

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca
da Universidade São Judas Tadeu**

Bibliotecária: Adriana Aparecida Magalhães - CRB 8/10264

O48a Oliveira, Caroline Umbinger de.
Análise de desempenho físico e mecânico de tubos de concreto produzidos com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado / Caroline Umbinger de Oliveira. - São Paulo, 2021.
f. 83: il.; 30 cm.

Orientador: Renan Pícolo Salvador.
Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2021.

1. Tubos de concreto. 2. Óxido de cálcio supercalcinado. 3. Aditivo compensador de retração. 4. Propriedades mecânicas. I. Salvador, Renan Pícolo. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22 – 624

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil

**ANÁLISE DE DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO DE TUBOS DE
CONCRETO PRODUZIDOS COM ADITIVO BASEADO EM ÓXIDO DE
CÁLCIO SUPERCALCINADO**

Caroline Umbinger de Oliveira

São Paulo
Outubro de 2021

Análise de desempenho físico e mecânico de tubos de concreto produzidos com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil

**ANÁLISE DE DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO DE TUBOS DE
CONCRETO PRODUZIDOS COM ADITIVO BASEADO EM ÓXIDO DE
CÁLCIO SUPERCALCINADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de conhecimento: Engenharia Civil

Especialidade: Materiais e Componentes de Construção

Orientador: Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador

Coorientador: Prof. Me. Cláudio Oliveira Silva

São Paulo
Outubro de 2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antônio e Lucimara por todo amor e incentivo incondicional. Ao maior engenheiro de todos os tempos, o criador de todas as coisas, o único capaz de fazer obras perfeitas, Deus.

AGRADECIMENTOS

Profissionais, familiares e amigos tornaram concreto este projeto de pesquisa. Na impossibilidade de listar todos os envolvidos, registro alguns agradecimentos pontuais:

Aos meus orientadores Prof. Me. Cláudio Oliveira Silva e Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador pelo incentivo, confiança, dedicação, direcionamento e por todo conhecimento compartilhado. A eles minha sincera gratidão.

À toda família Universidade São Judas Tadeu que tornaram minha formação humana e acadêmica possível, bem como este estudo. Aos professores das disciplinas de mestrado que cursei, os inesquecíveis e excelentes profissionais mestres e doutores, sobretudo educadores. Aos colaboradores e técnicos da Universidade São Judas Tadeu pela competência e auxílio em todas as etapas deste trabalho, em especial aos colaboradores do laboratório Igor, Cleyton e Fernando. Ainda, agradeço ao apoio e dedicação da Eng. Caroline Cardoso.

Em especial agradeço aos alunos de iniciação científica Matheus Polizel e Mariana Silva. Espero ter contribuído com o futuro de vocês que com certeza será brilhante. Obrigada pelo apoio e dedicação para superarmos todos os contratemplos atuais.

À empresa Chimica Edile do Brasil, com destaque ao CEO Riccardo Vannetti, por apoiar de forma completa este projeto de pesquisa, por meio do fornecimento de aditivos, aporte financeiro e compartilhamento de todo conhecimento técnico. Também, por acreditar na importância e potencial da pesquisa científica no Brasil.

À toda equipe da empresa Fermix Tubos, em especial aos Engenheiros Alírio Gimenez e José Carlos por todo apoio ao projeto com dedicação e prontidão, na doação de materiais, realização da produção de tubos de concreto, ensaios de compressão diametral e todo suporte técnico.

Ao Instituto Ânima Educação que busca fomentar a educação e pesquisa científica no Brasil, pela parceria nesta pesquisa. Em destaque para Paloma Gomes Rodrigues e Marlon Leal Marcelino por todo suporte com prontidão e competência.

Às instituições e universidades que tornaram o programa experimental possível e são o alicerce da pesquisa científica do país. Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em especial Anderson Lopes de Andrade, Sergio Soares de Lima e Valdecir Angelo Quarcioni por toda a

dedicação e atenção. Aos profissionais competentes da Universidade de São Paulo (USP) por todo suporte técnico e auxílio.

Aos profissionais da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) por todo o apoio e suporte incondicional, em especial ao time do laboratório de concreto, meus eternos amigos, Antônio, Eng. Ariel, Eng. Dayvid, Felipe Custodio, Felipe Diniz, José Cícero, Marcelo e Rubens Montanari. Aos profissionais Arnaldo Battagin e Me. Cláudio Oliveira Silva por todo apoio à esta pesquisa e tantas outras que promovem avanços significativos para a área de cimentos e para a sociedade brasileira.

Um agradecimento especial para os amigos que acreditaram no meu potencial e tornaram este projeto possível, assim como são motivo de felicidade constante em minha vida: Ma. Viviam Aparecida Vaz Pedrozo Cardoso e José Cícero Ferreira da Silva.

A Deus por ter me proporcionado saúde, paz, inteligência e pessoas maravilhosas que tornaram esta etapa da minha vida possível.

Enfim à minha família e base, meus pais Antônio José Xavier de Oliveira e Lucimara Cristina Umbinger de Oliveira pelo amor incondicional e por todo sacrifício. Aos meus irmãos e cunhadas Emerson, Rafael, Talita e Tamires por todo apoio e carinho. Às minhas tias Juraci (*in memoriam*), Silvana e Marcia por todo amor. Ao meu namorado Bruno por todo amor incondicional e dedicação. À minha prima Bruna por ser minha melhor amiga e sempre me incentivar. Aos meus avós maternos e paternos (*in memoriam*) pelo apoio. À minha amada sobrinha Melissa que cultive o amor pelo aprendizado e a curiosidade para sempre realizar novas descobertas.

RESUMO

Tubos de concreto são amplamente utilizados em redes de águas pluviais e esgoto sanitário no Brasil. Esses elementos necessitam cumprir os critérios de resistência mecânica e estanqueidade, conforme determina a ABNT NBR 8890:2020. Aditivos compensadores de retração são difundidos na indústria de pavimentos de concreto no país. Esses aditivos, baseados em óxido de cálcio supercalcinado, apresentam expansão volumétrica, podendo ser empregados em concreto para compensar sua retração. Além disso, os produtos gerados pelo aditivo podem preencher os poros do concreto e diminuir sua permeabilidade, bem como aumentar sua resistência mecânica. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é empregar o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado na fabricação de tubos de concreto, para proporcionar maior estabilidade volumétrica, estanqueidade e resistência mecânica. A composição química e mineralógica do aditivo foi caracterizada e a influência do aditivo na cinética e nos mecanismos de hidratação do cimento foi avaliada. As propriedades físicas e mecânicas de argamassas, concretos e tubos de concreto foram analisadas. Os resultados obtidos mostram que o aditivo acelera a hidratação do cimento, contribuindo para aumentar o grau de hidratação de pastas em curta idade. Tal fato, contribui para o aumento de resistência mecânica de concretos produzidos em laboratório e de tubos. Para finalizar, foi elaborado um procedimento de fabricação, cura e utilização de tubos de concreto produzidos com o aditivo.

Palavras-chave: Tubos de concreto, óxido de cálcio supercalcinado, aditivo compensador de retração, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Concrete pipes are widely used in rainwater and sanitary sewage networks in Brazil. These elements need to meet mechanical strength and tightness criteria, as determined by ABNT NBR 8890:2020. Shrinkage compensating admixtures are widespread in the concrete paving industry in the country. These admixtures, based on supercalcinated calcium oxide, present volumetric expansion that compensates concrete shrinkage. In addition, the products generated by the admixture may fill the pores of the concrete and decrease its permeability, as well as increase its mechanical strength. In this context, the objective of this research is to use the admixtures based on supercalcinated calcium oxide to manufacture concrete pipes, to provide greater volumetric stability, tightness and mechanical strength. The chemical and mineralogical composition of the admixture were characterized and the influence of the admixture on the kinetics and mechanisms of hydration were analyzed. In addition, the physical and mechanical properties of mortars, concretes and concrete pipes produced with the admixture were evaluated. Results showed that the admixture accelerates cement hydration, contributing to increase the degree of hydration of pastes. This fact contributes to the increase in the mechanical strength of concrete specimens and pipes. Finally, a procedure to manufacture, cure and use concrete pipes with the admixtures was elaborated.

Keywords: concrete pipe, supercalcinated calcium oxide, shrinkage compensating admixture, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do programa experimental conduzido.	4
Figura 2 - Fases de hidratação do cimento Portland, como visto em um calorimétrico isotérmico. ...	7
Figura 3 - Variações dimensionais de um concreto convencional e um concreto de retração compensada.	11
Figura 4 - Comparação de curvas de resistência à compressão ao longo do tempo de um concreto sem aditivos (Referência), concreto com aditivo de óxido de cálcio (CaO) e concreto com aditivos de óxido de cálcio e redutor de retração (CaO+SRA).	12
Figura 5 - Produção de tubos de concreto com equipamento de compressão radial.	15
Figura 6 - Semicorte longitudinal típico de tubos com encaixe: (a) macho e fêmea e (b) ponta e bolsa.	16
Figura 7 - Métodos de ensaio de tubos: ensaios de (a) três cutelos; (b) dois cutelos; (c) colchão de areia e (d) Minnesota.	17
Figura 8 - Esquema do ensaio de compressão diametral para tubo de encaixe ponta e bolsa, visto que L é o comprimento útil do tubo.	17
Figura 9 - Curvas de distribuição do tamanho de partícula do cimento CP V ARI RS e aditivo.	22
Figura 10 - Curvas de fluxo de calor de pastas de 0 a 1 h para amostras de pastas cimentícias e a pasta com 100% aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.	27
Figura 11 - Curvas de fluxo de calor de pastas de 0 a 24 h para amostras de pastas cimentícias e a pasta 100% aditivo.	28
Figura 12 - Imagens obtidas por MEV de pastas cimentícias para as amostras (a) sem aditivo, (b) com 3% de aditivo e (c) 5% de aditivo.	31
Figura 13 - Imagens obtidas por MEV de pastas cimentícias para as amostras (a) sem aditivo, (b) com 3% de aditivo e (c) 5% de aditivo.	32
Figura 14 - Aparato para determinação para o ensaio de variação dimensional. A seta azul indica a posição do corpo de prova durante o ensaio.	35
Figura 15 - Resultados de variação dimensional por idade de argamassas para amostras sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.	36

Figura 16 - Produção dos corpos de prova de concreto: (a) mistura dos materiais na betoneira; (b) preenchimento do molde com 1 camada de concreto; (c) aplicação de energia com o soquete para compactação do concreto.	39
Figura 17 - Resultados médios de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, obtidos de amostras sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.	42
Figura 18 - Principais dimensões (em mm) de tubos de concreto PA2 produzidos.	45
Figura 19 - Montagem do conjunto molde e armadura para fabricação de tubos de concreto: (a) fixação da armadura no molde; (b) transporte do conjunto para a máquina de vibro-compressão. ..	46
Figura 20 - Lançamento do cimento no misturador para a produção do concreto para tubos.	46
Figura 21 - Processo de produção do concreto para tubos: (a) transporte de agregados na esteira; (b) lançamento direto do aditivo no misturador.	47
Figura 22 - Processo de moldagem do tubo de concreto: (a) lançamento do concreto no molde metálico; (b) e (c) retirada do molde do tubo.	48
Figura 23 - Produção de tubos de concreto: (a) acabamento final com auxílio de desempenadeira e (b) cobertura do tubo com lona plástica após o acabamento.	49
Figura 24 - Ensaio de compressão diametral para tubo de concreto: (a) tubo posicionado na máquina de ensaio com painel de controle e (b) destaque para o apoio de três cutelos.	50
Figura 25 - Resultados de compressão diametral de três tubos de concreto: (a) amostra sem aditivo; (b) amostra com 3% de aditivo e (c) amostra com 5% de aditivo.	51
Figura 26 - Comparação de resultados de compressão diametral de três tubos de concreto entre as amostras sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.	52
Figura 27 - Resultados médios de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, de amostras de tubos de concreto sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.	55
Figura 28 - Etapas prévias para a produção de tubos de concreto: (a) montagem do reforço de aço; (b) fixação do reforço de aço no molde.	58
Figura 29 - Lançamento manual do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado no misturador para a produção de tubos de concreto.	59
Figura 30 - Silo de cimento gravitacional posicionado sobre o misturador para a fabricação de tubos de concreto.	60

Figura 31 - Transporte do concreto do misturador para o molde na máquina de vibro-compressão, a partir do uso de esteiras rolantes.	61
Figura 32 - Processo de cura de tubos de concreto com cobertura de lona plástica após o acabamento.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de atendimento com água e esgotos dos municípios com prestadores de serviços participantes do SNIS em 2018, conforme a macrorregião geográfica e Brasil.	13
Tabela 2 - Materiais selecionados para a realização da campanha experimental.	19
Tabela 3 - Modelos estruturais utilizados para o refinamento de Rietveld para o ensaio de DRX. ...	20
Tabela 4 - Diâmetros das partículas de cimento e aditivo obtidos por granulometria a laser.	22
Tabela 5 - Composição mineralógica do cimento CP V ARI RS por DRX.	23
Tabela 6 - Composição mineralógica do aditivo por DRX.....	23
Tabela 7 - Análise de agregados.	24
Tabela 8 - Análise das curvas de fluxo calor obtidas para amostras de pastas cimentícias e a pasta com 100% aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.	28
Tabela 9 - Composição mineralógica de pastas de cimento obtidas por DRX para amostras de pastas cimentícias sem aditivo e pasta com 3% e 5% de aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.	29
Tabela 10 - Dosagem de materiais para produção de 1 m ³ de argamassa.	34
Tabela 11 - Dosagem de materiais para produção de 1 m ³ de concreto para fabricação de tubos. ...	38
Tabela 12 - Resultados médios de resistência à compressão nas diferentes idades.....	41
Tabela 13 - Resultados de carga de fissura a partir do ensaio de compressão diametral.....	53
Tabela 14 - Resultados de carga de ruptura a partir do ensaio de compressão diametral.....	54

