compressão diametral



Fonte: Foto de Rodolfo Mori.

Inicia-se o ensaio com a medição do comprimento útil (L) do tubo em três geratrizes defasadas entre si de um ângulo de 120° , sendo o valor do comprimento útil igual à média das três medidas. Coloca-se o tubo deitado sobre apoios planos e horizontais, que consiste em sarrafos retos de madeira de comprimento igual ou superior ao tubo; ao longo da geratriz do tubo, coloca-se uma vigota reta de madeira de comprimento maior ou igual ao do tubo. Para evitar a localização de esforços em possíveis irregularidades do tubo, pode-se intercalar entre o tubo e cada cutelo com uma tira de borracha de aproximadamente 5 mm de espessura ou com uma camada de areia (ABNT NBR 8890:2007).

Após o início do ensaio, quando o tubo começar a apresentar fissuras visíveis, deve-se utilizar a lâmina-padrão para se determinar a carga de fissura (Figura 2.6).

A seguir, o carregamento deve continuar sendo aplicado com a mesma velocidade do início do ensaio até que o tubo atinja o colapso, determinando-se, deste modo, a carga de ruptura (Figura 2.7).

Figura 2.6 – Fissuração do Tubo



Fonte: EL DEBS, 2003.

Figura 2.7 – Ruptura do Tubo



Fonte: Foto de Rodolfo Mori.

De acordo com El Debs (2003), os condutos devem ser capazes de resistir a uma força vertical aplicada no ensaio de compressão diametral igual à razão entre o valor da força resultante das cargas verticais que irão atuar sobre o tubo dividido por um fator de equivalência:

$$F_{ens} = \frac{q + q_m}{\alpha_{eq}}, \quad \text{onde:} \quad (\text{eq. 2.1})$$

F_{ens} : Força vertical aplicada no ensaio;

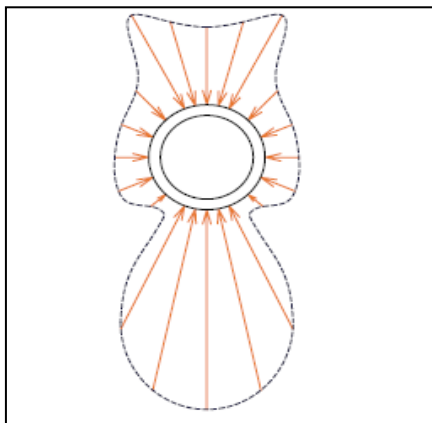
q : resultante das cargas verticais do solo;

q_m : resultante das sobrecargas, em geral de tráfego;

α_{eq} : Fator de equivalência;

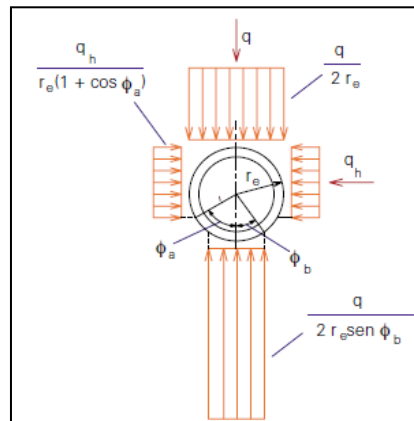
O fator de equivalência corresponde a uma minoração das cargas que agem sobre as tubulações. Este fator leva em conta o fato de que os modos de instalação e os tipos assentamento dos condutos influenciam em sua resistência. Nas figuras 2.8 e 2.9, apresentam-se um exemplo de distribuição de pressões nos tubos e a idealização dessas pressões para o cálculo do fator de equivalência, extraídas de El Debs (2003).

Figura 2.8 – Distribuição de pressões nos tubos de concreto



Fonte: EL DEBS, 2003.

Figura 2.9 – Distribuição das pressões idealizadas para o cálculo do Fator de Equivalência



Fonte: EL DEBS, 2003.

Portanto, o dimensionamento de uma canalização consiste nos seguintes passos:

- levantamento das cargas que agem sobre a tubulação; definição da forma de instalação; definição do tipo de assentamento; cálculo do fator de equivalência;

- b) realização de ensaio experimental para verificar se a solicitação atuante é menor que a capacidade resistente do tubo.

Com isso, a NBR 8890 (2007) separa os tubos de concreto em classes resistentes, dividindo-os segundo os seus diâmetros nominais. A partir da carga de fissura e da carga de ruptura, extraídas do ensaio de compressão diametral e apresentadas por meio de tabelas, é que se especifica um tubo para um determinado projeto. As tabelas 2.1 e 2.2, extraídas da ABNT NBR 8890 (2007), mostram respectivamente a carga de ruptura para tubos de concreto simples e armado.

Tabela 2.1 – Carga mínima de Ruptura: Tubos de concreto simples

TUBOS DE CONCRETO SIMPLES		
DN	CARGA MÍNIMA DE RUPTURA (kN/m)	
Classe	PS1	PS2
200	16	24
300	16	24
400	16	24
500	20	30
600	24	36

Fonte: ABNT NBR 8890:2007

Tabela 2.2 – Carga mínima de Ruptura: Tubos de concreto armado

DN	ÁGUA PLUVIAL							
	CARGA MÍNIMA DE FISSURA (TUBOS ARMADOS) OU CARGA ISENTA DE DANOS (TUBOS COM FIBRAS DE AÇO) (kN/m)				CARGA MÍNIMA DE RUPTURA (kN/m)			
Classe	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162
100	40	60	90	120	60	90	135	180
1100	44	66	99	132	66	99	149	198
1200	48	72	108	144	72	108	162	216
1500	60	90	135	180	90	135	203	270
1750	70	105	158	210	105	158	237	315
2000	80	120	180	240	120	180	270	360

Fonte: ABNT NBR 8890:2007

A ABNT NBR 8890:2007 aborda aspectos relativos ao concreto a ser utilizado na confecção de tubos, como também os ensaios que são necessários para a caracterização e aceitação dos mesmos, fixando:

a) máxima relação água-cimento: para tubos a serem aplicados em galerias de águas pluviais, a máxima relação é de 0,5. Porém este valor é elevado, à medida que o limitante prático da relação água/cimento conduz a valores bem menores dada a reologia bastante seca do material, da ordem de 0,2 a 0,3. Isso é necessário para se garantir a uniformidade dimensional do componente (item 4.1.1.1 da ABNT NBR 8890:2007);

b) tipo de cimento: pode ser utilizado qualquer tipo de cimento portland, porém, o mais utilizado é o CPV-ARI, uma vez que se almeja uma desforma rápida e também uma cura rápida para que a entrega dos tubos ao cliente seja mais eficaz (item 4.1.1.2 da ABNT NBR 8890:2007);

c) cobertura mínimo das armaduras em relação a face interna: deve ser, segundo o item 4.1.2.3 da ABNT NBR 8890:2007, de no mínimo 20 mm, e o cobertura externo de, no mínimo, 15 mm, para os tubos de diâmetro nominal até 600 mm. Para os tubos com diâmetros nominais maiores que 600 mm, o cobertura interno das armaduras deve ser de, no mínimo, 30 mm, e o cobertura externo de, no mínimo, 20 mm;

d) espaçamento entre espiras da armadura principal: não deve ser maior que 150 mm, inclusive entre a última espira e a extremidade do tubo (ponta). Na região da bolsa o espaçamento não deve ser maior que 50 mm e, na ponta, não deve ser maior que 70 mm, tendo, pelo menos, duas espiras em sua extremidade.

A ABNT NBR 8890:2007 estabelece também as tolerâncias nas dimensões e ensaios a serem realizados, conforme mostrado na tabela 2.3. Para controle de qualidade dos tubos, o item 6.5 da mesma norma estabelece que seja feito o ensaio de compressão diametral e posteriormente sejam retiradas duas amostras indeformáveis por tubo, sendo uma da região da ponta e outra da região da bolsa dos tubos submetidos à ruptura, para a realização do ensaio de absorção. No caso de tubos de águas pluviais de junta rígida, o

ensaio de permeabilidade não é exigido, devendo ser feito apenas se for exigência do cliente. O ensaio de permeabilidade deve ser realizado obrigatoriamente para tubos que se destinem a conduzir esgoto sanitário ou que se destinem a redes de água pluvial dotados de junta elástica.

Tabela 2.3 – Dimensões e folgas usadas na fabricação dos tubos

DN (mm)	COMPRIMENTO ÚTIL MÍNIMO DO TUBO L (mm)	COMPRIMENTO MÍNIMO DA BOLSA OU DA FÊMEA B (mm)	FOLGA MÁXIMA DO ENCAIXE C (mm)	ESPESSURA MÍNIMA DA PAREDE D* (mm)	
	Ponta e Bolsa	Ponta e Bolsa		Simples	Armado
200	1000	50	30	30	-
300	1000	60	30	30	45
400	1000	65	30	40	45
500	1000	70	40	50	50
600	1000	75	40	55	60
700	1000	80	40	-	66
800	1000	80	40	-	72
900	1000	80	40	-	75
1000	1000	80	40	-	80
1100	1000	80	50	-	90
1200	1000	90	50	-	96
1300	1000	90	50	-	105
1500	1000	90	60	-	120
1750	1000	100	60	-	140
2000	1000	100	60	-	180

Fonte: ABNT NBR 8890:2007

O ensaio de absorção objetiva a determinação do índice de absorção de água em tubos de concreto destinados a esgoto sanitário e águas pluviais. A absorção máxima de água em relação à sua massa seca é limitada a 8% para tubos destinados a conduzir águas pluviais e a 6% para tubos destinados à coleta de esgoto sanitário. A porcentagem da absorção é dada por:

$$A = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_0} \right) \cdot 100, \text{ onde:} \quad (\text{eq. 2.2})$$

A: índice de absorção de água, em porcentagem;

M1: massa do corpo-de-prova seco, em gramas;

M0: massa do corpo-de-prova após ensaio saturado, em gramas;

2.4 Produção de Tubulações de Concreto

Nas fábricas, os tubos podem ser adensados por meio de procedimentos de giro de compressão axial ou por compactação do tubo através de vibração do molde interno, conforme Chama Neto (2004). Este procedimento encontra-se respectivamente nas figuras 2.10 e 2.11.

Figura 2.10 – Processo de adensamento através de giro de compressão axial



.Fonte: MENEGOTTI EQUIPAMENTOS disponível no trabalho de FUGII 2008.

Figura 2.11 – Processo de adensamento através de compactação do tubo por meio de vibração do molde central



Fonte: MENEGOTTI EQUIPAMENTOS disponível no trabalho de FUGII 2008.

Para a confecção dos tubos de concreto almeja-se um processo vibratório intenso. Este fato deve-se à consistência seca do traço, uma vez que o valor do abatimento em tronco de cone é próximo a zero (CHAMA NETO 2004).

Os concretos de consistência seca exigem um processo de adensamento enérgico (vibro-prensagem) para sua moldagem, com o objetivo de eliminar o ar aprisionado e conseqüentemente reduzir o valor do índice de absorção de água, bem como o de proporcionar o contato íntimo da água com o cimento, condição essencial para as reações de endurecimento (CHAMA NETO 2004).

Desta maneira, o concreto possui consistência de “terra úmida” e não a de um concreto plástico; neste último, a pasta (cimento + água) ocupa todos os espaços entre os agregados. Já para o concreto de consistência seca, é a vibração que propicia a expulsão do ar dos vazios e o adensamento do concreto (CHAMA NETO 2004). A tabela 2.4, extraída de Araújo, Rodrigues e Freitas (2010), ilustra os Índices de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e de condições de adensamento.

Tabela 2.4 – Índices de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento

CONSISTÊNCIA	ABATIMENTO (cm)	TIPO DE OBRA	TIPO DE ADENSAMENTO
Extremamente seca (terra úmida)	0	Pré Fabricação	Condições especiais de adensamento
Muito Seca	0	Grandes massas; pavimentação	Vibração muito enérgica
Seca	0 a 2	Estruturas de concreto armado ou protendido	Vibração enérgica
Rija	2 a 5	Estruturas correntes	Vibração normal
Plástica (média)	5 a 12	Estruturas correntes	Adensamento manual
Úmida	12 a 20	Estruturas correntes sem grandes responsabilidades	Adensamento manual
Fluida	20 a 25	Concreto inadequado para qualquer uso	-

Fonte: ARAÚJO, RODRIGUES E FREITAS, 2010.

Ressalta-se que o fato de se almejar um concreto de consistência seca para a confecção de tubos e artefatos de concreto deve-se ao fato de se objetivar uma rápida retirada da fôrma. Com isso, a utilização de um concreto

muito fluido acarretaria na necessidade de um tempo maior para retirada da fôrma e uma perda de produtividade.

Ligado também ao aspecto de uma maior produtividade, a maioria das indústrias de tubos de concreto utiliza o cimento do tipo CPV-ARI, uma vez que o concreto elaborado com este tipo de cimento atinge grande resistência já nos primeiros dias de sua aplicação. Desta forma, faz com que a indústria atenda seus clientes com maior agilidade.

O concreto de alta resistência inicial, como o próprio nome já diz, é aquele que tem a característica de atingir grande resistência com pouca idade, podendo dar mais velocidade à obra ou ser utilizado para atender situações emergenciais. Sua aplicação pode ser necessária em indústrias de pré-moldados, em estruturas convencionais ou protendidas, na fabricação de tubos e de artefatos de concreto, entre outras. O aumento na velocidade da execução das obras permite a redução dos custos com funcionários, com alugueis de fôrmas e de equipamentos, e, além disso, possibilita diversos outros ganhos de produtividade (PORTAL DO CONCRETO, 2013).

2.5 Análise Estrutural de Tubos de Concreto

Segundo a NBR 6118 (2007), o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações em uma estrutura que a levem ao Estado Limite Último (ELU), ou que a conduza aos Estados Limites de Serviço (ELS). A ocorrência de tais estados limita a máxima solicitação e os máximos deslocamentos que podem ser impostos a um elemento estrutural por uma ação externa. A solicitação deve ser sempre menor que a resistência do elemento em questão, como, também, os deslocamentos, as vibrações e as deformações devem respeitar os limites previstos em norma.

Segundo Zaidler (1983), a resistência dos condutores depende, fundamentalmente, da forma da seção transversal e dos materiais que os constituem. Os tubos de concreto apresentam extrema complexidade principalmente pelas condições intrínsecas de hiperestaticidade e também por causa das condições em que é cercado nos aspectos da mecânica dos solos, ou seja, em suas condições de carregamento e de apoio.

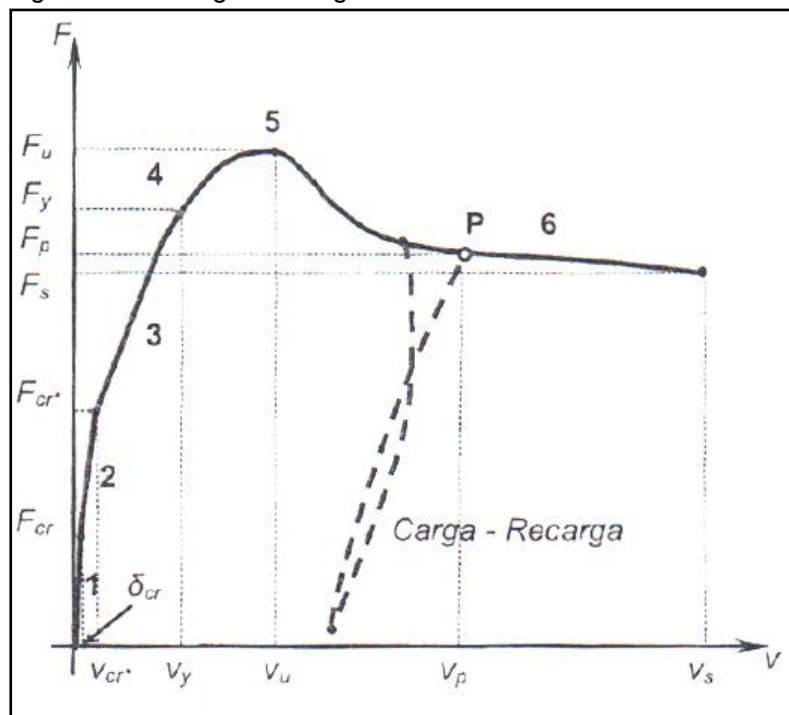
Devido a tal complexidade, o principal instrumento para avaliar comportamento estrutural de tubos de concreto é o ensaio de compressão diametral. Este ensaio possibilita a simulação das cargas que a tubulação estará sujeita em condições de uso. O ensaio possibilita a visualização da forma de ruptura de cada tipo de tubo.

A ABNT NBR 8890:2007 fixa a carga mínima de ruptura para os tubos de concreto conforme seu diâmetro, sua classe resistente e o tipo de armação (barras de aço ou reforçado com fibras metálicas). Para tubos de concreto simples, é fixada apenas a carga de ruptura mínima que deve ser atingida no ensaio de compressão diametral. Já para tubos de concreto reforçados com barras de aço é necessário que o tubo atinja uma carga mínima de fissura (tubos armados) ou uma carga isenta de dano (tubos reforçados com fibras de aço), e uma carga mínima de ruptura.

Segundo De La Fuente et. al. (2010), os tubos de concreto apresentam as mesmas fases durante o ensaio de compressão diametral independente do tipo de reforço. Porém, os modos de ruptura podem ser vários: flexão, cortante e tensões radiais. O trabalho em questão é focado nos mecanismos de ruptura por tensões normais, ou seja, no rompimento do concreto comprimido ou do aço tracionado.

Fuente et. al. (2010) realizou uma análise numérica de tubos de concreto. O autor constatou que os tubos de concreto submetidos ao ensaio de compressão diametral apresentam uma resposta estrutural que se decompõe em algumas fases, mostradas na figura 2.12. Estas fases são: (1) Elástica, (2) Elástica – Fissurada, (3) Fissurada, (4) Pré – Ruptura, (5) Ruptura, e (6) Pós Ruptura.

Figura 2.12 – Diagrama carga-descolocamento



Fonte: DE LA FUENTE et al, 2010.

Fase elástica (1): a resposta ao ensaio é dada principalmente pela geometria do tubo e pela rigidez da matriz de concreto. Esta fase termina quando a carga de fissura (F_{cr}) é atingida, sendo que a primeira seção a fissurar é a do topo e da base. Na figura 2.13 são mostradas as seções do topo e da base fissuradas, referentes aos pontos (1) e (2), adaptadas de HAKTANIR et. al, (2006);

Fase elástica fissurada (2): nesta etapa, o tubo já se encontra em um estágio de fissuração. Devido à perda de rigidez das seções do topo e da base e à grande hiperestaticidade do tubo, ocorre uma redistribuição de carregamentos no sistema. O ensaio segue com a curva “carga x deslocamento” com uma tendência praticamente linear apenas com uma ligeira perda de rigidez em relação à fase anterior. Esta fase termina quando ocorre a fissuração das seções laterais e a carga (F_{cr^*}) é atingida. Salienta-se que, para tubos de concreto simples e para tubos de concreto armado com taxas de armadura inferiores à mínima, a carga (F_{cr^*}) corresponde à carga última da tubulação (F_u), pois, nesse caso, a ruptura é frágil. Na figura 2.15, são mostradas as seções laterais fissuradas referentes aos pontos (3) e (4), adaptadas de HAKTANIR et. al, (2006);

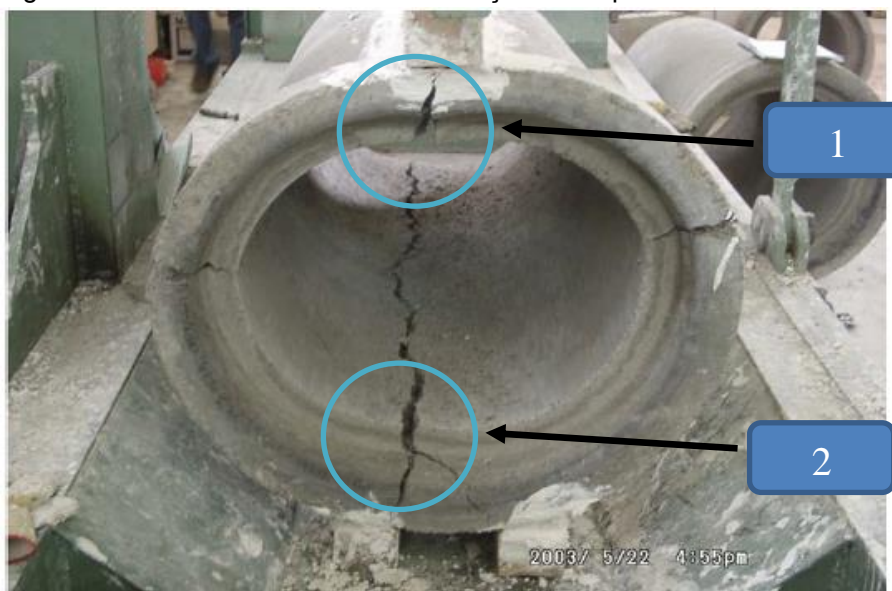
Fase fissurada (3): ocorre uma nova redistribuição do carregamento e o padrão de fissuração se estabiliza. Os tubos de concreto armado apresentam carga última no ramo entre a carga (F_{cr}) e (F_y).

