

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO HENRIQUE MATTIELLO CRUZ

**ESTUDO DE CASO: RESISTÊNCIA DE COMPRESSÃO DIAMETRAL
DE TUBOS DE CONCRETO DE 40 CM DE DIÂMETRO COM E SEM
ARMAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2019

FERNANDO HENRIQUE MATTIELLO CRUZ

**ESTUDO DE CASO: RESISTÊNCIA DE COMPRESSÃO DIAMETRAL
DE TUBOS DE CONCRETO DE 40 CM DE DIÂMETRO COM E SEM
ARMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 223

Estudo de caso: Resistência de compressão diametral de tubos de concreto de 40 cm de diâmetro com e sem armação

por

Fernando Henrique Mattiello Cruz

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 11:10h do dia **13 de novembro de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Rodny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha querida mãe, Neusa Mattiello, que sempre esteve muito presente e me deu coragem e incentivo para que esta realidade fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Savaris, pela sua paciência na orientação, pelo apoio, pela compreensão e auxílio em todas as etapas no desenvolvimento deste estudo.

Também agradeço à banca avaliadora pelas contribuições e sugestões que foram imprescindíveis para o aprimoramento deste estudo.

A todas as pessoas envolvidas na UTFPR que, de alguma forma, contribuíram, especialmente os técnicos dos laboratórios, Marcos e Wilson, pois sem a contribuição deles não seria possível realizar os ensaios. Não poderia esquecer também dos professores do curso que, de alguma forma, fizeram parte do resultado final.

Agradeço imensamente a todos os meus familiares, em especial minha querida mãe. Além disso, agradeço aos meus amigos que seguiram na jornada acadêmica, em especial Raquel, Eduardo, Gustavo, Iasmin, Lays e Luiz Felipe.

RESUMO

CRUZ, Fernando H. M. **Estudo de caso: Resistência de compressão diametral de tubos de concreto de 40 cm de diâmetro com e sem armação.** 2019. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

Os tubos de concreto de seção circular são amplamente empregados nas obras de saneamento no Brasil, principalmente para condução de águas pluviais e esgoto, podendo ser produzidos em concreto simples ou armado. Em virtude disso há a necessidade de realizar estudos para avaliar suas resistências e capacidade de suportar as pressões geradas pelo solo que os envolve. Além disso, é necessário avaliar se estes estão cumprindo as exigências normativas e se estão com a qualidade esperada pelo mercado. Este trabalho avalia a conformidade e a resistência a compressão diametral de tubos de concreto com e sem armadura com diâmetro nominal de 400 mm com encaixe tipo macho e fêmea, em relação às exigências normativas, incluindo a análise do processo produtivo e agregados utilizados na produção de concreto seco, para dois traços diferentes. Os resultados mostraram que a presença de armadura de tela soldada nos tubos avaliados elevou significativamente a resistência a compressão diametral, mesmo sendo utilizado um traço com resistência a compressão axial inferior. Pode-se concluir também que os tubos, de maneira geral, estão em conformidade com as exigências normativas.

Palavras-chave: Tubo de concreto. Compressão diametral. Concreto seco.

ABSTRACT

CRUZ, Fernando H. M. **Study case: Compressive strength of 40 cm diameter concrete pipes with and without reinforcement.** 2019. 63 f. Monograph – Civil Engineering. Federal University of Technology – Paraná – Brazil. Toledo, 2019.

Circular section concrete pipes are widely used in sanitation constructions in Brazil, mainly for rainwater and sewage conduction, and they can be produced in simple or reinforced concrete. Because of this, there is a need to carry out studies to evaluate their resistance and ability to withstand the pressures generated by the surrounding soil. Moreover, it is necessary to assess if they are complying with regulatory requirements and if they meet the quality expected by the market. This research measures the conformity and diametral compressive strength of reinforced and non-reinforced concrete pipes, with a nominal diameter of 400 mm with male and female fitting, in relation to normative requirements, including analysis of the production process and aggregates used in dry concrete production, for two different mixing ratios. The results demonstrated that the presence of welded screen reinforcement in the evaluated tubes significantly increased the resistance to diametral compressive strength, even though it was used a mix proportion with lower axial compressive strength. It can also be concluded that, in general, the pipes comply with the regulatory requirements.

Keywords: Concrete pipe. Diametral compression. Dry concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Semicorte longitudinal típico de tubos com encaixe macho e fêmea e ponta e bolsa	15
Figura 2 – Gabarito para medida de alinhamento da superfície interna dos tubos ...	20
Figura 3 – Métodos de ensaios de tubos de concreto	21
Figura 4 – Distribuição de pressões nos tubos de concreto enterrados	22
Figura 5 – Esquema do ensaio para tubo macho e fêmea	24
Figura 6 – Lâmina-padrão para medida de abertura de fissura segundo a norma NBR 8890 (ABNT, 2007).....	25
Figura 7 – Gabarito em aço inoxidável utilizado para avaliação de superfície interna dos tubos	28
Figura 8 – Esquema de ensaio a ser realizado	30
Figura 9 – Montagem do ensaio de compressão diametral	30
Figura 10 – Equipamento utilizado para produção de tubos de concreto	31
Figura 11 – Observações da linha de produção	32
Figura 12 – Curva granulométrica da areia utilizada no processo produtivo.....	33
Figura 13 – Curva granulométrica do pó de pedra utilizado no processo produtivo..	34
Figura 14 – Curva granulométrica da brita 0 utilizada no processo produtivo.....	34
Figura 15 – Exemplo de identificação de tubos	35
Figura 16 – Tubos CA1 e CA3 reprovados no teste do gabarito	36
Figura 17 – Análise geométrica: diâmetro nominal (DN)	37
Figura 18 – Análise geométrica: comprimento útil do tubo (L).....	37
Figura 19 – Análise geométrica: espessura de parede (D).....	38
Figura 20 – Análise geométrica: comprimento da fêmea (B)	39
Figura 21 – Aparência do concreto utilizado para produção dos tubos	40
Figura 22 – Capeamento realizado nos corpos de prova cilíndricos.....	41
Figura 23 – Corpos de provas ensaiados na prensa hidráulica	42
Figura 24 – Gráfico força <i>versus</i> tempo no ensaio de compressão diametral de CS2	44
Figura 25 – Quadros (<i>frames</i>) da filmagem do ensaio de compressão diametral de CS2.....	45
Figura 26 – Simulação numérica feita por Tehrani (2016).....	46

Figura 27 – Comparativo de antes e depois do ensaio de compressão diametral de CS2.....	46
Figura 28 – Aspecto do corpo de prova CA3.....	47
Figura 29 – Comparativo de antes e depois do ensaio de compressão diametral de CA3.....	48
Figura 30 – Fissura lateral no corpo de prova após o ensaio de compressão diametral de CA3	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões dos tubos para água pluvial com encaixe ponta e bolsa	16
Tabela 2 – Dimensões dos tubos para água pluvial com encaixe macho e fêmea ...	16
Tabela 3 – Compressão diametral de tubos simples	18
Tabela 4 – Compressão diametral de tubos de concreto armado ou armado com reforço secundário de fibras	18
Tabela 5 – Espessura das vigotas de madeira em função do diâmetro nominal	24
Tabela 6 – Dimensões dos tubos para águas pluviais com encaixe ponta e bolsa ou macho e fêmea segundo a norma NBR 8890 (ABNT, 2007)	26
Tabela 7 – Especificações técnicas da armadura utilizada na produção de tubos armados	32
Tabela 8 – Análise estatística: diâmetro nominal (DN)	37
Tabela 9 – Análise estatística: comprimento útil do tubo (L)	38
Tabela 10 – Análise estatística: espessura de parede (D)	38
Tabela 11 – Análise estatística: comprimento da fêmea (B)	39
Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de compressão axial	42
Tabela 13 – Módulo de elasticidade obtidos	43
Tabela 14 – Resultados obtidos no ensaio de compressão diametral	43
Tabela 15 – Análise estatística dos resultados obtidos no ensaio de compressão diametral	44

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABTC – Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto

ACPA – *American Concrete Pipe Association* – Associação Americana de Tubos de Concreto

ARI – Alta Resistência Inicial

CA – Concreto Armado

CS – Concreto Simples

DIN – *Deutsches Institut Für Normung* – Instituto Alemão para Normatização

DMC – Dimensão Máxima Característica

DN – Diâmetro Nominal

EPI – Equipamento de Proteção Individual

EUA – Estados Unidos da América

f_{ck} – *Feature Compression Know* – Resistência Característica do Concreto à Compressão

fps – *Frames per second* – Quadros por segundo

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer* – Transdutor de Deslocamento Variável Linear

NBR – Norma Brasileira

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 TUBOS DE CONCRETO.....	15
2.1.1 Parâmetros geométricos.....	15
2.1.2 Controle tecnológico.....	17
2.1.3 Resistência à compressão diametral.....	18
2.1.4 Controle de qualidade.....	19
2.1.5 Concreto seco.....	20
2.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TUBOS.....	21
2.2.1 Amostragem.....	23
2.2.2 Ensaio de compressão diametral.....	23
2.3 ALTERAÇÕES NA VERSÃO DA NORMA NBR 8890.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 COLETA DE AMOSTRAS.....	27
3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS TUBOS.....	28
3.2.1 Inspeção visual.....	28
3.2.2 Inspeção dimensional.....	29
3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS... ..	29
3.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS TUBOS.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 PROCESSO PRODUTIVO.....	31

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	33
4.3 INSPEÇÃO VISUAL DOS TUBOS	35
4.4 INSPEÇÃO DIMENSIONAL DOS TUBOS	36
4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	40
4.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL NOS TUBOS DE CONCRETO ...	43
5 CONCLUSÃO	50
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICE A – DADOS OBTIDOS PARA CURVAS GRANULOMÉTRICAS	54
APÊNDICE B – PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	56
APÊNDICE C – GRÁFICOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	57

1 INTRODUÇÃO

Os tubos de concreto de seção circular são frequentemente utilizados nas obras de saneamento no Brasil, principalmente para condução de águas pluviais e esgoto. Assim, tem-se a necessidade de realizar estudos para cumprimento das normas e aprimoramento do processo produtivo, com o objetivo de melhorar as características do produto final, como resistência, custo benefício e aparência.

É necessário levar em consideração que os tubos geralmente ficam enterrados e, portanto, a manutenção destes é mais complicada. Além disso, em caso extremo será necessária a troca completa, o que representa um alto valor econômico, principalmente por estes elementos estarem, geralmente, localizados abaixo de pavimentos asfálticos.

A complexidade de análise dos tubos de concreto enterrados ocorre devido a diversos fatores, os quais podem levar a discrepâncias entre os valores previstos pelo dimensionamento com resultados de ensaios experimentais, mesmo se considerados valores efetivos das resistências dos materiais e das grandezas geométricas (EL DEBS, 2003).

O projeto e construção das obras envolvendo estes elementos estão entre as áreas mais importantes da engenharia de obras públicas e, como todos os projetos, envolvem diversas etapas de desenvolvimento. A maioria dos manuais de projetos estruturais de tubos de concreto exigem consultas em referências complementares nas mais diversas áreas do conhecimento, principalmente mecânica dos solos, hidráulica, engenharia de materiais e concreto armado (ACPA, 2011).

Considerando que os tubos de concreto podem ser produzidos com ou sem armadura de aço, é necessário avaliar se a presença da armadura representa elevação da relação custo benefício. Assim, este trabalho visa realizar a análise da influência da armadura na resistência de tubos de concreto com seção circular e sistema de encaixe macho e fêmea com 400 mm de diâmetro, através de ensaios experimentais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os tubos de concreto são amplamente empregados nas obras de saneamento. Sendo fabricados com ou sem armadura, é necessário avaliar se estes estão sendo produzidos de acordo com as normativas vigentes, além de analisar de forma qualitativa e quantitativa, se a presença de armadura influencia na resistência final do tubo. Além disso, a comparação entre tubos com e sem armadura permite considerar a possibilidade de utilização de diferentes traços de concreto, a fim de reduzir o consumo de cimento e, conseqüentemente, o custo de produção, ainda que cumprindo as exigências das normas brasileiras.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo de caso em uma empresa produtora de tubos de concreto na região Oeste do estado do Paraná.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a resistência à compressão diametral dos tubos de concreto de 40 cm de diâmetro com e sem armadura;
- Realizar inspeções visuais e geométricas em tubos de dois lotes de produção;
- Comparar os traços de concreto utilizados na produção dos tubos;
- Avaliar a conformidade dos tubos obtidos com a NBR 8890 (ABNT, 2018).