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Programa experimental.....	4
1.4. Estrutura do trabalho	4
2. Revisão bibliográfica	6
2.1. Concreto	6
2.1.1. Hidratação do cimento.....	6
2.1.2. Variação dimensional	8
2.1.3. Aditivos para concreto.....	9
2.2. Aditivos compensadores de retração baseados em óxido de cálcio supercalcinado.....	9
2.2.1. Definição	9
2.2.2. Composição	10
2.2.3. Mecanismo de ação e influência na hidratação do cimento.....	10
2.2.4. Influência nas propriedades do concreto	11
2.3. Tubos de concreto.....	12
2.3.1. Definição	12
2.3.2. Processo de produção	14
2.3.3. Caracterização e normatização	16
2.3.4. Limitações tecnológicas	18
3. Caracterização de materiais	19
3.1. Materiais.....	19
3.2. Métodos de caracterização.....	19
3.2.1. Cimento e aditivo.....	19
3.2.2. Agregados.....	21
3.3. Resultados e discussão.....	21
3.3.1. Cimento e aditivo.....	21
3.3.2. Agregados.....	23
3.4. Conclusões do capítulo.....	24
4. Análise da influência do aditivo na cinética e nos mecanismos de hidratação.....	25
4.1. Materiais.....	25
4.2. Dosagem e preparação de pastas de cimento.....	25
4.3. Métodos.....	26
4.3.1. Calorimetria isotérmica	26
4.3.2. DRX.....	26
4.3.3. MEV	27

4.4.	Resultados e discussão.....	27
4.4.1.	Calorimetria isotérmica	27
4.4.2.	DRX.....	29
4.4.3.	MEV	30
4.5.	Conclusões do capítulo.....	33
5.	Caracterização da estabilidade dimensional de argamassas	34
5.1.	Composição e preparo de argamassas	34
5.2.	Métodos	35
5.3.	Resultados e discussão.....	35
5.4.	Conclusões do capítulo.....	36
6.	Produção de concreto em laboratório.....	38
6.1.	Composição e preparo de concretos	38
6.2.	Métodos de ensaio para avaliação de concretos	40
6.2.1.	Resistência à compressão	40
6.2.2.	Absorção após imersão e fervura e índice de vazios	40
6.3.	Resultados e discussão.....	40
6.3.1.	Resistência à compressão	40
6.3.2.	Absorção após imersão e fervura e índice de vazios	42
6.4.	Conclusões do capítulo.....	42
7.	Produção de tubos de concreto.....	44
7.1.	Composição de tubos de concreto	44
7.2.	Descrição dos tubos.....	44
7.3.	Processo de produção de tubos de concreto	45
7.4.	Métodos	49
7.4.1.	Compressão diametral	49
7.4.2.	Absorção após imersão e fervura e índice de vazios	50
7.5.	Resultados.....	50
7.5.1.	Compressão diametral	50
7.5.2.	Absorção após imersão e fervura e índice de vazios	54
7.6.	Conclusões do capítulo.....	55
8.	Procedimento de fabricação, cura e utilização de tubos de concreto com óxido de cálcio supercalcinado.....	57
8.1.	Conclusões do capítulo.....	62
9.	Conclusões	63
9.1.	Aplicabilidade da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras.....	64
10.	Publicações	65
11.	Referências	66

1. Introdução

Elementos produzidos com concreto de consistência seca são amplamente utilizados no Brasil, como tubos de concreto. Estes tubos têm vantagens competitivas para o uso em redes de águas pluviais e de esgoto sanitário e podem ser produzidos com diâmetros que variam entre 200 e 2000 mm e com espessuras mínimas de parede entre 45 e 180 mm [1]. Tais características são fundamentais para que os tubos atendam as cargas mínimas isentas de dano em ensaios de compressão e garantam a estanqueidade do sistema.

É fato que o país necessita de imediato realizar a ampliação dos sistemas de saneamento básico. O relatório do Ministério das Cidades [2] indica baixos índices de atendimento de saneamento básico no país. À vista do exposto, é necessário investir no desenvolvimento tecnológico do sistema de saneamento básico do Brasil. Para isso, diversos estudos foram publicados com o intuito de melhorar o desempenho de tubos de concreto a partir da redução de limitações tecnológicas [3,4].

O uso de aditivos contribui para melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido e está difundido mundialmente [5]. Assim é usual a aplicação de aditivos em concretos para atribuir vantagens técnicas e econômicas. Em relação aos concretos de consistência plástica, aditivos são utilizados para diversas finalidades, como melhorar a trabalhabilidade do concreto, reduzir o consumo de cimento e aumentar a resistência mecânica.

Aditivos compensadores de retração baseados em óxido de cálcio são amplamente aplicados na fabricação de pisos industriais à nível nacional e internacional [6]. O uso desses aditivos atribui vantagens para os pisos de concreto, em relação à melhoria da estética, menor irregularidade dos pisos, aumento da vida útil, maior resistência mecânica, produção de maiores áreas de pisos sem o uso de juntas de dilatação, assim como menor frequência de reparos.

Aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado apresentam expansão volumétrica de cerca de 100% quando se hidratam, o que compensa a retração por secagem e a retração autógena da matriz cimentícia, diminuindo possíveis riscos de fissuração relativos a esses fenômenos [6]. Além disso, as fases formadas pela sua hidratação podem preencher os poros da matriz, diminuindo sua porosidade e promovendo ganhos de resistência [7]. Esses fatos evidenciam o potencial de uso desses aditivos para matrizes cimentícias de aplicações diversas.

Dessa forma, o uso do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado pode ser uma alternativa viável para o aumento do desempenho de concretos aplicados em tubos. Por outro lado, como o aditivo aumenta o teor de finos do concreto, a determinação do teor de umidade ótimo para produção de tubos pode aumentar seu desempenho quando o aditivo é empregado. Com isso, pode ser possível viabilizar o emprego deste tipo de aditivo neste processo industrial.

Neste contexto, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar o uso do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado, de nome comercial DRY D1, para a produção de concretos de consistência seca utilizados em tubos de concreto. Os resultados do estudo podem ser aplicados para tubos utilizados em redes de água pluviais e esgoto sanitário. O trabalho foi desenvolvido com uma parceria entre a Universidade São Judas Tadeu, a Associação Brasileira de Cimento Portland e as empresas Química Edile do Brasil e Fermix Tubos.

1.1. Justificativa

Sistemas compostos por tubos de concreto são amplamente utilizados no Brasil, com vantagens competitivas para a aplicação em redes de águas pluviais e de esgoto sanitário. Apesar da relevância destes sistemas, o Brasil possui um déficit de saneamento básico, sendo esse maior em relação aos outros setores de infraestrutura [8]. Desse modo, é necessário investir no desenvolvimento tecnológico de tubos de concreto.

À vista do exposto, julgou-se pertinente o interesse de pesquisar de modo inédito a utilização de um aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado em concretos para a produção de tubos. Uma vez que estes aditivos são amplamente utilizados na indústria de pavimentos industriais de concreto e apresentam bons resultados em relação às propriedades físicas e mecânicas de matrizes cimentícias.

O emprego deste aditivo, devido à sua propriedade expansiva, pode promover tensões de origem química na matriz, o que pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas de tubos de concreto. Deste modo, o aditivo composto por óxido de cálcio supercalcinado pode contribuir para o aumento da resistência mecânica de tubos de concreto, sobretudo dos elementos reforçados com armadura, produzindo elementos que atendam aos requisitos mecânicos exigidos pela norma ABNT NBR 8890 [9].

Mediante o exposto, os resultados obtidos a partir do estudo são de extrema importância, uma vez que podem fornecer dados necessários para especificar concretos com desempenho superior para a produção de tubos no país.

O objeto de estudo apresenta interesses acadêmicos e práticos. Em relação ao propósito acadêmico, o projeto busca contribuir com a literatura atual em relação à interação de aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado com matrizes cimentícias. Ainda, o projeto pode incentivar uma série de parâmetros, a partir de trabalhos futuros, que relacionam estes aditivos com concretos de consistência seca, sobretudo para tubos de concreto.

Do ponto de vista prático, compreender a influência dos aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado nas propriedades de tubos de concreto pode levar à maior estabilidade volumétrica, estanqueidade e resistência mecânica destes elementos. Além disso, o objeto de estudo pode fornecer referências relevantes para a indústria de aditivos e de elementos cimentícios, como fábricas de tubos de concreto. Mediante o exposto, um desenvolvimento na tecnologia de materiais cimentícios e aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado pode ser obtido.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do trabalho é avaliar o uso de aditivo compensador de retração baseado em óxido de cálcio supercalcinado na fabricação de tubos de concretos. Para cumprir o objetivo geral, foram definidos os 5 objetivos específicos descritos a seguir:

- I. Avaliar a influência do aditivo composto por óxido de cálcio na cinética, nos mecanismos de hidratação e na microestrutura de misturas cimentícias.
- II. Analisar como o aditivo influencia as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos em laboratório.
- III. Analisar a estabilidade dimensional de argamassas produzidas com o aditivo.
- IV. Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas de tubos de concreto fabricados com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

Elaborar um procedimento prático para a utilização de óxido de cálcio supercalcinado na fabricação de tubos de concreto.

1.3. Programa experimental

As etapas do programa experimental conduzido estão descritas conforme a Figura 1. A primeira etapa do estudo focou na caracterização de materiais utilizados nesta pesquisa. A segunda etapa se concentrou na análise da influência do aditivo composto por óxido de cálcio supercalcinado na cinética, nos mecanismos de hidratação e na microestrutura de misturas cimentícias.

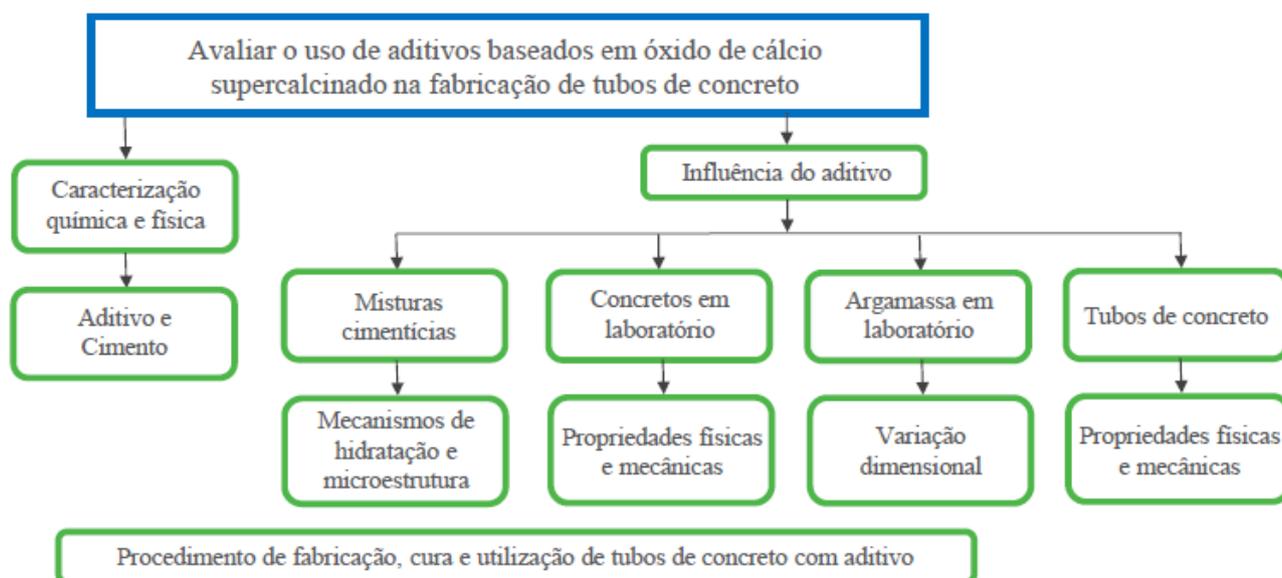


Figura 1 - Esquema do programa experimental conduzido.

A terceira etapa do estudo analisou a influência do aditivo nas propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos em laboratório. A quarta etapa contemplou a análise da influência do aditivo nas propriedades físicas de argamassas produzidas em laboratório. A quinta etapa consistiu na análise da influência do aditivo nas propriedades físicas e mecânicas de tubos de concreto produzidos na indústria. Por fim, foi apresentado um procedimento para a fabricação de tubos de concreto contendo aditivos compostos por óxido de cálcio supercalcinado.

1.4. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em dez capítulos, com o propósito de facilitar o entendimento dos conceitos abordados. Neste capítulo, foram apresentados de maneira sucinta o quadro atual da aplicação de aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado e de tubos de concreto, a justificativa da pesquisa, objetivos e estrutura do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, que abrange aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado e tubos de concreto. Para tal, são expostos os aspectos relevantes dos temas, como o mecanismo de hidratação do óxido de cálcio e o ensaio de compressão diametral para tubos. No capítulo 3, é apresentada a caracterização de materiais utilizados na pesquisa. Este capítulo descreve os métodos de ensaio e os respectivos resultados da análise de materiais.

No capítulo 4, é apresentada a influência do aditivo composto por óxido de cálcio supercalcinado na cinética, nos mecanismos de hidratação e na microestrutura de misturas cimentícias. Para tal, são apresentados os métodos de ensaio e resultados, baseado na comparação entre a pasta sem aditivo e pastas produzidas com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

No capítulo 5, são apresentadas as análises da influência do aditivo nas propriedades físicas de argamassas produzidas em laboratório. São apresentados o método de ensaio de variação dimensional e os respectivos resultados, com foco na comparação entre o desempenho da argamassa sem aditivo e argamassas produzidas com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

No capítulo 6, são mostradas as análises da influência do aditivo nas propriedades físicas e mecânicas de concretos. Para estes concretos produzidos em laboratório, o foco foi a comparação entre o desempenho do concreto sem aditivo e concretos produzidos com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

No capítulo 7, é exposta avaliação da produção de tubos de concreto produzidos na fábrica da empresa Fermix Tubos para avaliar a influência do aditivo nas propriedades físicas e mecânicas desses artefatos. Nesse sentido, são comparados tubos de concreto sem aditivo e tubos de concreto produzidos com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado, analisados a partir dos métodos de ensaios e resultados expostos.

No capítulo 8, é apresentado um procedimento de fabricação, cura e utilização de tubos de concreto com óxido de cálcio supercalcinado. Desse modo, são apresentados estudos e normas técnicas pertinentes ao tema, bem como as observações constatadas durante a produção de tubos de concreto com o aditivo na fábrica de tubos.