Fase de pré ruptura (4): consiste em uma degradação progressiva do tubo que gera uma fissuração secundária. Um novo processo de fissuração é produzido e a esta fase é finalizada quando se alcança a carga última (F_u).

Fase ruptura (5): corresponde a um estado de plastificação a partir do qual o tubo não aceita maior carga. Tubos com quantidades de aço superiores à mínima possuem um comportamento mais dúctil e atingem a carga de ruptura como mostrado na figura 2.14.

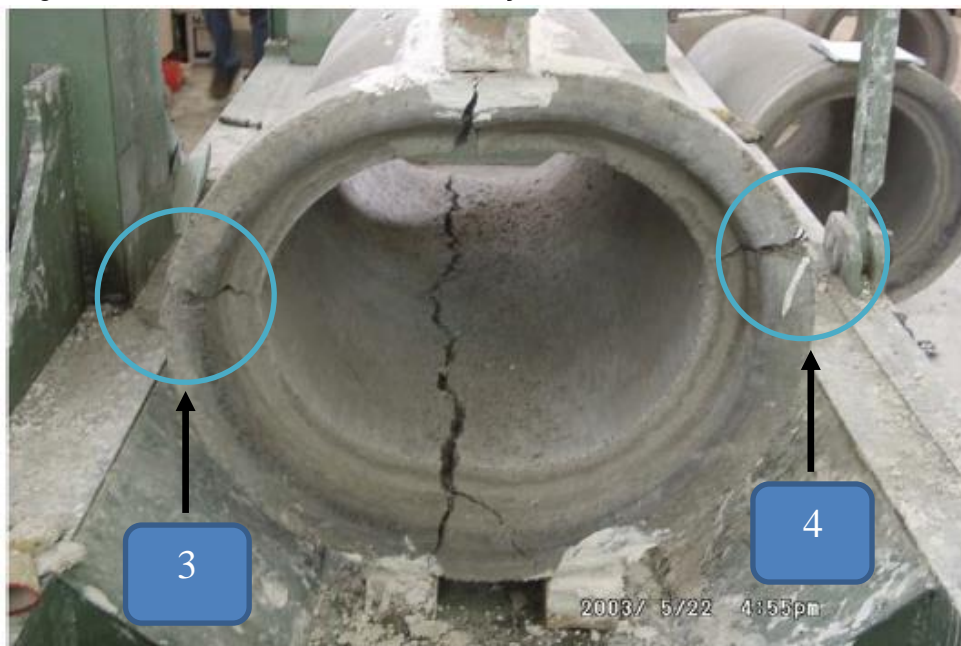
Fase pós ruptura (6): o tubo continua se deformando com a diminuição da carga aplicada. Se as quantidades de aço são adequadas, podem ocorrer os fenômenos denominados de “softening” ou “hardening”, que correspondem, respectivamente, à perda de capacidade resistente com o aumento da carga ou ao aumento da carga resistida com o aumento da deformação diametral.

Figura 2.13 – Abertura de fissuras nas seções do topo e da base



Fonte: adaptada de HAKTANIR et al, 2006.

Figura 2.14 – Abertura de fissuras nas seções laterais do tubo



Fonte: adaptada de HAKTANIR et al, 2006.

Queiroz (2012) estudou o comportamento mecânico de tubos de concreto simples, com adição de diferentes teores de borracha de pneu. Segundo o autor, em relação ao ensaio de compressão diametral, todos os tubos apresentaram resistência superior ao limite especificado pela norma. Portanto, pode-se observar que tubos de concreto com os teores de resíduo de borracha de pneu utilizados pelo autor poderiam ser comercializados. Assim a borracha atua na fase elástica (1) como mostrado na figura 2.12. No entanto, nenhum dos tubos com resíduo de borracha de pneu conseguiu completar totalmente o ensaio de compressão diametral exigido por norma. Deste modo, o resíduo não se comportou como se fosse uma fibra, e, sendo assim, os tubos poderiam ser considerados apenas como se fossem de concreto simples (PS 2).

Figueiredo et. al. (2010) avaliaram a viabilidade da aplicação de fibras metálicas estruturais em tubos de concreto. No estudo realizado pelos autores, foi constatado o desempenho similar dos tubos de concreto com fibras em relação aos com vergalhões de aço. Os testes realizados mostraram que o ensaio de compressão diametral com monitoramento de deformações diametraes pode ser utilizado como sendo uma maneira de analisar o

comportamento estrutural tanto de tubos com fibras de aço quanto de tubos convencionalmente armados.

Segundo Figueiredo et al (2012), embora existam diferentes procedimentos de ensaios prescritos por norma com o intuito de se conhecer o comportamento estrutural de tubos com variados tipos de reforço, o teste contínuo foi utilizado em seu programa experimental com a finalidade de avaliar todas as amostras em uma mesma condição de carregamento. Esta solução foi escolhida porque não há nenhuma influência do número de ciclos utilizado nos ensaios de compressão diametral no comportamento estrutural dos tubos.

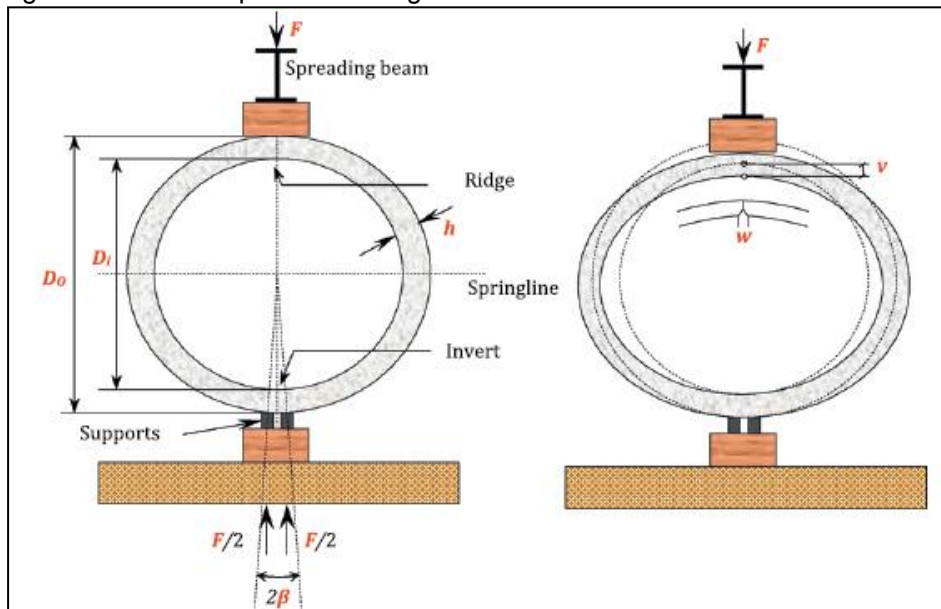
Um dos objetivos do processo cíclico de descarregamento e recarregamento do ensaio de compressão diametral, para tubos de concreto com fibras, é o de verificar se a ancoragem da fibra no concreto está adequada ou não. Outro objetivo é o de verificar se a resistência residual do tubo, após a fissuração, é maior que uma resistência mínima previamente definida. Para tubos com diâmetros de 800 mm e de 1000 mm, reforçados com fibras de aço, Figueiredo (2008) e provaram que o valor máximo da carga de pós-fissuração foi praticamente o mesmo, sejam nos ensaios cíclicos, sejam em ensaios contínuos (FUENTE et al, 2012).

Fuente et. al. (2012 b) apresentam um modelo de análise numérica não linear para tubos de pequeno e de médio diâmetros, designado de MAP (Mechanical Analysis of Pipe), que simula o ensaio de compressão diametral descrito na ABNT NBR 8800:2007. Neste modelo, o comportamento do elemento estrutural fissurado é levado em consideração por meio de um método apresentado por Fuente et. al. (2008) chamado de AES (Analysis of Evolutive Sections). Os autores obtiveram uma excelente correlação entre os resultados numéricos e experimentais, com um nível de erro inferior a 7%, a favor da segurança.

Para Fuente et. al. (2012), o comportamento mecânico de um tubo de concreto reforçado com fibras e submetido a um ensaio de compressão diametral depende da geometria do tubo e de sua espessura, como ilustrado na figura 2.15, bem como do tipo e da quantidade de fibras utilizadas. Segundo os autores, o comportamento estrutural de um tubo de concreto reforçado com fibras de aço pode ser descrito por meio de três fases distintas, que são

regidas pela relação tensão-deformação nas seções mais críticas, correspondentes às seções do topo e às seções laterais do tubo.

Figura 2.15 – Principais variáveis geométricas envolvidas na resistência mecânica



Fonte: DE LA FUENTE et al, 2012.

2.6 Características do concreto com fibras

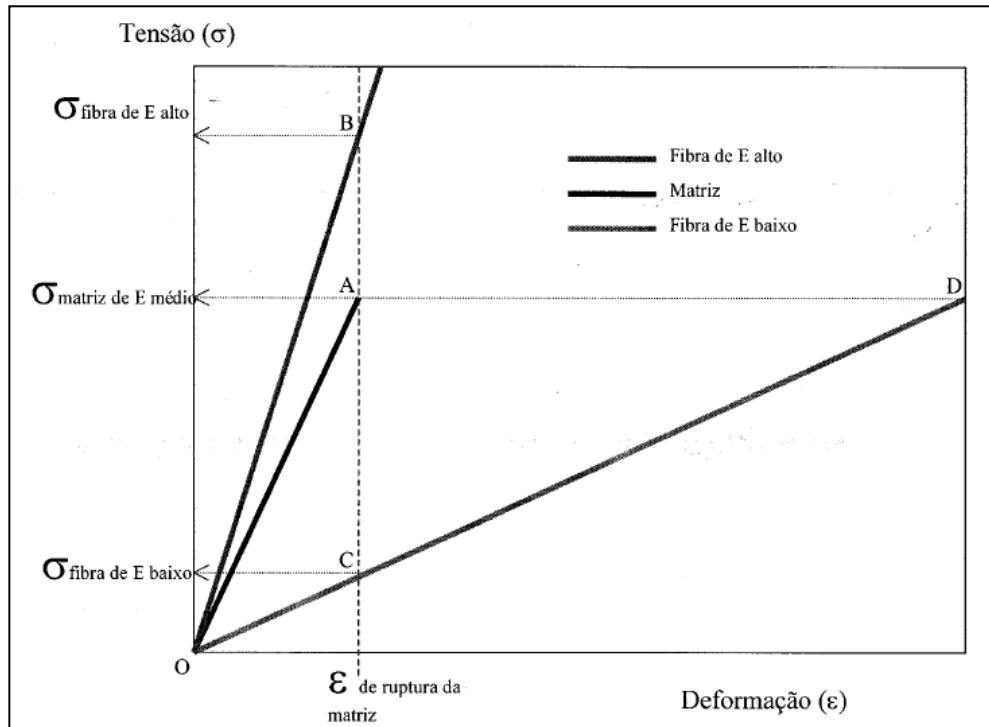
Conforme Oréfica (2012), materiais compósitos podem ser definidos como sendo materiais formados a partir de dois ou mais constituintes e que apresentam composições, estruturas e propriedades diferentes. Por meio da combinação de diferentes materiais, separados por uma interface, pode-se obter um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários.

Portanto, os compósitos são materiais constituídos por duas fases: a matriz e o reforço. Geralmente o papel do reforço pertence às fibras, cujas propriedades associadas às da matriz determinam o comportamento mecânico do compósito. Os compósitos podem ser feitos com materiais extremamente simples, como, por exemplo, o barro reforçado com palha, usado nas construções de habitações desde a antiguidade, até com materiais bem mais sofisticados, como, por exemplo, as blindagens têxteis reforçadas com fibras de Kevlar. (NUNES, 2008)

Conforme Mehta e Monteiro (1994), citado por Figueiredo (2000), o concreto de cimento Portland também pode ser considerado como sendo um compósito formado por três fases principais: a pasta de cimento, os agregados miúdos e os grãos. O concreto apresenta várias vantagens como, por exemplo, a capacidade de produzir estruturas com diversas variações de forma. Também é capaz de apresentar uma enorme variação de suas propriedades em função dos seus componentes principais e respectivas proporções, bem como o uso de uma grande variedade de aditivos e de adições. No entanto, o concreto, apresenta algumas limitações como, por exemplo, o comportamento de ruptura frágil e a pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais estruturais como o aço, por exemplo.

Conforme Figueiredo (2000), as fibras têm como objetivo melhorar o desempenho mecânico da matriz. Estas podem ser diferenciadas basicamente em dois grupos: fibras de baixo e de alto módulo de elasticidade. Na Figura 2.16, tem-se o trabalho de uma matriz hipotética de comportamento elástico perfeito, reforçada com dois tipos de fibras: uma de módulo de elasticidade alto e outra, de baixo, sendo ambas de comportamento elástico perfeito. A curva de tensão-deformação da matriz está representada pela linha O-A, enquanto as linhas O-B e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto e de baixo módulo respectivamente. No momento em que a matriz se rompe (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C), esta irá apresentar uma grande deformação de modo a garantir o mesmo nível de tensão que estava atuando na matriz. Logo, a fibra de baixo módulo não poderá oferecer uma capacidade de reforço após a fissuração da matriz para o carregamento aplicado, ou permitirá uma grande deformação do compósito com um conseqüente elevado nível de fissuração (ponto D). Com isso, o que normalmente acontece, é que as fibras de baixo módulo apresentam menor resistência mecânica. Por outro lado, a fibra de alto módulo de elasticidade já apresentará um elevado nível de tensão no momento da ruptura da matriz, o que lhe permitirá atuar como um reforço já a partir do ponto B, caso sua resistência não seja superada.

Figura 2.16 – Comparação entre o comportamento de três diferentes tipos de fibra



Fonte: FIGUEIREDO, 2000

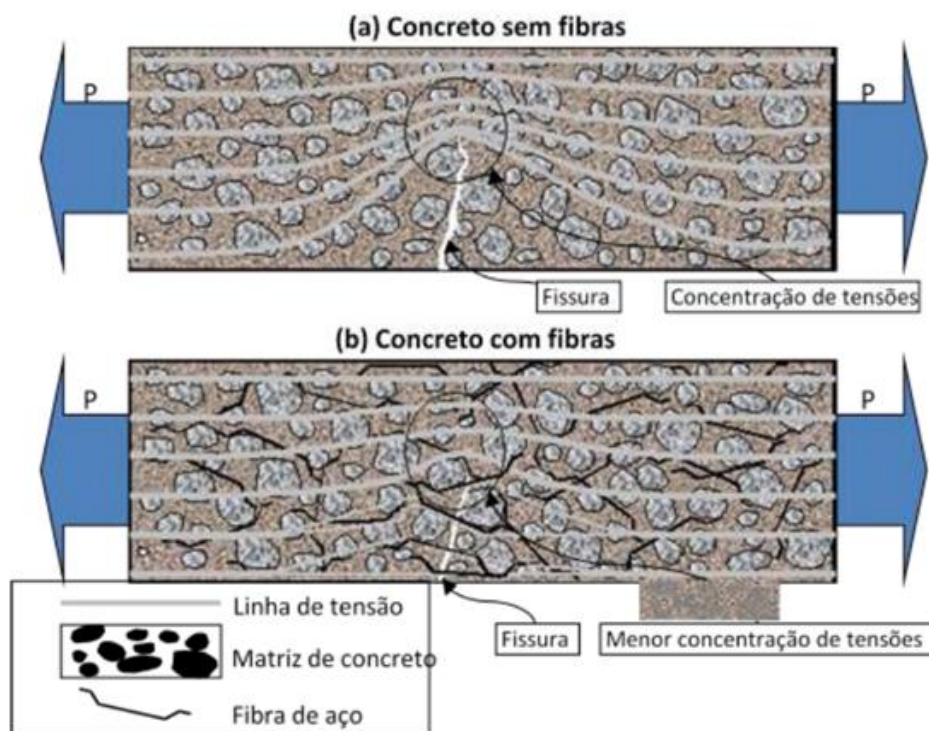
As fibras de aço podem ser classificadas como fibras de alto módulo. O Brasil já conta com fabricantes de fibras de aço desenvolvidas especialmente para o reforço do concreto e a produção mensal das mesmas já ultrapassou a centena de toneladas. As fibras de aço, quando adicionadas ao concreto, dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Pela capacidade resistente pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizada em baixos teores (FIGUEIREDO, 2000).

A comunidade técnica e científica despertou para o uso do concreto reforçado com fibras metálicas através de Romualdi e Mandel (1964), que, utilizando o conceito de mecânica da fratura, previram que a resistência à tração do concreto, na formação da primeira fissura, poderia ser significativamente melhorada com a adição de pedaços curtos de arame metálico. Embora os resultados obtidos não tenham sido plenamente satisfatórios, como se pôde contatar através de Bentur e Mindess (1990), e Balaguru e Shah (1992), a adição das fibras mostrou a possibilidade de se transformar o concreto, um material de comportamento frágil, em um material

de comportamento pseudodúctil, sendo essa a principal contribuição da adição de fibras ao concreto (BENTUR e MINDESS, 1990, citado por NUNES, 2008).

Outro fator relacionado à propagação de fissuras está apresentado na figura 2.17, na qual é mostrado que uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, representadas simplificada pelas linhas de tensões. Tal desvio irá implicar numa concentração de tensões nas extremidades da fissura e, no caso de essa tensão superar a resistência da matriz, ocorrerá ruptura abrupta do material. Quando se adicionam fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados, o concreto deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isso ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, como mostrado na figura 2.17 b (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 2.17 – Fissuras observadas no concreto tracionado

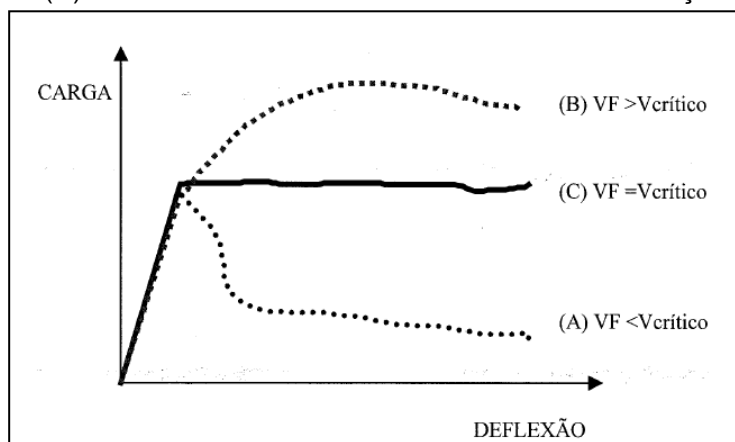


Fonte: FIGUEIREDO, 2011.

Além disso, FIGUEIREDO (2000) faz considerações quanto a outros fatores capazes de influenciar na resistência do concreto com fibras, tais como: a determinação do “volume crítico” de fibras, “comprimento crítico” das mesmas e a disposição das fibras no interior do concreto.

O “volume crítico” corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Sendo assim, abaixo do volume crítico, no momento em que haja a ruptura da matriz, ocorre, necessariamente, uma queda da capacidade resistente que o material tem condições de suportar. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamento crescentes, mesmo após a ruptura da matriz. Este conceito encontra-se ilustrado na Figura 2.18 (FIGUEIREDO, 2000).

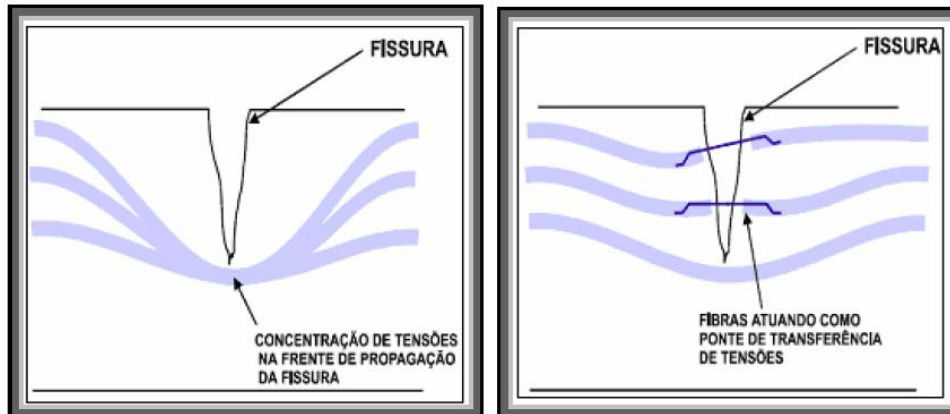
Figura 2.18 – Compositos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão



Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

O “comprimento crítico” pode ser definido como sendo aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento, proporciona uma tensão de ruptura no seu centro igual à tensão de ruptura do material que a compõe. Quando a fibra tem um comprimento menor que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra. Nesta situação, com o aumento da deformação e conseqüentemente da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões pela fissura será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido (FIGUEIREDO, 2000). Na figura 2.19, apresenta-se um esquema do mecanismo de controle das fissuras.