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo está focado em uma análise experimental para determinação da resistência a compressão diametral de tubos de concreto com seção circular, exclusivamente para o diâmetro nominal de 400 mm, de dois lotes de produção escolhido ao acaso, a fim de avaliar se a presença de armadura possui colaboração significativa na resistência final dos tubos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TUBOS DE CONCRETO

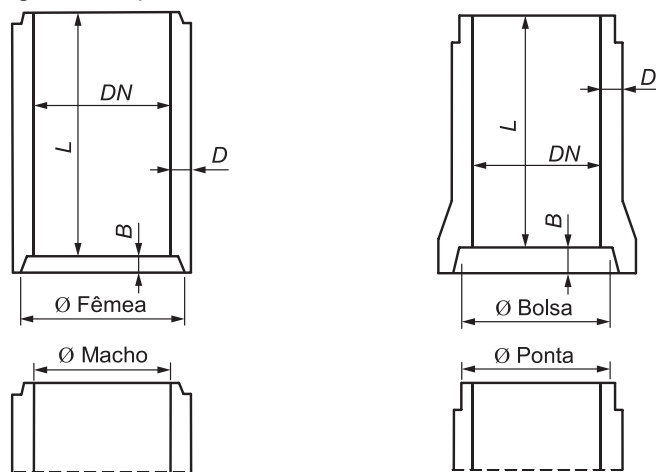
Segundo a NBR 8890 (ABNT, 2018), o tubo de concreto é uma peça pré-moldada ou pré-fabricada de concreto, de seção circular uniforme em toda a sua superfície longitudinal interna, exceto na região do encaixe (bolsa ou fêmea). No Brasil são, em sua maioria, utilizados para redes de águas pluviais e esgotamento sanitário (ESCARIZ, 2012).

Os projetos destes tubos devem ter o mesmo cuidado, ou até maior, apresentado nos projetos usuais de estruturas, visto que a falha de um tubo pode causar problemas sérios e onerosos, mesmo não apresentando vítimas fatais (SILVA, 2011).

2.1.1 Parâmetros geométricos

A norma NBR 8890 (ABNT, 2018) estabelece os parâmetros geométricos que os fabricantes devem seguir, como indica a Figura 1, sendo as dimensões diferentes para os tubos com encaixe ponta e bolsa e macho e fêmea, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Figura 1 – Semicorte longitudinal típico de tubos com encaixe macho e fêmea e ponta e bolsa



a) Encaixe macho e fêmea

b) Encaixe ponta e bolsa

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2018).

Tabela 1 – Dimensões dos tubos para água pluvial com encaixe ponta e bolsa

Diâmetro nominal	Comprimento útil mínimo do tubo	Comprimento mínimo da bolsa	Espessura mínima de parede						
			D						
DN	L	B	PS1	PS2	PA1	PA2	PA3	PA4	
200	1 000	50	30	30	–	–	–	–	
300	1 000	60	30	30	45	45	45	45	
400	1 000	65	40	40	45	45	45	45	
500	1 000	70	50	50	50	50	50	60	
600	1 000	75	55	55	60	60	60	70	
700	1 000	80	–	–	66	66	75	80	
800	1 000	80	–	–	72	72	80	95	
900	1 000	80	–	–	75	75	90	100	
1 000	1 000	80	–	–	80	80	100	115	
1 100	1 000	80	–	–	90	90	112	125	
1 200	1 000	90	–	–	96	96	125	140	
1 300	1 000	90	–	–	105	105	130	155	
1 500	1 000	90	–	–	120	120	155	160	
1 750	1 000	100	–	–	140	140	165	175	
2 000	1 000	100	–	–	160	160	170	180	

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2018).

Tabela 2 – Dimensões dos tubos para água pluvial com encaixe macho e fêmea

Diâmetro nominal	Comprimento útil mínimo do tubo	Comprimento mínimo da fêmea	Espessura mínima de parede						
			D						
DN	L	B	PS1	PS2	PA1	PA2	PA3	PA4	
500	950	20	50	50	50	50	50	60	
600	950	20	55	55	60	60	60	70	
700	950	35	–	–	66	66	75	80	
800	950	35	–	–	72	72	80	95	
900	950	35	–	–	75	75	90	100	
1 000	950	35	–	–	80	80	100	115	
1 100	950	35	–	–	90	90	112	125	
1 200	950	35	–	–	96	96	125	140	
1 300	950	35	–	–	105	105	130	155	
1 500	950	35	–	–	120	120	155	160	
1 750	950	35	–	–	140	140	165	175	
2 000	950	35	–	–	160	160	170	180	

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2018).

A norma NBR 8890 (ABNT, 2018) também determina que todos os tubos devem trazer, em caracteres legíveis, gravados em baixo-relevo no concreto ainda fresco, o nome ou marca do fabricante, o diâmetro nominal, a classe a que pertencem ou a resistência do tubo, a data de fabricação e um número para rastreamento de todas as suas características de fabricação. No caso de tubos reforçados exclusivamente com fibras de aço, estes devem ser identificados com a sigla “RF” gravada em caracteres legíveis em baixo-relevo no concreto ainda fresco.

2.1.2 Controle tecnológico

A respeito do controle tecnológico dos materiais, a NBR 8890 (ABNT, 2018) orienta seguir os requisitos das normas pertinentes (agregados, telas soldadas, concreto armado, tubos pré-moldados, entre outras), no entanto, traz alguns requisitos gerais sobre os materiais a serem utilizados nos tubos. Em relação ao concreto, a escolha dos materiais deve considerar a agressividade do meio, interno e externo, onde serão instalados os tubos.

No entanto, a relação água/cimento deve ser no máximo de 0,50 para tubos destinados a água pluvial e no máximo de 0,45 para tubos destinados a esgoto sanitário. Também define parâmetros para utilização de agregados, os quais devem possuir dimensão máxima característica limitada a um terço da espessura da parede do tubo e o cobrimento mínimo da armadura.

A norma brasileira não estabelece, diretamente, parâmetros de resistência característica do concreto, sendo de responsabilidade do projetista fazer a avaliação, podendo ser utilizada como referência os requisitos da NBR 6118 (ABNT, 2014). Recorrendo a normas internacionais, segundo Wong e Nehdi (2018), no Canadá e EUA recomenda-se que os tubos sejam produzidos com resistência à compressão característica variando entre 28 MPa e 42 MPa, dependendo do seu tamanho e classe. Na China e Reino Unido, essa resistência deve ser de 40 MPa, independentemente de tamanho e classe do tubo. Na Austrália e Nova Zelândia não há especificação.

A NBR 8890 (ABNT, 2018) traz alguns requisitos extras para produção de tubos, sendo possível utilizar como armadura as telas soldadas, desde que de acordo com a NBR 7481 (ABNT, 1990). No entanto, deve ser garantido o posicionamento geométrico das armaduras de maneira uniforme, respeitando o cobrimento interno, que deve ser no mínimo de 20 mm, e o cobrimento externo, que deve ser no mínimo de 15 mm, para os tubos de diâmetro nominal até 600 mm. Para os tubos com diâmetros nominais maiores que 600 mm, o cobrimento interno das armaduras deve ser no mínimo de 30 mm e o cobrimento externo no mínimo de 20 mm.

Por fim, o tubo deve apresentar arestas bem definidas e ser feito por processo industrial adequado às características do produto final quanto à resistência mecânica, permeabilidade, estanqueidade, absorção, dimensões e acabamento.

2.1.3 Resistência à compressão diametral

Os tubos são classificados de acordo com a carga resistida, obtida no ensaio de compressão diametral. Deste ensaio, obtém-se a força de ruptura e força isenta de fissura, sendo a classificação apresentada na Tabela 3 para tubos sem armadura e na Tabela 4 para tubos de concreto com armadura.

Tabela 3 – Compressão diametral de tubos simples

DN	Água pluvial		Esgoto sanitário
	Força mínima de ruptura kN/m		Força mínima de ruptura kN/m
Classe	PS1	PS2	ES
200	16	24	36
300	16	24	36
400	16	24	36
500	20	30	45
600	24	36	54

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2018).

Tabela 4 – Compressão diametral de tubos de concreto armado ou armado com reforço secundário de fibras

DN	Água pluvial								Esgoto sanitário					
	Força mínima isenta de fissura kN/m				Força mínima de fissura kN/m				Força mínima isenta de fissura kN/m			Força mínima de fissura kN/m		
Classe ^a	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4	EA2	EA3	EA4	EA2	EA3	EA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54	18	27	36	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72	24	36	48	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90	30	45	60	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108	36	54	72	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126	42	63	84	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144	48	72	96	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162	54	81	108	81	122	162
1 000	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180
1 100	44	66	99	132	66	99	149	198	66	99	132	99	149	198
1 200	48	72	108	144	72	108	162	216	72	108	144	108	162	216
1 500	60	90	135	180	90	135	203	270	90	135	180	135	203	270
1 750	70	105	158	210	105	158	237	315	105	158	210	158	237	315
2 000	80	120	180	240	120	180	270	360	120	180	240	180	270	360

^a Outras classes podem ser admitidas mediante acordo entre fabricante e comprador, devendo atender aos demais requisitos desta Norma para tubos de classe normal. Para tubo armado e tubo armado com reforço secundário de fibras, a força de ruptura mínima deve corresponder a 1,5 da força mínima isenta de fissura.

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2018).

As siglas das classes de resistência apresentadas nas tabelas significam:

- PS1 e PS2 = Pluvial Simples (sem armação) – Classe de resistência 1 e 2, respectivamente;
- ES = Esgoto Simples (sem armação);
- PA1 à PA4 = Pluvial Armado – Classe de resistência 1 à 4;
- EA2 à EA4 = Esgoto Armado – Classe de resistência 2 à 4.

2.1.4 Controle de qualidade

Segundo Camargo (2010), a gestão de qualidade visa oferecer aos clientes produtos e serviços revestidos de aspectos e atributos que atendam e muitas vezes até surpreendam os clientes no atendimento de suas necessidades e desejos.

A NBR 8890 (ABNT, 2018) preconiza que o controle de produção deve ser realizado, o qual é definido como o conjunto de procedimentos realizados pelo produtor, durante a produção, visando o atendimento dos requisitos estabelecidos para os tubos. Para isso, são selecionadas amostras aleatórias, compreendidas por tubos pertencentes a um mesmo lote, e estas são avaliadas para definir se estão dentro de um conjunto de parâmetros que garantam a qualidade do produto final.

Dentre estes requisitos, o acabamento da peça final é muito importante. As superfícies internas e externas dos tubos devem ser regulares e homogêneas, compatíveis com o processo de fabricação, não podendo apresentar defeitos visíveis a olho nu ou detectáveis por meio de percussão, e que sejam prejudiciais à qualidade do tubo quanto à resistência, permeabilidade e durabilidade.

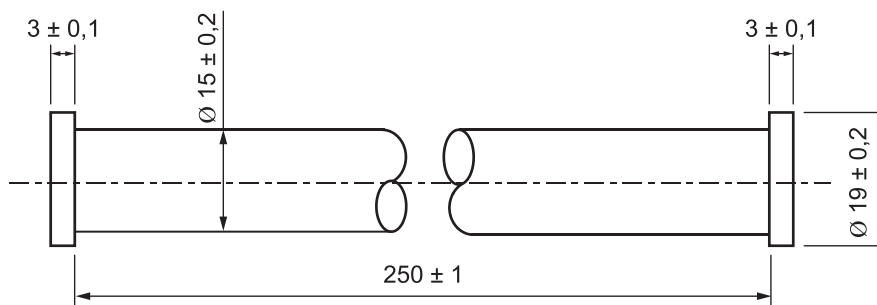
Além disso, a NBR 8890 (ABNT, 2018) também afirma que não são permitidos retoques com nata de cimento ou com outros materiais, visando esconder defeitos. Também não podem ser aceitos tubos com defeitos como bolhas ou furos superficiais com diâmetro superior a 10 mm e profundidade superior a 5 mm e fissuras com abertura maior que 0,15 mm.

Segundo esta norma, é necessária a avaliação do acabamento da superfície interna do tubo com o gabarito apresentado na Figura 2, que deve ser rolado sobre

esta superfície em movimentos circulares com o eixo paralelo ao eixo do tubo. O procedimento deve ser feito em 5% do lote, devendo ser aprovados os tubos cuja parede não é tocada pela parte central do gabarito.

Figura 2 – Gabarito para medida de alinhamento da superfície interna dos tubos

Dimensões em milímetros



Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2018).

São permitidas algumas tolerâncias nas características geométricas. O diâmetro interno médio não pode diferir mais de 1% do diâmetro nominal (DN); para a espessura de parede não são admitidas diferenças para menos de 5% da espessura declarada ou 5 mm, adotando-se sempre o menor valor; o comprimento útil não pode diferir da dimensão declarada em mais de 20 mm para menos, nem mais de 50 mm para mais.

A NBR 8890 (ABNT, 2018) recomenda que os consumidores finais realizem estas avaliações de qualidade de forma rotineira. O controle de recebimento representa o conjunto de procedimentos realizados pelo comprador, durante a produção ou nos lotes adquiridos, para fins de aceitação ou rejeição dos tubos. A indicação é que devem ser rejeitados os tubos que não atendam aos requisitos previstos na norma. Se houver rejeição na avaliação visual maior ou igual a 30%, todo o lote deve ser rejeitado.