No capítulo 9, são apresentadas, de forma resumida, as principais conclusões obtidas nos capítulos anteriores da dissertação. Além disso, são propostas recomendações para a realização de estudos futuros pertinentes ao tema. No capítulo 10, são apresentadas as produções técnicas e científicas decorrentes da pesquisa desenvolvida.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica dos temas abordados nesse projeto de pesquisa. Os temas gerais abordados são concreto, aditivos compensadores de retração baseados em óxido de cálcio supercalcinado e tubos de concreto.

2.1. Concreto

O uso do concreto produzido com cimento Portland foi descoberto no fim do século XIX e difundido no século XX, tornando-se o material mais consumido na atualidade depois da água [10]. Desse modo, é possível considerar o concreto uma das descobertas mais relevantes do desenvolvimento da humanidade, com impacto direto na qualidade de vida da sociedade [10]. Concretos podem ser produzidos, basicamente, a partir da mistura entre ligante, água e agregados [11].

Contudo, a competitividade do mercado da construção civil e o desenvolvimento da tecnologia dos materiais gerou a produção de concretos com melhor desempenho [11]. Dessa forma, na atualidade é comumente utilizado o concreto com aditivos, fibras, pigmentos, agregados especiais e adições minerais [10]. Entre esses, os aditivos recebem destaque, pois atribuem benefícios para as propriedades do estado fresco e endurecido do concreto, além de gerar vantagens econômicas [12].

2.1.1. Hidratação do cimento

O cimento Portland é um ligante hidráulico composto, essencialmente, pela mistura de clínquer Portland e de sulfato de cálcio, que são moídos até obter aspecto de pó fino. Nesta mistura, podem ser adicionados materiais complementares, conforme determina a norma ABNT NBR 16697 [13], o que caracteriza os diferentes tipos de cimento Portland.

O cimento possui propriedades adesivas e coesivas, e promove a união de fragmentos minerais em uma unidade compactada. Este material hidráulico quando misturado com água se hidrata [12]. O processo de hidratação do cimento é um fenômeno complexo que ocorre a partir de diversas reações químicas [13]. Tal processo é exotérmico, no qual os silicatos e aluminatos em contato com água formam produtos hidratados.

Assim, a hidratação do cimento ocorre entre as principais fases do clínquer (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e água. Essas fases do cimento, a partir de uma suspensão, interagem em meio aquoso e resultam em propriedades adesivas que se desenvolvem até formar um sólido rígido. Os produtos hidratados apresentam baixa solubilidade em água e contribuem para o desenvolvimento de resistência mecânica da matriz [12].

Para o estudo do processo de hidratação do cimento, é usual analisar a taxa de liberação de calor em relação ao tempo decorrido. Conforme ilustra a Figura 2, na primeira região “A” observa-se que o primeiro pico de calor, superior em relação aos demais, corresponde a diversos processos, como neutralização de cargas superficiais das partículas de cimento, dissolução dos silicatos e aluminatos e formação de algumas fases hidratadas, como a etringita [14].

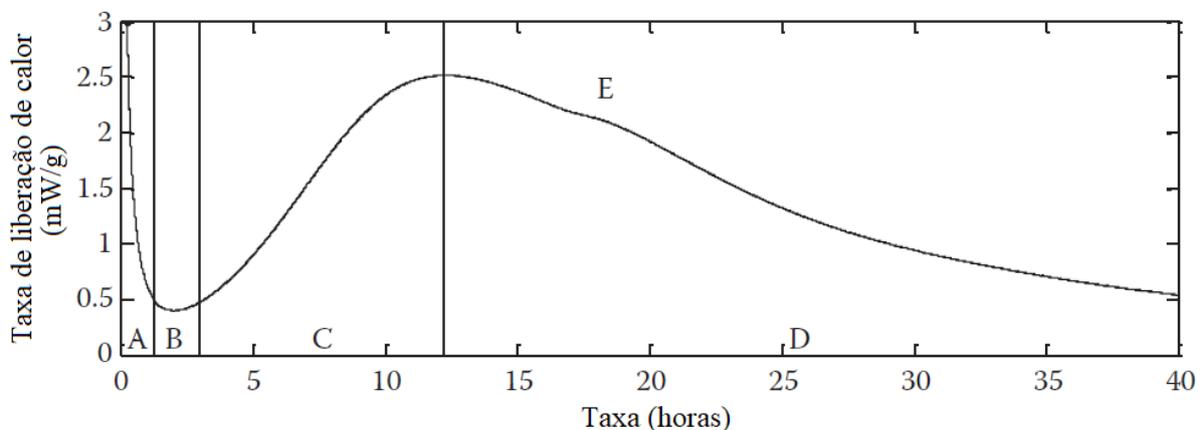


Figura 2 - Fases de hidratação do cimento Portland, como visto em um calorimétrico isotérmico [14].

Posteriormente, na região “B” da Figura 2 observa-se o período de indução, com lentas velocidades de dissolução e precipitação de fases. Depois disso, nota-se na região “C” que a liberação de calor aumenta gradativamente no período de aceleração, visto que ocorre a hidratação da alita, resultando no gel C-S-H e na precipitação da portlandita [12].

Nessa fase, os produtos de hidratação se interconectam, promovendo o enrijecimento e o endurecimento da matriz [12]. Após o pico principal, observa-se a formação do monossulfoaluminato a partir da reação do C_3A com a etringita. Depois disso, as velocidades de reação do processo diminuem, como indicado na região “D” e “E” da Figura 2 [12].

2.1.2. Variação dimensional

Concretos apresentam variação de volume gerada por diversos fatores, além de mudanças externas de temperatura, como a movimentação de água no seu interior [15]. Entre as principais causas da variação dimensional, as mais relevantes são a retração por secagem, a retração plástica e a retração autógena [12].

A retração plástica manifesta-se durante o estado plástico do concreto, mediante a perda de água superficial da matriz cimentícia. Essa retração depende de diversos fatores, como a quantidade de água perdida pela superfície, rigidez da mistura, exsudação da matriz cimentícia e a temperatura e umidade relativa do ambiente [12].

A retração por secagem ocorre a partir da perda de água da pasta de cimento, uma vez que o concreto está em contato com o ambiente externo. Neste processo, a perda de água livre é predominante, que ocorre concomitantemente com a movimentação da água adsorvida, água capilar e água quimicamente combinada da matriz cimentícia. Entre esses eventos, a perda de água adsorvida é responsável por parte significativa da retração por secagem [15].

Além disso, ocorrem variações de redução de volume de matrizes cimentícias após o início da hidratação do cimento, sem considerar variações externas de temperatura e umidade. Essa retração ocorre a partir da transferência de água do interior dos poros capilares para realizar a hidratação do cimento anidro, uma vez que não há um suprimento de água para aumentar a umidade desses poros novamente [12].

Assim, os capilares provocam altas tensões capazes de gerar a contração do volume original de matrizes cimentícia. Esse processo de redução de volume é denominada retração autógena [16]. Esse fenômeno de retração pode aumentar mediante fatores, como altas temperaturas externas, o uso de cimentos finos, consumo elevado de cimento e relações água/cimento menores [12].

As tensões geradas no concreto pela retração podem exceder a resistência à tração desses elementos, o que pode resultar na formação de fissuras. Dessa forma, a variação dimensional pode comprometer o desempenho e a durabilidade de estruturas de concreto [15].

2.1.3. Aditivos para concreto

No Brasil, aditivos para concreto são amplamente utilizados, como aditivos dispersantes, aceleradores e retardadores de pega, compensadores de retração e incorporadores de ar. A norma ABNT NBR 11768-1 [17] define aditivo para concreto como um produto adicionado e misturado nesta matriz, usualmente em quantidade não superior a 5% sobre a massa de cimento. O objetivo do uso de aditivos é alterar as propriedades de concretos no estado fresco e endurecido [17].

Dessa forma, é essencial a definição assertiva do tipo de aditivo e de sua dosagem a partir das suas propriedades e compatibilidade com o cimento. Além disso, deve-se levar em consideração parâmetros, como a capacidade de retenção de água do aditivo, desenvolvimento de resistências iniciais e finais, capacidade de incorporação de ar, entre outras. Devido ao uso frequente de cimento Portland composto no país, é fundamental compreender a sua interação com aditivos, especificamente para cada aplicação [17].

2.2. Aditivos compensadores de retração baseados em óxido de cálcio supercalcinado

2.2.1. Definição

Aditivos compensadores de retração baseados em óxido de cálcio supercalcinado são muito utilizados na composição de pavimentos industriais de concreto. Esses materiais permitem melhor desempenho do pavimento, pois são agentes que compensam a retração do concreto [6].

Os aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado podem ser empregados como substituição de cimentos expansivos. Desta forma, é possível melhorar propriedades do concreto no estado endurecido sem alterar o tipo de cimento utilizado [6].

Atualmente, esses materiais são classificados como aditivos compensadores de retração tipo G, segundo a classificação da norma ABNT NBR 11768-1 [17]. No Brasil, seu desempenho é caracterizado de acordo com a análise da variação dimensional de concretos, conforme a norma ABNT NBR 16834 [18].

Em relação às normas internacionais que avaliam o desempenho desses aditivos, a partir da variação dimensional linear, recebe destaque a ASTM C 157 [19]. Ainda, a ASTM C 878 [20] é utilizada para avaliar elementos cimentícios com variação dimensional linear restringida.

2.2.2. Composição

O aditivo é inorgânico, composto por óxido de cálcio supercalcinado, possui aspecto de pó com uma granulometria específica e controlada. O composto é produzido a partir de um tratamento térmico específico para o carbonato de cálcio [6]. O estudo realizado por Shi *et al.* (2002) caracteriza a hidratação do óxido de cálcio a partir do seu processo de manufatura [21].

Em vista disso, observou-se que o aumento de temperatura de calcinação reduz a velocidade das reações de hidratação do óxido de cálcio, o que altera as propriedades microestruturais [21]. O aditivo apresenta expansão volumétrica de aproximadamente 100% quando se hidrata [7].

2.2.3. Mecanismo de ação e influência na hidratação do cimento

As reações de hidratação do óxido de cálcio (CaO) ocorrem conforme as equações 1 e 2, sendo o hidróxido de cálcio (portlandita) o produto de hidratação formado [22].



Destaca-se que a expansão gerada como consequência da adição de óxido de cálcio em concretos ocorre a partir da pressão exercida pelos cristais de portlandita durante a sua formação. Esta reação é altamente exotérmica e expansiva, visto que o produto formado apresenta, aproximadamente, duas vezes o volume dos reagentes [6].

Assim, observa-se que o uso de aditivos baseados em cálcio em matrizes cimentícias contribui para o aumento da difusão de íons Ca^{2+} e para a adição de hidróxido de cálcio. Dessa forma, estes aditivos contribuem para a aceleração da supersaturação de cálcio dissolvido no meio líquido, uma vez que ocorre a maior concentração do íon Ca^{2+} em solução [7].

À medida que o término do período de indução e o início do processo de aceleração são função da supersaturação da solução com Ca^{2+} , a inclusão de aditivos baseados em cálcio é capaz de gerar a aceleração dos processos de hidratação [23]. Em vista disso, estes aditivos podem acelerar a precipitação de produtos de hidratação como o gel de C-S-H [6,7].

2.2.4. Influência nas propriedades do concreto

Concretos de retração compensada são caracterizados por uma expansão nas primeiras idades, a qual pode compensar a retração e reduzir significativamente a variação dimensional do concreto a longo prazo [11].

O processo de expansão é capaz de gerar tensões internas desenvolvidas no concreto entre 0,1 e 0,7 MPa. Para tal, são utilizados cimentos expansivos ou aditivos [11]. Tal processo é benéfico em relação ao desempenho dos elementos cimentícios e, portanto, do ponto de vista econômico [6,11].

Os aditivos de óxido de cálcio supercalcinado geram expansão controlada em matrizes cimentícias e como resultado esses aditivos atuam, principalmente, na retração por secagem e na retração autógena de matrizes cimentícias [6]. Na Figura 3, observa-se o comportamento de variação dimensional de concretos de retração compensada e de concretos convencionais [11].

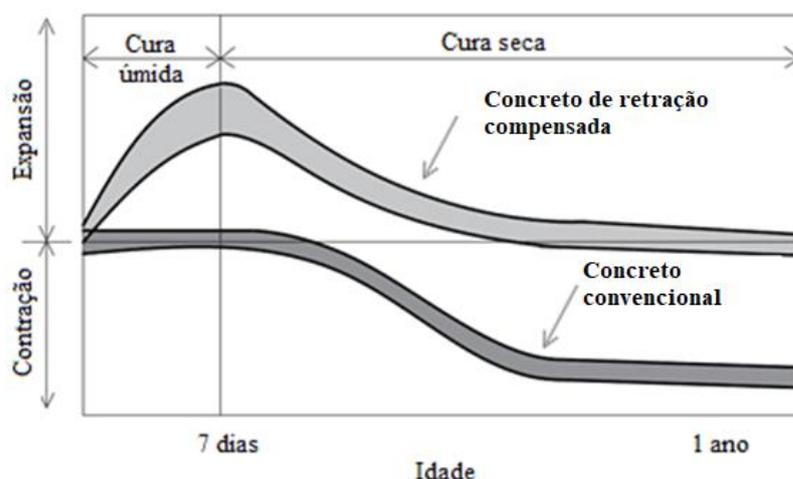


Figura 3 - Variações dimensionais de um concreto convencional e um concreto de retração compensada [11].

Além disso, a hidratação do óxido de cálcio pode gerar produtos expansivos que resultam em incremento de resistência de elementos de cimentícios, uma vez que podem acelerar a precipitação do gel de C-S-H [6,7]. A Figura 4 ilustra a comparação entre um concreto sem aditivo e um concreto com aditivo composto por óxido de cálcio (CaO). Observa-se que no concreto com o aditivo, houve incremento de resistência à compressão em relação à amostra referência [25].