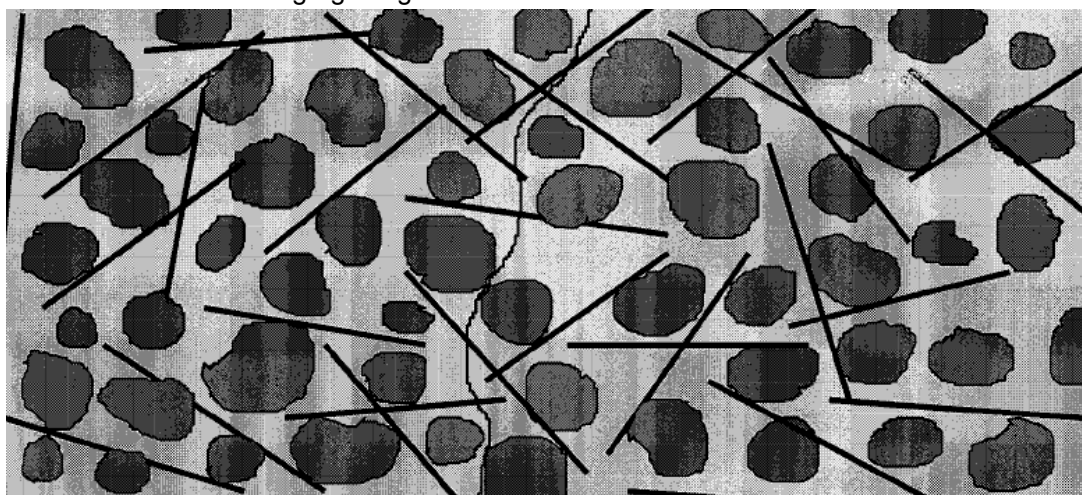
Figura 2.19 – Mecanismo de controle de fissuras



Fonte: NUNES, 2006 citado por FUGII, 2008.

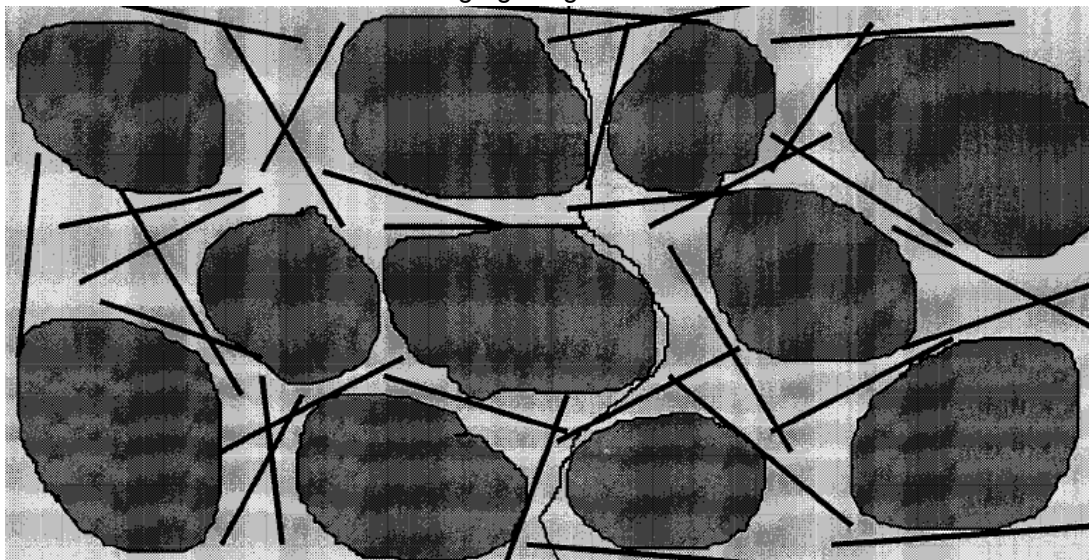
A disposição das fibras no interior do concreto será mais eficiente quando mais direcionadas as fibras estiverem em relação ao sentido da tensão principal de tração. Recomenda-se a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto. Em outras palavras, deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito (MAIDL, 1991 citado por FIGUEIREDO, 2000). Esta disposição é importante, também, pelo fato da fratura se propagar preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta, para concretos de baixa e moderada resistência mecânica. As figuras 2.20 e 2.21 ilustram a disposição das fibras entre os agregados (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 2.20 – Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo



Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

Figura 2.21 – Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo

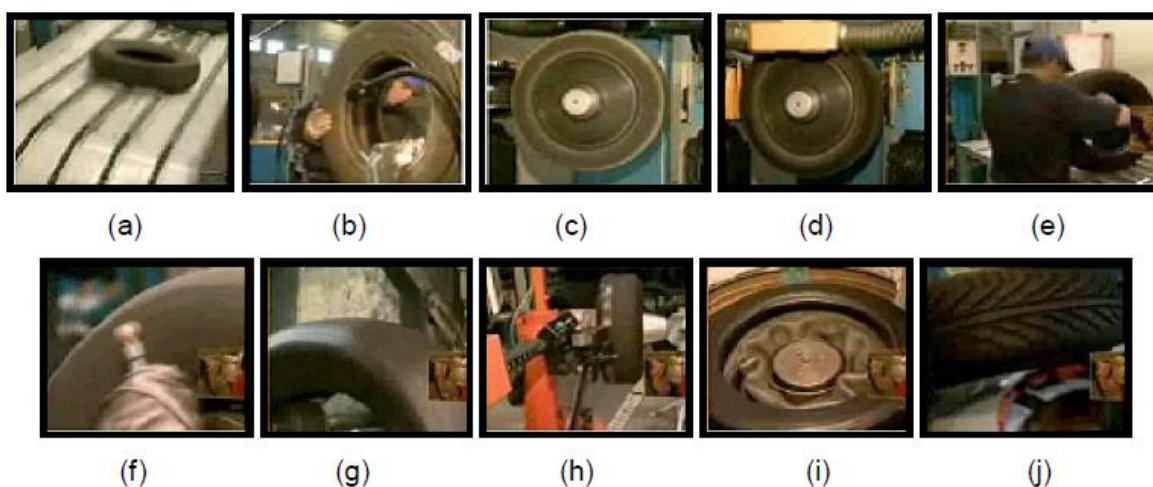


Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

2.7 Resíduo de Borracha de Pneu

A reciclagem do pneu por meio da recapagem ou da remoldagem, como mostrado na figura 2.23, aumenta a vida útil deste em cerca de 40%, além de diminuir o consumo de matéria-prima e de energia. No entanto, este processo gera, como resíduo, as raspas de borracha. O material resultante do processo de raspagem do pneu pode ser aproveitado como matéria-prima barata pela indústria da construção civil (FREITAS, 2007).

Figura 2.22 – Processo de remoldagem do pneu



Legenda: (a) pneu usado; (b) inspeção visual; (c) e (d) raspagem mecânica em alta velocidade; (e) inspeção visual; (f) raspagem manual; (g) emulsão; (h) nova camada de borracha; (i) vulcanização; e, (j) inspeção visual.

Fonte: FREITAS, 2007.

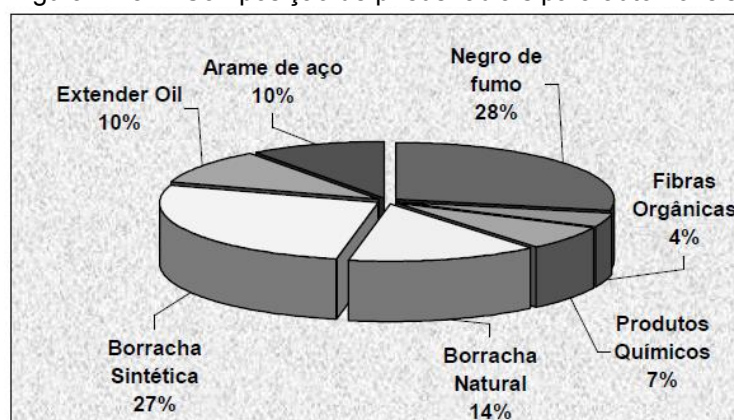
Segundo Pena (2011), o aspecto de economia no setor de reforma de pneus é importante quando se menciona a redução de petróleo consumido na fabricação de um pneu. Considera-se que, para fabricar um pneu novo, é preciso de aproximadamente 79 litros de petróleo, enquanto que, para reformar o mesmo pneu, são necessários apenas 29 litros. Aliado aos processos de fabricação com alto grau tecnológico, a fabricação de um pneu novo também requer um consumo elevado de mão de obra de energia.

Segundo Martins (2005), durante o processo de recauchutagem, a raspagem mecânica faz com que o restante da banda de rodagem velha transforme-se em pequenas partículas de diversas granulometrias, com

formatos variando de alongados (tipo fibra) a granular (tipo pó), sendo denominados, de modo geral, como resíduos de borracha de pneu.

As matérias primas utilizadas na confecção de pneus radiais são apresentadas na figura 2.24. A porcentagem de borracha utilizada na confecção de pneus corresponde a aproximadamente 40% dentre todos os materiais que o constituem. Os pneus radiais utilizados em carros de passeio pesam em média 9,2 kg. Partindo-se dessa premissa, para confecção de um pneu, são utilizados aproximadamente 3,68 kg de borracha. (BNDS, 1998 citado por ANDRADE, 2007).

Figura 2.23 – Composição de pneus radiais para automóveis



Fonte: BNDS, 1998 citado por ANDRADE, 2007.

A utilização desse resíduo em tubos de concreto pode ser importante do ponto de vista ecológico. Isso porque em cada tubo de concreto produzido, para esta pesquisa, com resíduo de borracha de pneu, foram utilizados aproximadamente 3,46 kg de borracha (referente ao teor de 20 kg de borracha por m³ de concreto). Esta quantidade refere-se à quantidade de borracha que é descartada de um pneu no processo de recauchutagem, levando-se em consideração que um pneu radial possui 9,2 kg e aproximadamente 40% da sua constituição é de borracha, como considerado por Andrade (2007).

A maioria das pesquisas mostra que a inclusão do resíduo de borracha no concreto provoca uma diminuição da resistência mecânica à compressão, uma diminuição da trabalhabilidade das misturas e um aumento do teor de ar incorporado.

Eldin e Senouci, citados por Siddique (2004), relataram que miniaturas de concreto com agregados granulados de borracha apresentaram menor resistência à compressão e à tração que o concreto apenas com cimento Portland.

Khatib e Bayomy (1999) mencionam que a queda de resistência à compressão de concretos com adição de resíduo de borracha depende principalmente da qualidade da pasta, da aderência entre agregados e pasta, e da dureza e densidade dos agregados. Substituindo-se os agregados naturais mais densos por agregados mais leves, a menor densidade da borracha poderá funcionar como um concentrador de tensão, causando microfissuras da matriz de concreto, levando a uma perda de resistência.

França (2004) verificou que, para manter o abatimento e a resistência à compressão de concretos com adição de resíduo, faz-se necessário um aumento no consumo de cimento e uma redução da quantidade de água.

Son, Hajirasouliha e Pilakoutas (2011) analisaram a deformabilidade e a capacidade de absorção de energia em pilares de concreto armado constituídos de resíduo de borracha de pneu. Os pilares foram ensaiados sob carga axial. Foram verificadas reduções da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em relação aos traços convencionais. Para a mesma carga axial, os autores constataram que as partículas de borracha causaram maiores deformações no concreto e na armadura dos pilares. Os resultados também indicaram que a capacidade resistente dos pilares foi reduzida em função da inserção do resíduo. No entanto, os autores verificaram incrementos de até 90% nos valores de curvatura dos modelos com resíduo, o que lhes conferiu maior ductilidade, caracterizando o resíduo de borracha de pneu como um material potencialmente adequado para aplicações sísmicas.

Trigo (2008) concluiu que, para manter a resistência à compressão próxima entre si de corpos de prova sem e com resíduo, foi necessário aumentar o consumo de cimento em 18% para estes em relação àqueles. O resíduo de borracha funcionou como “vazios” dentro do concreto e aumentou o teor de ar incorporado na mistura. Isso fez com que o módulo de elasticidade do concreto fosse menor.

Fazzan (2011) estudou o comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduo de borracha de pneu. No total, foram ensaiados seis modelos, sendo três deles sem adição de borracha e os outros três com substituição de 10% do volume de areia por resíduo. O autor salienta que os modelos com adição de resíduo de borracha de pneu apresentaram um comportamento diferenciado quanto ao padrão de fissuração e que foram verificadas menores aberturas de fissura, em relação aos modelos sem adição de resíduo.

Fazzan (2011) desenvolveu também uma nova dosagem de concreto com resíduo de borracha de pneu. Nesta dosagem, o resíduo foi adicionado no final das misturas. Dessa maneira observou-se que esta modificação trouxe acréscimos nos valores da resistência à tração e do módulo de elasticidade, além de reduções do teor de ar incorporado, se comparado com a inserção do resíduo no início da mistura. A diminuição da quantidade de ar incorporado se justifica pela redução do tempo de mistura da borracha com os outros componentes do concreto, uma vez que o formato alongado do resíduo (tipo fibra) tem influência na capacidade de reter ar no interior das misturas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O projeto foi desenvolvido em parceria com a construtora CASO, de São José do Rio Preto-SP, e com o Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - SP. A construtora se responsabilizou pela confecção dos tubos de concreto e os ensaios de compressão diametral foram realizados nas instalações do NEPAE. Foram confeccionados 5 tubos de concreto: um deles definido como TC não sofreu a adição de resíduo de borracha de pneu; dois deles denominados TR 10 foram confeccionados com o teor de 10 kg de borracha por m³ de concreto; e, por fim, outros 2, designados por TR 20, com o teor de 20 kg de borracha por m³. Além desses tubos foram fabricados mais dois protótipos para a retirada de amostras que foram usadas para o ensaio de absorção (TC e TR 20). Além disso, para o ensaio de absorção também foram usados pedaços de todos os tubos rompidos (TC, TR 10 e TR 20).

3.1 Materiais e Equipamentos

Para a confecção dos condutos e realização dos ensaios experimentais, foram utilizados os seguintes materiais: cimento, água, areia média, brita 1, resíduo de borracha de pneu e armadura composta por barras de aço com diâmetro de 5 mm. Os equipamentos utilizados foram: vibro prensa, célula de carga, relógios comparadores, perfis metálicos e sistema de aquisição de dados.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado pela construtora na confecção dos condutos é o CP V – ARI MAX. A caracterização desse cimento foi fornecida pelo fabricante e é mostrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização do cimento CP V – ARI MAX

Certificado de ensaios em cimento		CIMENTO NACIONAL		
CP V-ARI MAX Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Agosto 2014	ABNT NBR 5733/91 <i>Resultados Parciais</i>	Companhia Nacional de Cimento BR 040, km 474 - Zona Rural Sete Lagoas, MG - CEP 35.701-970 www.cimentonacional.com.br tecnico@brennandcimentos.com.br		
Ensaios Químicos				
ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,83	≤ 1,0
Perda ao Fogo - PF	ABNT NM 18/12	%	3,80	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	1,25	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₂	ABNT NM 16/12	%	2,65	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,53	≤ 3,0
Ensaios Físicos				
ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4.653	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,06	não aplicável
Índice de finura - # 75 µm (nº 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,03	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,41	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	31,5	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	120	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	175	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,00	≤ 5,0
Ensaios Mecânicos				
ENSAIOS - ABNT NBR 7215/96	UN.	DESVIO PAD	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resistência à Compressão - 1 Dia	MPa	1,31	29,8	14,0
Resistência à Compressão - 3 Dias	MPa	1,68	44,2	24,0
Resistência à Compressão - 7 Dias	MPa	1,60	50,4	34,0
Resistência à Compressão - 28 Dias	MPa	0,42	60,9	não aplicável

Fonte: Nacional Cimentos.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural, classificada como areia média. Este material foi coletado nas dependências da empresa e foi caracterizado segundo as diretrizes das normas técnicas vigentes. Foram feitas as seguintes caracterizações:

- composição granulométrica, conforme a NBRNM 248 (ABNT, 2003);
- massa específica e massa específica aparente conforme a NBRNM 52 (ABNT, 2009);
- absorção de água conforme a NBRNM 30 (ABNT, 2001).

A tabela 3.2 e a figura 3.1 mostram, respectivamente, a composição granulométrica do agregado miúdo e a sua dispersão granulométrica; já a tabela 3.3 mostra os índices do agregado miúdo.

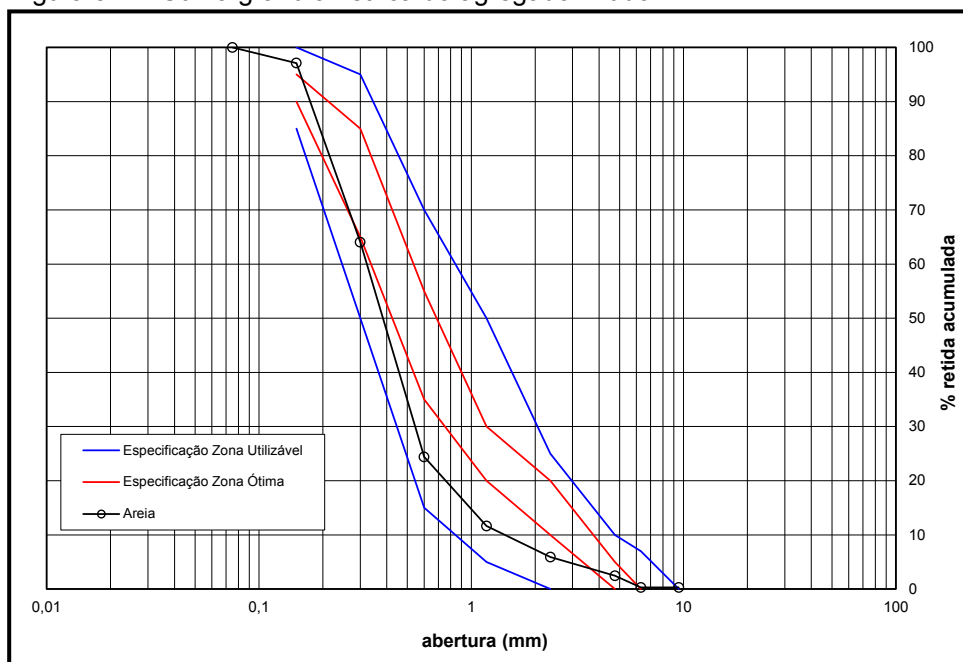
Tabela 3.2 – Composição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRAS			Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada
Normal	Auxiliar					
3"	-	75 mm			0,0	0,0
-	2 1/2"	63 mm			0,0	0,0
-	2"	50 mm			0,0	0,0
1 1/2"	-	37,5 mm			0,0	0,0
-	1 1/4"	31,5 mm			0,0	0,0
-	1"	25 mm			0,0	0,0
3/4"	-	19 mm			0,0	0,0
-	1/2"	12,5 mm	0	0,0	0,0	0,0
3/8"	-	9,5 mm	2,8	0,28	0,28	0,28
-	1/4"	6,3 mm	0,0	0,00	0,28	0,28
N.º 4	-	4,75 mm	21,6	2,17	2,45	2,45
N.º 8	-	2,36 mm	34,5	3,46	5,91	5,91
N.º 16	-	1,18 mm	57,2	5,73	11,64	11,64
N.º 30	-	600 µm	127,3	12,76	24,40	24,40
N.º 50	-	300 µm	395,4	39,64	64,05	64,05
N.º 100	-	150 µm	329,6	33,05	97,09	97,09
fundo	-	75 µm	29,0	2,91	100,00	100,00
Total			997,4	100,00	205,82	

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	97,1	64,0	24,4	11,6	5,9	2,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3.3 – Índices de caracterização da areia

φ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária	absorção (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	
2,36	2,06	2,622	2,610	2,674	1,710	1,21

Fonte: Próprio Autor.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi classificado como sendo uma brita 1. Este material foi coletado nas dependências da empresa e foi caracterizado segundo as diretrizes das normas técnicas vigentes. Foram feitas as seguintes caracterizações:

- composição granulométrica conforme NBRNM 248 (ABNT, 2003);
- massa específica e massa específica aparente conforme a NBRNM 53 (ABNT, 2009);
- taxa de absorção de água conforme a NBRNM 30 (ABNT, 2001).