2.1.5 Concreto seco

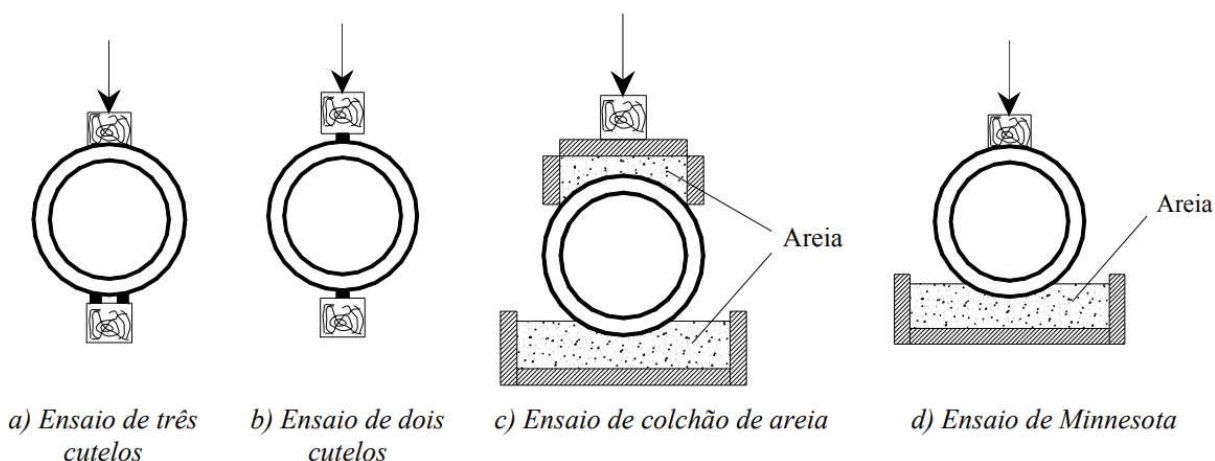
Segundo Rezende et al. (2012), o concreto seco é aplicado na indústria de pré-moldados e de concretos compactados. O termo “concreto seco” é aplicado aos concretos com baixo teor de água, entre 6% e 8% de umidade (FRASSON JUNIOR, 2000 apud REZENDE et al., 2012), o que resulta em abatimento zero e, em virtude disso, este também é conhecido como concreto sem abatimento ou *no-s slump*.

Este tipo de concreto apresenta elevada coesão e, em virtude disso, é necessária energia de compactação e vibração para realizar a eliminação de vazios. Assim, a retirada de ar aprisionado geralmente é feita por máquinas vibro-prensas ou rolo compactador (MARCHIONI, 2012; REZENDE et al., 2012).

2.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE TUBOS

Segundo Silva (2011), dentre os vários métodos de ensaio destinados à determinação de resistência de um tubo, os quatro principais são: ensaio de três cutelos (Figura 3-a), ensaio de dois cutelos (Figura 3-b), ensaio de colchão de areia (Figura 3-c) e ensaio de Minnesota (Figura 3-d).

Figura 3 – Métodos de ensaios de tubos de concreto



Fonte: Silva (2011).

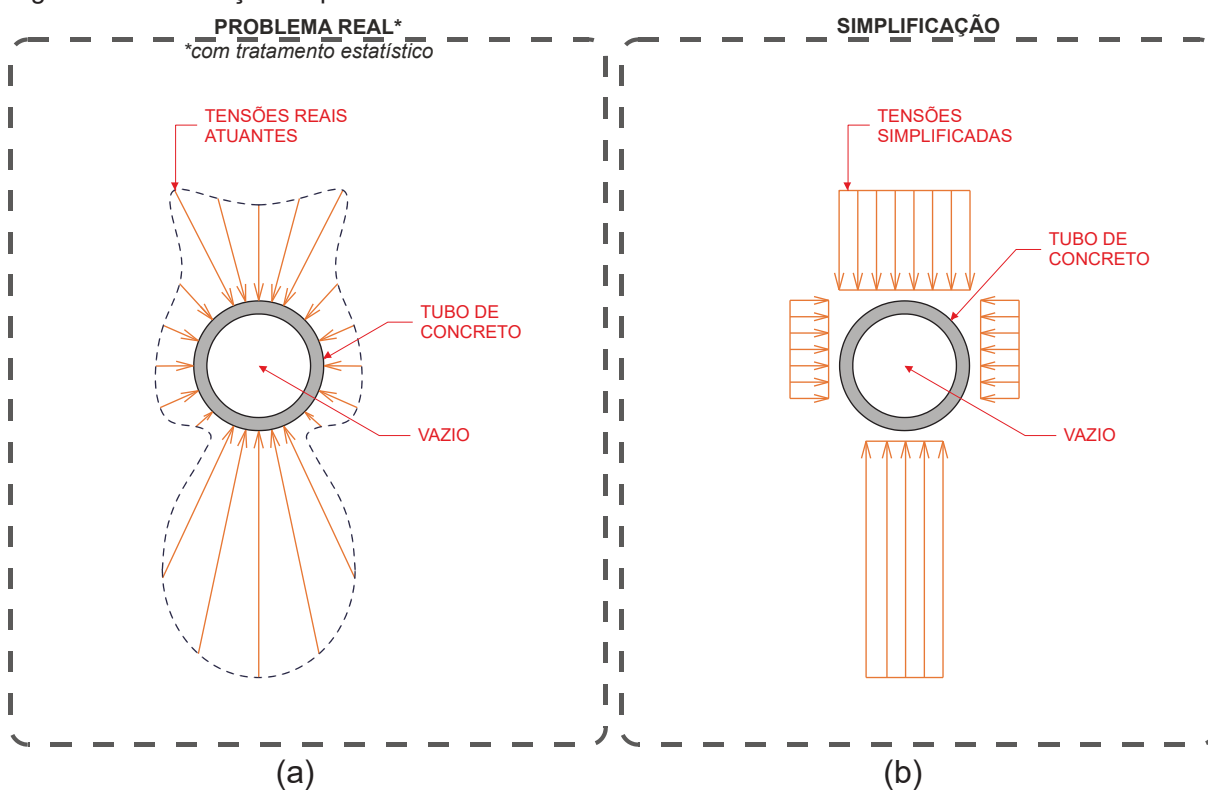
O ensaio de três cutelos é o padronizado pela NBR 8890 (ABNT, 2018), sendo denominado de ensaio de compressão diametral. Este modelo simula que o tubo recebe cargas crescentes e diretas, o que não acontece na prática, visto que existe o efeito da pressão lateral da terra e, portanto, simula um caso de carga mais desfavorável que o real (DE LA FUENTE; AGUADO; MOLINS, 2008).

Este efeito da pressão lateral é o que dificulta o cálculo dos esforços em tubos enterrados, visto que depende da pressão no solo nas paredes do tubo e também da forma de instalação (valas, aterros ou por cravação) e do assentamento (forma da base e condições de compactação do aterro lateral) (SILVA; EL DEBS; BECK, 2008).

Segundo El Debs (2003), as complexidades na determinação das pressões do solo contra as paredes do tubo dificultam os cálculos dos esforços solicitantes. Uma situação comum é em aterro e, que ao analisar experimentalmente a distribuição de pressões que ocorre nos tubos, obtém-se a Figura 4-a, sendo que esta foi tratada de forma a tornar simétrica a distribuição das pressões.

A situação real geralmente é convertida em uma simplificação com distribuições idealizadas, como na Figura 4-b, sendo que os valores e a extensão das pressões na base e laterais são dependentes da região de contato do tubo com o solo.

Figura 4 – Distribuição de pressões nos tubos de concreto enterrados



Fonte: Adaptado de El Debs (2003).

Além destas considerações de projeto e execução, estudos recentes, como Peter et al. (2018), indicam que a lenta deterioração dos tubos enterrados pode contribuir para a formação de vazios, o que corresponde à falta de suporte do solo e, conseqüentemente, resulta em carga desigual. Assim, ainda há muitos estudos a serem feitos sobre o comportamento de tubos enterrados.

2.2.1 Amostragem

A NBR 8890 (ABNT, 2018) determina que, para o objeto de interesse do estudo, a formação do lote para os tubos, de mesmo diâmetro e classe, deve ser agrupada em lotes de 100 peças, limitados a um período máximo de produção de 15 dias, com numeração sequencial.

Para lotes de até 50 tubos, a amostra deve ser constituída de uma peça para ensaio de compressão diametral. Para lote de 51 tubos a 100 tubos, deve-se realizar o ensaio de duas peças.

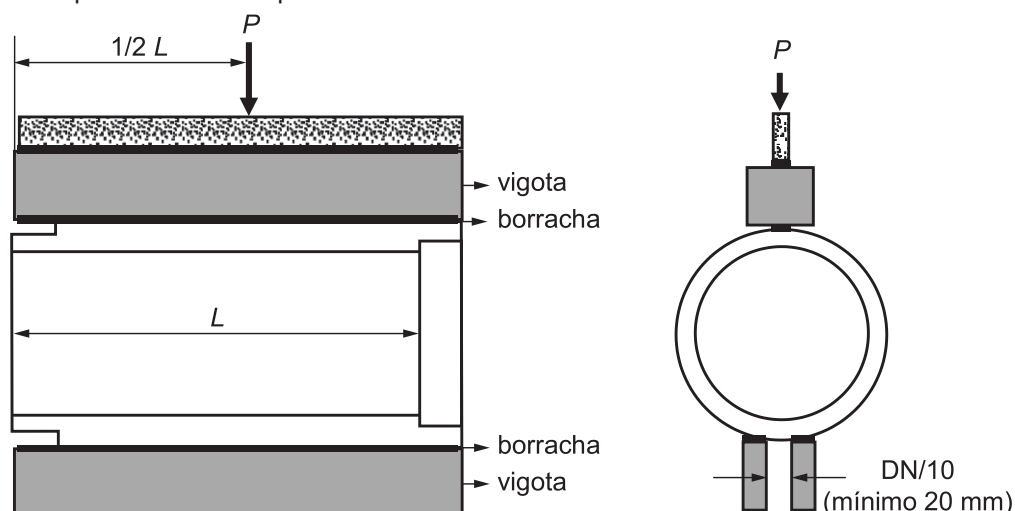
2.2.2 Ensaio de compressão diametral

Este ensaio é normatizado pela NBR 8890 (ABNT, 2018), o qual verifica o atendimento à força mínima isenta de fissura e a determinação do valor efetivo da força de ruptura do tubo submetido ao ensaio.

A força mínima isenta de fissura é a força medida pelo equipamento de aplicação de carga no limite da formação da fissura, enquanto a força de ruptura é a força máxima apresentada pelo aparelho de medida, cujo valor deixa de sofrer acréscimo, mesmo com o prosseguimento do ensaio.

Inicialmente deve-se medir o comprimento útil (L) do tubo em três geratrizes defasadas entre si em um ângulo de 120° , sendo o valor do comprimento útil igual a média das três medidas. Em seguida o tubo deve ser posicionado sobre vigotas de madeira de seção retangular, dispostos paralela e simetricamente em relação ao seu eixo. As vigotas devem ter comprimento total maior ou igual ao comprimento útil do tubo. Na face superior do tubo, deve-se colocar outra vigota de madeira com altura maior do que a diferença entre os diâmetros externos do tubo e da bolsa, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema do ensaio para tubo macho e fêmea



Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2018).

Não existe especificação na norma brasileira a respeito da espessura das vigotas, sendo necessária a adoção de recomendações de normas internacionais. A norma alemã DIN 4035 (1976, apud SILVA, 2011) propõe que a espessura varie em função do diâmetro nominal do tubo, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Espessura das vigotas de madeira em função do diâmetro nominal

Diâmetro nominal do tubo (mm)	Espessura da vigota (mm)
< 500	35
≤ 1000	95
≤ 1600	165
> 1600	200

Fonte: DIN 4035 (1976, apud SILVA, 2011).

A NBR 8890 (ABNT, 2018) afirma que se deve evitar a localização de esforços em possíveis irregularidades da superfície do tubo. Assim, pode-se intercalar entre o tubo e cada cutelo uma tira de borracha com cerca de 5 mm de espessura ou uma camada de areia. A vigota superior possui a finalidade de distribuir esta carga por todo o comprimento útil do tubo.

Para os tubos simples deve-se aplicar a força a uma taxa não inferior a 5 kN/min nem superior a 30 kN/min. A força deve ser elevada até a ruptura do tubo. Em tubos armados, deve-se aplicar a força com taxa de variação igual à mencionada para tubos simples, até atingir o valor estabelecido para a força mínima isenta de fissura. Caso não seja observada qualquer abertura de fissura, deve-se dar prosseguimento ao carregamento do tubo a partir desta força até que o tubo chegue à sua força máxima definida como força de ruptura. Por fim, as forças mínimas isentas de fissura e de ruptura são obtidas dividindo-se os valores dos

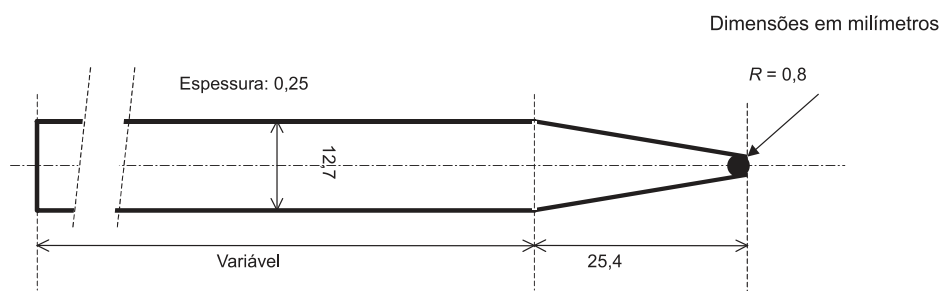
esforços totais correspondentes pelo comprimento útil do tubo, expressas em quilonewtons por metro. Através destes resultados é feita a determinação da classe do tubo.