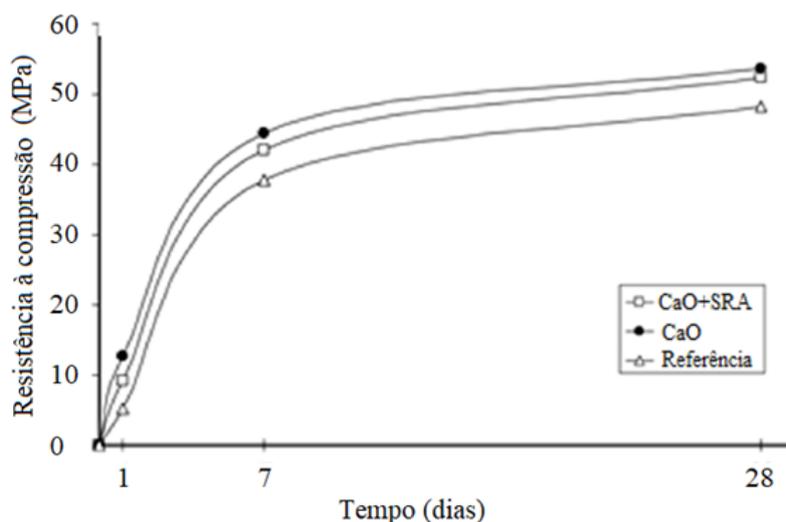


Figura 4 - Comparação de curvas de resistência à compressão ao longo do tempo de um concreto sem aditivos (Referência), concreto com aditivo de óxido de cálcio (CaO) e concreto com aditivos de óxido de cálcio e redutor de retração (CaO+SRA) [25].

À vista do exposto, a bibliografia que relaciona a interação entre o cimento e óxido de cálcio necessita de estudos complementares, a nível internacional. Para tal, é necessário analisar a sinergia entre a mistura do cimento e óxido de cálcio, bem como a influência das fases de cada componente [6].

2.3. Tubos de concreto

2.3.1. Definição

Os condutores de fluidos possuem amplo histórico, como as obras hidráulicas de aquedutos atribuídas aos romanos, alguns dos quais estão preservados até a atualidade. A evolução dos serviços de saneamento básico no Brasil possui uma ampla cronologia. Entre os fatos, é possível destacar a cidade do Rio de Janeiro no período do império, a qual recebeu um modelo de sistema de esgoto antes do aplicado em grandes cidades, como Nova Iorque [26].

A história da necessidade de canalizações enterradas está intrinsicamente relacionada à indústria dos tubos de concreto [27]. Tal indústria foi consolidada a nível mundial no início do século XIX e foi desenvolvida até os dias atuais, principalmente para a composição de redes de esgoto sanitário e águas pluviais [26].

A partir dos anos 1960, foram inseridos no mercado equipamentos de produção por vibro-compactação e compressão radial, geralmente produzidos na Europa. Nos anos seguintes, o processo de produção de tubos apresentou alto grau de automatização das instalações industriais [27]. Ainda, destaca-se a alta flexibilidade de produção, processos desde a composição da armadura até a cura integrados e automatizados, bem como moldes com diversas dimensões [27].

Apesar do extenso histórico desses sistemas no Brasil, o país apresenta baixos índices de atendimento de saneamento básico, como indica o relatório do Ministério das Cidades [2]. O baixo atendimento da demanda de coleta e tratamento de esgoto ocorre, principalmente, nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, como pode ser observado na Tabela 1 [2].

Tabela 1 - Níveis de atendimento com água e esgotos dos municípios com prestadores de serviços participantes do SNIS em 2018, conforme a macrorregião geográfica e Brasil [2].

Macrorregião	Índice de atendimento com rede (%)				Índice de tratamento dos esgotos gerados (%)
	Água		Coleta de esgotos		
	Total	Urbano	Total	Urbano	
Norte	57,1	69,6	10,5	13,3	21,7
Nordeste	74,2	88,7	28	36,3	36,2
Sudeste	91	95,9	79,2	83,7	50,1
Sul	90,2	98,6	45,2	51,9	45,4
Centro-Oeste	89	96	52,9	58,2	53,9
Brasil	83,6	92,8	53,2	60,9	46,3

Além disso, o aumento progressivo das áreas urbanas altera as dinâmicas destes ambientes. Por exemplo, observa-se o acréscimo de áreas impermeabilizadas em áreas urbanas, o que impede a absorção de parte das águas pluviais pelo solo e pode sobrecarregar os sistemas de drenagem. Por conseguinte, são necessários investimentos nos sistemas de drenagem de águas pluviais a fim de prevenir inundações, alagamentos e, portanto, danos para a sociedade [28].

O desenvolvimento dos sistemas de saneamento básico urbano é fundamental para evitar doenças, enchentes e outros impactos negativos para a sociedade. Dessa forma, é fundamental que redes de esgoto e de águas pluviais apresentem uma maior qualidade e, por conseguinte, um melhor funcionamento. Para tal, é necessário investir no apropriado dimensionamento estrutural e de capacidade de vazão dos sistemas de esgoto e águas pluviais. Além disso, é fundamental aprimorar o controle tecnológico do concreto aplicado em tubos [28].

2.3.2. Processo de produção

Tubos de concreto são produzidos a partir da escolha apropriada de materiais, que são selecionados com base na caracterização de ensaios de laboratórios. As proporções dos materiais são determinadas para o concreto atender as propriedades físicas e mecânicas para sua aplicação adequada [29]. Os concretos aplicados em tubos são de consistência seca, a fim de aumentar a produtividade da fabricação de tubos. Desse modo, ocorre a sustentação do formato do tubo em poucos minutos devido à coesão do concreto, o que permite a desforma rápida e possibilita a reutilização das formas.

O processo de fabricação de tubos consiste no adensamento enérgico do concreto para diminuir a absorção de água e garantir a resistência mecânica requerida [27]. Este processo de adensamento é necessário, pois concretos de consistência seca, logo após o lançamento no molde, apresentam bolhas de ar que ocupam em torno de 20% do volume [20]. Assim, a vibração gera a fluidificação da argamassa da mistura seca, a fim de reduzir o atrito interno, acomodar os agregados graúdos e reduzir o índice de vazios [20].

Além disso, o adensamento enérgico do concreto busca proporcionar o contato eficiente da água com o cimento, o que é essencial para as reações de hidratação. Este processo de adensamento consiste nos sistemas de vibração simples, vibrocompressão e centrifugação radial. O sistema de vibração simples é usual para tubos de concreto de pequenos diâmetros e sem armadura [27].

Os equipamentos de compressão radial são compostos por prensas radiais que possuem um molde exterior e um eixo rotatório hidráulico. Este eixo possui um sistema de roletes que realizam um movimento de rotação em alta velocidade, sendo capaz de comprimir o concreto lançado na máquina contra o molde exterior. Como resultado, o tubo é produzido, como ilustra a Figura 5 [27].

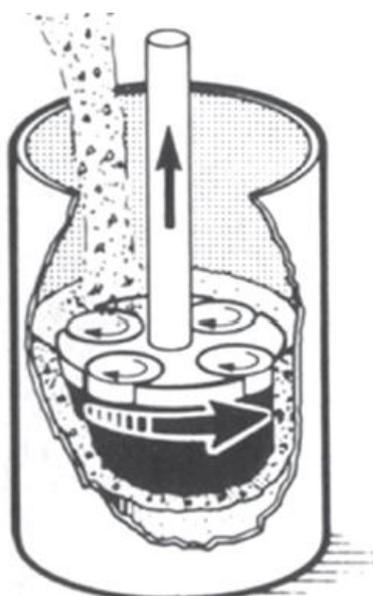


Figura 5 - Produção de tubos de concreto com equipamento de compressão radial [27].

A norma ABNT NBR 8890 [9] determina o uso de qualquer tipo de cimento Portland na produção dos tubos de concreto que não são utilizados em meios agressivos. Nesse contexto, é usual a aplicação do cimento CP V ARI RS na indústria de produção de tubos de concreto para aplicação em transporte de esgoto sanitário. Este fato ocorre porque o concreto produzido com esse tipo de cimento proporciona uma alta resistência inicial, o que permite uma desforma mais rápida dos tubos, e uma alta resistência a sulfatos.

Os tubos de concreto podem ser produzidos sem reforço, denominados tubos simples, assim como, podem possuir reforço estrutural composto por armadura ou fibras de aço. A norma ABNT NBR 8890 [9] classifica tubos simples de esgoto e de águas pluviais, respectivamente, como ES e PS. Da mesma forma, a norma classifica tubos armados de esgoto e de águas pluviais, respectivamente, como EA e PA. Além disso, a ABNT NBR 8890 [9] determina para os tubos o encaixe macho e fêmea, assim como, o encaixe ponta e bolsa, como ilustra a Figura 6. Os tubos aplicados em esgoto sanitário devem possuir junta elástica e nos tubos aplicados em redes de águas pluviais, as juntas podem ser elásticas ou rígidas.

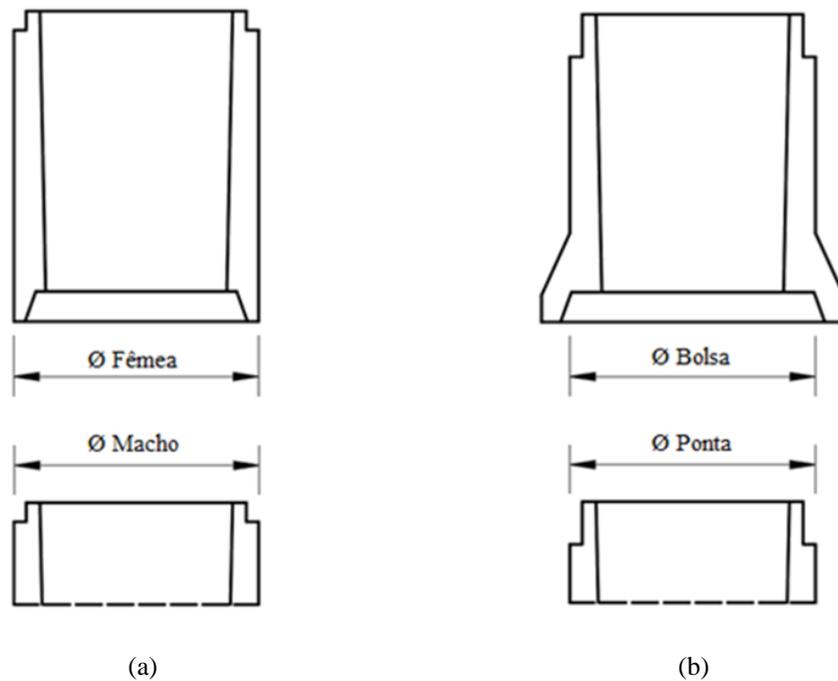


Figura 6 - Semicorte longitudinal típico de tubos com encaixe: (a) macho e fêmea e (b) ponta e bolsa [9].

2.3.3. Caracterização e normatização

A capacidade de resistência de tubos de concreto é determinada pelo ensaio de compressão diametral. No Brasil, este ensaio é regulamentado de acordo com a norma ABNT NBR 8890 [9]. Para tubos com reforço convencional, o ensaio de compressão diametral permite determinar as cargas de fissura e de ruptura, a partir de um carregamento contínuo, e comparar esses resultados com os valores mínimos da norma.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão diametral permitem verificar a classe de resistência do tubo, conforme especificado em projeto, para a aplicação de tubos em redes de águas pluviais ou redes de esgoto sanitário. A carga mínima isenta de dano corresponde à carga de fissura do tubo, o que permite classificar o elemento conforme a ABNT NBR 8890 [9].

A carga mínima de ruptura é a força máxima obtida no ensaio de compressão diametral e é equivalente ao estado-limite último de ruína do tubo, conforme a classificação da ABNT NBR 8890 [9]. As cargas mínimas de fissura e de ruptura de tubos são calculadas a partir dos respectivos valores de carga total dividida pelo comprimento útil do tubo, na unidade kN/m.

A avaliação de compressão diametral possui diversos métodos de montagem do aparato de ensaio. Conforme Zaidler (1983 apud Figueiredo e Neto, 2002) entre esses métodos destacam-se ensaio de três cutelos, ensaio de dois cutelos, ensaio de colchão de areia e ensaio de Minnesota, como ilustra Figura 7 [29].

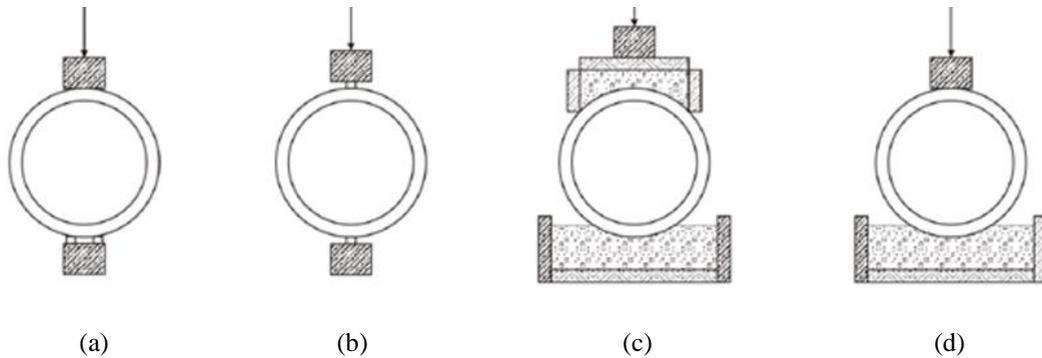


Figura 7 - Métodos de ensaio de tubos: ensaios de (a) três cutelos; (b) dois cutelos; (c) colchão de areia e (d) Minnesota [29].

No Brasil, o método de ensaio mais aplicado é o de três cutelos, conforme recomenda a ABNT NBR 8890 [9]. Esse método consiste no apoio do tubo em dois cutelos de madeira inferiores e no carregamento a partir de um cutelo superior centralizado e articulado, o qual pode conter cutelo de madeira entre esse e o tubo para ajustes de altura. A Figura 8 ilustra o aparato de ensaio de compressão diametral. Após a ruptura dos tubos, são extraídos testemunhos para determinar a absorção de água do concreto.