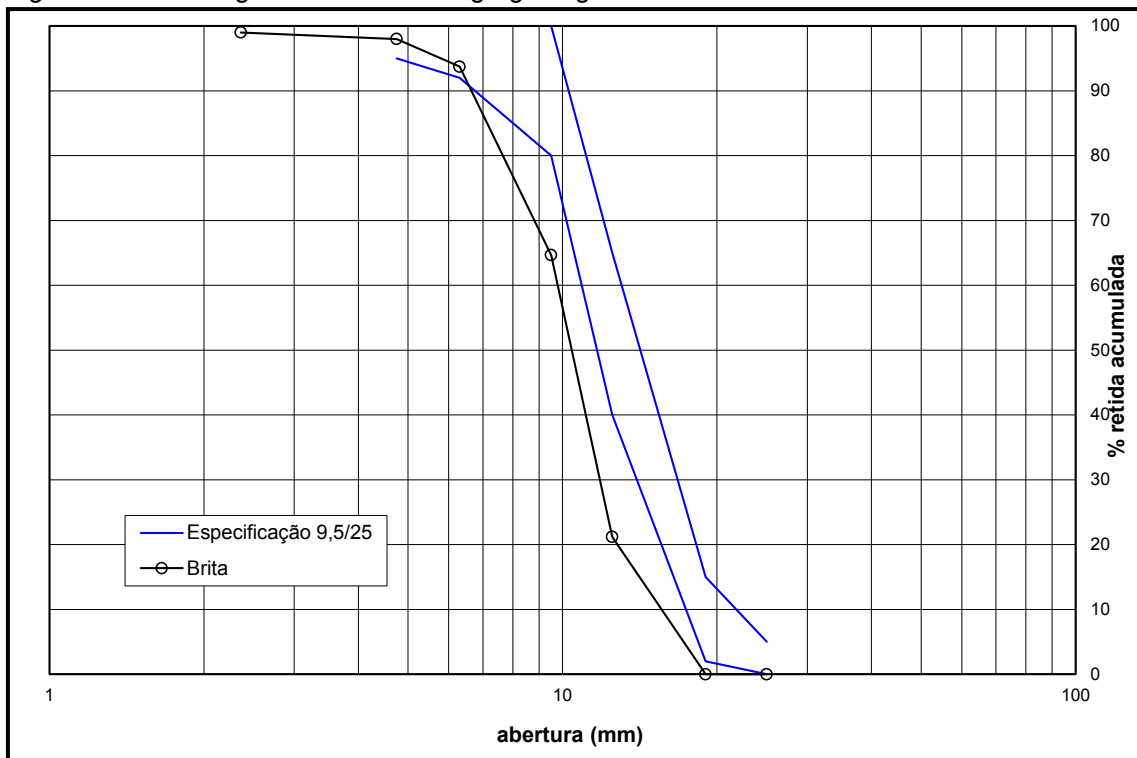
A tabela 3.4 e a figura 3.2 mostram, respectivamente, a composição granulométrica do agregado graúdo e a sua dispersão granulométrica. Já a tabela 3.5 mostra os índices do agregado graúdo.

Tabela 3.4 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Obra : Construtora Caso				Carta n.º:								
Procedência: Mineração Grandes Lagos na cidade de Içém				O. S. n.º:								
Identificação: Brita 1				Data ensaio: 16/07/2014								
PENEIRAS		Abertura (mm)	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada							
Normal	Auxil.											
3"	-	75 mm		0,0	0,0							
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0						
-	2"	50 mm		0,0		0,0						
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0							
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0						
-	1"	25 mm	0	0,0		0,0						
3/4"	-	19 mm	0	0,0	0,0							
-	1/2"	12,5 mm	1690	21,2		21,2						
3/8"	-	9,5 mm	3470	43,5		64,7						
-	1/4"	6,3 mm	2320	29,1		93,7						
N.º 4	-	4,75 mm	340,0	4,3		98,0						
N.º 8	-	2,36 mm	80	1,0		99,0						
N.º 16	-	1,18 mm	0	0,0		99,0						
N.º 30	-	600 µm	0	0,0		99,0						
N.º 50	-	300 µm	0	0,0		99,0						
N.º 100	-	150 µm		0,0		99,0						
fundo	-	75 µm	80	1,0		100,0						
Total			7980	100,00		657,64						
Peneiras		% Retida Acumulada										
(mm) →	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	98,0	93,7	64,7	21,2	0,0	0,0	0,0

Fonte: Próprio Autor.

Figura 3.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3.5 – Índices de caracterização do agregado graúdo

ϕ máximo (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária (g/cm ³)	absor- ção (%)
		s.s.s. (g/cm ³)	seca (g/cm ³)	aparente (g/cm ³)		
19,0	6,58	2,889	2,837	2,990	1,610	1,83

Fonte: Próprio Autor.

A curva mostrada na figura 3.2 ficou fora da faixa de especificação pois o agregado apresentou uma grande quantidade de material fino. Porém como o diâmetro máximo é de 19 mm, este agregado foi classificado como brita 1.

3.1.4 Água

A água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de São José do Rio Preto-SP.

3.1.5 Resíduo de borracha de pneu

O resíduo de borracha de pneu utilizado foi fornecido pela empresa Mirassol recauchutadora de Pneus, situada na cidade de Mirassol – SP, e com Filial na cidade de Araçatuba-SP.

Para sua utilização, o resíduo foi peneirado para eliminar as possíveis impurezas, como mostrado na figura 3.3. A granulometria utilizada corresponde ao diâmetro menor que 6,3 mm, como estabelecido na dosagem realizada por Fazzan (2011).

Nas figuras de 3.4 a 3.6 são mostradas as três granulometrias que foram utilizadas na confecção dos tubos de concreto. Após ser peneirado, o resíduo foi novamente misturado para voltar a ter um aspecto uniforme, como mostrado na figura 3.7.

Figura 3.3 – Peneiramento do resíduo de borracha de pneu



Fonte: Próprio autor

Figura 3.4 – Resíduo de borracha que é retida pela peneira de 6,3 mm de abertura



Fonte: Próprio autor

Figura 3.5 – Resíduo de borracha que é retido pela peneira de 2,38 mm de abertura



Fonte: Próprio autor

Figura 3.6 – Resíduo de borracha que é retida pela peneira de 1,19 mm de abertura



Fonte: Próprio autor

Figura 3.7 – Processo de mistura do resíduo após o peneiramento



Fonte: Próprio autor

3.1.6 Armaduras

Foram utilizados vergalhões nervurados com diâmetro nominal igual a 5 mm, tanto para a montagem das espiras da armadura transversal, quanto para a montagem da armadura longitudinal. A figura 3.8 mostra o detalhe das espiras. As barras de aço foram ensaiadas à tração segundo a NBRISO 6892 (ABNT, 2002). Os resultados são mostrados na tabela 3.6.

Figura 3.8 – Detalhe da montagem das armaduras transversais e longitudinais



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.9 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração das armaduras



Fonte: Próprio autor.

Tabela 3.6 – Características do aço

ϕ (mm)	CATEGORIA (CA)	Ensaio mecânico					Local de Ruptura
		Escoamento		Ruptura		Alogam.	
		kgf	MPa	kgf	MPa	%	
5	60	1263,08	630,84	1358,44	678,47	2,23	meio
5	60	1288,51	643,54	1375,63	687,05	2,36	meio
5	60	1284,77	641,67	1364,51	681,5	2,15	meio

Fonte: Próprio Autor.

3.2 Método

3.2.1 Dosagem dos concretos

A dosagem dos concretos foi feita com base no traço utilizado pela construtora CASO, o qual, para este trabalho, foi denominado como traço controle TC. Foram elaborados outros dois traços de concreto por meio da inclusão do resíduo de borracha de pneu no traço controle. Os traços com resíduo de borracha de pneu foram designados pela sigla TR.

- TC (Traço controle)

O traço controle foi o mesmo que é utilizado pela construtora CASO, uma vez que, o intuito da pesquisa não é analisar e produzir um novo traço e sim avaliar o efeito da inclusão do resíduo de borracha em tubos de concreto do tipo PA1. A tabela 3.7 mostra o traço utilizado pela empresa. Foi confeccionado 1 tubo de concreto com este traço.

Tabela 3.7 - Composição dos traços utilizados como referência

Materiais	Consumo (kg/m³)
Cimento (kg)	427,26
Areia (kg)	787,4
Brita 1 (kg)	1081,9
Água (kg)	170
Relações	Índices
Relação água/cimento (a/c)	0,4
Relação (em massa) 1:m	1 : 4,37

Fonte: Próprio Autor.

- TR – 10 e TR -20 (Traços com resíduo de borracha de pneu)

Optou-se por se utilizar dois teores de resíduo de borracha de pneu. O TR – 10 possui, em seu traço, 10 kg de borracha por m³ de concreto. Já o TR – 20, 20 kg de borracha por m³. Na tabela 3.8, têm-se as quantidades de materiais utilizados. Estes teores foram estudados por Queiroz (2012). O intuito se de trabalhar com dois teores de resíduo consiste em avaliar qual dos teores iria produzir os melhores resultados. Foram elaborados 2 tubos para cada um

destes traços. O resíduo de borracha foi considerado como uma adição e não uma substituição.

Tabela 3.8 - Composição dos traços com resíduo de borracha de pneu: TR-10 e TR-20

Materiais	TR-10	TR-20
	Consumo (kg/m ³)	Consumo (kg/m ³)
Cimento (kg)	427,26	427,26
Areia (kg)	787,4	787,4
Brita 1 (kg)	1081,9	1081,9
Água (kg)	170	170
Resíduo de borracha (kg)	10	20
Relações	Índices	Índices
Relação água/cimento (a/c)	0,4	0,4
Relação (em massa) 1:m	1 : 4,37	1 : 4,37

Fonte: Próprio Autor.

3.2.2 Mistura dos materiais

Para realizar a mistura dos materiais na fabricação dos tubos de concreto, foi utilizado o procedimento desenvolvido por Fazzan (2011). Este procedimento proporcionou um melhor amassamento do concreto, implicando em uma dosagem mais eficiente, com consumo de cimento não muito elevado e pouca utilização de aditivo superplastificante. O procedimento utilizado foi o seguinte:

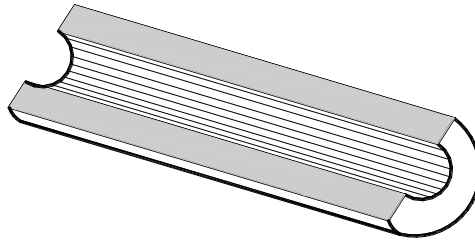
- 1- **Etapa Inicial:** Inserção, no misturador, da areia, brita e aproximadamente 50% da água. Em seguida, liga-se o misturador e deixa-se misturar por 1 minuto;
- 2- **Etapa final para os tubos TC:** inserção no misturador do cimento e do restante da água. Em seguida o misturador é ligado até que a mistura fique homogênea e possa ser laçada nas fôrmas dos tubos;
- 3- **Etapa final para os tubos TR:** inserção no misturador do cimento e do restante da água. Em seguida o misturador é ligado até que a mistura fique homogênea, como no caso do passo 2. Após o concreto estar homogeneizado, o resíduo é inserido na massa e o processo de mistura segue por cerca de um minuto;

3.2.3 Dimensionamento das Armaduras

Como descrito no item 2.5, para que o tubo apresente uma ruptura dúctil, é necessário que sua armadura seja maior que a mínima.

Neste modelo inicial, adotou-se uma seção transversal que possui uma altura numericamente igual a 6 cm (e que corresponde à espessura do tubo), e uma largura numericamente igual a 100 cm (e que corresponde a 1m de comprimento do tubo). A figura 3.10 mostra a seção transversal considerada para os cálculos.

Figura 3.10 – Seções transversais retangulares onde atuam os momentos fletores



Fonte: Próprio autor.

A área da seção transversal para o elemento correspondeu ao produto da espessura do tubo ou altura da seção transversal (h), pelo comprimento unitário do tubo (b):

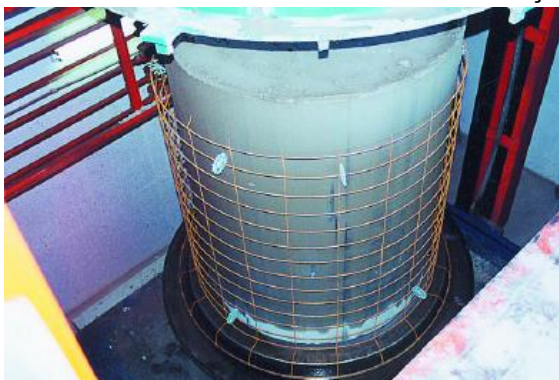
$$A = h \cdot b \rightarrow 6 \cdot 100 = 600 \text{ cm}^2 \quad (\text{eq. 4.1})$$

Já o cálculo do momento de inércia em torno do eixo z (I_z) para o elemento foi obtido pela equação 3.5:

$$I_z = b \cdot h^3 / 12 \rightarrow 100 \cdot 6^3 / 12 = 1800 \text{ cm}^4 \quad (\text{eq. 3.5})$$

A altura útil da seção transversal (d) foi admitida como sendo numericamente igual a 2,25 cm. A armadura ficará mais próxima da região externa visto que os espaçadores utilizados pela construtora Caso possuem 2 cm e são posicionados como mostrado na figura 3.11. Na tabela 3.9, são mostrados os parâmetros admitidos no cálculo.

Figura 3.11 – Posicionamento da armadura na seção tubular



Fonte: EL DEBS, 2003

Tabela 3.9 – Parâmetros utilizados no cálculo

Descrição	Valores
f_{ck} (MPa)	50
f_{yk} (MPa)	600
b (cm)	100
h (cm)	6
d'_{int} (cm)	3,75
d (altura útil) (cm)	2,25
C_{int} (cm)	2,0
A (cm ²)	600
I_z (cm ³)	1800
Diâmetro da armadura (mm)	5

Fonte: Próprio autor.

Foram feitas duas verificações para a escolha do arranjo da armadura da seção transversal de tal forma que o tubo possa apresentar uma ruína dúctil. Esses modelos de cálculo são apresentados a seguir.

a) Modelo 1 - Cálculo da Armadura Mínima (A_{Smin})

Segundo EL DEBS (2003), a taxa de armadura mínima para tubos de concreto deve ser calculada de acordo com a ABNT NBR 6118:2007. A taxa mínima de armadura pode determinada de forma a atender a um momento fletor estabelecido a seguir:

$$M_{d \min} = 0,8 \cdot w_0 \cdot f_{ctk \sup} \quad , \text{ onde} \quad (\text{eq. 3.6})$$

w_0 : é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada, dada por:

$$w_0 = \frac{I_z}{y} = \frac{1800}{6/2} = 600 \text{ cm}^3 \quad (\text{eq. 3.7})$$

$f_{ctk \sup}$: é a resistência característica superior do concreto à tração dada pela seguinte relação:

$$f_{ctk \sup} = 1,3 \cdot f_{ctm} \quad (\text{eq. 3.8})$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad (\text{eq. 3.9})$$

Admitiu-se, para efeito de cálculo, que o concreto terá resistência característica de 50 MPa. Este valor foi adotado de acordo com os tubos estudados por Fugii (2008).

$$f_{ctk \sup} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot (50)^{2/3} = 5,29 \text{ MPa}$$

Substituindo-se o resultado encontrado na equação (3.7) e (3.9) na equação (3.6) tem-se que:

$$M_{d \min} = 0,8 \cdot 600 \cdot 0,529 = 253,92 \text{ kN.cm}$$

Por meio da equação (3.10), foi calculada a altura da linha neutra e, por meio da equação (3.11), a área mínima de aço necessária. Neste dimensionamento, optou-se por se trabalhar com valores característicos, visto que se trata de um ensaio experimental.

$$y = d \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_{d \min}}{0,425 \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{ck}}} \right) \quad (\text{eq. 3.10})$$

Logo:

$$y = 2,25 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{253,52}{0,425 \cdot 100 \cdot 2,25^2 \cdot 5}} \right) = 0,282 \text{ cm}$$

$$a_s = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot y}{f_{yk}} \quad (\text{eq. 3.11})$$

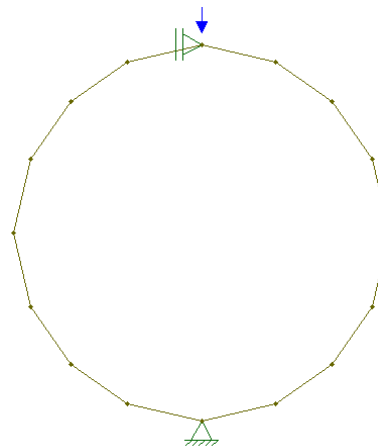
Logo:

$$a_s = \frac{0,85 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 0,282}{60} = 2,00 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (\geq 0,15\% \cdot A_c = 0,9 \text{ cm}^2/\text{m})$$

b) Modelo 2 - Cálculo da armadura para a carga de ruptura prevista pela norma NBR 8890 (ABNT, 2007)

Para a confecção do cálculo desta armadura, optou-se por uma modelagem bidimensional, utilizando-se o programa Ftool, na qual a linha média da seção tubular foi dividida em elementos lineares, como mostrado na figura 3.12. Adotaram-se as características da seção transversal dos elementos lineares conforme a figura 3.10.

Figura 3.12 – Discretização da seção média em elementos lineares utilizando-se o programa Ftool



Fonte: Próprio autor.

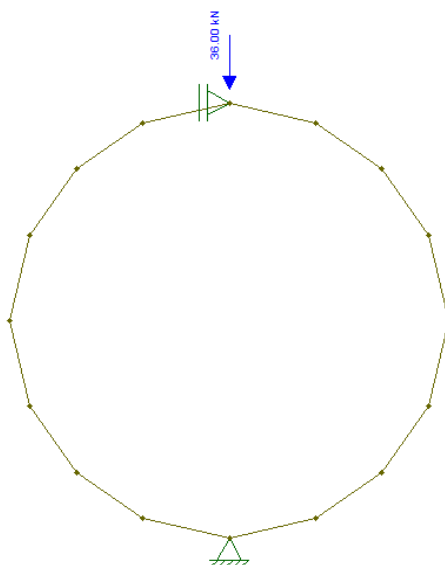
A carga lançada neste modelo corresponde à carga de ruptura do tubo tipo PA1 que, conforme a Tabela A.4 do Anexo A da ABNT NBR 8890:2007, é igual a 36 kN/m,.

Como nos cálculos foi adotado um comprimento unitário, têm-se a seguinte carga aplicada no modelo:

$$P = 36 \times 1,0 = 36 \text{ kN}$$

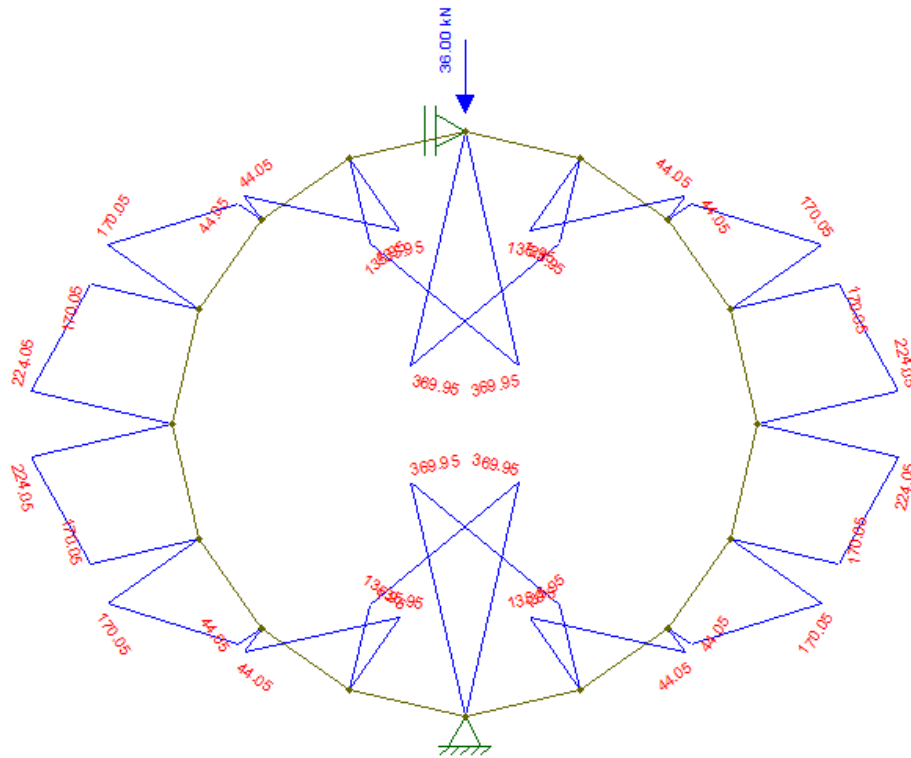
Nas figuras 3.13 e 3.14 são mostrados, respectivamente, a aplicação da carga e o momento fletor calculado pelo programa Ftool.