2.3 ALTERAÇÕES NA VERSÃO DA NORMA NBR 8890

A norma NBR 8890 publicada em 2018 apresentou alterações em relação à versão anterior, de 2007. Portanto, é possível que as empresas produtoras de tubos ainda não estejam adequadas às novas mudanças e, sendo assim, é realizada a análise das principais mudanças da norma para compreender a realidade do mercado.

Na versão anterior da norma havia o conceito de carga mínima isenta de dano, a qual representava a carga apresentada pelo aparelho de medida, cuja aplicação sobre o tubo reforçado com fibras de aço não gerasse o surgimento de nenhum tipo de dano visível (como fissuras e lascamentos). Além disso, havia a recomendação da utilização de uma lâmina-padrão para medir a abertura de fissuras, feita com chapa de aço 0,25 mm e características geométricas dadas pela Figura 6.

Figura 6 – Lâmina-padrão para medida de abertura de fissura segundo a norma NBR 8890 (ABNT, 2007)



Fonte: NBR 8890 (ABNT, 2007).

A versão atual desta norma permite que a verificação de fissuras possa ser realizada utilizando um fissurômetro. Além disso, a principal mudança, que afeta diretamente a produção dos tubos, é em relação às dimensões. A última versão permite DN 200 a 2000, junta rígida, para tubos de água pluvial com encaixe ponta e bolsa e DN 500 a 2000 com encaixe macho e fêmea, conforme Tabelas 1 e 2. No entanto, a versão anterior considerava, para junta rígida, DN 200 à 2000 independente do encaixe ser ponta e bolsa ou macho e fêmea, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Dimensões dos tubos para águas pluviais com encaixe ponta e bolsa ou macho e fêmea segundo a norma NBR 8890 (ABNT, 2007)

Diâmetro nominal DN	Comprimento útil mínimo do tubo L		Comprimento mínimo da bolsa ou da fêmea B		Espessura mínima de parede D*	
	Ponta e Bolsa	Macho e Fêmea	Ponta e Bolsa	Macho e Fêmea	D*	
					Simples	Armado
200	1 000	950	50	20	30	–
300	1 000	950	60	20	30	45
400	1 000	950	65	20	40	45
500	1 000	950	70	20	40	50
600	1 000	950	75	20	55	60
700	1 000	950	80	35	–	66
800	1 000	950	80	35	–	72
900	1 000	950	80	35	–	75
1 000	1 000	950	80	35	–	80
1 100	1 000	950	80	35	–	90
1 200	1 000	950	90	35	–	96
1 300	1 000	950	90	35	–	105
1 500	1 000	950	90	35	–	120
1 750	1 000	950	100	35	–	140
2 000	1 000	950	100	35	–	180

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2007).

Assim, apesar da alteração da norma, é possível que ainda tenham empresas realizando a produção de tubos com encaixe macho e fêmea para DN 200, 300 e 400.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de realizar uma avaliação dos tubos obtidos, desenvolveu-se um programa experimental para realizar um comparativo dos tubos de concreto com e sem armadura, de dois lotes de produção, doados por uma empresa instalada na região oeste do Paraná.

Para isso, realizou-se a caracterização dos agregados utilizados no processo produtivo, no Laboratório de Materiais de Construção Civil, e rompimento dos tubos de concreto, através do ensaio de compressão diametral, no laboratório de Estruturas, ambos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Toledo. As principais etapas realizadas para obtenção dos resultados apresentados estão descritas nesta seção.

3.1 COLETA DE AMOSTRAS

A empresa fabricante de pré-moldados permitiu uma visita técnica na linha de produção, sendo realizada em 13 de julho de 2019. Neste dia procedeu-se com a análise do processo produtivo, coleta de agregados (areia, pó de pedra e brita 0) e moldagem de corpos de prova cilíndricos para ensaio de compressão axial.

A análise do processo produtivo consistiu em anotações gerais sobre a produção dos tubos de concreto, como utilização de EPI's pelos funcionários, máquinas empregadas, nível de automação e fluxo de produção.

A coleta de agregados foi feita utilizando baldes com tampas para permitir a sua devida caracterização de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo a composição granulométrica efetuada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e teor de material pulverulento de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003). Cada uma das amostras coletadas teve em torno de 10 kg.

A moldagem dos corpos de prova procedeu de acordo com as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Como a empresa utiliza traços de concreto diferentes para produção dos tubos com e sem armadura, foram moldados três corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura) para cada traço, sendo

denominados de CPS1, CPS2 e CPS3 para o concreto seco utilizado nos tubos sem armadura, e CPA1, CPA2 e CPA3 para o concreto seco utilizado nos tubos com armadura.

Por fim, a empresa selecionou aleatoriamente seis tubos da linha de produção, deixando-os reservados para posterior transporte ao Laboratório de Estruturas, após a cura dos mesmos. Todos os tubos possuíam diâmetro nominal de 400 mm, com encaixe tipo macho e fêmea. Destes, três foram do lote de concreto simples (sem armação), sendo denominados como CS1, CS2 e CS3. Os outros três foram do lote de concreto armado, sendo denominados como CA1, CA2 e CA3.

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS TUBOS

3.2.1 Inspeção visual

Os tubos foram avaliados em relação a presença do nome ou marca do fabricante, diâmetro nominal, classe, data de fabricação e um número único de identificação, sendo estes gravados em baixo-relevo. Também foram avaliados se existiam correções com nata de cimento ou outros materiais, visando esconder defeitos.

Além disso, todos os tubos foram submetidos ao teste do gabarito conforme exigido pela norma. Este gabarito possui as dimensões de acordo com a Figura 2, produzido em aço inoxidável, conforme Figura 7.

Figura 7 – Gabarito em aço inoxidável utilizado para avaliação de superfície interna dos tubos



Fonte: Autor (2019).

3.2.2 Inspeção dimensional

Foram realizadas todas as medições e os resultados foram catalogados e comparados com as exigências técnicas. Para a determinação do diâmetro nominal (DN) e comprimento útil do tubo (L) utilizou-se uma trena, enquanto para a determinação do comprimento da fêmea (B) e espessura de parede (D) utilizou-se um paquímetro.

3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS

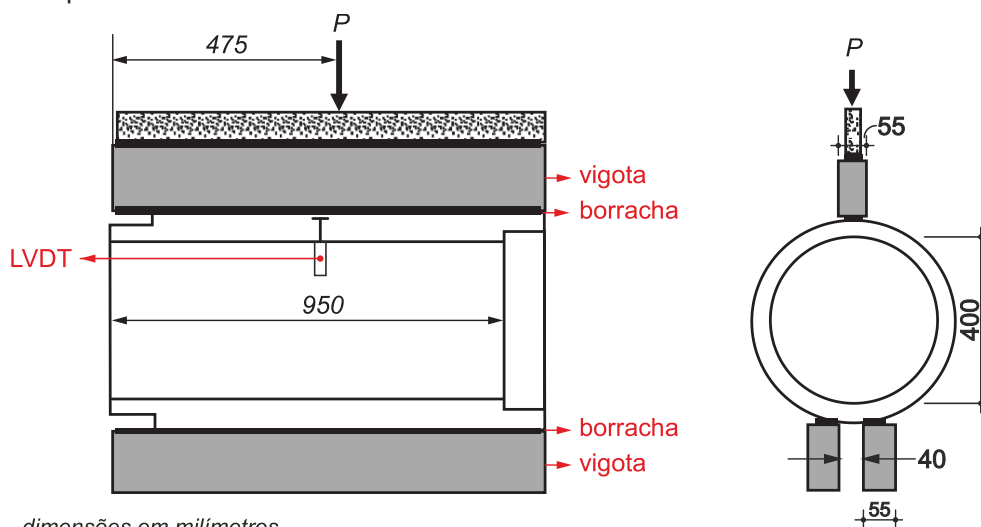
Este ensaio para determinação da resistência à compressão axial dos concretos foi efetuado como descrito nas orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova moldados foram do tipo cilíndrico, possuindo 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Além disso, para dois corpos de provas, também cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, realizou-se a determinação do módulo de elasticidade, conforme orientações da NBR 8522 (ABNT, 2017).

3.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS TUBOS

Este ensaio foi efetuado como descrito na NBR 8890 (ABNT, 2018). Para isso, realizou-se o esquema de ensaio da Figura 5, considerando-se as vigotas de madeiras com espessura de 55 mm. Para medir os deslocamentos nos tubos de concreto, foi utilizado um transdutor de deslocamento (LVDT), posicionado no centro do tubo, como indica a Figura 8.

Figura 8 – Esquema de ensaio a ser realizado



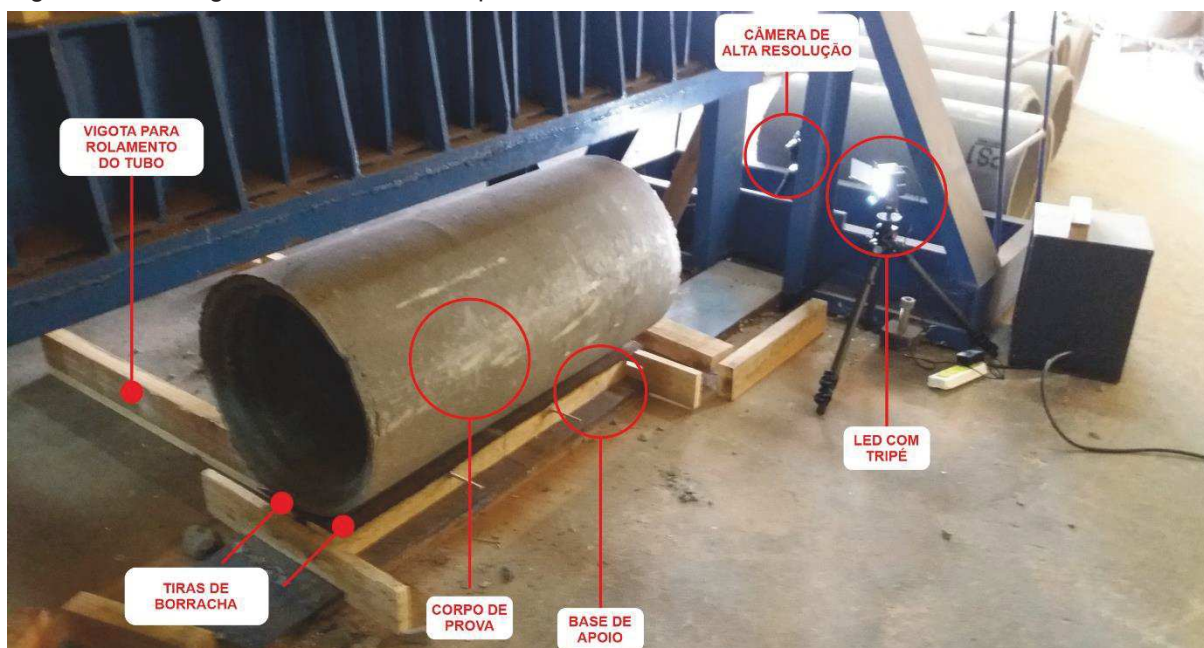
dimensões em milímetros

Fonte: Adaptado de NBR 8890 (ABNT, 2018).

Assim, pode-se desenvolver gráficos de carga por deslocamento médio, carga por tempo e deslocamento médio por tempo.

A montagem propriamente dita pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 – Montagem do ensaio de compressão diametral



Fonte: Autor (2019).

Realizou-se a filmagem dos ensaios, utilizando-se uma câmera de alta resolução (1080p a 30 fps) e uma lâmpada de LED com tripé para iluminação do encaixe macho e avaliação do modo de ruptura do corpo de prova e o surgimento de fissuras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo dos tubos de concreto foi avaliado e pode-se concluir que há elevado grau de padronização, controle tecnológico e controle de qualidade na empresa, visto que a maioria dos equipamentos utilizados possuem automação, garantindo a homogeneidade do produto final.

Tratando-se da produção dos tubos, é utilizado o concreto seco, com características discutidas no tópico 2.1.5. Para a conformação do tubo, é utilizado o equipamento MHT1500 da marca CSM. Esta máquina hidráulica utiliza o processo de compressão radial e vibração na base das fôrmas (CSM, 2019), como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Equipamento utilizado para produção de tubos de concreto



Fonte: Autor (2019).

A análise do fluxo de trabalho permite concluir que a linha de produção apresenta elevado nível de organização. Como pode ser verificado na Figura 11, a cura dos tubos é feita ao abrigo do sol e todos os funcionários utilizam EPI's, como capacete, protetor auricular, luvas, botina de proteção e vestimentas longas e fechadas.

Figura 11 – Observações da linha de produção



Fonte: Autor (2019).

Além disso, pôde-se constatar que todos os agregados utilizados ficam ao abrigo das intempéries, o que contribui significativamente para diminuir a variação de umidade, proporcionando um traço constante. Outro dado obtido é que, no caso dos tubos armados, é utilizada a tela soldada Gerdau MF196, apresentada em rolo, com as propriedades definidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Especificações técnicas da armadura utilizada na produção de tubos armados

Designação	Malha (cm) LxT	Diâmetro (mm) LxT	Largura (m)	Comprimento (m)	kg/m ²
MF196	10x20	5,0x3,4	0,975	120	1,94

Fonte: Adaptado de Gerdau (2019).