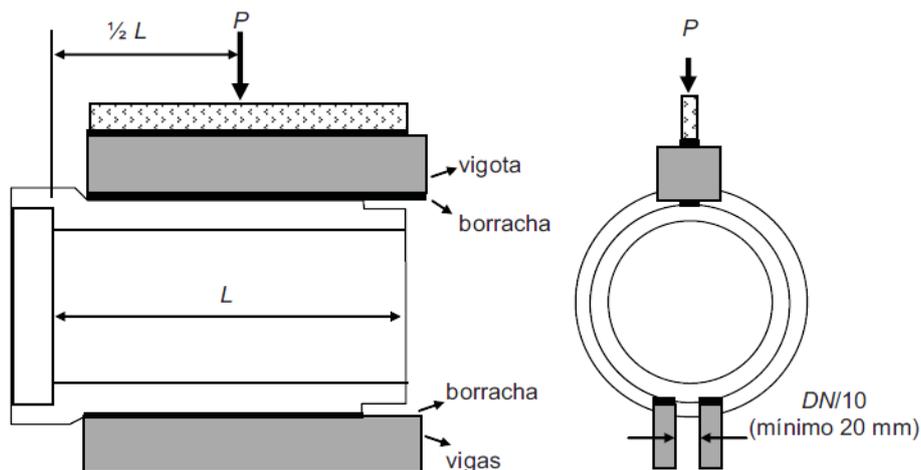


Figura 8 - Esquema do ensaio de compressão diametral para tubo de encaixe ponta e bolsa, visto que L é o comprimento útil do tubo [9].

2.3.4. Limitações tecnológicas

Tubos de concreto compõem redes de sistemas enterrados, nos quais a ocorrência de falhas pode gerar danos sérios e onerosos. A ABNT NBR 8890 [9] limita o valor de absorção de água dos tubos de concreto, uma vez que tubos porosos podem facilitar a contaminação do líquido no interior dos tubos, bem como podem gerar a poluição do meio externo.

Em vista disso, é necessário investir no desenvolvimento tecnológico de tubos de concreto. Para tal, diversos estudos foram publicados com o intuito de melhorar o desempenho de tubos de concreto a partir da redução das limitações do concreto de consistência seca, como estabilidade volumétrica e capacidade de resistir à esforços [3,4].

Nesse sentido, nota-se que o uso de aditivos e adições pode gerar melhorias para o concreto aplicado em tubos. Entre os materiais com potencial de gerar melhor desempenho do concreto aplicado em tubos, recebem destaque os aditivos.

Em concretos de consistência seca, os aditivos contribuem para melhorar algumas propriedades, como a hidratação do cimento, propriedades mecânicas, preenchimento do molde e aspecto final dos elementos. Dessa forma, é possível reduzir a porosidade, aumentar a resistência mecânica e a produtividade da fabricação a partir do uso de aditivos [8].

A melhoria de desempenho de um tubo de concreto poderá acarretar no amplo ganho de qualidade no sistema final, mediante o número de repetições desses elementos. À vista disso, nota-se a relevância de diminuir limitações de desempenho em relação ao concreto aplicado em tubos.

3. Caracterização de materiais

Neste capítulo, é apresentada a caracterização dos materiais empregados na produção de tubos de concreto. Os materiais analisados são o cimento CP V ARI RS, aditivo de óxido de cálcio supercalcinado e agregados.

3.1. Materiais

Os materiais selecionados para a campanha experimental estão descritos na Tabela 2. O aditivo de óxido de cálcio supercalcinado DRY D1 foi fornecido pela empresa Chimica Edile do Brasil e os demais materiais foram providenciados pela empresa Fermix Tubos.

Tabela 2 - Materiais selecionados para a realização da campanha experimental.

Material	Tipo	Fornecedor
Cimento	CP V ARI RS	InterCement Ijací
Agregado miúdo	Areia artificial granítica	Embu - Mogi
Agregado graúdo	Brita granítica (B0 e B1)	Pau Pedra
Aditivo compensador de retração	Óxido de cálcio supercalcinado (DRY D1)	Chimica Edile do Brasil
Água	Deionizada (para pastas e argamassas) e potável (para concretos)	USJT

O cimento e o DRY D1 foram armazenados em sacos plásticos vedados e mantidos em local reservado, para evitar absorção de água e carbonatação [13]. Os agregados foram previamente secos em estufa na temperatura 105 °C até a massa constante.

3.2. Métodos de caracterização

3.2.1. Cimento e aditivo

Massa específica

O cimento e o aditivo foram caracterizados pela determinação de suas respectivas massas específicas, utilizando o frasco de Le Chatelier e querosene, segundo a ABNT NBR 16605 [32].

Distribuição do tamanho de partícula

A distribuição do tamanho de partícula foi realizada por granulometria a laser, em uma suspensão em etanol absoluto, no equipamento Malvern Mastersizer V3.63 da Malvern Instruments.

Difração de raios-X

A composição mineralógica desses compostos foi determinada por difração de raios-X (DRX). O ensaio foi realizado em um difratômetro PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1 em geometria de reflexão Bragg-Brentano $\theta/2\theta$ equipado com um detector Pixel (comprimento ativo de 3,347 °) e uma fenda divergente fixa de 0,5 °.

Esse equipamento opera com radiação $\text{CuK}\alpha 1$ filtrada por Ni ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) na voltagem de 45 kV e corrente de 40 mA. Os porta-amostras eram cilíndricos, com diâmetro de 16 mm e profundidade de 2,5 mm. Foram carregados por backloading e girados a 2 rps [33].

Os difratogramas foram obtidos de 4 o 2θ a 80 o 2θ , com passo de 0,013 o 2θ e 100 s/passos. Foram analisados quantitativamente pelo método de Rietveld utilizando o programa X'Pert HighScore Plus com os modelos estruturais apresentados na Tabela 3. O conteúdo de fases amorfas foi determinado pelo método do padrão externo [33] utilizando alumina em pó (SRM 676a, NIST) como uma referência padrão.

Tabela 3 - Modelos estruturais utilizados para o refinamento de Rietveld para o ensaio de DRX.

Fase	Fórmula	Sistema cristalino	Número PDF	Código ICSD	Referência
Alita	Ca_3SiO_5	Monoclínico	01-070-8632	94742	[34]
Belita _m	$\text{Ca}_2\text{SiO}_{4m}$	Monoclínico	01-083-0460	79550	[35]
Belita _o	$\text{Ca}_2\text{SiO}_{4o}$	Ortorrômbico	01-086-0399	81097	[36]
Aluminato de cálcio	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_{6c}$	Cúbico	00-038-1429	1841	[37]
Aluminato de cálcio	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_{6o}$	Ortorrômbico	00-032-0150	1880	[38]
Ferroaluminato de cálcio	$\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$	Ortorrômbico	01-071-0667	9197	[39]
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Monoclínico	00-033-0311	151692	[40]
Sulfato de cálcio hemidratado	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic	00-041-0224	380286	[41]
Anidrita	CaSO_4	Ortorrômbico	01-086-2270	40043	[42]
Calcita	CaCO_3	Romboédrico	01-083-0577	79673	[43]
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Trigonal	01-075-1761	31335	[44]
Óxido de cálcio	CaO	Cubic	00-043-1001	75785	[45]

Tabela 3 - Modelos estruturais utilizados para o refinamento de Rietveld para o ensaio de DRX (continuação).

Fase	Fórmula	Sistema cristalino	Número PDF	Código ICSD	Referência
Portlandita	Ca(OH) ₂	Romboédrico	01-072-0156	15741	[46]
Etringita	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ . (OH) ₁₂ .26H ₂ O	Hexagonal	00-041-1451	155395	[47]
Monosulfoaluminato de cálcio	3CaO.Al ₂ O ₃ . CaSO ₄ .12H ₂ O	Romboédrico	-	24461	[48]
Hemicarboaluminato de cálcio	Ca ₄ Al ₂ (OH) ₁₂ . OH.0.5CO ₃ .4H ₂ O	Romboédrico	00-041-0221	263124	[49]
Monocarboaluminato de cálcio	Ca ₄ Al ₂ (OH) ₁₂ . CO ₃ .5H ₂ O	Triclínico	01-087-0493	59327	[50]
Alumina (padrão)	Al ₂ O ₃	Romboédrico	01-081-2267	73725	[51]

3.2.2. Agregados

Os agregados miúdo e graúdo foram caracterizados pela absorção de água, respectivamente, conforme a ABNT NBR NM 30 [52] e ABNT NBR NM 53 [53]. Além disso, os agregados miúdo e graúdo foram analisados pela determinação da massa específica.

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Cimento e aditivo

Massa específica

A massa específica do cimento e do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado foram 3,05 e 3,13 g/cm³, respectivamente. Os valores determinados estão bastante próximos de resultados presentes na literatura [6]. Dessa forma, o valor da massa específica determinado para o aditivo se enquadra no valor especificado pela norma ABNT NBR 11768-1 [17].

Distribuição do tamanho de partícula

As curvas de distribuição do tamanho de partícula determinadas por granulometria a laser do cimento e do aditivo estão apresentadas na Figura 9. A partir dessa análise, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4. Observa-se que o cimento CP V ARI RS apresenta distribuição de tamanho de partícula mais fina que o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.

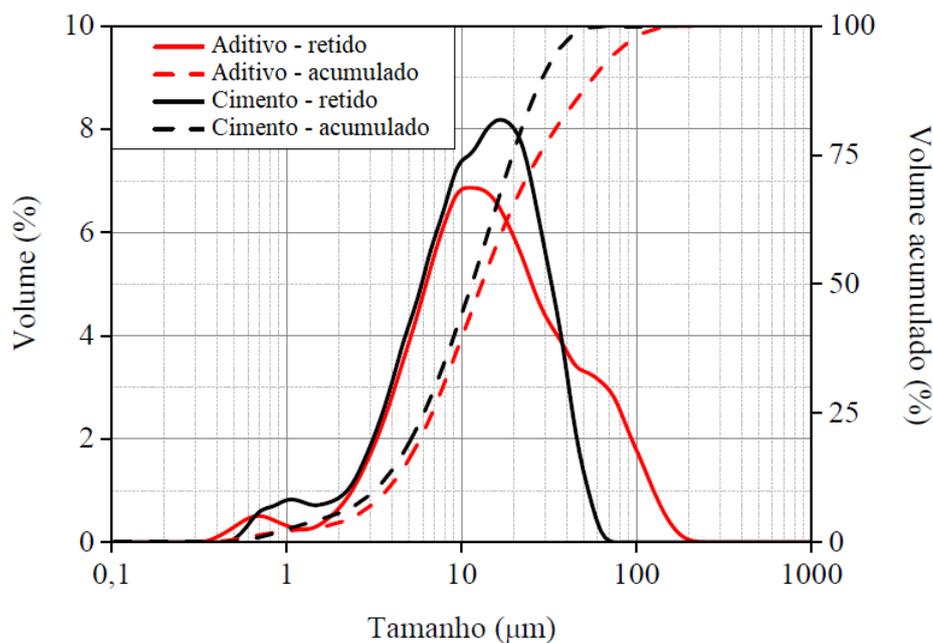


Figura 9 - Curvas de distribuição do tamanho de partícula do cimento CP V ARI RS e aditivo.

Tabela 4 - Diâmetros das partículas de cimento e aditivo obtidos por granulometria a laser.

Diâmetro	Cimento	Aditivo
d ₁₀ (µm)	3,80	5,6
d ₅₀ (µm)	13,6	19,1
d ₉₀ (µm)	34,2	108,0

Difração de raios-X

As composições mineralógicas do cimento e do aditivo estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente. As fases encontradas no cimento CP V ARI RS estão de acordo com a literatura técnica [23,54]. O aditivo apresentou quantidade de óxido de cálcio de 90%, predominante em relação à outras composições, como hidróxido de cálcio, calcita e dolomita. De acordo com esses resultados, o aditivo está de acordo com o prescrito na norma ABNT NBR 11768-1 [17].

Tabela 5 - Composição mineralógica do cimento CP V ARI RS por DRX.

Fase	Quantidade (% em massa)
C ₃ S	58,9
C ₂ S	11,4
C ₃ A _c	5,8
C ₃ A _o	2,1
C ₄ AF	7,9
Ca(OH) ₂	1,2
CaCO ₃	2,7
CaSO ₄ .0,5H ₂ O	6,8
CaSO ₄	1,7
SiO ₂	1,5
Soma total	100,0

Tabela 6 - Composição mineralógica do aditivo por DRX.

Fase	Quantidade (% em massa)
CaO	90,5
MgO	0,3
Ca(OH) ₂	5,2
CaCO ₃	1,5
CaMg(CO ₃) ₂	2,6
Soma total	100,0

3.3.2. Agregados

A absorção de água e a massa específica dos agregados miúdo e graúdo estão apresentados na Tabela 7. A caracterização dos agregados forneceu resultados que contribuem com a seleção de materiais adequados para a produção de tubos de concreto e auxilia a reprodução da pesquisa.

Tabela 7 - Análise de agregados.

Item	Agregado miúdo	Agregado graúdo B0	Agregado graúdo B1
Absorção de água (%)	2,95	0,84	0,36
Massa específica (g/cm ³)	2,78	2,81	2,89

3.4. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram analisados os materiais empregados no estudo para a realização da campanha experimental. Os materiais analisados são o cimento, o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado e os agregados. Para tal, foram realizados os ensaios de massa específica, distribuição do tamanho de partícula e difração de raios-X.

A partir dos resultados de massa específica, nota-se que o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado está conforme os parâmetros da ABNT NBR 11768-1 [17] e estudos anteriores [6]. Observa-se a partir das curvas de distribuição do tamanho de partícula que o cimento CP V ARI RS apresenta distribuição de tamanho de partícula mais fina que o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.

Conforme a análise obtida do ensaio de difração de raios-X, observa-se que o aditivo composto por óxido de cálcio supercalcinado está de acordo com os parâmetros da ABNT NBR 11768-1 [17] para aditivos compensadores de retração tipo G. Conforme o ensaio, as fases encontradas no cimento CP V ARI RS estão conforme a bibliografia [23,54].

A partir da análise dos agregados obteve-se resultados de absorção de água e massa específica, com o objetivo de fornecer parâmetros para a seleção de agregados utilizados na produção de tubos de concreto e facilitar a reprodução da pesquisa.

4. Análise da influência do aditivo na cinética e nos mecanismos de hidratação

No capítulo em questão é apresentado o procedimento experimental empregado para analisar a influência do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado na cinética e nos mecanismos de hidratação do CP V ARI RS. Para tal, são analisados e discutidos os ensaios de calorimetria isotérmica, de DRX e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4.1. Materiais

Os materiais utilizados nessa parte da campanha experimental foram o cimento CP V ARI RS, o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado e água deionizada, conforme descrito no item 3.1.