Figura 3.13 – Carga aplicada ao modelo



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.14 – Momento fletor em kN.cm



Fonte: Próprio autor.

Por meio das equações (3.10) e (3.11) foram calculadas, respectivamente, a altura da linha neutra e a área de aço necessária para que o tubo atinja o Estado Limite Último relacionado ao momento fletor mostrado na figura 3.14.

$$y = 2,25 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{369,95}{0,425 \cdot 100 \cdot 2,25^2 \cdot 5}} \right) = 0,427 \text{ cm}$$

$$A_s = \frac{0,85 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 0,427}{60} = 3,03 \text{ cm}^2/\text{m}$$

c) Detalhamento

A tabela 3.10 mostra a área de aço calculada para cada verificação, como também o espaçamento entre as barras de aço, admitindo-se que serão utilizadas barras de 5 mm de diâmetro (ϕ).

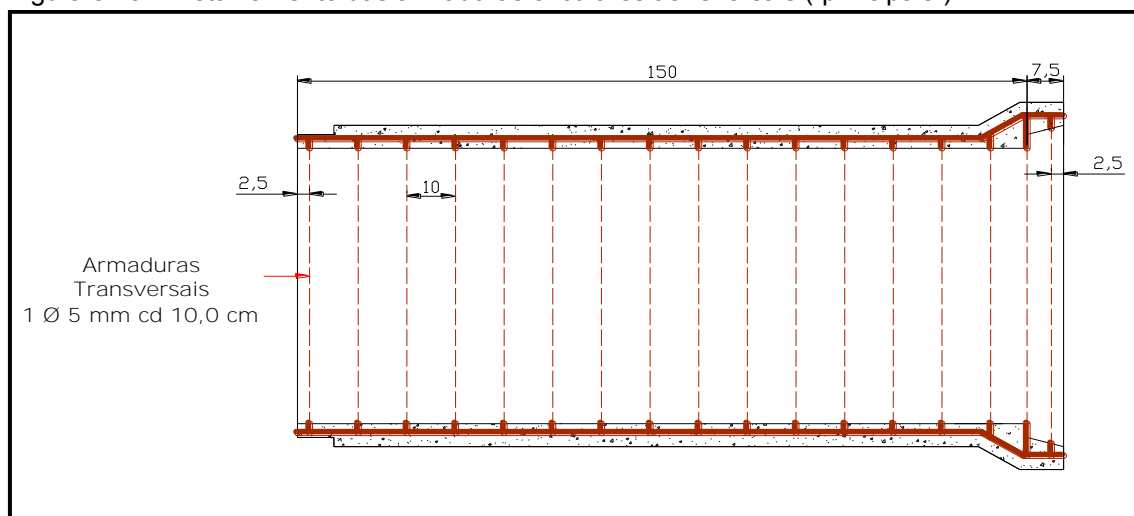
Tabela 3.10 – Detalhamento das armaduras

MODELO	Momento fletor (kN.cm)	Área de Armadura (As) (cm ² /m)	Espaçamento (cm)
1	253,92	2,00	1 ϕ de 5 mm a cada 10 cm
2	369,95	3,03	1 ϕ de 5 mm a cada 6,0 cm

Fonte: Próprio autor.

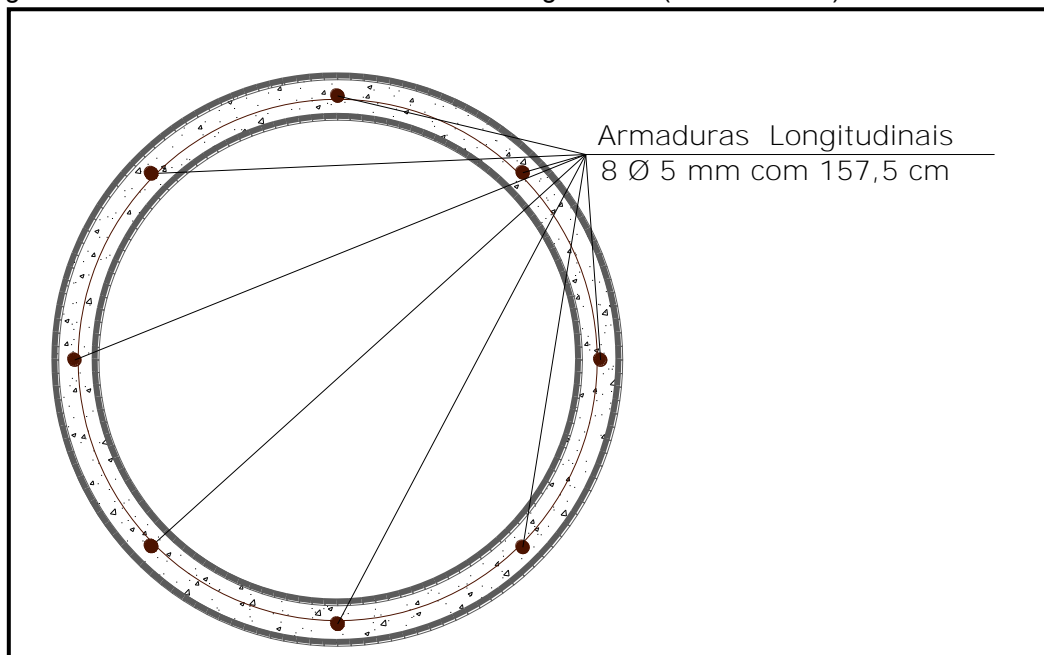
Tendo-se em vista a forma de ruptura dos tubos, optou-se pelo uso da taxa de armadura calculada por meio do modelo 2. No entanto, a construtora CASO alertou que as barras de aço pouco espaçadas poderiam impossibilitar o adensamento do concreto no molde, por causa da consistência seca do concreto e do tipo de vibração. Sendo assim, foi sugerido pela construtora a utilização de um espaçamento de 10 cm para barras com 5 mm de diâmetro, conforme mostrado na figura 3.15. Como armaduras secundárias de distribuição, e também para facilitar a montagem da armadura principal, foram adotadas 8 barras de 5 mm com comprimento de 157,5 cm (comprimento útil do tubo mais o comprimento da bolsa), como mostrado na figura 3.16.

Figura 3.15 – Detalhamento das armaduras circulares transversais (“principais”)



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.16 – Detalhamento das armaduras longitudinais (“secundárias”)



Fonte: Próprio autor.

3.2.4 Montagem das armaduras

A montagem das armaduras dos tubos foi feita manualmente com o auxílio de um conjunto metálico cilíndrico. Este equipamento propicia maior agilidade ao processo de fabricação das armaduras uma vez que o conjunto gira e facilita o posicionamento das barras em relação às espiras. O processo de fabricação compreende a passagem das espiras em torno do conjunto metálico (figura 3.17) e a fixação das armaduras longitudinais (figura 3.18). Na figura 3.19, é mostrada a armação do tubo já pronta, para ser posicionada na forma, faltando apenas a colocação dos dispositivos plásticos para garantir o cobrimento mínimo das armaduras.

Figura 3.17 – Fixação das espiras



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.18 – Fixação das armaduras longitudinais



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.19 – Armação Finalizada

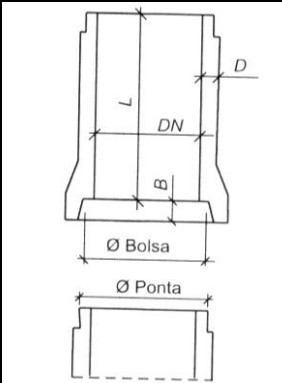


Fonte: Próprio autor.

3.2.5 Dimensões dos tubos de concreto

Os tubos produzidos têm as dimensões compatíveis a um tubo do tipo PA1, conforme a NBR 8890 (ABNT, 2008). A tabela 3.11 mostra as características geométricas dos tubos analisados.

Tabela 3.11 - Características geométricas dos tubos a serem analisados

Diâmetro nominal (DN), em cm	60	
Espessura (D), em cm	6	
Comprimento (L), em cm	150	
Raio da seção média, em cm*	32,5	
<p>* correspondente ao raio médio da seção tubular, a qual, possui, raio externo e interno respectivamente iguais a 35 cm e 30 cm.</p>		<p>b) Encaixe ponta e bolsa (NBR 8890, p.12)</p>

Fonte: Próprio autor.

3.2.6 Processo produtivo dos tubos

O procedimento adotado pela construtora Caso para a fabricação dos tubos é apresentado a seguir: inicialmente, é feita a mistura do concreto por meio do misturador (figuras 3.20 e 3.21), conforme apresentado no item 3.2.2; posteriormente, a mistura segue por meio de um conjunto de esteiras (figura 3.22) até o silo de armazenamento (figura 3.23); em seguida, por meio de uma segunda esteira, o concreto é lançado entre o molde externo e o interno, que permanece em estado de vibração; por fim, o tubo é desformado (figura 3.24) e curado (figura 3.25).

Figura 3.20 – Colocação dos agregados



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.21 – Detalhe do misturador



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.22 – Detalhe das Esteiras



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.23 – Lançamento do concreto no núcleo vibratório



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.24 – Tubo desformado



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.25 – Cura dos tubos de concreto



Fonte: Próprio autor.

3.2.7 Moldagem dos corpos de prova (CP)

Foram retirados corpos de prova para cada um dos traços usados nesta pesquisa, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, sendo os moldes fabricados em material PVC (Cloro de Polivinila). O adensamento dos corpos de prova foi feito por meio da utilização do núcleo vibratório usado na moldagem dos tubos, como mostrado na figura 3.26. No dia seguinte, os CPs foram desmoldados e levados para o tanque de cura (figura 3.27), onde permaneceram até a data dos ensaios.

Figura 3.26 – Adensamento dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.27 – Cura dos corpos de Prova



Fonte: Próprio autor.

3.2.8 Ensaios realizados nos corpos de prova 10cm x 20 cm

- Resistência à compressão axial do concreto

A determinação da resistência à compressão axial foi efetuada na data do ensaio de compressão diametral dos tubos, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). Antes da realização do ensaio, os CPs foram capeados por meio de um composto de enxofre e pozolanas.

- Resistência à tração por compressão diametral do concreto

Este ensaio também foi realizado na data do ensaio de compressão diametral dos tubos, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011).

- Módulo de Elasticidade do concreto

Este ensaio também foi realizado na data do ensaio de compressão diametral dos tubos, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008).

3.2.9 Ensaio de compressão diametral

O ensaio de compressão diametral foi realizado nas instalações do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – SP.

Para a aplicação da força em cada modelo, foi utilizada uma bomba elétrica, acoplada a um atuador hidráulico, com capacidade para 60 tf (600kN). A magnitude das forças foi medida por meio de uma célula de carga fixada na base do atuador hidráulico, como mostrado na figura 3.28.

Para a obtenção dos dados referentes aos deslocamentos, foram utilizados relógios comparadores da marca KYOWA – Eletronic Instruments CO, Ltda., tipo DT-20D Peacock. Estes dispositivos foram posicionados na região da ponta (figura 3.29) e da bolsa (figura 3.30), e tem a função de medir os deslocamentos relativos à superfície superior interna do tubo, como mostrado na figura 3.31. Para a coleta e o armazenamento dos dados obtidos por meio dos relógios comparadores, foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados, DAQbook 120 da Iotech, com interface ao programa DASyLab 5.0, mostrado na figura 3.24.

Figura 3.28 – Posicionamento no pórtico



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.29 – Detalhe do posicionamento do relógio comparador na ponta



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.30 – Detalhe da colocação do relógio comparador na bolsa



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.31 – Detalhe do sistema de aquisição de dados



Fonte: Próprio autor.

3.2.10 Ensaio de absorção

Este ensaio foi realizado seguindo-se as recomendações da NBR 8890 (ABNT,2007). Foram usados pedaços dos tubos rompidos durante o ensaio de compressão diametral para o ensaio de absorção, como mostrado na figura 3.32. Também foram retiradas amostras de dois tubos que não foram submetidos ao ensaio de compressão diametral, como mostrado na figura 3.33. Nas figuras 3.34 e 3.35 são mostrados os detalhes das amostras na estufa.

Figura 3.32 – Corpos de prova extraído do tubo após o ensaio de compressão diametral



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.33 – Corpo de prova extraído do tubo íntegro



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.34 – Pedacos dos tubos rompidos colocados na estufa



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.35 – Corpos de prova extraídos de tubo integros



Fonte: Próprio autor.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resultados dos traços de concreto

4.1.1 Ensaio de compressão axial

Na tabela 4.1, são apresentados os resultados de resistência a compressão axial dos corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm). Os dados mostram que existe uma tendência a diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de borracha incorporado ao concreto.

Tabela 4.1 – Resistência a compressão axial dos corpos de prova

Tubo	CP	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
TC	1	17,69	21,56	3,96	18,38
	2	25,61			
	3	21,38			
TR 10	1	18,79	19,36	1,12	5,80
	2	18,63			
	3	20,65			
TR 20	1	10,99	12,89	3,09	24,00
	2	11,22			
	3	16,46			

Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Na tabela 4.2, são apresentados os resultados de resistência a tração por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm). Era de se esperar um aumento na resistência a tração com o aumento do teor de resíduos, que na prática, não foi observado.

Tabela 4.2 – Resistência a tração por compressão diametral

Tubo	CP	Resistência à tração na Compressão Diametral (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
TC	1	2,98	3,27	0,41	12,54
	2	3,56			
TR 10	1	2,68	2,61	0,11	4,07
	2	2,53			
TR 20	1	1,92	2,47	0,55	22,27
	2	3,02			

Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Ensaio de módulo de elasticidade

Na tabela 4.3, são apresentados os resultados do módulo de elasticidade obtidos por meio de corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) durante o ensaio de compressão axial. Embora os resultados tenham a mesma ordem de grandeza, e coerentes com a literatura encontrada (menores valores de módulo para maiores valores de resíduo), foi observada que módulo do TR 10 é maior que o módulo do TC: é provável que pequenos teores de borracha, ocupando espaços vazios na matriz de concreto, aumentem a rigidez do elemento.

Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade

Tubo	CP	Módulo de Elasticidade (GPa)	Valor Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
TC	2	37	35,05	1,30	3,71
	4	34,46			
	5	33,69			
TR 10	2	36,2	36,56	0,91	2,49
	3	35,5			
	4	37,9			
TR 20	2	26,5	27,63	0,76	2,73
	3	28,5			
	4	27,9			

Fonte: Próprio autor.

4.1.4 Resultados obtidos no ensaio de absorção

Como mostrado no item 3.2.9, foram realizados dois ensaios de absorção. Na tabela 4.4, são mostrados os resultados de absorção de pedaços de concreto retirados dos tubos após estes terem sido submetidos ao ensaio de compressão diametral (ensaio de absorção 1), e, na tabela 4.5, são mostrados os resultados de corpos de prova extraídos de tubos íntegros, que não foram submetidos ao ensaio de compressão diametral (ensaio de absorção 2).

Tabela 4.4 – Ensaio de absorção 1 – CPs provenientes de pedaços de concreto dos tubos rompidos

Série	Tubo	CP	Massa Seca (g)	Massa Saturado (g)	Absorção (%)	Absorção Média (tubos) (%)	Absorção Média (série) (%)
TC	TC	1	2640	2760	4,55	4,81	4,81
		2	2110	2220	5,21		
		3	1930	2020	4,66		
TR 10	TR 10.1	1	2790	2920	4,66	4,68	4,46
		2	2340	2450	4,70		
		3	2560	2680	4,69		
	TR 10.2	1	2580	2690	4,26	4,23	
		2	1510	1580	4,64		
		3	1320	1370	3,79		
TR 20	TR 20.1	1	2200	2260	2,73	3,58	3,81
		2	1640	1700	3,66		
		3	1380	1440	4,35		
	TR 20.2	1	4300	4480	4,19	4,04	
		2	5280	5500	4,17		
		3	1925	2000	3,90		

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.5 – Ensaio de absorção 2 – CPs extraídos de tubos integros

Tubo	CP	Massa Seca (g)	Massa Saturado (g)	Absorção (%)	Absorção Média (tubos) (%)
TC AP	1	1073,1	1121,2	4,48	4,42
	2	1164,2	1217	4,54	
	3	1337,3	1394,2	4,25	
TR AP	1	1237,6	1282,9	3,66	3,66
	2	1283	1332,6	3,87	
	3	1318,4	1364,1	3,47	

Fonte: Próprio autor.

Não foram extraídos corpos de prova do TR 10 uma vez que não foi confeccionado um protótipo exclusivo para este ensaio.

Como a NBR 8890 (ABNT, 2008) estabelece que a absorção de água em tubos destinados á drenagem de água pluvial deve ser de, no máximo, 8%, tanto os tubos sem resíduo de borracha quanto os tubos com resíduo estariam aprovados.

Os dados referentes aos dois ensaios de absorção mostram que os corpos de prova com resíduo de borracha tiveram uma absorção menor em relação aos corpos de prova extraídos do tubo controle. A diminuição da absorção deve-se ao fato da borracha atuar como um fino no concreto, propiciando uma diminuição da sua porosidade.

Fazzan (2011) salienta que em função da borracha atuar como poros fechados no interior dos concretos, já que sua taxa de absorção é nula, a adição de resíduos de borracha de pneu em concretos pode servir como uma forma de aumentar a sua durabilidade, por meio da diminuição da porosidade.

Tanto para o tubo TC quanto para os tubos TR, os valores das taxas de absorção no ensaio 2 foram menores que os do ensaio 1. Este fato é explicado porque o tubo, após ser ensaiado, apresenta uma micro fissuração interna. As fissuras fazem com que o tubo apresente uma taxa de absorção maior. Com isso, a NBR 8890 (ABNT, 2008), ao estabelecer que se deve retirar corpos de prova do tubo após este ser submetido ao ensaio de compressão diametral, faz com que a taxa de absorção seja maior do que a que o tubo apresentaria em

suas condições de uso. Dessa maneira a norma parece ser um pouco conservadora neste aspecto, estando a favor da segurança.

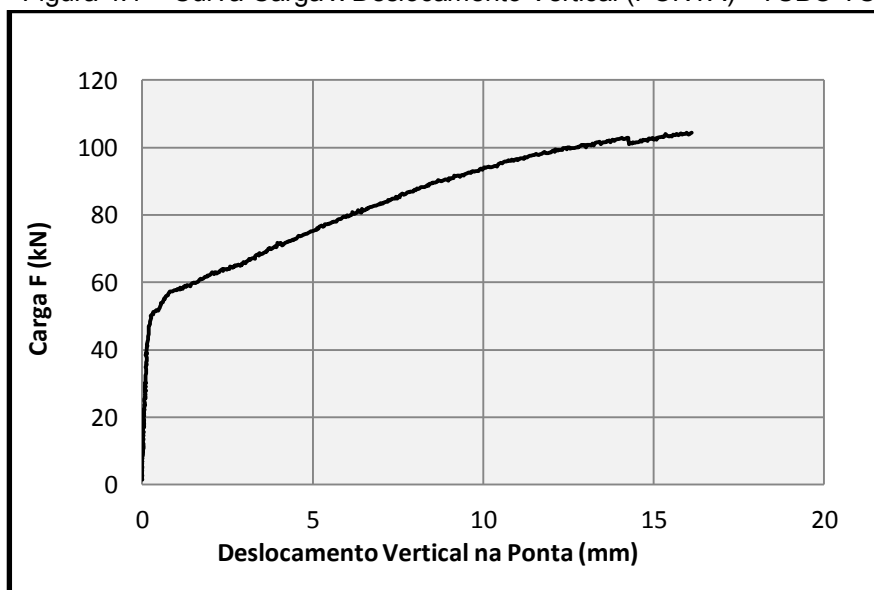
4.2 Resultados do ensaio de compressão diametral

Como descrito no item 3.2.8, os tubos de concreto armado foram submetidos ao ensaio de compressão diametral. Para melhor visualização dos resultados dos pares “carga aplicada” e “deslocamento vertical”, foram construídas as curvas “cargas vs deslocamento vertical” para a região da ponta e para a região da bolsa. Foram construídas, também, curvas “carga vs tempo”. Por fim, são apresentados gráficos comparativos de forças críticas para a fissuração e para a ruptura, os quais permitem identificar algumas diferenças existentes entre o padrão de fissuração do tubo controle e o dos com resíduo.