Em relação aos tipos de tubos produzidos, verificou-se que a empresa ainda realiza a produção de tubos com encaixe macho e fêmea para o diâmetro nominal de 400 mm. Conforme descrito na nota 2 da Tabela A.2 da NBR 8890 (ABNT, 2018), “em função do sistema de encaixe macho e fêmea, esses tubos são especificados somente a partir de DN 500”.

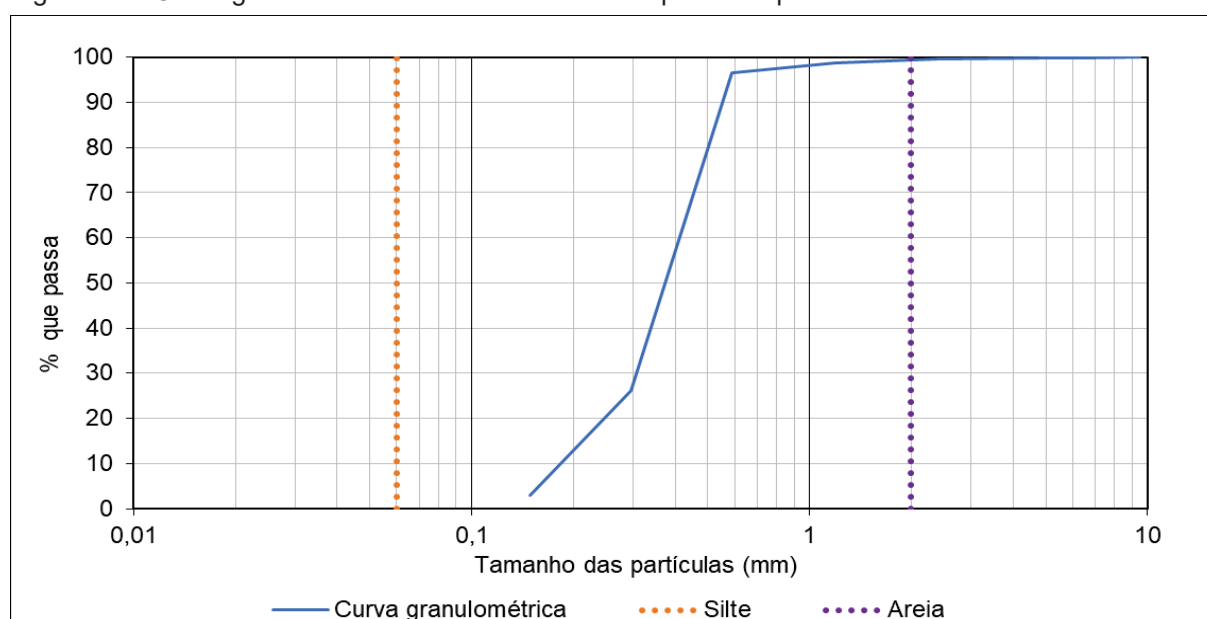
No entanto, a produção de tubos com DN menor que 500 mm se justifica, pois projetos elaborados até a publicação da nova versão, em 19 de dezembro de 2018, poderiam especificar a utilização destes tubos que atualmente não são mais permitidos. Assim, a produção deve continuar, por atendimento aos projetos existentes e razões de mercado.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

O traço do concreto seco utilizado na produção dos tubos pela empresa é composto por areia, pó de pedra e brita 0. Estes foram caracterizados de acordo com o descrito no tópico 3.1.

Na Figura 12 é apresentada a curva granulométrica obtida para a areia. Os dados completos utilizados para geração dos gráficos encontram-se no Apêndice A.

Figura 12 – Curva granulométrica da areia utilizada no processo produtivo

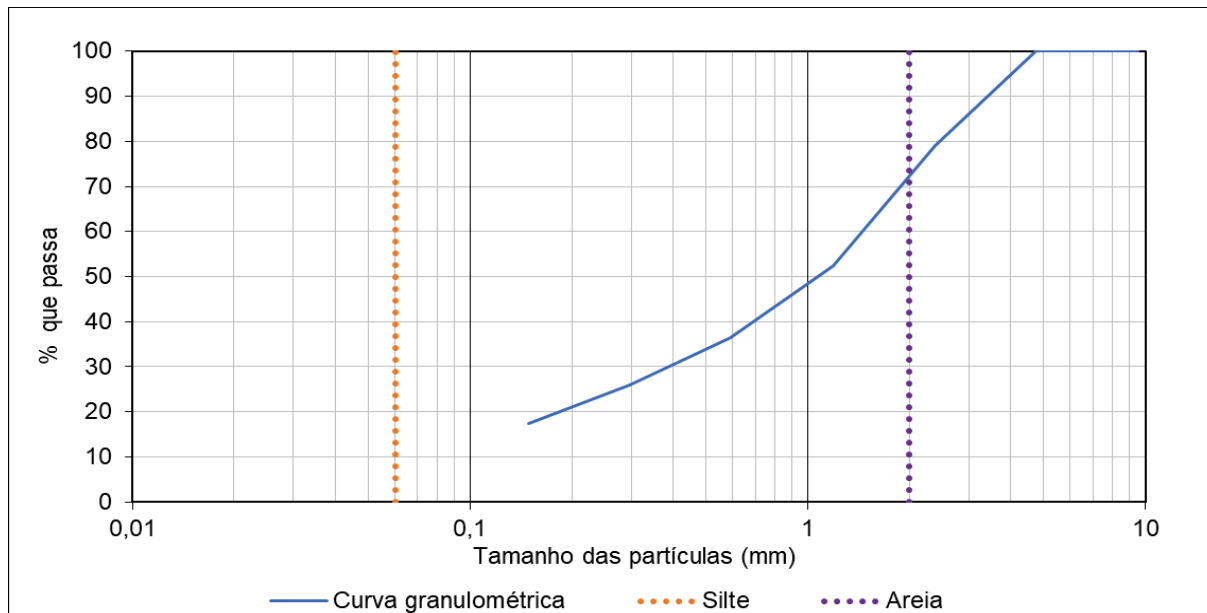


Fonte: Autor (2019).

O módulo de finura (MF), que é calculado somando-se as porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal e dividindo-se por 100, foi de 1,76, o que permite caracterizar como areia fina, na zona utilizável inferior, segundo a Tabela 2 da NBR 7211 (ABNT, 2015). O teor de material pulverulento para a amostra foi de 5,12%.

Na Figura 13 é apresentada a curva granulométrica obtida para o pó de pedra.

Figura 13 – Curva granulométrica do pó de pedra utilizado no processo produtivo

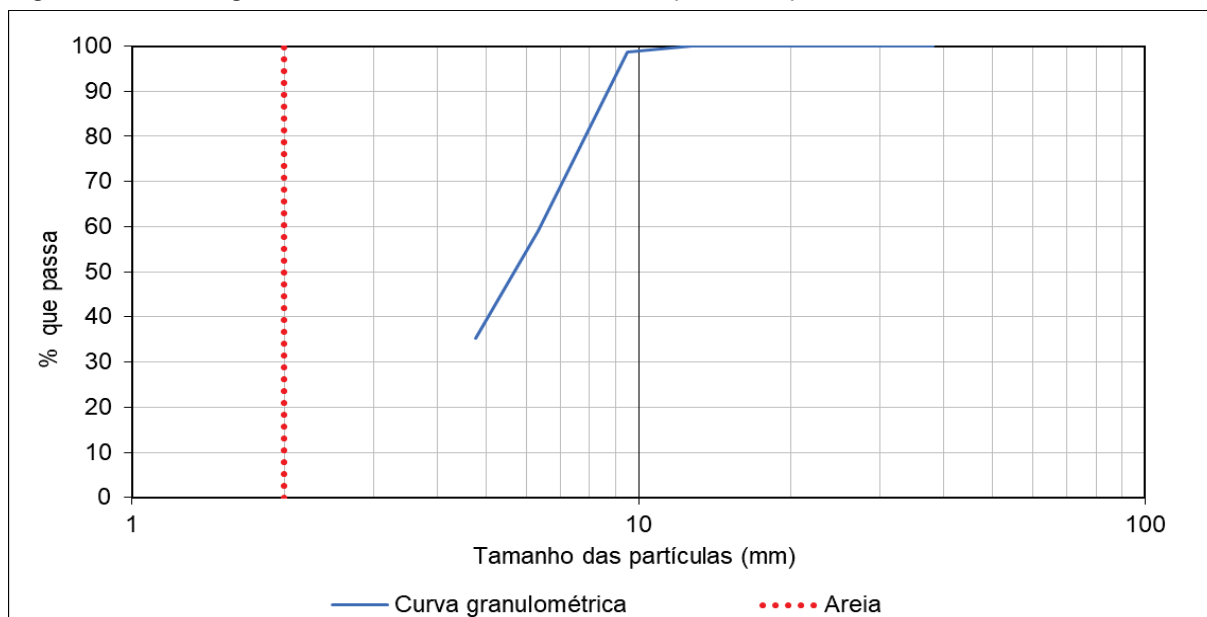


Fonte: Autor (2019).

O módulo de finura (MF) foi de 2,89 e o teor de material pulverulento para a amostra foi de 14,94%.

Na Figura 14 é apresentada a curva granulométrica para a brita 0.

Figura 14 – Curva granulométrica da brita 0 utilizada no processo produtivo



Fonte: Autor (2019).

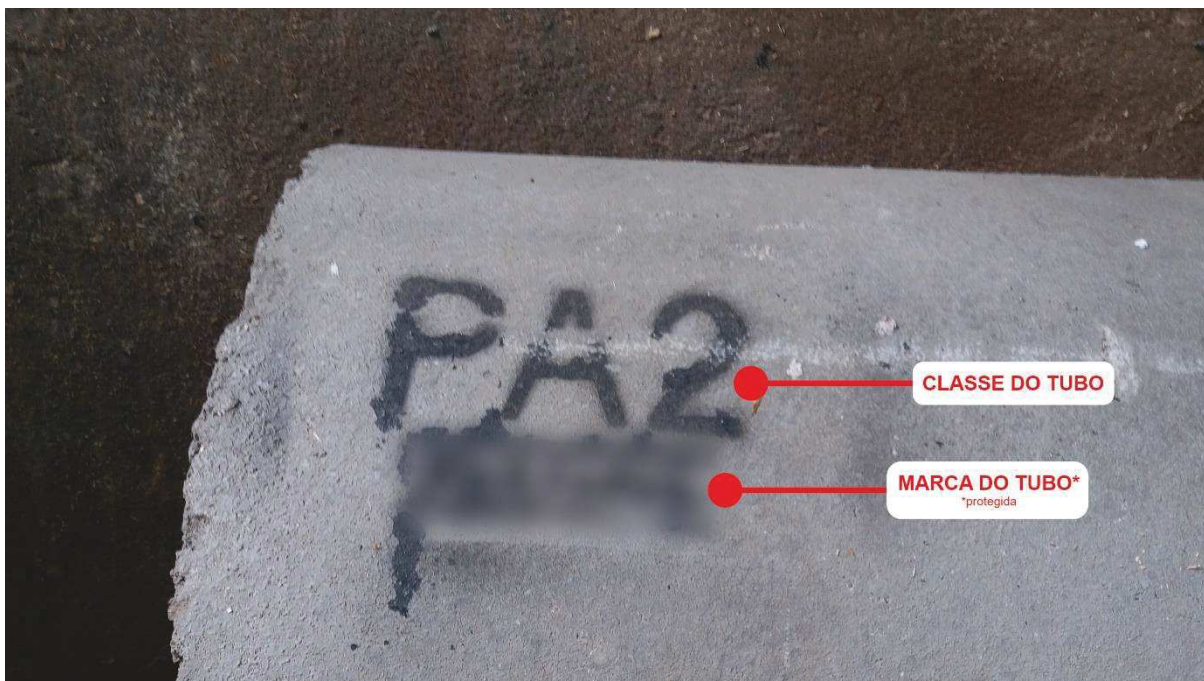
A dimensão máxima característica (DMC) foi de 9,52 mm, a qual está de acordo com o item 4.1.1.3 da NBR 8890 (ABNT, 2018). O teor de material pulverulento para a amostra foi de 1,47%.

Assim, através da análise dos agregados, pode-se concluir que todos os agregados utilizados no processo produtivo estão de acordo com os requisitos da norma regulamentadora da produção de tubos.

4.3 INSPEÇÃO VISUAL DOS TUBOS

Na análise visual foi possível constatar apenas a presença da marca do fabricante e classe do tubo, sendo estes marcados com tinta preta após a sua produção, e não em baixo-relevo, como pode ser visto na Figura 15, portanto, a demarcação não está em conformidade com a norma pertinente. Além disso, não consta o diâmetro nominal, data de fabricação e número único de identificação.

Figura 15 – Exemplo de identificação de tubos



Fonte: Autor (2019).

Nenhuma das amostras coletadas apresentaram correções com nata de cimento ou outros materiais com o objetivo de esconder defeitos.