4.2. Dosagem e preparação de pastas de cimento

As pastas foram produzidas com uma relação água/cimento (a/c) fixa igual a 0,45, conforme o usual para tubos de concreto. Os teores de aditivo selecionados foram de 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 e 6,0 % sobre a massa de cimento (% smc), conforme recomendação do fabricante.

Além disso, para a relação a/c de 0,45 foi produzida uma pasta somente com o aditivo e água, bem como, foi produzida uma pasta com o cimento e água, consideradas como as amostras de referência para análise comparativa.

Para a produção de cada amostra, 200 g de pasta foram preparadas pela pré-mistura de cimento e aditivo, seguido da adição de água e homogeneização por 1 min usando um agitador IKA RW 20 acoplado a um eixo R1342 de 4 lâminas a 1500 rpm.

Após esse tempo, o agitador foi desligado e as paredes internas do recipiente foram limpas durante 30 s com uma espátula. Então, a pasta foi homogeneizada novamente por 1 min a 1500 rpm no agitador. Concluído o processo de mistura, a pasta foi destinada para o ensaio correspondente.

4.3. Métodos

4.3.1. Calorimetria isotérmica

Calorimetria isotérmica foi realizada a 23 °C durante 24 h com 8,7 g de pasta de cimento, utilizando um calorímetro isotérmico TAMAir (TA Instruments) de 8 canais. Esse ensaio foi realizado para analisar a cinética de hidratação de pastas de cimento com diferentes teores de aditivo.

As pastas analisadas foram a referência (sem aditivo) e as pastas contendo 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 e 6,0 % de aditivo sobre a massa de cimento. Além disso, foi feita uma pasta apenas contendo aditivo e água, na relação 1,0 : 0,45 em massa, para análise comparativa.

4.3.2. DRX

A DRX foi utilizada para determinar a composição das pastas de cimento com 24 h de hidratação, utilizando o procedimento descrito no item 3.2.1. Foram utilizadas as pastas de cimento produzidas com 3% e 5% de aditivo, bem como a pasta de referência sem aditivo. A hidratação das pastas foi paralisada 24 h após sua preparação pelo método da troca de solvente [55]. Esse método foi empregado porque não afeta a estabilidade e a cristalinidade de aluminatos hidratados [55].

O procedimento de troca de solvente consiste em 6 passos: primeiramente, a pasta foi imersa em isopropanol (razão solvente/pasta igual a 10) por 1 h a -4 °C. Em segundo lugar, o solvente foi substituído por um novo volume de isopropanol (razão solvente/pasta igual a 10) e a pasta foi mantida imersa por 1 h a -4 °C. Em terceiro lugar, o solvente foi substituído por um novo volume de isopropanol (razão solvente/pasta igual a 50) e a imersão ocorreu por 24 h a -4 °C.

Após essa etapa, o isopropanol foi substituído por éter dietílico (razão solvente/pasta igual a 25) e a pasta foi mantida imersa por 24 h a -4 °C. Em seguida, o solvente foi removido e a amostra foi seca por 30 min a 40 °C. Finalmente, a pasta foi moída em moinho de ágata até atingir tamanho máximo de partícula igual a 63 µm.

4.3.3. MEV

Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada para analisar a microestrutura das pastas de cimento com aditivos na idade de 24 h. Foram ensaiadas as mesmas amostras utilizadas para DRX, em idade específica. Os ensaios foram executados em um microscópio modelo Quanta FEG 650 na voltagem de 20 kV. A superfície analisada foi a de fratura, recobertas com carbono. A morfologia dos hidratos precipitados foi avaliada por feixe de elétrons secundários e sua composição química foi avaliada por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS).

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Calorimetria isotérmica

As curvas de fluxo de calor estão apresentadas na Figura 10 e na Figura 11. Os pontos característicos das curvas de fluxo de calor foram determinados seguindo o procedimento de Salvador et al [56] e estão na Tabela 8. As conclusões derivadas dessa análise estão apresentadas subsequentemente.

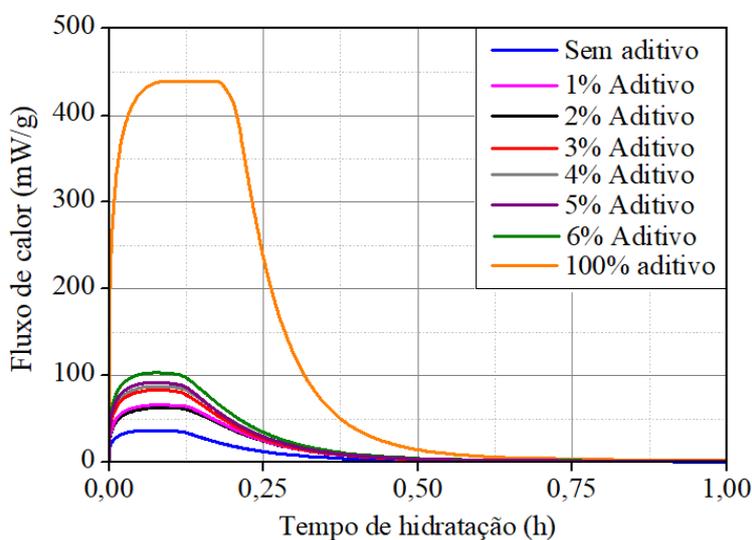


Figura 10 - Curvas de fluxo de calor de pastas de 0 a 1 h para amostras de pastas cimentícias e a pasta com 100% aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.

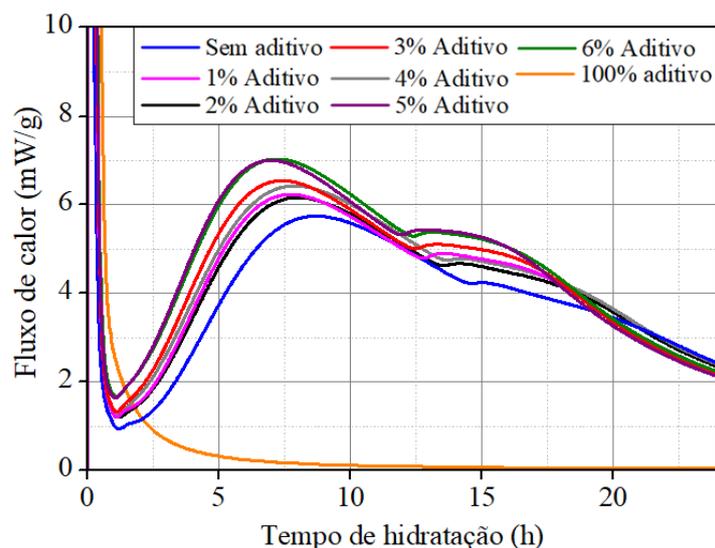


Figura 11 - Curvas de fluxo de calor de pastas de 0 a 24 h para amostras de pastas cimentícias e a pasta 100% aditivo.

Tabela 8 - Análise das curvas de fluxo calor obtidas para amostras de pastas cimentícias e a pasta com 100% aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.

Pasta / teor de aditivo (% smc)	Período de indução (h)	Taxa de reação do pico principal (mW/g.h)	Fluxo de calor máximo (mW/g)	Energia liberada no pico principal (J/g)	Energia liberada até 24 h (J/g)
0,0	139,6	1,05	5,74	384,4	317,0
1,0	123,8	1,24	6,24	402,4	345,6
2,0	125,7	1,13	6,16	407,4	343,7
3,0	106,9	1,25	6,55	420,2	363,0
4,0	111,5	1,21	6,43	427,6	359,4
5,0	98,3	1,31	6,99	439,6	383,3
6,0	97,4	1,29	7,05	448,2	387,2

Na Figura 10, observa-se que a reação do aditivo com água gera um intenso pico de liberação de calor. A hidratação do óxido de cálcio gerando hidróxido de cálcio é potencialmente exotérmica. Essa reação é rápida e termina aproximadamente 1 h após a mistura do aditivo com água. Na Figura 11, é possível verificar que não ocorrem reações químicas nessa pasta até 24 h.

A partir da análise das curvas de pastas de cimento com diferentes teores de aditivo na Figura 11, observa-se que a inclusão do aditivo na pasta acelera a cinética de reações de hidratação. Quanto maior o teor de aditivo adicionado, menor é o tempo de indução, maior a velocidade de reação, maior a intensidade do pico principal de hidratação e maior a energia liberada pelos processos de hidratação. Tal fato é devido à promoção da formação e da precipitação de C-S-H na matriz [6].

Tais fatos ocorrem porque a inclusão de aditivos contendo cálcio e a adição de hidróxido de cálcio em sistemas cimentícios contribuem para aumentar a concentração do íon Ca^{2+} em solução, fazendo com que o meio líquido atinja a supersaturação mais rapidamente [7].

Como o final do período de indução e o início do processo de aceleração dependem da supersaturação da solução com Ca^{2+} , a inclusão de aditivo acelera os processos de hidratação [23]. Com isso, é possível concluir que o aditivo acelera o endurecimento da pasta e pode conferir aumento de resistência mecânica da matriz cimentícia. Tais resultados estão coerentes com os encontrados na literatura [6,7].

Ainda, a partir da análise da Figura 11, foram selecionadas as dosagens de aditivo de 3,0 e 5,0 % sobre a massa de cimento que foram utilizadas nas etapas seguintes da campanha experimental. Esses teores receberam destaque, pois são valores intermediários que apresentaram resultados de taxa de reação do pico principal maiores em relação aos demais teores adjacentes.

4.4.2. DRX

A Tabela 9 apresenta a composição mineralógica obtidas a partir da análise de DRX para pastas de cimento com 24 h de hidratação. As amostras analisadas foram sem aditivo e com 3% e 5% de aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

Tabela 9 - Composição mineralógica de pastas de cimento obtidas por DRX para amostras de pastas cimentícias sem aditivo e pasta com 3% e 5% de aditivo de óxido de cálcio supercalcinado.

Amostra 24 h	Sem aditivo	3% de aditivo	5% de aditivo
Fase	Quantidade (% em massa)		
C_3S	31,3	26,9	25,8
C_2S	6,0	5,5	5,4
C_3A	4,7	4,9	4,9
C_4AF	3,1	3,6	3,6
CaCO_3	5,9	5,8	5,8
Etringita	13,8	13,6	13,6
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	15,1	18,3	17,8
Fases amorfas	19,9	21,3	23,1

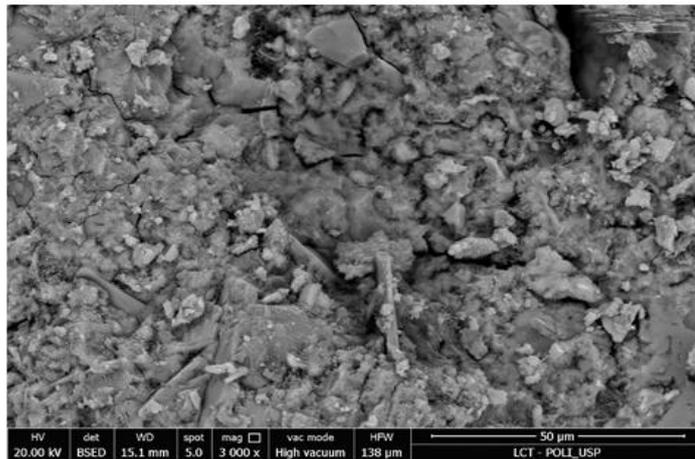
A partir da análise de DRX nota-se que as amostras com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado possuem maior presença de portlandita. O emprego de 3% e 5% de aditivo aumentou o teor de portlandita em relação à pasta sem aditivo, respectivamente, de 21,2% e 17,9%. Desse modo, observa-se que os resultados da análise de DRX estão conforme observado na bibliografia, pois a reação de hidratação do aditivo é capaz de gerar portlandita [6].

Ao analisar os resultados do ensaio de DRX observa-se que as amostras com o aditivo possuem maior teor de fases amorfas. As amostras com 3% e 5% de aditivo apresentaram aumento do teor de fases amorfas em relação à pasta sem aditivo, respectivamente, de 7,0% e 16,1%. Nota-se que esse fato está relacionado à presença de C-S-H nas amostras e os resultados estão conforme a bibliografia, pois a hidratação do óxido de cálcio pode acelerar a precipitação do gel de C-S-H em matrizes cimentícias [6,7].

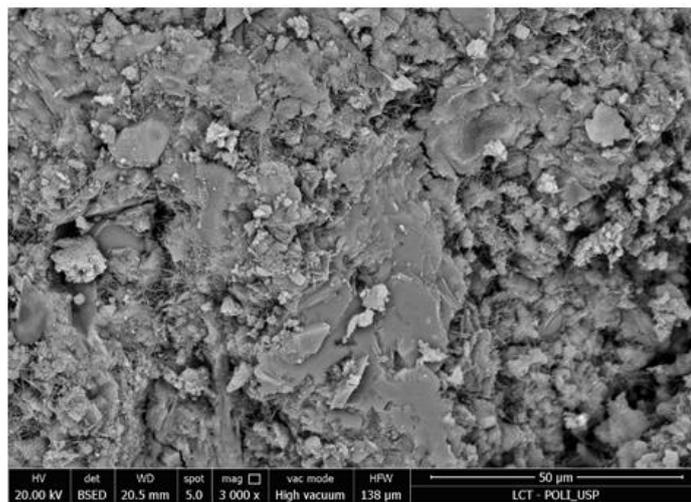
4.4.3. MEV

As imagens obtidas por MEV das amostras sem o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado, com 3% e 5% de aditivo são mostradas na Figura 12.b

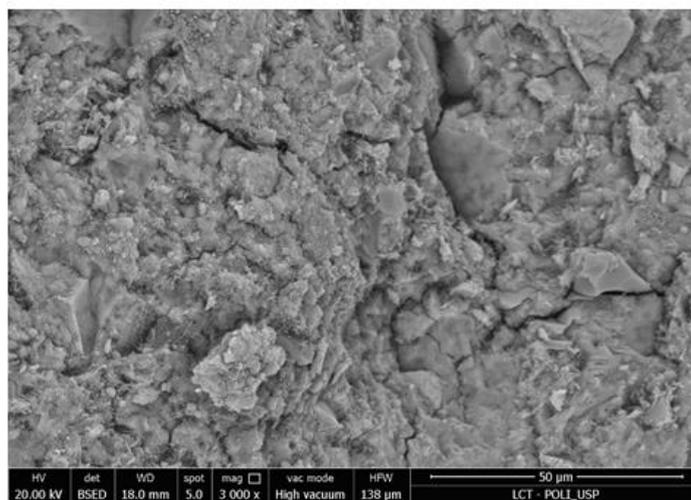
A partir da comparação entre a Figura 13.a e Figura 13.b nota-se que a amostra com 3% de aditivo apresenta maior presença de hidróxido de cálcio e gel de C-S-H. Ainda, em relação à Figura 13.a e Figura 13.c observa-se maior presença de gel de C-S-H na amostra com 5% de aditivo. Desse modo, a partir da análise visual das Figuras nota-se que as pastas com aditivo de óxido de cálcio supercalcinado podem apresentar maior presença de gel de C-S-H, como observado na literatura [14].