4.2.1 Curvas “carga vs deslocamento na ponta”

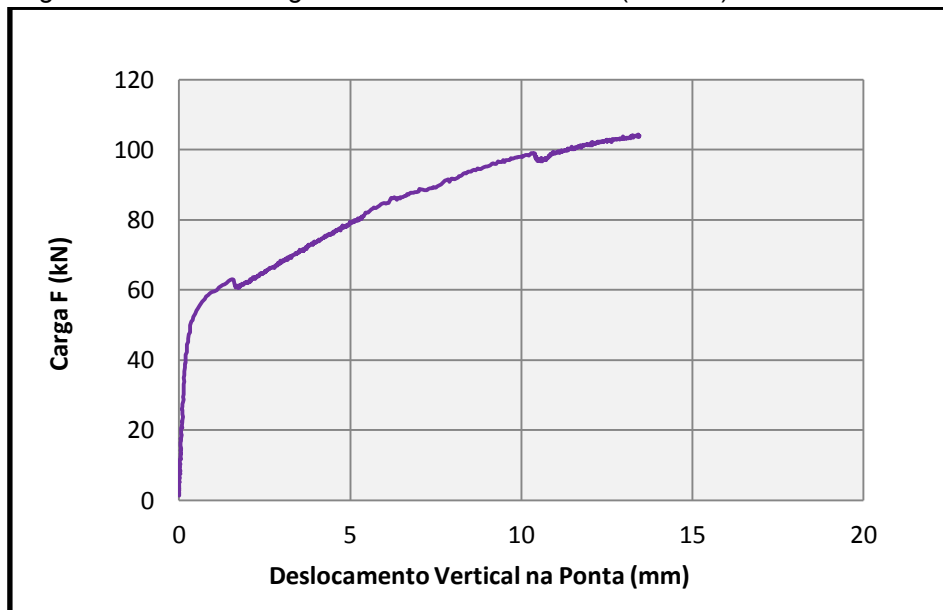
As figuras 4.1 a 4.6 apresentam as curvas “cargas vs deslocamento diametral” na região da ponta do tubo. Na figura 4.12, para melhor visualização, são mostradas todas as curvas em um único gráfico.

Figura 4.1 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TC



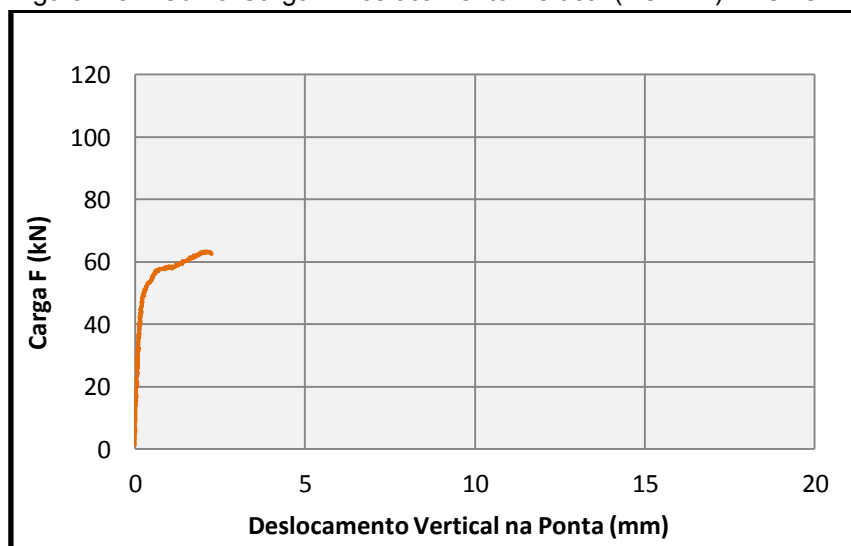
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.2 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 10.1



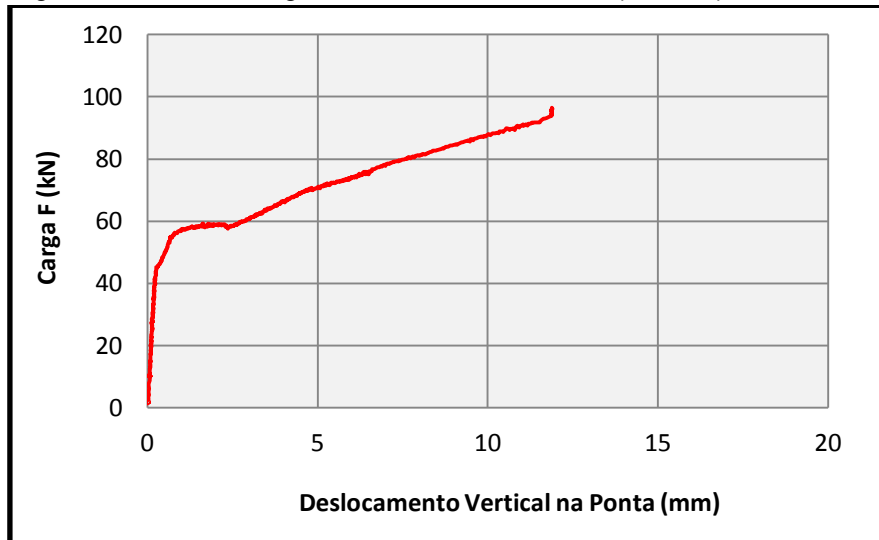
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.3 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 10.2



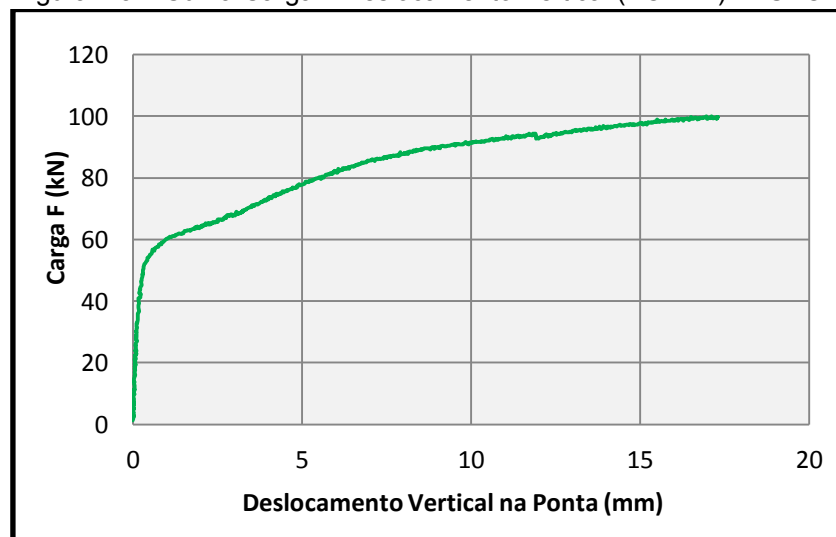
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 20.1



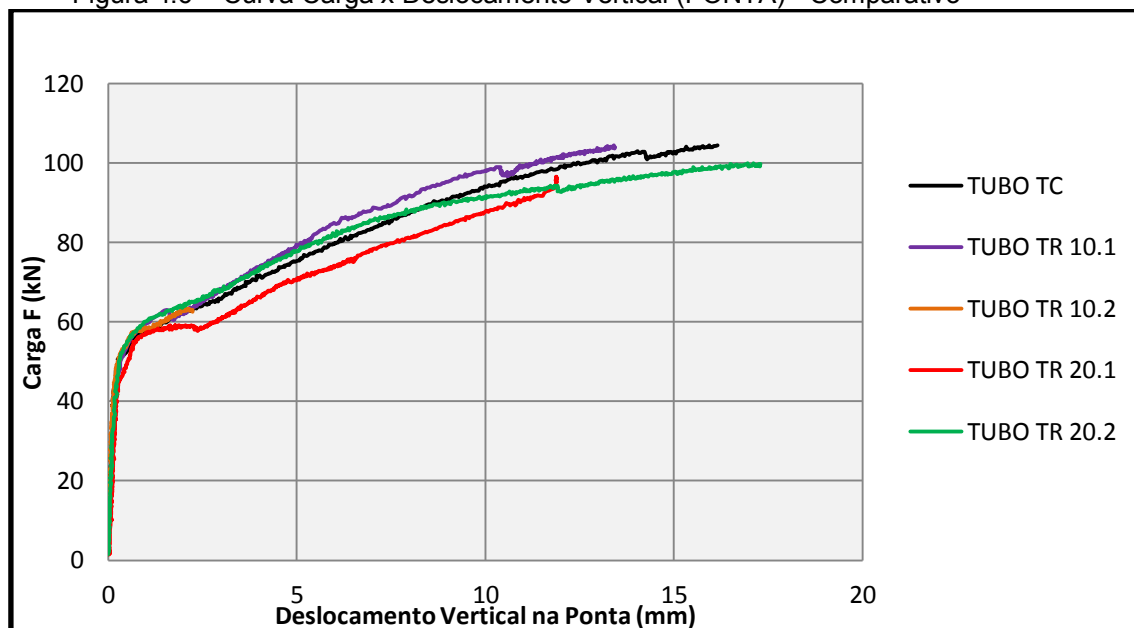
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.5 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - TUBO TR 20.2



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (PONTA) - Comparativo



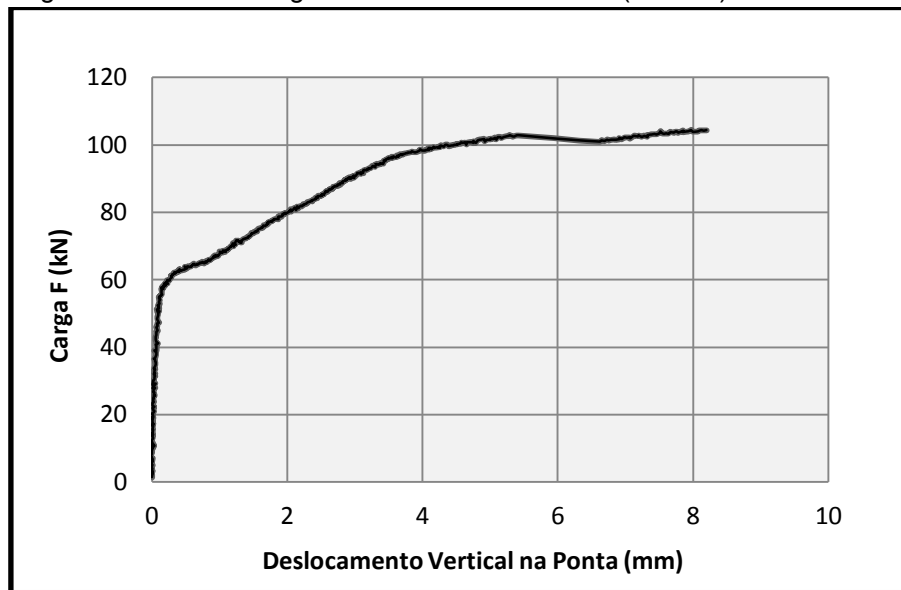
Fonte: Próprio autor.

Analisando as figuras apresentadas neste item, todos os tubos apresentaram capacidade resistente semelhante. Nota-se também que os tubos apresentaram boa ductilidade, pois, após a plastificação, eles continuaram suportando o carregamento sem que houvesse uma ruptura frágil. Dessa maneira, eles apresentaram o comportamento denominado “hardening”, como definido no trabalho de Figueiredo et. al. (2010). Este aspecto está ligado ao fato de que a armadura utilizada foi maior que a mínima.

4.2.2 Curvas “carga vs deslocamento na bolsa”

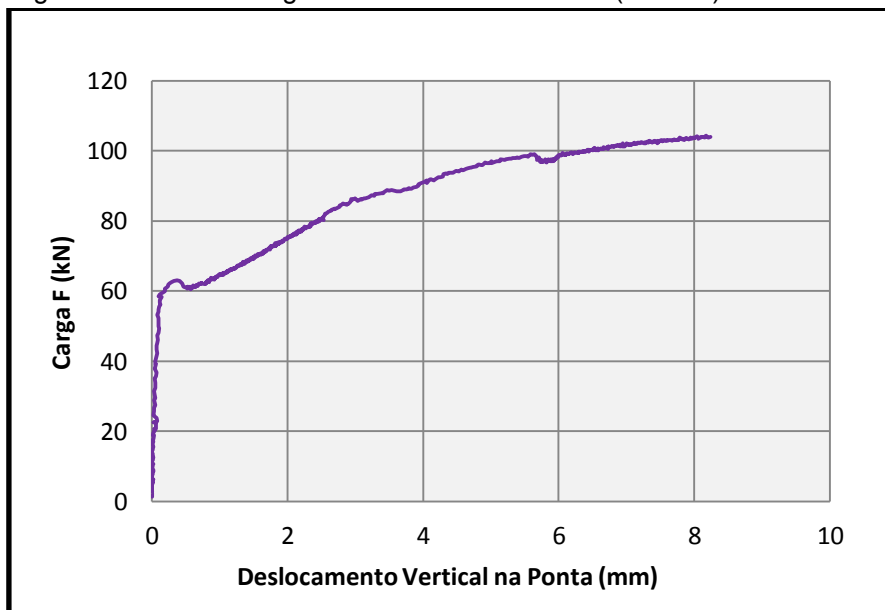
Nas figuras 4.7 a 4.12, são apresentadas as curvas “cargas vs deslocamento diametral” na região da bolsa do tubo. Na figura 4.19, para melhor visualização são mostradas todas as curvas em um único gráfico.

Figura 4.7 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TC



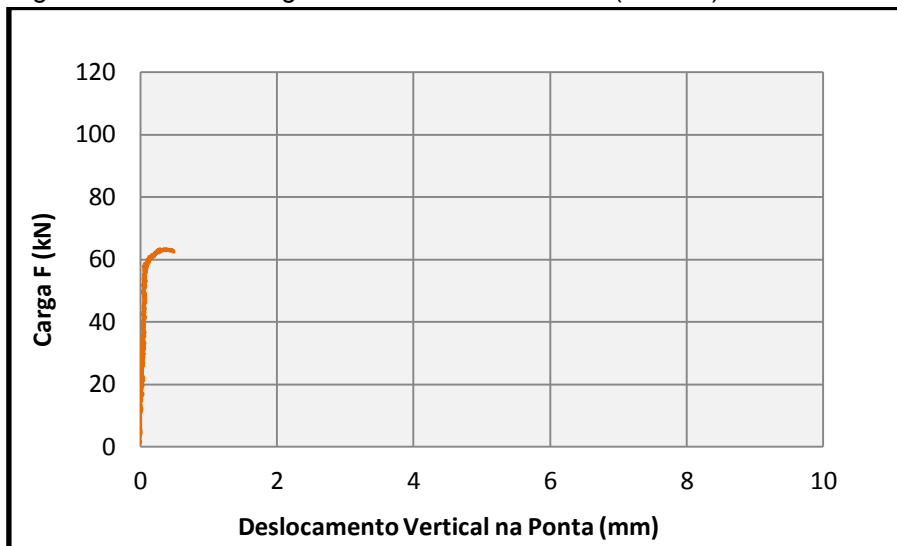
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.8 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 10.1



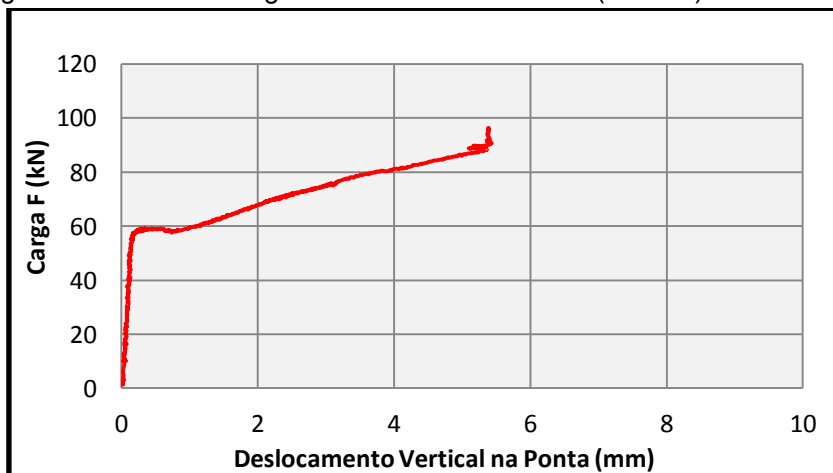
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.9 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 10.2



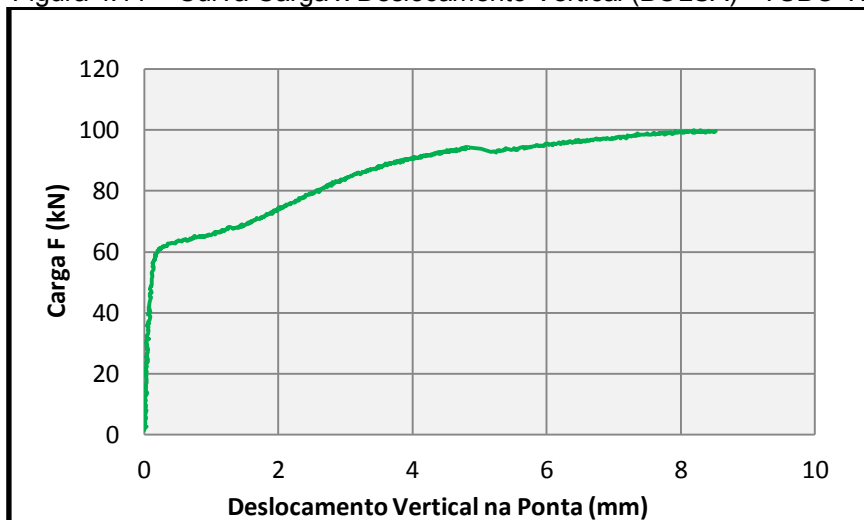
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.10 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 20.1



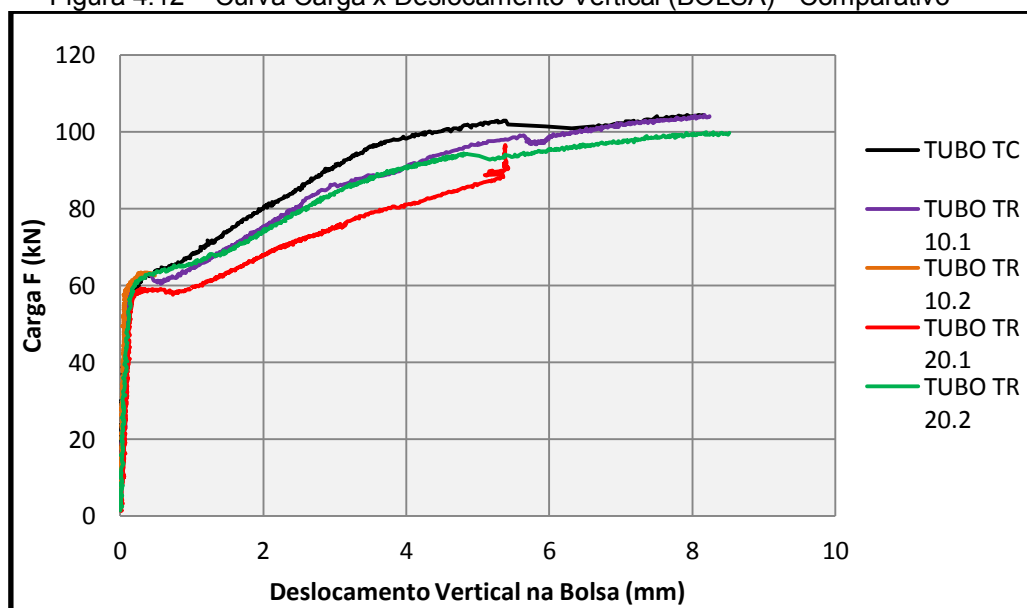
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.11 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - TUBO TR 20.2



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.12 – Curva Carga x Deslocamento Vertical (BOLSA) - Comparativo



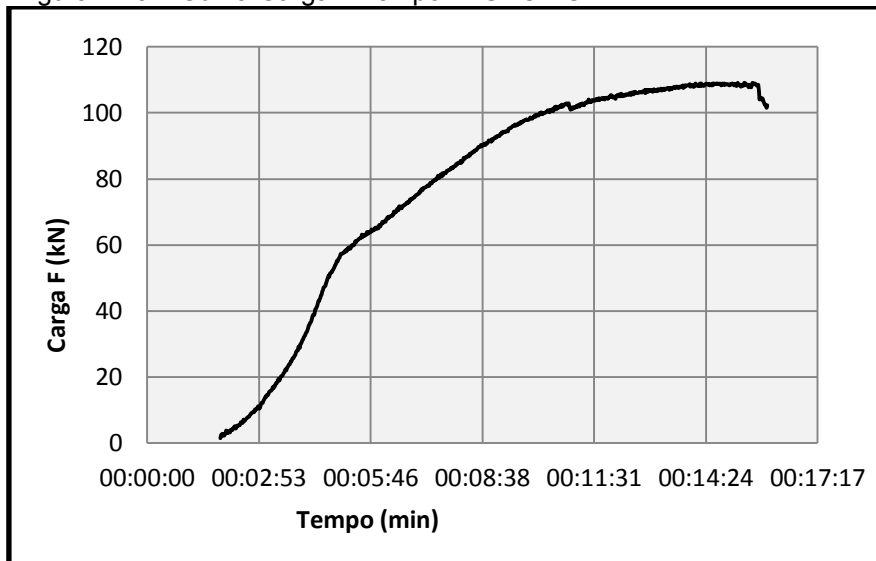
Fonte: Próprio autor.