No teste com o gabarito da Figura 7, foram reprovados os tubos CA1 e CA3, pois os mesmos apresentaram pequenas irregularidades que foram tocadas pela parte central do gabarito, conforme pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Tubos CA1 e CA3 reprovados no teste do gabarito



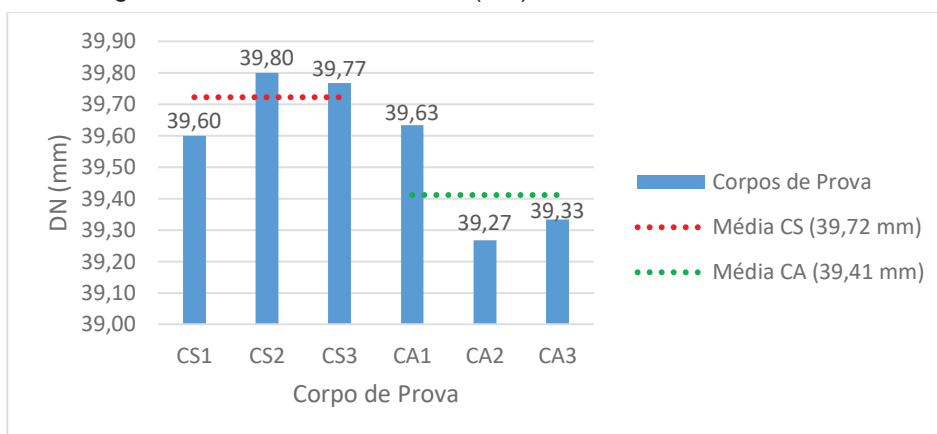
Fonte: Autor (2019).

Assim, pode-se constatar que houve apenas reprovação de tubos com armadura. Como são utilizadas máquinas de mesmo modelo, talvez a máquina utilizada para produção dos tubos armados possa apresentar algum tipo de falha no molde ou a armadura possa estar influenciando no processo de conformação.

4.4 INSPEÇÃO DIMENSIONAL DOS TUBOS

Os tubos foram avaliados geometricamente e os resultados detalhados estão dispostos no Apêndice B. Com os resultados da análise de diâmetro nominal (DN), foi possível elaborar o gráfico da Figura 17 e análise estatística conforme Tabela 8.

Figura 17 – Análise geométrica: diâmetro nominal (DN)



Fonte: Autor (2019).

Tabela 8 – Análise estatística: diâmetro nominal (DN)

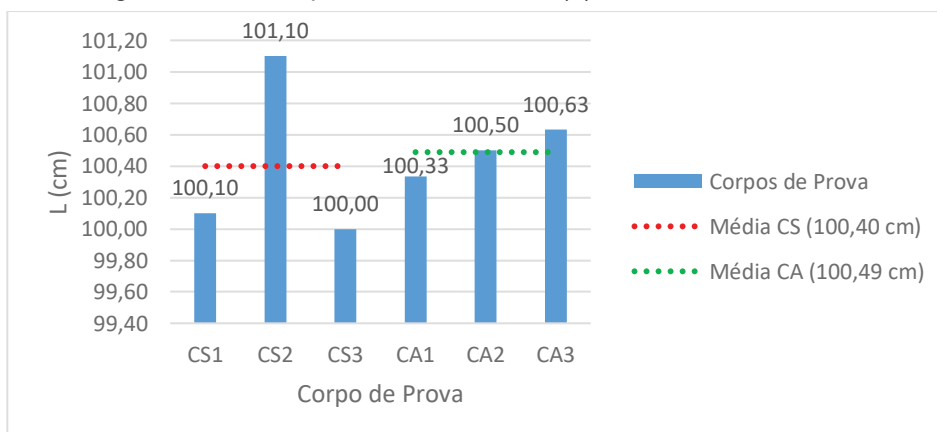
Tubo	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Simples	39,72	0,107	0,270
Armado	39,41	0,195	0,496

Fonte: Autor (2019).

Ao avaliar as médias obtidas em relação ao item 5.2.2.3 da NBR 8890 (ABNT, 2018), constatou-se que os tubos sem armadura estão em conformidade enquanto os tubos com armadura apresentaram variação de 1,475% em relação ao diâmetro nominal, superando o limite normativo de 1%. Além disso, apesar dos coeficientes de variação indicarem baixa dispersão, constatou-se que os tubos com armadura apresentam maiores desvios geométricos em relação aos parâmetros analisados, o que pode indicar que a máquina ou molde utilizados em sua produção apresentam algum tipo de falha.

Com os resultados da análise de comprimento útil do tubo (L), foi possível elaborar o gráfico da Figura 18 e análise estatística conforme Tabela 9.

Figura 18 – Análise geométrica: comprimento útil do tubo (L)



Fonte: Autor (2019).

Tabela 9 – Análise estatística: comprimento útil do tubo (L)

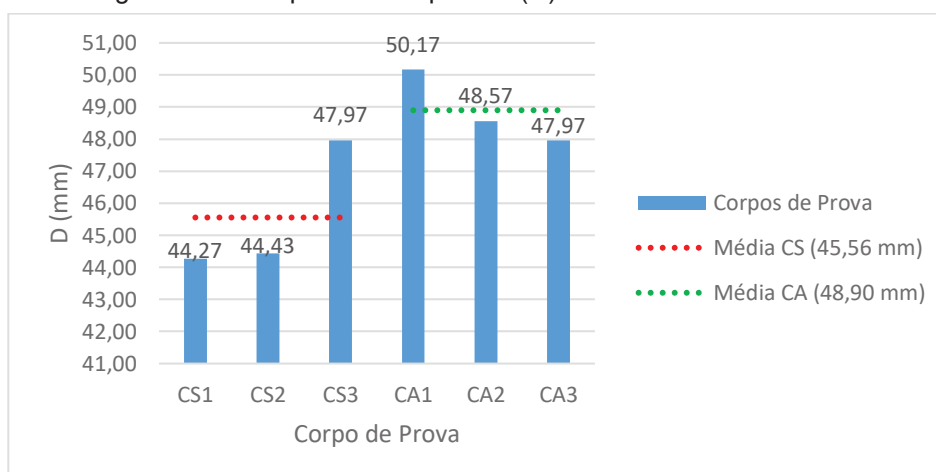
Tubo	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Coefficiente de Variação (%)
Simple	100,40	0,608	0,606
Armado	100,49	0,150	0,150

Fonte: Autor (2019).

Constatou-se que todos os tubos atenderam ao item 5.2.2.5 da NBR 8890 (ABNT, 2018), pois todos os corpos de prova, com comprimento declarado de 1000 mm (conforme nota fiscal de doação), atenderam ao limite normativo inferior (950 mm) e superior (1050 mm). O corpo de prova CS2 apresentou maior comprimento útil, o que implicou no maior coeficiente de variação em relação aos tubos armados.

Com os resultados da análise de espessura de parede (D), foi possível elaborar o gráfico da Figura 19 e análise estatística conforme Tabela 10.

Figura 19 – Análise geométrica: espessura de parede (D)



Fonte: Autor (2019).

Tabela 10 – Análise estatística: espessura de parede (D)

Tubo	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Coefficiente de Variação (%)
Simple	45,56	2,090	4,587
Armado	48,90	1,137	2,326

Fonte: Autor (2019).

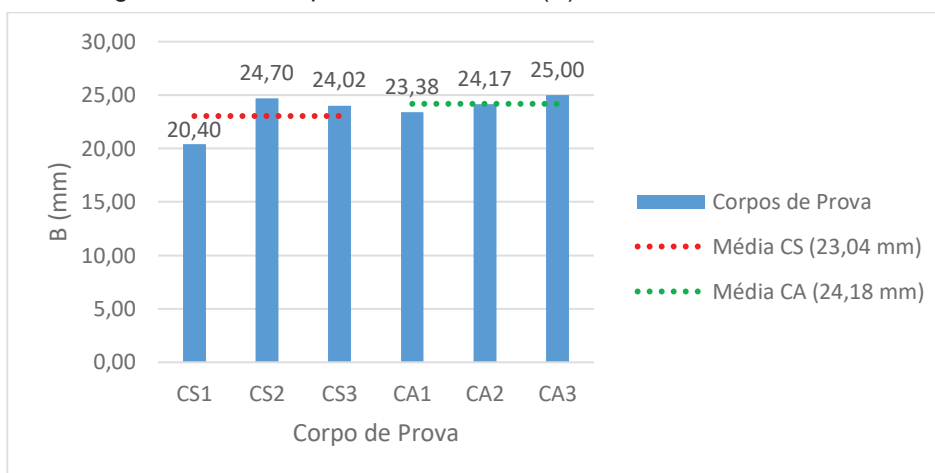
Constatou-se que para este parâmetro geométrico, o corpo de prova CS3 apresentou maior desvio em relação à CS1 e CS2, o que implicou em um maior coeficiente de variação para os tubos simples.

A rigor, na última versão da NBR 8890, não há especificação de espessura de parede para o tubo em análise, conforme Tabela 2 e discussão no tópico 4.1. No entanto, se tomarmos como base a versão de 2007 temos, conforme a Tabela 6,

especificação de espessuras 40 mm e 45 mm para tubos simples e armados, respectivamente e, portanto, todos os tubos atenderam a espessura mínima.

Com os resultados da análise de comprimento da fêmea (B), foi possível elaborar o gráfico da Figura 20 e análise estatística conforme Tabela 11.

Figura 20 – Análise geométrica: comprimento da fêmea (B)



Fonte: Autor (2019).

Tabela 11 – Análise estatística: comprimento da fêmea (B)

Tubo	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Coefficiente de Variação (%)
Simples	23,04	2,309	10,021
Armado	24,18	0,808	3,343

Fonte: Autor (2019).

Constatou-se que este parâmetro geométrico apresentou os maiores coeficientes de variação, o que pode ser justificado pela medição propriamente dita. Apesar de ser medido com um paquímetro, que possui precisão adequada, na região da fêmea não há um ângulo reto, pois o concreto não consegue ser conformado com esta característica e, assim, dificultou uma padronização de leitura. Além disso, dada a grandeza de medida, pequena variação em escala milimétrica implica em grande alteração do coeficiente de variação.

Conforme já explicado anteriormente, a versão atual da norma NBR 8890 não apresenta este parâmetro e, sendo assim, recorre-se novamente à versão anterior, conforme Tabela 6. Tanto para os tubos sem armadura quanto com armadura era exigido um comprimento mínimo da fêmea de 20 mm, situação a qual todos os corpos de prova atendem a este requisito.

4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Conforme descrito no tópico 4.1, para a produção dos tubos é empregado o concreto seco, apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Aparência do concreto utilizado para produção dos tubos



Fonte: Autor (2019).

Ao avaliar a Tabela 2 da NBR 5738 (ABNT, 2015), não há sugestão de método de adensamento para concreto com abatimento menor que 10 mm. Neste caso, há uma nota indicando que “para concretos especiais, o procedimento de moldagem pode ser modificado de modo a simular o adensamento a ser empregado na obra, de acordo com o responsável pela obra”.

Neste sentido, sabendo-se que o concreto seco, conforme descrito no tópico 2.1.5, necessita de energia de compactação e vibração para realizar a eliminação de vazios, procedeu-se da seguinte forma: adensamento manual com várias camadas e vários golpes de tal forma que visualmente e audivelmente fosse possível constatar a compactação e eliminação de vazios, simulando o resultado final de uma máquina de vibro-compressão.

Assim, realizou-se o adensamento de pelo menos 10 camadas por corpo de prova, tendo cada uma aproximadamente 40 golpes realizados com a haste de adensamento padronizada. Constatou-se grande dificuldade no adensamento da última camada e no rasamento da superfície com a borda do molde, aparentando aspecto inadequado, se comparado às características de moldagem de concretos plásticos.

O procedimento de cura foi realizado também de modo a simular a cura empregada no processo produtivo e, assim, deixou-se os corpos de prova em repouso ao abrigo do sol até a realização do ensaio de compressão. Os corpos de prova foram ensaiados com 56 dias de idade, na mesma data dos ensaios dos tubos.

Ao realizar a desforma do molde pôde-se constatar, visualmente, que a solução utilizada não foi eficiente. Constatou-se que a parte superior do corpo de prova esfarelava com o contato manual.

Assim, com uma escova de aço, realizou-se a raspagem da face superior do corpo de prova de forma a permanecer na face com um concreto mais coeso, com o objetivo de eliminar o aspecto esfarelento do topo. No entanto, pode-se constatar que para reduzir este aspecto, seriam necessárias muitas raspagens. Portanto, estas foram realizadas de forma a tentar otimizar essa interface.

Após a raspagem, a face tornou-se muito desuniforme, impossibilitando a utilização da retífica faceadora de corpo de prova presente no laboratório de materiais. Assim, optou-se por realizar o capeamento com nata de cimento feita com cimento CP V-ARI e água suficiente para permitir fluidez no momento de aplicação. O acabamento ficou liso e plano após o endurecimento, como pode-se constatar na Figura 22.