(a)

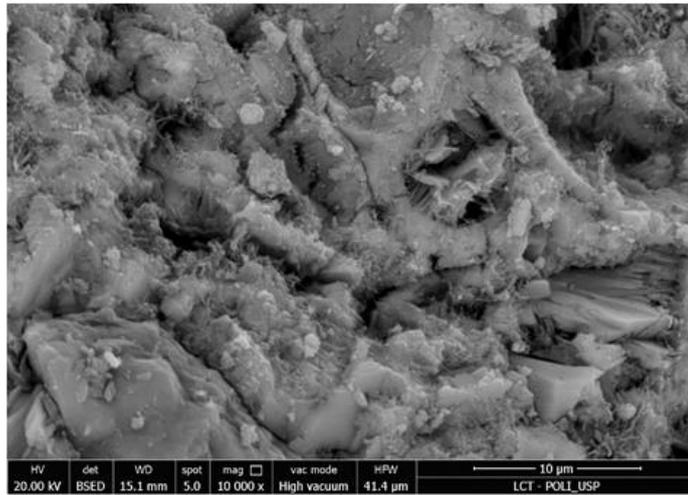


(b)

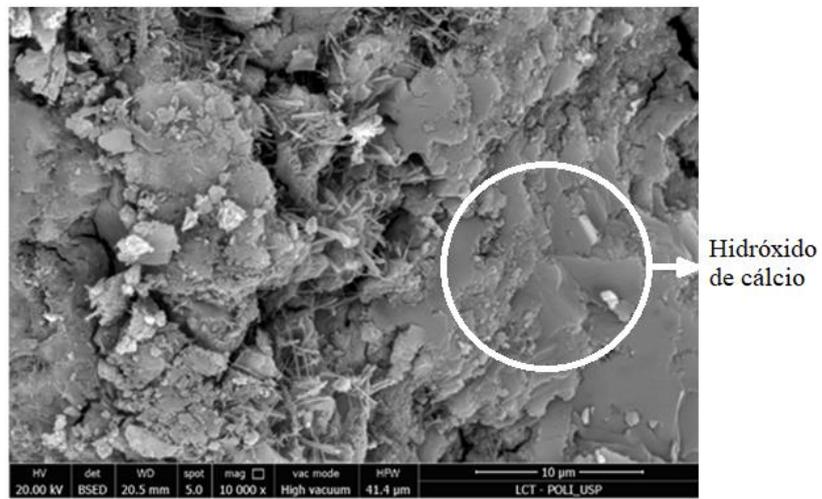


(c)

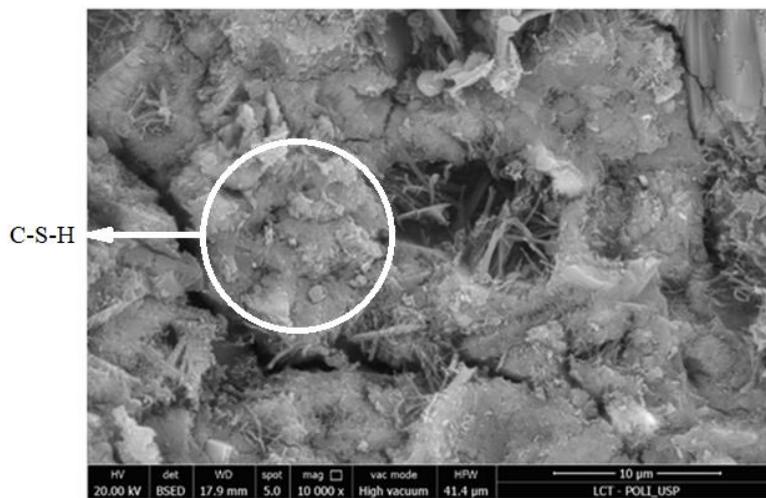
Figura 12 - Imagens obtidas por MEV de pastas cimentícias para as amostras (a) sem aditivo, (b) com 3% de aditivo e (c) 5% de aditivo.



(a)



(b)



(c)

Figura 13 - Imagens obtidas por MEV de pastas cimentícias para as amostras (a) sem aditivo, (b) com 3% de aditivo e (c) 5% de aditivo.

Dessa forma, a análise dos resultados de MEV está de acordo com o observado nos ensaios anteriores, principalmente em relação à análise de calorimetria isotérmica na qual observou-se que os aditivos baseados em óxido de cálcio são capazes de gerar a aceleração dos processos de hidratação e, conseqüentemente, a precipitação de produtos de hidratação, como o gel de C-S-H [23]. Além disso, essa análise está conforme a bibliografia, uma vez que a reação de hidratação do aditivo é capaz de gerar hidróxido de cálcio [6].

4.5. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram analisadas amostras de pastas cimentícias baseadas nos ensaios de calorimetria isotérmica, DRX e MEV. O ensaio de calorimetria isotérmica analisou pastas cimentícias com o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado nos teores de 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 e 6,0 % sobre a massa de cimento. Ainda, o ensaio analisou uma amostra de pasta cimentícia sem o aditivo e uma pasta composta somente do aditivo.

A partir dos resultados de calorimetria isotérmica observa-se que a reação do aditivo com água gera um intenso pico de liberação de calor, uma vez que a hidratação do óxido de cálcio gerando hidróxido de cálcio é potencialmente exotérmica. Ainda, observa-se que conforme ocorre o aumento o teor do aditivo, menor é o tempo de indução, maior a velocidade de reação, maior a intensidade do pico principal de hidratação e maior a energia liberada pelos processos de hidratação.

As análises de DRX e MEV foram realizadas para as amostras de pastas sem aditivo e com 3% e 5% do aditivo. Nota-se a partir da análise de DRX que o uso do aditivo aumentou o teor de portlandita e de fases amorfas, correspondentes ao teor de C-S-H, conforme a bibliografia [6,7].

Observa-se na análise de MEV que o aditivo não alterou de forma significativa a microestrutura da pasta cimentícia, pois as amostras possuem deposição de produto similares. Entretanto, nota-se que a amostra com 3% de aditivo apresenta maior presença de portlandita e gel de C-S-H. Além disso, nota-se na amostra com 5% de aditivo maior presença de gel de C-S-H.

5. Caracterização da estabilidade dimensional de argamassas

Com o objetivo de caracterizar o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado foi realizado o ensaio de variação dimensional. Este ensaio é característico para aditivos compensadores de retração, uma vez que permite determinar a influência do aditivo na expansão de matrizes cimentícias, conforme determina a ABNT NBR 11768-1 [17].

5.1. Composição e preparo de argamassas

A fim de permitir a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de determinação da variação dimensional, a dosagem de concreto consistência seca foi adaptada para uma argamassa de consistência plástica. Esta alteração foi necessária, pois os moldes do ensaio possuem pinos metálicos rosqueados em seu interior, os quais não podem sofrer os deslocamentos gerados durante o processo de moldagem de concretos de consistência seca.

A adaptação da dosagem de concreto para a argamassa foi realizada de forma experimental, mantendo-se fixa a quantidade de cimento e a relação água/cimento aplicada na dosagem do concreto. Por outro lado a quantidade de agregado miúdo foi reduzida em 23,4% e o agregado graúdo foi retido da dosagem, com o objetivo de garantir uma argamassa de consistência plástica, conforme apresentado na Tabela 10. O aditivo de óxido de cálcio supercalcinado foi empregado nas dosagens de 3% e 5% sobre a massa de cimento.

Tabela 10 - Dosagem de materiais para produção de 1 m³ de argamassa.

Material	Tipo	Dosagem (kg/m ³)	Traço unitário em massa
Cimento	CP V ARI RS	310,0	1,00
Agregado miúdo	Areia artificial granítica	867,28	2,71
Água	Potável	145,7	0,47

As argamassas foram preparadas em argamassadeira orbital marca Perfecta Curitiba com capacidade de 20 L, com a pré-mistura do cimento e do aditivo por 30 s a 136 rpm, adição e mistura da água por 60 s a 281 rpm e adição e mistura da areia por 90 s a 281 rpm.

5.2. Métodos

Imediatamente após a finalização da mistura, corpos de prova prismáticos 75 mm x 75 mm x 285 mm (largura x altura x comprimento) foram moldados segundo a norma ABNT NBR 16834 [57]. O processo de cura dos corpos de prova foi realizado conforme determinado por Nunes *et al.* [15], com o objetivo de simular a cura usual de tubos de concreto.

Os autores propuseram a adaptação da norma ASTM C 157 [19] que consiste na seguinte metodologia: imediatamente após a moldagem dos corpos de prova, estes foram recobertos por papel filme e colocados em câmara úmida; depois de 1 dia os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e desformados.

A primeira leitura da variação dimensional foi realizada conforme o procedimento da norma ABNT NBR 16834 [57], mantendo-se a posição do corpo de prova de acordo com a indicação de seta, como mostra a Tabela 14. Em seguida, os corpos de prova foram mantidos na câmara seca até a leitura de 180 dias.

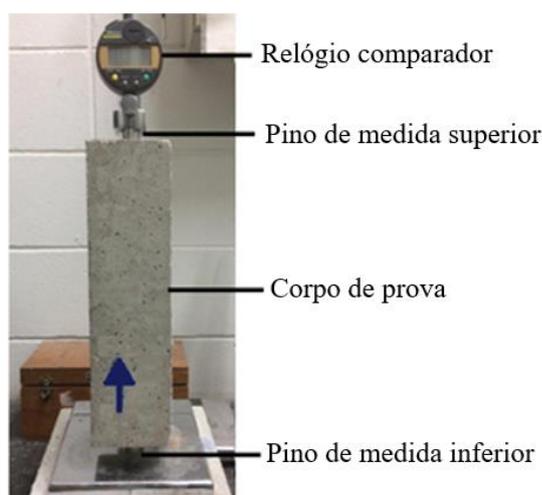


Figura 14 - Aparato para determinação para o ensaio de variação dimensional. A seta azul indica a posição do corpo de prova durante o ensaio.

5.3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos na análise de variação dimensional estão apresentados na Figura 15. Observa-se que houve uma redução da retração nas amostras com aditivos, em relação à amostra referência sem aditivo. Assim, argamassas produzidas com o aditivo apresentaram maior estabilidade volumétrica, quando comparadas às argamassas referência.

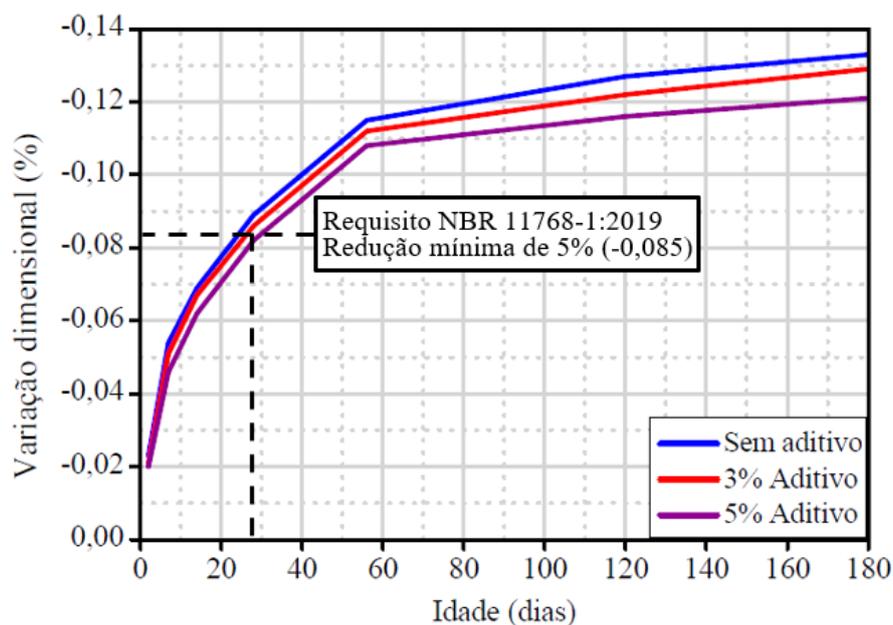


Figura 15 - Resultados de variação dimensional por idade de argamassas para amostras sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.

A amostra referência apresentou variação dimensional de -0,089%. A redução de retração aos 28 dias de idade de ensaio foi de 3,37 e 7,87% com o emprego de 3% e 5% de aditivo sobre a massa de cimento com resultados de variação dimensional, respectivamente, de -0,086% e -0,082%.

Desse modo, para a amostra com 5% de aditivo, a redução de retração aos 28 dias de idade é maior que o mínimo de 5% determinado para caracterizar o aditivo compensador de retração, conforme a ABNT NBR 11768-1 [17] para aditivos compensadores de retração tipo G.

Observa-se que a maior redução do valor de variação dimensional foi de 0,008% para 7 dias, a partir da comparação entre a argamassa referência e a argamassa com 5% de aditivo. A redução de variação dimensional foi similar entre as leituras a partir de 7 dias.

De acordo com o observado no item 4.2, a inclusão do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado em matrizes cimentícias aumenta a quantidade de portlandita disponível. Os cristais de portlandita exercem uma pressão durante a sua formação, o que gera uma reação expansiva. Assim, o uso do aditivo compensa a retração por secagem e a retração autógena da matriz cimentícia.