O deslocamento vertical da ponta foi superior ao deslocamento vertical da bolsa. Isso porque a bolsa possui maior rigidez que o corpo do tubo. Dessa maneira a seção crítica em termos de deslocamentos verticais é a ponta. De maneira geral o comportamento da bolsa é similar ao comportamento da ponta.

4.2.3 Curvas “carga vs tempo”

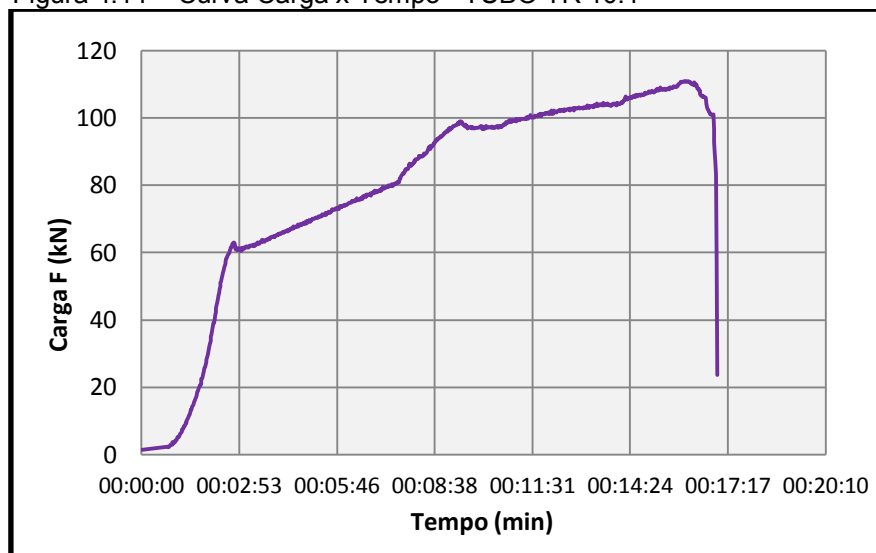
Nas figuras 4.13 a 4.24 são apresentadas as curvas “cargas vs tempo” . Na figura 4.25 para melhor visualização são mostradas todas as curvas em um único gráfico.

Figura 4.13 – Curva Carga x Tempo - TUBO TC



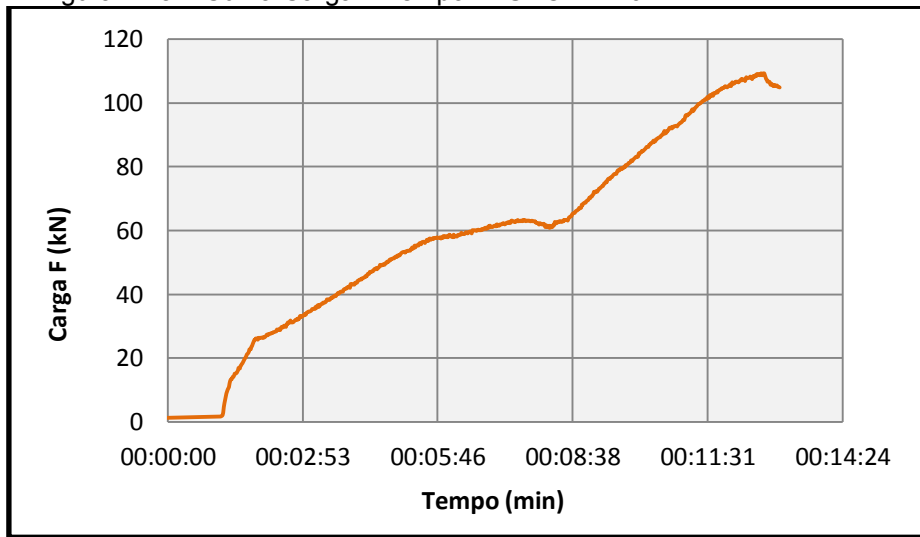
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.14 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 10.1



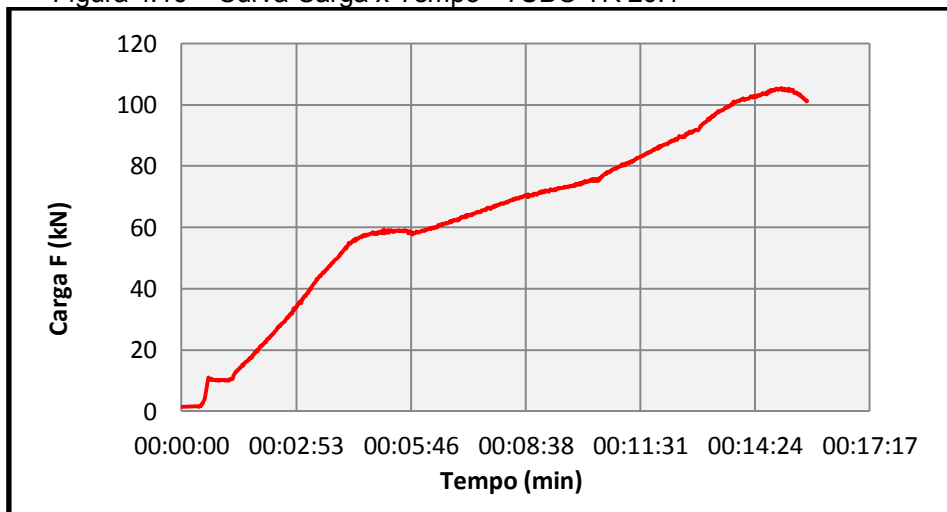
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.15 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 10.2



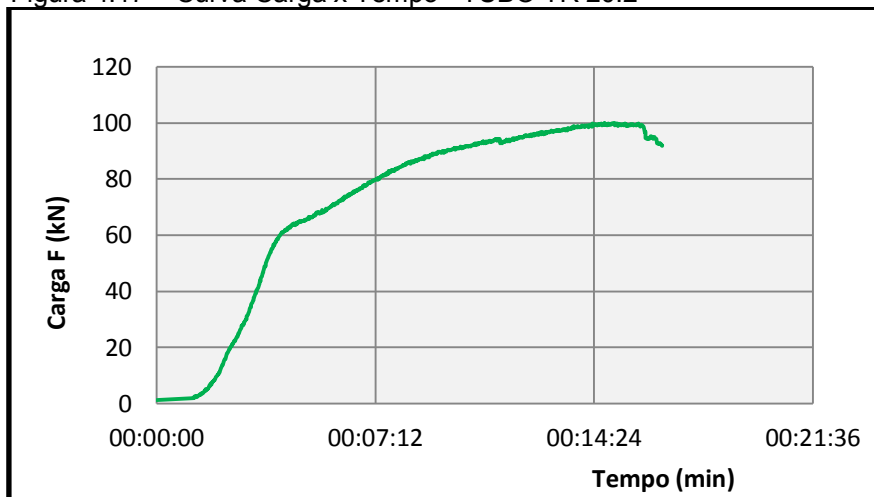
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.16 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 20.1



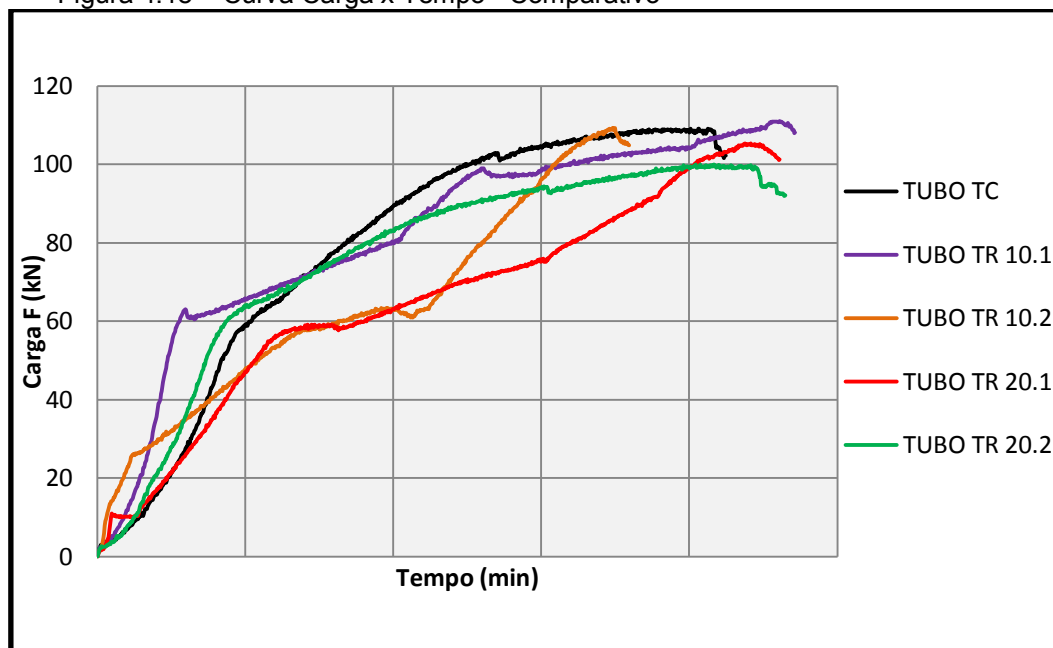
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.17 – Curva Carga x Tempo - TUBO TR 20.2



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.18 – Curva Carga x Tempo - Comparativo



Fonte: Próprio autor.

Os gráficos “curva vs tempo” mostram que a velocidade de carregamento em todos os condutos foi semelhante e que o critério exigido por norma de carregamento contínuo foi atendido.

4.2.4 Gráficos comparativos entre as forças críticas

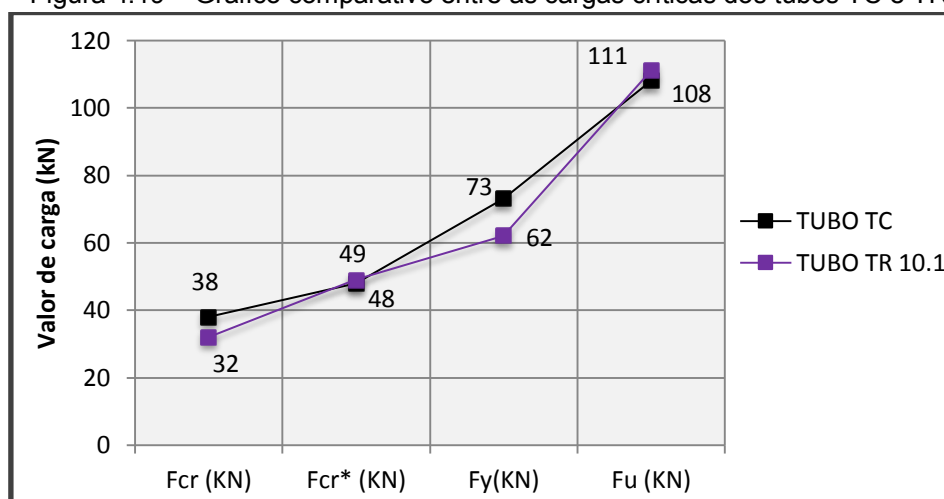
Os gráficos foram elaborados por meio da construção de retas tangentes às curvas “carga vs deslocamento diametral” na ponta. Optou-se por se fazer essa análise na região da ponta, uma vez que, nessa região, a fissuração é mais crítica e os deslocamentos são maiores. A tabela 4.6 com a equação de cada reta tangente às suas respectivas curvas. Nas figuras 4.19 a 4.22, são apresentadas as curvas comparativas entre as forças críticas de fissuração e de ruptura. Este procedimento se baseia no trabalho de Fuente et. al. (2010), como mostrado no item 2.5. A carga correspondente à primeira fissura está designada pelo termo F_{cr} , a carga de fissuração das seções laterais corresponde a F_{cr^*} , carga de plastificação crítica F_y , e a carga última F_u . Destaca-se que os valores de F_{cr} , F_{cr^*} , F_y e F_u foram obtidos por meio da análise dos gráficos, e não através da análise visual.

Tabela 4.6 – Equações das retas tangentes as curvas “carga vs deslocamento diametral”

TUBO	CARGAS		EQUAÇÃO DA RETA			CELULA DE INICIO E FIM DA RETA	
	DESCRIÇÃO	CARGA	A	b	R ²	INICIO	FIM
TUBO TC	F _{cr} (KN)	38	229,9	8,1921	0,9296	8	150
	F _{cr*} (KN)	48	90,511	28,127	0,9126	151	170
	F _y (KN)	73	3,7078	55,342	0,9797	171	545
	F _u (KN)	108	1,5378	79,612	0,8367	546	597
TUBO TR 10.1	F _{cr} (KN)	32	202,12	5,4101	0,9348	8	82
	F _{cr*} (KN)	49	81,727	24,128	0,9447	83	100
	F _y (KN)	62	4,8247	53,773	0,9879	101	515
	F _u (KN)	111	2,3036	76,536	0,9368	516	782
TUBO TR 10.2	F _{cr} (KN)	36	260,31	8,8549	0,9083	8	135
	F _{cr*} (KN)	51	82,065	29,601	0,8806	136	228
	F _y (KN)	58	14,707	47,328	0,9498	229	289
	F _u (KN)	109	4,451	53,717	0,9582	290	415
TUBO TR 20.1	F _{cr} (KN)	41	204,6	2,63	0,9638	8	184
	F _{cr*} (KN)	56	24,825	37,31	0,9822	185	244
	F _y (KN)	59	2,263	54,738	0,8462	245	308
	F _u (KN)	105	3,711	51,078	0,9915	309	786
TUBO TR 20.2	F _{cr} (KN)	45	200,47	4,8421	0,9163	8	145
	F _{cr*} (KN)	61	15,061	45,957	0,8959	146	185
	F _y (KN)	64	3,1829	60,255	0,9544	186	619
	F _u (KN)	100	1,1911	79,51	0,9665	620	835

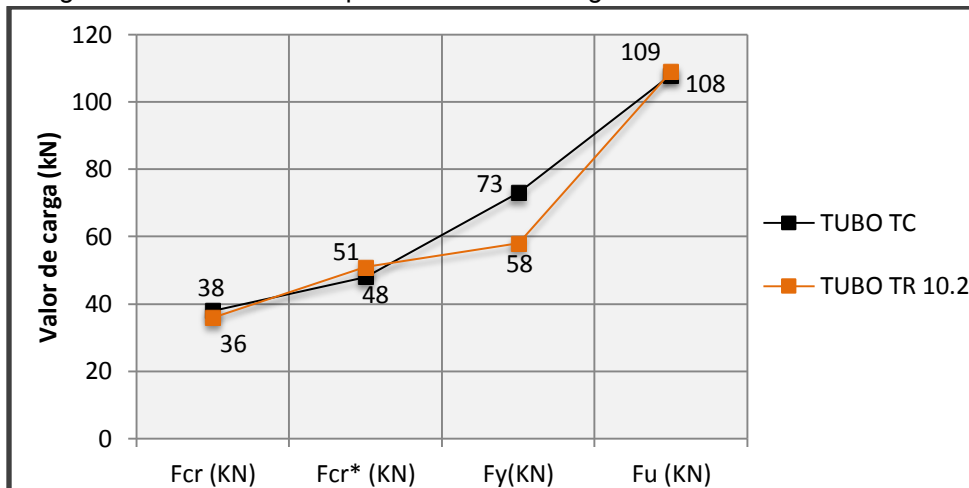
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.19 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 10.1



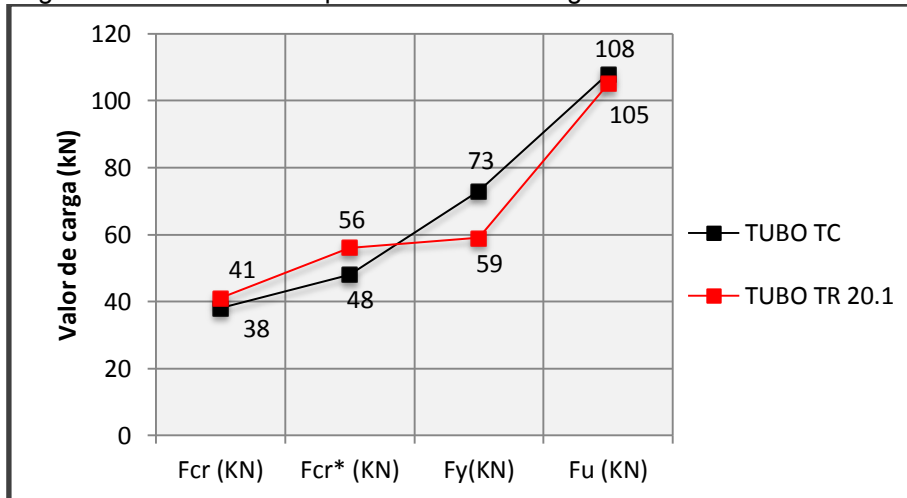
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.20 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 10.2



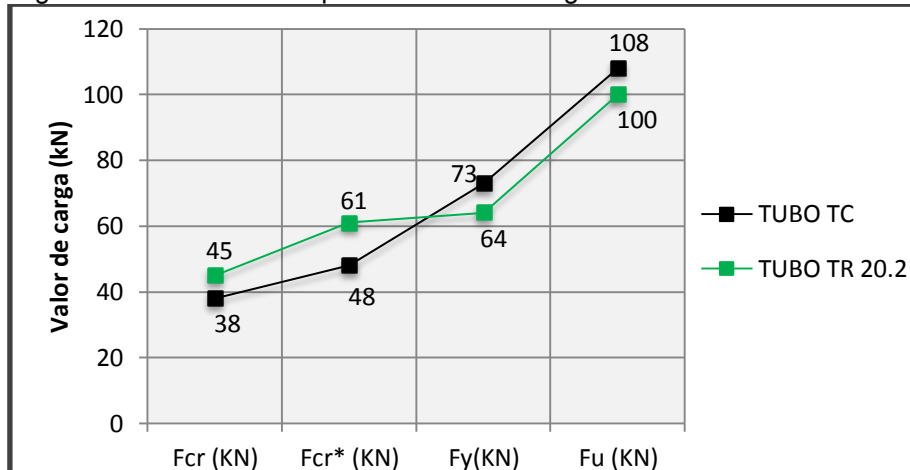
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.21 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 20.1



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.22 – Gráfico comparativo entre as cargas críticas dos tubos TC e TR 20.2

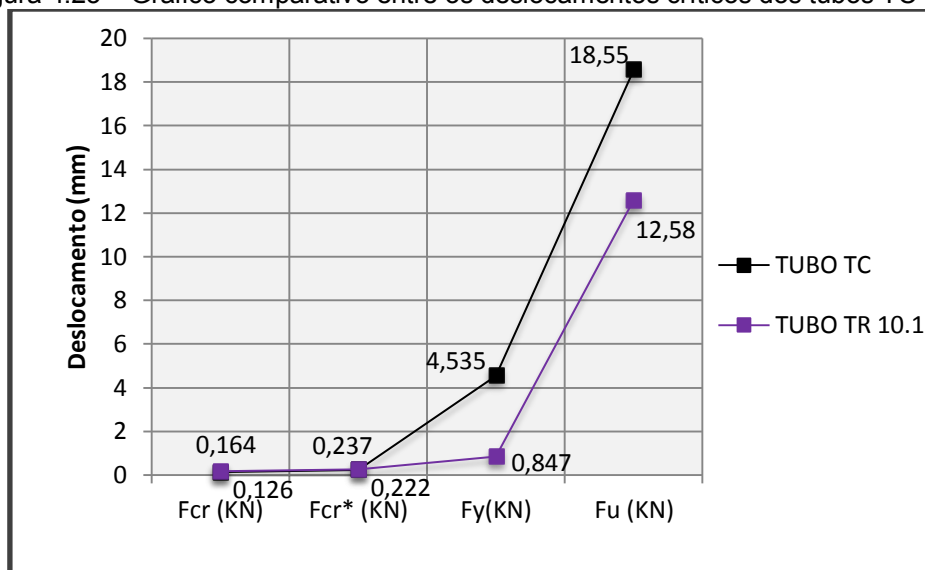


Fonte: Próprio autor.