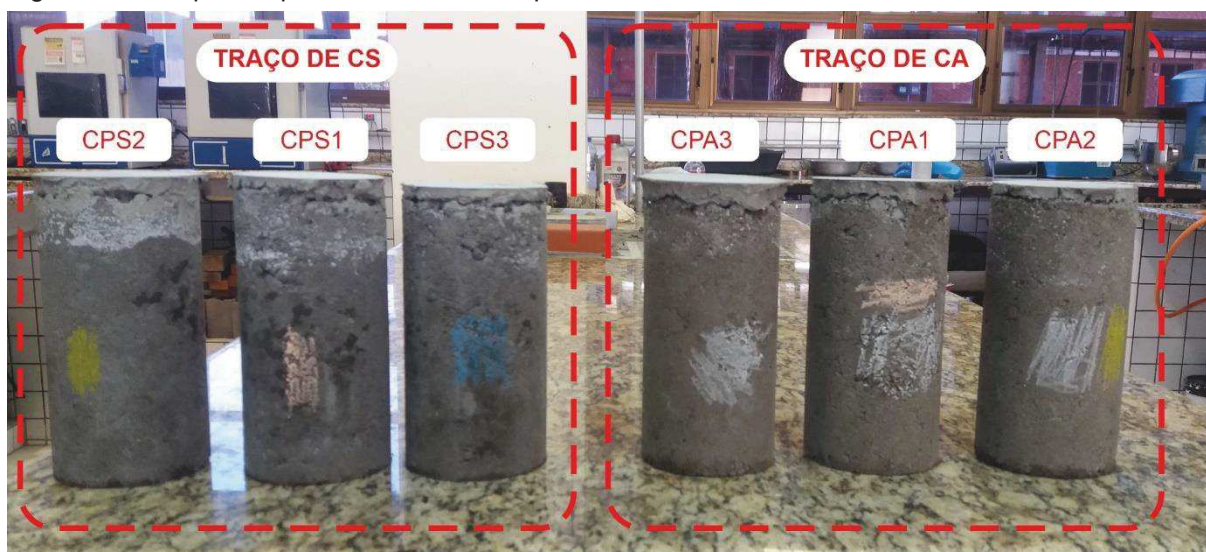
Figura 22 – Capeamento realizado nos corpos de prova cilíndricos



Entretanto, devido às grandes irregularidades na superfície, aliado ao alto peso específico, proveniente da alta compactação, somente foi possível realizar o capeamento com camadas espessas de nata de cimento, o que representou grande influência nos resultados. Todos os corpos de prova ficaram com relação h/d maior que 2,06, o que impossibilitou a utilização de fatores de correção para obtenção da tensão aplicada.

Apesar disso, os ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar outras características importantes para o estudo e realizar conclusões dos fatores que influenciaram nos resultados obtidos. Assim, inicialmente realizaram-se os ensaios dos corpos de prova do traço dos tubos de concreto simples (CS), sem armadura, e posteriormente os de concreto com armadura (CA), conforme sequência apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Corpos de provas ensaiados na prensa hidráulica



Fonte: Autor (2019).

Os resultados foram sintetizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de compressão axial

Traço	Corpo de Prova	h/d	Tensão Máxima (MPa)
CS	CPS1	2,823	8,312
	CPS2	2,560	17,140
	CPS3	2,209	13,164
CA	CPA1	2,095	7,215
	CPA2	2,770	8,333
	CPA3	2,097	5,854

Fonte: Autor (2019).

Além disso, pode-se obter o módulo de elasticidade para dois corpos de prova, conforme indica a Tabela 13.

Tabela 13 – Módulo de elasticidade obtidos

Traço	Corpo de Prova	Módulo de Elasticidade (GPa)
CS	CPS3	25,8
CA	CPA3	16,5

Fonte: Autor (2019).

Constatou-se que os resultados obtidos através do ensaio de compressão axial não foram coerentes, principalmente por não ser possível aplicar fatores de correção de tensão devido às relações h/d. Apesar disso, de forma geral, pode-se concluir que os corpos de prova do traço de concreto simples apresentam maior resistência característica a compressão do que os corpos de prova do traço de concreto armado. Essa análise é corroborada pelo ensaio que determinou o módulo de elasticidade.

Concluiu-se também que a metodologia de moldagem não foi adequada para este tipo de concreto, não representando fielmente o adensamento realizado por uma máquina de vibro-prensagem sendo, portanto, necessário realizar estudos específicos para determinação de uma metodologia adequada e executável de adensamento de concreto seco em campo.

4.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL NOS TUBOS DE CONCRETO

Os tubos de concreto foram ensaiados no pórtico e os resultados estão apresentados na Tabela 14, sendo que todos os gráficos obtidos a partir do ensaio podem ser encontrados no Apêndice C.

Tabela 14 – Resultados obtidos no ensaio de compressão diametral

Tubo	Corpo de Prova	Força de formação da fissura (kgf/m)	Força de ruptura (kgf/m)	Deslocamento no instante de ruptura (mm)
Simples	CS1	-	4.083,92	5,5436
	CS2	-	4.599,07	5,6237
	CS3	-	3.319,35	5,6690
Armado	CA1	4.806,53	7.517,48	42,7547
	CA2	4.578,09	7.338,00	46,7875
	CA3	3.764,57	7.386,95	45,6449

Fonte: Autor (2019).

Realizou-se uma análise estatística para cada grupo de tubos, conforme pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Análise estatística dos resultados obtidos no ensaio de compressão diametral

Tubo	Parâmetro	Força de formação da fissura	Força de ruptura	Deslocamento no instante de ruptura
Simples	Média	-	4.000,78 kgf/m	5,6121 mm
	Desvio padrão	-	643,90 kgf/m	0,0635 mm
	Coefficiente de variação	-	16,09%	1,13%
Armado	Média	4.383,06 kgf/m	7.414,14 kgf/m	39,1941 mm
	Desvio padrão	547,67 kgf/m	92,78 kgf/m	12,1761 mm
	Coefficiente de variação	12,50%	1,25%	31,07%

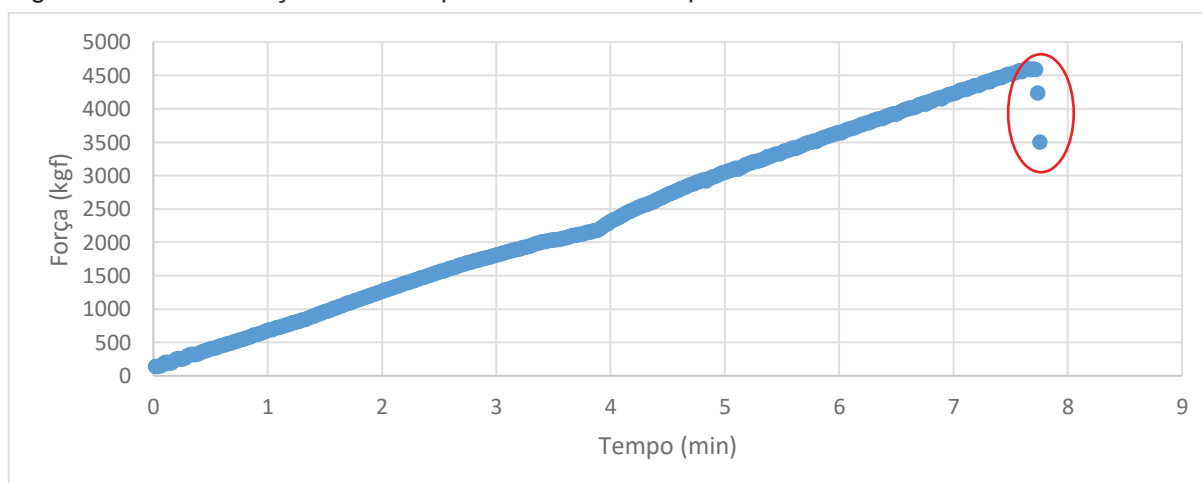
Fonte: Autor (2019).

Os tubos sem armadura apresentaram uma força média de ruptura de 4.000,78 kgf/m, sendo este valor acima de 24 kN/m o que, segundo a norma, classifica-os na classe PS2. A média obtida é, aproximadamente, 67% superior ao exigido para esta classe, indicando boa qualidade dos tubos produzidos pela empresa.

Verificou-se uma maior variação nas cargas de ruptura dos tubos sem armadura, com coeficiente de variação de 16,09%, semelhante a variação da carga de formação de fissura nos tubos com armadura, de 12,50%.

Constatou-se a ruptura frágil de todos os tubos em concreto sem armadura, podendo ser verificada através do gráfico Força x Tempo, sendo a força medida pelo sensor do pórtico em escala de 0,2s, apresentando consequente descontinuidade (destaque), como pode ser visto na Figura 24.

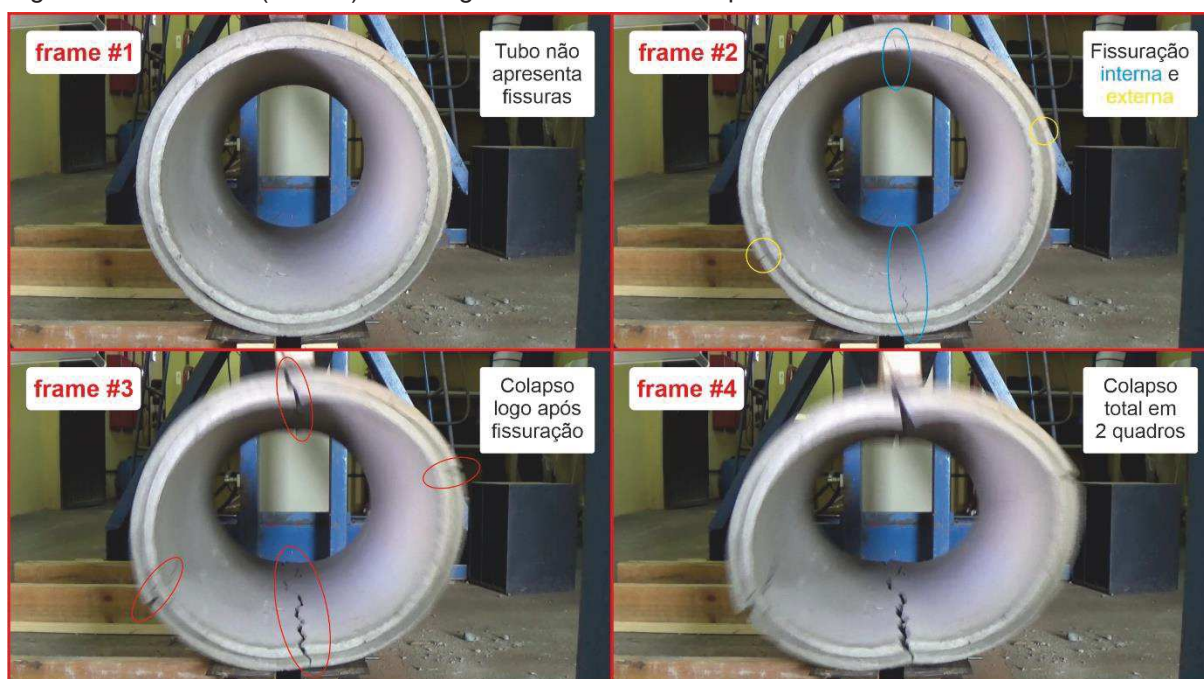
Figura 24 – Gráfico força versus tempo no ensaio de compressão diametral de CS2



Fonte: Autor (2019).

Através da filmagem sincronizada com o ensaio, é possível detectar o instante da fissuração, ocorrendo em seguida o colapso do tubo sem aviso prévio – ausência de patamar de escoamento. Como a filmagem foi efetuada em 30 quadros por segundo, pode-se concluir que decorreram, no máximo, 67 milissegundos entre a estabilidade estrutural e colapso total do tubo. Constatou-se também a formação de fissuras na parte interna do tubo nos cutelos superiores e inferiores, enquanto nas laterais as fissuras ocorreram na parte externa do tubo, como indica a Figura 25.

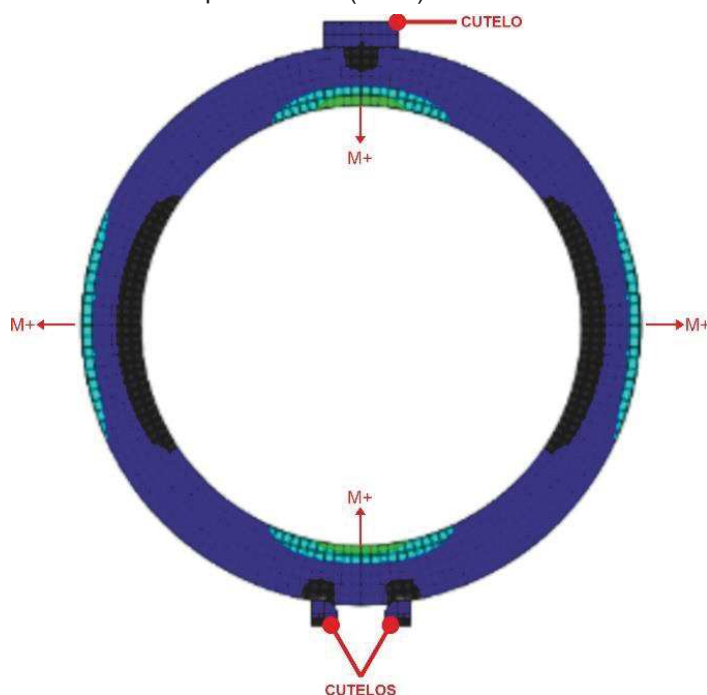
Figura 25 – Quadros (*frames*) da filmagem do ensaio de compressão diametral de CS2



Fonte: Autor (2019).

A posição das fissuras na seção pode ser explicada devido aos momentos atuantes no tubo. Uma simulação numérica, utilizando-se Modelagem de Elementos Finitos, feita por Tehrani (2016), indica o comportamento geral de tubos de concreto armado submetidos ao ensaio de três cutelos, como pode ser visto na xxx.

Figura 26 – Simulação numérica feita por Tehrani (2016)



Fonte: Adaptado de Tehrani (2016).

O concreto não apresenta resistência à tração e, sendo assim, há formação de fissuras nas regiões de momentos positivos, o que correspondeu aos locais de formação de fissuras no ensaio de compressão diametral.

Constatou-se que os deslocamentos no instante da ruptura foi uniforme, apresentando um coeficiente de variação de 1,13%, apesar de a força de ruptura apresentar maior heterogeneidade. O estado dos tubos sem armadura, antes e depois do ensaio, podem ser vistos na Figura 27.

Figura 27 – Comparativo de antes e depois do ensaio de compressão diametral de CS2



Fonte: Autor (2019).

A análise dos tubos armados permite concluir que a força de ruptura foi bastante homogênea entre os corpos de prova analisados, apresentando média de 7.414,14 kgf/m, sendo superior à força mínima de ruptura de classe PA4 (72 kN/m).

No entanto, a média da força mínima de fissuração foi de 4.383,06 kgf/m que, apesar de próximo ao requisito da classe PA4 (48 kN/m), enquadra-se em classe PA3 (36 kN/m). Assim, como há demarcação de classe PA2 no tubo, a empresa fornece um tubo com classe superior ao informado.

É importante a avaliação das forças de fissura para o tubo em concreto armado, principalmente em relação ao CA3. Visualmente este apresentava defeitos na sua conformação, como pequenas falhas de concretagem (Figura 28), em comparação ao CA1 e CA2, indicando, antecipadamente, que a parcela resistida pelo concreto seria inferior às outras amostras. Essa situação fica evidente ao realizar a avaliação da carga de fissuração, em que o corpo de prova apresentou menor resistência.

Figura 28 – Aspecto do corpo de prova CA3



Fonte: Autor (2019).

Assim, a menor variabilidade do resultado de força de ruptura indica que a resistência final dos tubos é uniforme, dado o processo produtivo, sendo a armadura utilizada a principal responsável pela uniformidade dos resultados finais.

A análise dos tubos armados permite identificar, visualmente, que a seção transversal se tornou uma elipse, como pôde ser exemplificado na Figura 29. É importante destacar que os quadros deste comparativo possuem o mesmo tamanho e posição, filmados com câmera de alta definição.

Figura 29 – Comparativo de antes e depois do ensaio de compressão diametral de CA3



Fonte: Autor (2019).

Este comportamento foi o mesmo apresentado por todos os tubos em concreto armado. Houveram grandes fissurações em 4 pontos da seção transversal – base (entre cutelos), topo e laterais. Exemplo de fissura lateral pode ser vista na Figura 30.

Figura 30 – Fissura lateral no corpo de prova após o ensaio de compressão diametral de CA3



Fonte: Autor (2019).

Além disso, pode-se concluir que a ruptura foi dúctil, indicada pelos sons característicos de escoamento do aço, havendo deslocamentos de concreto, como verificado na Figura 29. Constatou-se um elevado desvio padrão em relação ao

deslocamento no instante de ruptura, 31,07%, haja visto que há diversos fatores com alta influência, como posicionamento da armadura na seção e grau de conformação do concreto.

5 CONCLUSÃO

O estudo de caso realizado permitiu obter algumas conclusões sobre a produção dos tubos de concreto analisados. Estes são produzidos de acordo com as orientações da NBR 8890. No entanto, alguns requisitos não são atendidos, como a demarcação dos tubos e diâmetro nominal e a produção com DN 400, efetuada devido a exigências de mercado e projetos.

Em relação aos parâmetros geométricos, estes são considerados satisfatórios, apesar de ser possível identificar que os tubos produzidos em concreto armado apresentaram acabamentos inferiores aos tubos sem armadura.

Constatou-se que a NBR 5738:2015 não apresenta método de adensamento para concreto com abatimento menor que 10 mm, a qual é uma característica do concreto seco utilizado na produção dos tubos. Realizou-se a moldagem de corpos de prova com elevada compactação manual porém os resultados obtidos no ensaio de compressão axial não foram coerentes.

Por fim, os resultados dos ensaios de compressão diametral foram coerentes com o que é apresentado na literatura, podendo-se concluir que a presença de armadura no tubo apresentou alto impacto na sua resistência final, mesmo na utilização de um traço de concreto mais fraco, se comparado ao tubo de concreto sem armadura. Os tubos de concreto sem armadura foram caracterizados como PS2, enquanto os tubos de concreto armado foram classificados como PA3, apesar de serem comercializados como sendo de classe PA2, ou seja, a resistência da peça final, para este lote, é superior a resistência informada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização dos estudos constatou-se a necessidade de um método de adensamento adequado para o concreto seco, visto que a NBR 5738:2015 não apresenta. É importante destacar que este deve simular o processo de vibroprensagem, com o objetivo de este ser representativo da produção realizada, e deve permitir a sua execução em campo.

Sugere-se a utilização de mais corpos de prova de compressão axial, pois a variabilidade de resultados tende a ser grande, devido ao processo de moldagem e cura dos mesmos. Além disso, ao realizar o ensaio destes corpos de prova, sugere-se a utilização de extensômetros externos ao equipamento de prensa hidráulica.

De forma complementar à moldagem dos corpos de prova para ensaio de compressão axial, sugere-se a execução de ensaios não destrutivos na peça final, como esclerometria e ultrassom, a fim de determinar a resistência característica do concreto à compressão no tubo produzido.

Sugere-se a quantificação dos deslocamento horizontais nos tubos de concreto, utilizando-se transdutores de deslocamento, a fim de avaliar o seu comportamento quando o tubo estiver submetido a carga no ensaio, haja visto que, na prática, o tubo estará envolto por algum tipo de contenção e, portanto, pode-se desenvolver estudos a partir destes resultados.

Por fim, sugere-se o estudo de um comparativo entre os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral, estudado neste trabalho conforme a norma NBR 8890:2018, e o comportamento real de tubos enterrados, a fim de avaliar os esforços no tubo quando há presença de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7481**: Tela de aço soldada – Armadura para concreto. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 8890**: Tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário — Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 8890**: Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários — Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 46**: Agregados — Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248**: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE TUBOS DE CONCRETO – ABTC. Disponível em: <<https://www.abtc.com.br/>>. Acesso em: 02 mai 2019.

AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION – ACPA. Disponível em: <www.concrete-pipe.org>. Acesso em: 08 abr 2019.

AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION – ACPA. **Concrete Pipe Design Manual**. 78-58624. 2011.

CAMARGO, W. **Controle de Qualidade Total**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Paraná. 2011.

CSM. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <https://www.csm.ind.br/catalogo_for_mas.pdf>. Acesso em: 03 out 2019.

DE LA FUENTE, A.; AGUADO A.; MOLINS C. Aplicaciones del HRFA: tuberías de hormigón. **IV Congreso Internacional de Estructuras**. pp. 1 - 10. Asociación científica técnica del hormigón estructural, ISBN 978-84-89670-62-4. España, 2008.

EL DEBS, M. K. **Projeto Estrutural de Tubos Circulares de Concreto Armado**. Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto. São Paulo, 2003.

ESCARIZ, R. C. **Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/D.3.2011.tde-09042012-122504.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. doi:10.11606/D.3.2012.tde-18072013-150832.

OLIVEIRA, R. **Análise teórica e experimental de estruturas planas de concreto armado com a consideração da fluência**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/T.3.2011.tde-16032012-144558.

PETER, J. M. et al. Impact of soil erosion voids on reinforced concrete pipe responses to surface loads. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 82, p. 111-124, 2018. ISSN 0886-7798. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.003>.

REZENDE, M. L. S. et al. Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 135-146, set 2012. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000300010>.

SILVA, J. L. **Análise de tubos circulares de concreto armado para o ensaio de compressão diametral com base na teoria de confiabilidade**. Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

SILVA, J. L.; EL DEBS, M. K.; BECK, A. T. Avaliação da Confiabilidade de Tubos de Concreto Armado no Estado Limite de Fissuração. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 1, n. 4, p. 314-330, dez 2008. ISSN 1983-4195.

TEHRANI, A. D. **Finite element analysis for ASTM C-76 reinforced concrete pipes with reduced steel cage**. 201 p. USA, 2016. 10.13140/RG.2.2.13688.08967.

WONG, L.S.; NEHDI, M.L. Critical Analysis of International Precast Concrete Pipe Standards. **Infrastructures**, n. 3. 2018. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030018>

YANG, Y.M.; ZHANG, R.T.; QU, B. Reinforced Concrete Sewer Pipes used for Jacking Construction of Experimental Research and Finite Element Analysis. **International Conference on Material Science and Application (ICMSA)**, 2015. <https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.46>.

APÊNDICE A – DADOS OBTIDOS PARA CURVAS GRANULOMÉTRICAS

AREIA

Abertura de malha (mm)	Série	Material retido na peneira (g)	Material retido acumulado (g)	Material que passa (g)	% Material que passa	% Retido	% Retido acumulado
9,52	N	0,00	0,00	500,00	100,00	0,00	0,00
6,35	I	0,69	0,69	499,31	99,86	0,14	0,14
4,76	N	0,00	0,69	499,31	99,86	0,00	0,14
2,38	N	1,67	2,36	497,64	99,53	0,33	0,47
1,19	N	3,82	6,18	493,82	98,76	0,76	1,24
0,590	N	11,33	17,51	482,49	96,50	2,27	3,50
0,297	N	351,26	368,77	131,23	26,25	70,25	73,75
0,149	N	116,15	484,92	15,08	3,02	23,23	96,98
Fundo	-	15,08	500,00	0,00	0,00	3,02	
TOTAL		500,00				100,00	176,22

PÓ DE PEDRA

Abertura de malha (mm)	Série	Material retido na peneira (g)	Material retido acumulado (g)	Material que passa (g)	% Material que passa	% Retido	% Retido acumulado
9,52	N	0,00	0,00	500,00	100,00	0,00	0,00
6,35	I	0,00	0,00	500,00	100,00	0,00	0,00
4,76	N	0,07	0,07	499,93	99,99	0,01	0,01
2,38	N	104,45	104,52	395,48	79,10	20,89	20,90
1,19	N	133,52	238,04	261,96	52,39	26,70	47,61
0,590	N	80,06	318,10	181,90	36,38	16,01	63,62
0,297	N	52,46	370,56	129,44	25,89	10,49	74,11
0,149	N	42,42	412,98	87,02	17,40	8,48	82,60
Fundo	-	87,02	500,00	0,00	0,00	17,40	
TOTAL		500,00				100,00	288,85

BRITA 0

Abertura de malha (mm)	Série	Material retido na peneira (g)	Material retido acumulado (g)	Material que passa (g)	% Material que passa	% Retido	% Retido acumulado
38,10	N	0,00	0,00	1000,00	100,00	0,00	0,00
25,40	I	0,00	0,00	1000,00	100,00	0,00	0,00
19,10	N	0,00	0,00	1000,00	100,00	0,00	0,00
12,70	I	0,00	0,00	1000,00	100,00	0,00	0,00
9,52	N	12,34	12,34	987,66	98,77	1,23	1,23
6,35	I	396,36	408,70	591,30	59,13	39,64	40,87
4,76	N	238,03	646,73	353,27	35,33	23,80	64,67
Fundo	-	353,27	1000,00	0,00	0,00	35,33	
TOTAL		1000,00				100,00	106,78

APÊNDICE B – PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

CP	Diâmetro nominal (mm)			
#	DN1	DN2	DN3	DN
PS1.1	39,50	39,50	39,80	39,60
PS1.2	39,60	39,80	40,00	39,80
PS1.3	39,80	39,80	39,70	39,77
PA2.1	39,50	39,50	39,90	39,63
PA2.2	39,50	39,40	38,90	39,27
PA2.3	39,50	39,40	39,10	39,33

CP	Comprimento útil (cm)			
#	L1	L2	L3	L
PS1.1	100,30	100,00	100,00	100,10
PS1.2	101,10	101,10	101,10	101,10
PS1.3	100,00	100,00	100,00	100,00
PA2.1	100,50	100,50	100,00	100,33
PA2.2	101,00	100,00	100,50	100,50
PA2.3	100,80	100,70	100,40	100,63

CP	Espessura de parede (mm)			
#	D1	D2	D3	D
PS1.1	44,40	44,10	44,30	44,27
PS1.2	45,50	43,60	44,20	44,43
PS1.3	45,40	50,50	48,00	47,97
PA2.1	50,70	48,80	51,00	50,17
PA2.2	50,00	45,80	49,90	48,57
PA2.3	48,90	46,20	48,80	47,97

CP	Comprimento da fêmea (mm)			
#	B1	B2	B3	B
PS1.1	20,43	20,40	20,38	20,40
PS1.2	23,70	25,00	25,40	24,70
PS1.3	24,15	24,50	23,40	24,02
PA2.1	23,45	25,00	21,70	23,38
PA2.2	25,00	24,00	23,50	24,17
PA2.3	24,80	26,10	24,10	25,00

APÊNDICE C – GRÁFICOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