4.2.5 Gráficos comparativos entre deslocamentos críticos

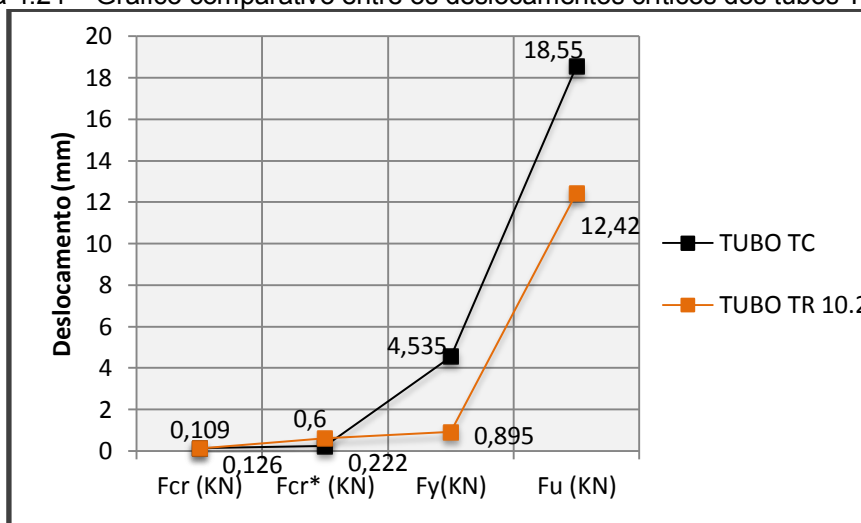
Nas figuras 4.23 a 4.26, são apresentadas as curvas comparativas entre os deslocamentos verticais correspondentes às forças críticas de fissuração e de ruptura apresentadas no item 4.3.4. Na tabela 4.7, são mostradas as cargas críticas e seus respectivos deslocamentos.

Figura 4.23 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 10.1



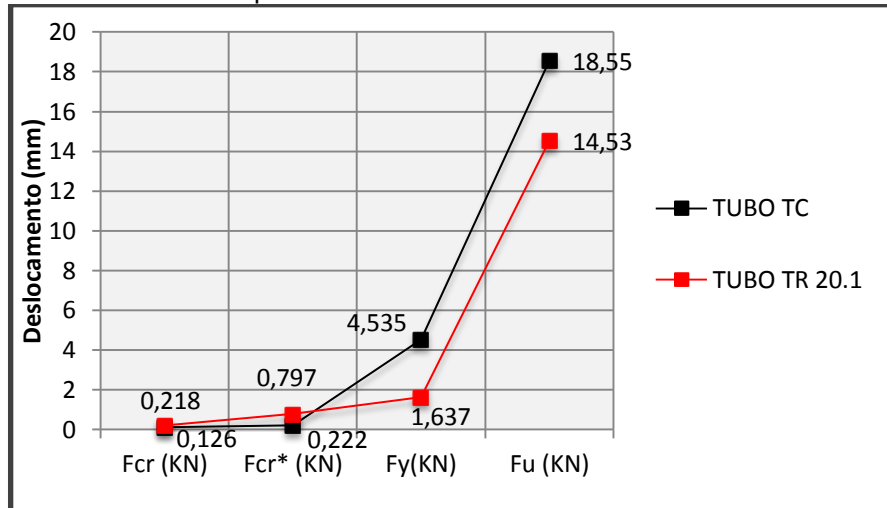
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.24 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 10.2



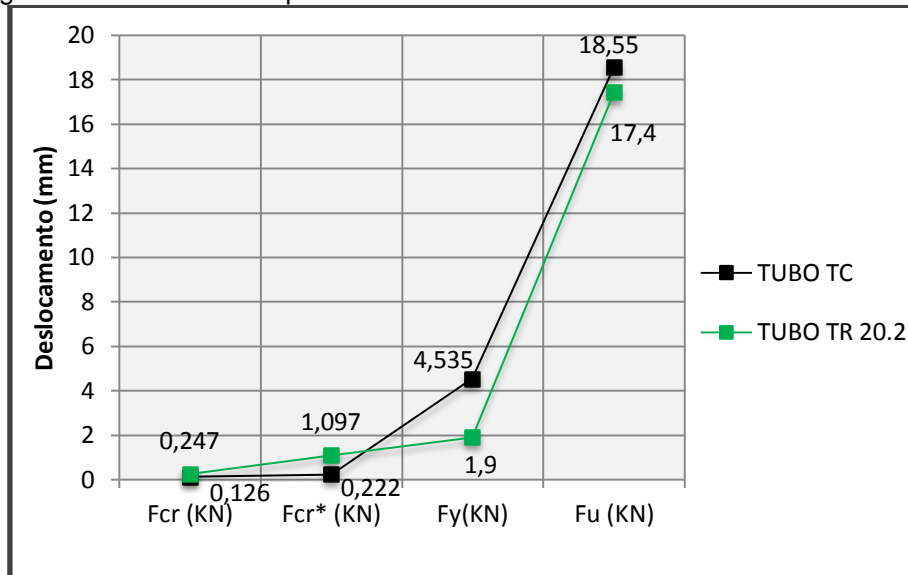
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.25 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 20.1



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.26 – Gráfico comparativo entre os deslocamentos críticos dos tubos TC e TR 20.2



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.7 – Cargas e deslocamentos críticos

TUBO	DESCRIÇÃO	CARGA (kN)	DESLOCAMENTO (mm)
TC	F_{cr} (KN)	38	0,126
	F_{cr*} (KN)	48	0,222
	F_y (KN)	73	4,535
	F_u (KN)	108	18,55
TR 10.1	F_{cr} (KN)	32	0,125
	F_{cr*} (KN)	49	0,311
	F_y (KN)	62	1,393
	F_u (KN)	111	14,27
TR 10.2	F_{cr} (KN)	36	0,109
	F_{cr*} (KN)	51	0,6
	F_y (KN)	58	0,895
	F_u (KN)	109	12,42
TR 20.1	F_{cr} (KN)	41	0,218
	F_{cr*} (KN)	56	0,797
	F_y (KN)	59	1,637
	F_u (KN)	105	14,53
TR 20.2	F_{cr} (KN)	45	0,247
	F_{cr*} (KN)	61	1,097
	F_y (KN)	64	1,9
	F_u (KN)	100	17,4

Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados para o ensaio de compressão diametral mostram que todos os tubos seguiram o mesmo padrão de fissuração porém com cargas de fissuras maiores para os tubos com resíduo, mostrando que este material tem potencial para ser utilizado nesse tipo de estrutura.

Analisando os gráficos entre cargas críticas de fissuração, mostrados nas figuras de 4.19 a 4.22, observa-se que os tubos de concreto com o teor de 10 kg de borracha por m³ de concreto (TR 10), quando comparados ao tubo controle (TC), tiveram capacidade resistente praticamente igual para as cargas associadas a pequenos deslocamentos (F_{cr} e F_{cr}^*). Já os tubos de concreto com teor de 20 kg de borracha por m³ de concreto (TR 20), quando comparados ao tubo controle (TC), tiveram capacidade resistente superior para as cargas associadas a pequenos deslocamentos (F_{cr} e F_{cr}^*). Dessa maneira, observou-se que a presença do resíduo de borracha de pneu proporcionou tubos com maiores cargas associados ao início do processo de fissuração.

No início do ensaio de compressão diametral, o resíduo de borracha de pneu auxilia a matriz de concreto a resistir aos esforços de tração e retardam o início da fissuração. Posteriormente, com o aumento do nível de carregamento, as armaduras passam a ser responsáveis por resistir exclusivamente aos esforços de tração, uma vez que ela está posicionada praticamente no centro da seção transversal do tubo.

Analisando os gráficos comparativos entre deslocamentos críticos apresentados nas figuras 4.29 a 4.32, nota-se que o deslocamento vertical referente às cargas F_{cr} e F_{cr}^* , para o tubo sem resíduo, é praticamente igual ao dos tubos com resíduo.

Em relação ao deslocamento diametral os tubos de concreto o ganho de resistência inicial em relação ao início da fissuração e o menor deslocamento diametral dos condutos com resíduo de borracha de pneu podem estar relacionados, também, ao formato cilíndrico dos condutos, que poderia propiciar um efeito de arco, que, por sua vez, induziria um efeito de confinamento do resíduo de borracha inserido na microestrutura do concreto.

4.2.6 Critérios para o estabelecimento da carga de fissura e ruptura dos

A norma NBR 8890 (ABNT, 2007) define carga de fissura como sendo a carga medida no instante em que aparecem fissuras de abertura igual a 0,25 mm e comprimento de 300 mm ou mais. Considera-se que a carga de fissura é atingida a partir do momento em que a lâmina padrão, feita de chapa de aço, consiga penetrar na fissura. Esta inspeção é feita visualmente e está representada na figura 4.34. e 4.35

Figura 4.27 – Utilização da lâmina padrão para o levantamento da carga de fissura;



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.28 – Utilização da lâmina padrão para o levantamento da carga de fissura nas laterais;



Fonte: Próprio autor.

A NBR 8890 (ABNT, 2007) separa os tubos de concreto em classes resistentes, dividindo-os segundo os seus diâmetros nominais. A partir da carga de fissura e da carga de ruptura, extraídas do ensaio de compressão diametral e apresentadas por meio de tabelas, é que se especifica um tubo para um determinado projeto.

Para cada tubo de concreto foi extraída a carga de fissura utilizando a lâmina padrão. A tabela 4.8 mostra as cargas de fissuração e de ruptura extraídas para cada tubo.

Tabela 4.8 – Cargas de fissura e de ruptura com a utilização da lâmina padrão

TUBOS	Carga de Fissura Ensaio (kN)	Carga de Fissura Ensaio (kN/m)	Carga de Ruptura Ensaio (kN)	Carga de Ruptura Ensaio (kN/m)
TC	59	39,3	108	72
TR 10.1	62,5	41,6	111	74
TR 10.2	61	40,6	109	72,6
TR 20.1	56	37,7	105	70
TR 20.2	64	42,6	100	66,6

Fonte: Próprio autor.

Por meio das cargas extraídas por intermédio da lâmina padrão todos os tubos poderiam ter sido classificados como PA2, pois, possuem carga de fissura superior a 36 kN/m e carga de ruptura superior a 54 kN/m,

Além do critério estabelecido por norma, o processo de fissuração pode ser avaliado por meio das curvas “carga vs deslocamento diametral”. A carga correspondente ao instante que as seções laterais fissuram foi estabelecida a partir do momento que a curva deixa de ter comportamento linear, o que a título de comparação, poderia ser considerado análoga a carga F_{cr}^* das seções laterais, como mostrado na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Cargas de fissura e de ruptura tendo como referência a carga F_{cr}^*

TUBOS	Carga de Fissura Ensaio (kN)	Carga de Fissura Ensaio (kN/m)	Carga de Ruptura Ensaio (kN)	Carga de Ruptura Ensaio (kN/m)
TC	48	32,0	108	72
TR 10.1	49	32,6	111	74
TR 10.2	51	34	109	72,6
TR 20.1	56	37,33	105	70
TR 20.2	61	40,6	100	66,6

Fonte: Próprio autor.

Analisando os valores de F_{cr}^* , a partir do qual o tubo deixa de ter um comportamento linear, observa-se que: quanto maior o teor de borracha, maior o valor de F_{cr}^* demonstrando que a borracha retarda o início do processo de plastificação do tubo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos por meio do ensaio de compressão diametral mostraram que a incorporação do resíduo de borracha de pneu em tubos de concreto armado é uma alternativa estruturalmente viável e ecologicamente sustentável, uma vez que, no ensaio de compressão diametral, todos os tubos tiveram resistências semelhantes.

Foi observado que todos os tubos com resíduo de borracha de pneu seguiram o mesmo padrão de fissuração em relação ao tubo controle. Eles apresentaram uma carga de fissura maior, retardando, assim, o início do processo de fissuração. Com isso, pode-se dizer que o ensaio de compressão diametral comprova que o resíduo de borracha de pneu contribui em termos de durabilidade da estrutura tubular, pois faz com que o tubo tenha menor número de fissuras, reduzindo assim, a entrada de agentes corrosivos que possam comprometer a utilização do conduto em seu uso cotidiano.

Foram feitos ensaios de compressão axial e de tração por compressão diametral, utilizando-se corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm. A resistência à compressão ficou abaixo da esperada visto que o traço possui baixa relação água/cimento (a/c) e um consumo de cimento elevado. Em relação à resistência à tração do concreto com borracha, os valores deveriam ser maiores para o concreto com resíduo; porém, o traço controle obteve maiores valores de resistência à tração.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos por meio dos CPs mencionados mostram que, embora os resultados sejam da mesma ordem de grandeza, e coerentes com a literatura encontrada (menores valores de módulo para maiores teores de resíduo), Embora os resultados tenham a mesma ordem de grandeza, e coerentes com a literatura encontrada (menores valores de módulo para maiores valores de resíduo), foi observada que módulo do TR 10 é maior que o módulo do TC: é provável que pequenos teores de borracha,

ocupando espaços vazios na matriz de concreto, aumentem a rigidez do elemento.

Com relação à absorção todos os tubos apresentaram valores inferiores ao limite recomendado pela NBR 8890 (ABNT, 2007). Os tubos com resíduo apresentaram valores médios ligeiramente inferiores ao do traço controle. A diminuição da absorção deve-se ao fato da borracha atuar como um fino no concreto, propiciando uma diminuição da sua porosidade.

A inclusão do resíduo de borracha de pneu foi eficaz, também, sob o ponto de vista ecológico, pois o resíduo que seria descartado no processo de recauchutagem pode ser utilizado nos condutos sem que este seja prejudicado em termos estruturais. Salienta-se que a cada tubo de concreto produzido com resíduo de borracha de pneu foram utilizados aproximadamente 3,46 kg de borracha (referente ao teor de 20 kg de borracha por m³ de concreto). Esta quantidade refere-se à quantidade de borracha que é descartada de um pneu no processo de recauchutagem, levando-se em consideração que um pneu radial possui 9,2 kg e aproximadamente 40% de sua constituição é de borracha, como considerado por Andrade (2007).

6 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para as pesquisas futuras, inicialmente é proposto o estudo de novas dosagens experimentais, com diferentes teores de resíduo de borracha de pneu, para que a visualização do efeito de “fibra” apresentado pelo resíduo seja melhor entendido e também para que se chegue a um teor ótimo de resíduo de borracha que possa ser inserido nos tubos de concreto.

Para melhor comprovação científica do potencial de uso do resíduo de borracha de pneu em tubos de concreto armado, é necessário que seja feito um maior número de ensaios experimentais, como, por exemplo, ensaios de durabilidade, ensaios de porosidade e ensaios de tenacidade.

Propõe-se o estudo de modelos numéricos utilizando-se a programação em elementos finitos com intuito de se construir as curvas teóricas “carga vs deslocamento diametral” de modo a se ter subsídios numéricos para um dimensionamento mais refinado de tubulações em concreto armado e das tubulações de concreto com fibras de alto e de baixo módulo de elasticidade. Isso porque sabe-se que o resíduo de borracha de pneu proporcionou ganhos de resistência aos condutos; porém, não se conhece ainda até que ponto esse efeito é eficiente e se, no futuro, a taxa de armadura poderá ser diminuída frente à utilização do resíduo extraído no processo de recauchutagem.

Por fim, propõe-se que seja estudado se os ganhos de resistência que o resíduo de borracha de pneu poderia proporcionar aos tubos de concreto e se pode estar relacionado, também, ao formato cilíndrico dos condutos, que poderia propiciar um efeito de arco, que, por sua vez, induziria um efeito de confinamento do resíduo de borracha inserido na micro-estrutura do concreto.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: concreto- procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: concreto- ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos concreto. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: argamassa e concreto - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: concreto- determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação .Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8890**: tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2007 (versão corrigida 2008)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6118**: projeto de estrutura de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS DE CONCRETO – ABTC. **A questão do saneamento no Brasil**. 2013. Disponível em: <<http://www.abtc.com.br/site/brasil.html>>. Acesso em: 18 dez. 2013.

ANDRADE, H. S. **Pneus inservíveis**: alternativas possíveis de reutilização. 2007. 101 f. Monografia (Especialização) - Curso de Graduação em Ciências Econômicas, Departamento de Centro Sócio-econômico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS. **Concreto de cimento portland**. Disponível em:<http://www.set.eesc.usp.br/1enppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/115.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2013.

CHAMA NETO, P. J. **Tubos de concreto**. Jaraguá Do Sul: Gráfica Régis, 2004. 115 p.

EL DEBS, M. K. **Projeto estrutural de tubos circulares**. São Paulo: ABTC, 2003. 71 p.

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduo de borracha de pneu**. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

FIGUEIREDO A. D. et al. Tubos de concreto reforçado com fibras de aço: parte 1: análise tecnológica do comportamento mecânico. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 1-11, 2012. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/riem/v5n1/v5n1a02.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Epusp, 2000, 2000. 71 p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/260. Disponível em: < http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00260.pdf>. Acesso em 01 nov. 2014.

FIGUEIREDO A. D. et al. Análise de viabilidade do uso de fibras metálicas em tubos de concreto. parte 1: campanha experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, FORTALEZA-CE. **Anais...** Gonçalves: Ibracon 2009, 2009. p. 1 – 11

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto Reforçado com Fibras**. São Paulo: Usp - Poli, 2011. 256 p

FIORANELLI JUNIOR, A.. **Análise de novo procedimento para o projeto estrutural de tubos de concreto enterrados**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FREITAS, C. et al. Concreto com adição de borracha para uso na confecção de blocos intertravados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Ibracon 2009, 2009. p. 1 - 11.

FUGII, A. P. **Avaliação de tubos de concreto reforçados com fibras de aço segundo a NBR 8890**. 2008. 163 f. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. **Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete**. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 5, p. 1828–1836, 2009.

HAKTANIR, Tefaruk et al. Effects of steel fibers and mineral filler on the watertightness of concrete pipes. **Cement & Concrete Composites**, Kayseri, v. 20, n. 28, p. 811-816, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **Atlas de saneamento 2011**. Brasília-DF: Ministério das Cidades, 2011. 268 p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm>. Acesso em: 20 dez. 2013.

JORGE, R. et al. Aproveitamento da borracha de pneus inservíveis na produção de componentes para construção. In: ICTR 2004 - CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1., 2004, Florianópolis. **Anais do ICTR 2004**. Florianópolis-sc: ICTR - USP, 2004. p. 1 - 9.

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M. Rubberized portland cement concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 11, n. 13, p. 206-213, 1999.

LA FUENTE, A. et al. A new desing method for steel fibre reinforced concrete pipes. **Construction And Building Materials**, Catalunya, v. 30, p. 547-555, 2012a. Disponível em: < http://ac.els-cdn.com/S0950061811006921/1-s2.0-S0950061811006921-main.pdf?_tid=ae3c73da-794e-11e4-9dfd-00000aab0f26&acdnat=1417434136_e819e0c1ff4b0aa78cb7769b1bd28214>. Acesso em: 12 nov. 2014.

LA FUENTE, A. et al. Tubos de concreto reforçado com fibras de aço: parte 2: modelo numérico para simular o ensaio de compressão diametral. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 1, p.12-25, 01 fev. 2012b. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/riem/v5n1/v5n1a03.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

LA FUENTE, A. et al. Análisis de viabilidad del uso de fibras metálicas em tubos de hormigón. parte 2: modelo numérico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, FORTALEZA-CE. **Anais...** Bento Gonçalves: Ibracon 2009, 2009. p. 1 - 11.

MARQUES, A. C. **Estudo da adição de borracha vulcanizada a temperatura ambiente e elevada temperatura**. 2005. 114 f. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MARTINS, I. R. F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 276 f. Tese

(Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ORÉFICE. **Compósito.** Disponível em: <<http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/compositos.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

PENA, E. T. A **Reforma de pneus é uma atividade “verde”**. Entrevista. Disponível em: <<http://www.infopneus.com.br/artigos/a-reforma-de-pneus-e-uma-atividade-verde/>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

PORTAL BRASIL. . **País terá plano nacional de saneamento básico.** 2013. Disponível em: <<https://www.brasil.gov.br/saude/2013/12/pais-tera-plano-nacional-de-saneamento-basico>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

PORTAL DO CONCRETO. **Tipos de cimento.** Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/inicial.html>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

QUEIROZ, R. M. **Tubos de concreto com adição de resíduos de borracha de pneu.** 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. **Waste Management**, Oxford, 24, n. 6, p. 563-569, 2004.

SON, K. S.; HAJIRASOULIHA, I.; PILAKOUTAS, K. Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, n. 1, p 218-226, 2011.

TRENTIN, T. F. S.; MELGES, J. L. P. **Modelagem numérica de tubos de concreto utilizando-se o sistema computacional ANSYS - Número 1 e 2.** Ilha Solteira: Unesp/FFE, 2011. (Relatório de pesquisa, 10/19853-5)

TRIGO, A. P. M. **Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu.** 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista Ilha Solteira, 2005.

TUCCI, C. E. M.. **Gestão de águas pluviais.** Porto Alegre: Ministério Das Cidades, 2005. 192 p.

ZAILLER, W. **Projetos estruturais de tubos enterrados.** São Paulo: Pini, 1983. 106 p.