5.4. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foi avaliada a variação dimensional de amostras de argamassa sem aditivo e com 3% e 5% de aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado. Observa-se que nas amostras

com 3% e 5% de aditivo, houve redução de retração aos 28 dias de idade, respectivamente, de 3,37 e 7,87%, em relação à amostra sem aditivo. As amostras apresentaram comportamento similar ao longo do ensaio realizado até 180 dias.

A amostra com 5% de aditivo apresentou redução de retração aos 28 dias, em relação à amostra sem aditivo, conforme determina a ABNT NBR 11768-1 [17] para aditivos compensadores de retração tipo G. Desse modo, nota-se que argamassas produzidas com o aditivo possuem maior estabilidade volumétrica.

6. Produção de concreto em laboratório

Concretos foram produzidos em laboratório, com o propósito de avaliar a influência do uso do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado nestas amostras. Para tal, foram realizados os ensaios de resistência à compressão e absorção de água após imersão e fervura e índice de vazios. As amostras de concreto analisadas foram as contendo 3% e 5% de aditivo de óxido de cálcio supercalcinado, assim como a amostra sem aditivo.

6.1. Composição e preparo de concretos

A fim de analisar a aplicação do aditivo compensador de retração em tubos de concreto, optou-se por utilizar uma dosagem de concreto normalmente empregada para a fabricação de tubos. Esse concreto caracteriza-se por uma consistência seca, pois os tubos são moldados por vibro-compactação e os moldes são removidos aproximadamente 5 min após sua moldagem.

A dosagem de concreto utilizada está descrita na Tabela 11, desenvolvida pela empresa Fermix Tubos para fabricar tubos tipo PA-2 com reforço de armadura metálica. Foram utilizados os materiais descritos no capítulo 3.

Tabela 11 - Dosagem de materiais para produção de 1 m³ de concreto para fabricação de tubos.

Material	Tipo	Dosagem (kg/m ³)	Traço unitário em massa
Cimento	CP V ARI RS	310,0	1,00
Agregado miúdo	Areia artificial granítica	1131,5	3,65
Agregado graúdo	Brita granítica B0	226,3	0,73
Agregado graúdo	Brita granítica B1	530,1	1,71
Água	Potável	145,7	0,47

Observa-se que a dosagem de concreto em questão possui relação água/cimento inferior à 0,50, conforme determina a ABNT NBR 8890 [9] para tubos destinados à redes de água pluvial. Além disso, o traço de concreto possui um teor de argamassa igual a 65,6%, conforme método do IPT

(1+teor de agregado miúdo por quilograma de cimento / 1+ teor de agregado total por quilograma de cimento) [30,31].

O teor de argamassa utilizado é aproximadamente 20% superior ao teor em concretos convencionais para garantir melhor acabamento superficial do tubo e o recobrimento adequado das armaduras utilizadas para reforço do elemento.

Os concretos selecionados para análise foram o de referência (sem aditivo) e contendo 3% e 5% de aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado sobre a massa de cimento. Lotes de 25 L foram produzidos em betoneira estacionária de 50 L, eixo vertical e mistura forçada, conforme determina a ABNT NBR 12821 [58]. O procedimento de mistura pode ser visto na Figura 16.a.

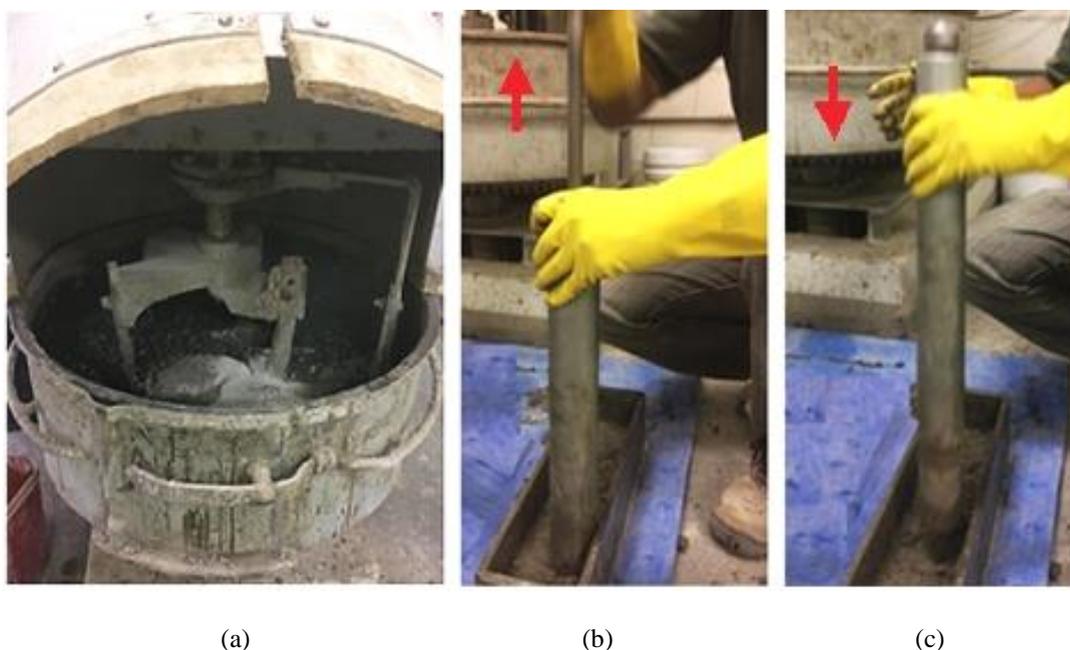


Figura 16 - Produção dos corpos de prova de concreto: (a) mistura dos materiais na betoneira; (b) preenchimento do molde com 1 camada de concreto; (c) aplicação de energia com o soquete para compactação do concreto.

Imediatamente após a mistura do concreto, foram moldados corpos de prova cilíndricos na dimensão de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. A moldagem dos corpos de prova foi realizada com o auxílio de soquete metálico dotado de guia para aplicação de energia, conforme descreve a ABNT NBR 7182 [59].

O processo de moldagem dos corpos de prova está apresentado nas Figura 16.b e Figura 16.c. Os corpos de prova foram desmoldados 24 h após a moldagem, cobertos com lona plástica e mantidos

no laboratório em condições de temperatura e umidade, respectivamente, de 23 ± 1 °C e 58 ± 2 % de até a data de realização dos ensaios.

6.2. Métodos de ensaio para avaliação de concretos

6.2.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão tem o intuito de verificar a influência do uso do aditivo na resistência mecânica de concretos. O ensaio foi realizado com 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura retificados, nas idades de 1, 3 e 28 dias. Foi utilizada uma prensa universal TONI PACT 3000 de 100 tf. A velocidade de aplicação de pressão foi igual a 0,45 MPa/s, seguindo as recomendações da ABNT NBR 5739 [60].

6.2.2. Absorção após imersão e fervura e índice de vazios

O ensaio tem o intuito de verificar a influência do aditivo na porosidade acessível à água da matriz. Este foi realizado com 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a idade de 28 dias, seguindo a ABNT NBR 9778 [61].

Os corpos de prova foram imersos em água por 3 dias e sua massa saturada foi determinada. Então, foram secos a 60 °C por 3 dias e sua massa seca foi medida. A absorção de água foi calculada pela diferença entre a massa saturada e seca, em valores percentuais em relação à massa seca.

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Resistência à compressão

A Tabela 12 resume os resultados médios de resistência à compressão dos concretos, com o desvio padrão e análise de variância “Anova” de cada medida. Observa-se clara influência do aditivo compensador de retração no aumento de resistência mecânica do concreto, em relação à referência. A amostra com 5% de aditivo apresentou maior resistência à compressão em todas as idades analisadas.

A partir da análise da Tabela 12, em relação à Anova, com uma confiabilidade de 95%, obteve-se o valor de “p” inferior a 0,05 (5%) para as amostras nas idades de ensaio de 1, 3 e 28 dias. Assim, observa-se que a diferença entre as amostras referência, com 3,0% de aditivo e com 5,0% de aditivo são estatisticamente significativas para as três idades de ensaio analisadas.

Tabela 12 - Resultados médios de resistência à compressão nas diferentes idades.

Amostra	f_{cm,1} (MPa)	f_{cm,3} (MPa)	f_{cm,28} (MPa)
Sem aditivo	11,9 ± 0,56	14,9 ± 0,15	18,1 ± 0,78
3,0% de aditivo	13,0 ± 0,40	18,7 ± 0,51	19,7 ± 0,64
5,0% de aditivo	14,0 ± 0,50	19,6 ± 0,35	20,9 ± 0,28
Anova	0,0057	0,0019	0,0306
p			

Concretos produzidos com o aditivo apresentaram maiores resistências à compressão que o concreto referência em todas as idades analisadas. Empregando 3% de aditivo, a resistência à compressão aumenta 9,2, 25,5 e 8,8% nas idades de 1, 3 e 28 dias, respectivamente. Concretos produzidos com 5% do aditivo apresentaram valores de resistência a compressão 17,7, 31,5 e 15,7% superiores ao concreto referência nas idades de 1, 3 e 28 dias, respectivamente.

Conforme observado nos resultados de calorimetria isotérmica, o aditivo compensador de retração contribui para acelerar a cinética de hidratação do cimento, o que é capaz de aumentar o preenchimento dos poros da matriz cimentícia. Assim, essa aceleração contribui para aumentar a velocidade de formação e precipitação de C-S-H na matriz. Com isso, o emprego do aditivo promove aumento na resistência à compressão do concreto.

6.3.2. Absorção após imersão e fervura e índice de vazios

Os resultados obtidos de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, para concretos na idade de 28 dias estão apresentados na Figura 17, com o desvio padrão de cada resultado. Concretos produzidos com 3% de aditivo apresentaram valores de absorção de água e índice de vazios 5,1 e 6,7% inferiores em relação à amostra sem aditivo. Empregando 5% do aditivo, a absorção de água e índice de vazios diminuíram 8,0 e 9,0%, respectivamente.

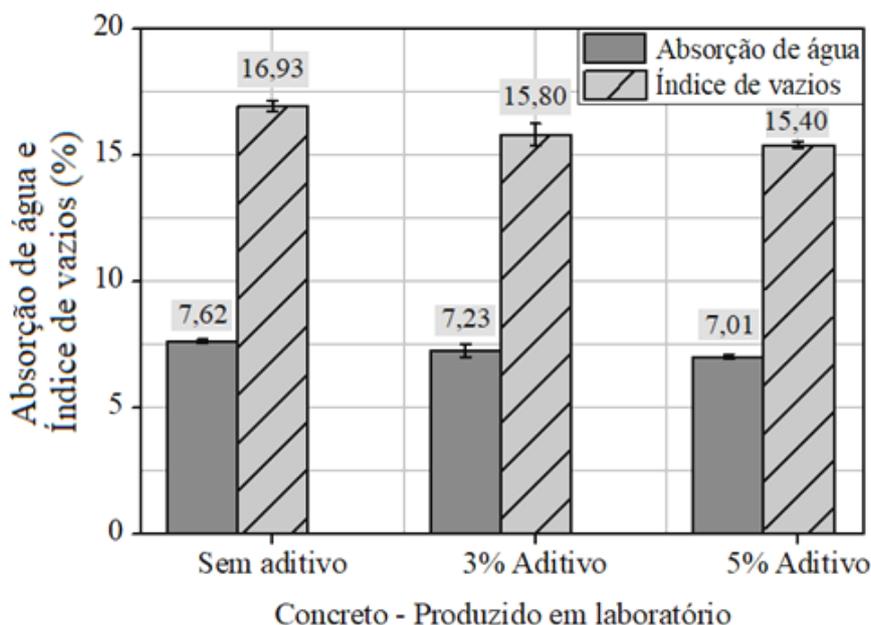


Figura 17 - Resultados médios de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, obtidos de amostras sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.

Os resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, estão de acordo com o observado nos resultados de calorimetria isotérmica e resistências à compressão, pois o uso do aditivo promove o preenchimento dos poros de elementos cimentícios.

6.4. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram analisadas amostras de concreto produzidas em laboratório para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água após imersão e fervura e índice de vazios. As amostras de concreto analisadas foram as contendo 3% e 5% de aditivo de óxido de cálcio supercalcinado, comparadas em relação à amostra sem aditivo.

Concretos produzidos com 3% de aditivo apresentaram ganho de resistência à compressão de 9,2, 25,5 e 8,8% nas idades de 1, 3 e 28 dias, respectivamente. A amostra com 5% de aditivo apresentou aumento de valores de resistência à compressão de 17,7, 31,5 e 15,7% nas idades de 1, 3 e 28 dias, respectivamente, em relação à amostra sem aditivo.

A análise “Anova” foi aplicada entre as amostras e comprovou a significância dos resultados para as três idades de ensaio analisadas.

Os resultados obtidos a partir do ensaio de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura apresentam valores menores para as amostras com o aditivo, em relação à amostra sem aditivo. Entretanto, os resultados obtidos não possuem diferença significativa entre as amostras analisadas, o que prejudica a análise da influência do aditivo nas propriedades físicas do concreto.

7. Produção de tubos de concreto

Neste capítulo, é apresentado o processo de produção de tubos de concreto com o objetivo de analisar a influência do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado nas propriedades físicas e mecânicas desses elementos. Os resultados do estudo compreendem tubos utilizados em redes de água pluviais e esgoto sanitário. Para tal, são analisados e discutidos os ensaios de compressão diametral e absorção de água por imersão e fervura.

7.1. Composição de tubos de concreto

Os materiais aplicados nessa parte da campanha experimental estão descritos na Tabela 2 e no item 3.1. A dosagem utilizada para a produção de tubos de concreto foi fornecida pela empresa Fermix Tubos para fabricar tubos tipo PA-2 com reforço de armadura metálica, conforme descrito na Tabela 11 e no item 6.1. Optou-se pela produção dessa categoria de tubos, pois são amplamente utilizados no Brasil.

Para a produção de tubos de concreto foram usadas as dosagens de amostras sem aditivo e com 3% e 5% de aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado. Assim, foram produzidas três misturas diferentes, conforme a amostra, com três tubos de concreto para cada amostra.

7.2. Descrição dos tubos

Os tubos de concreto produzidos nesse estudo tinham diâmetro nominal de 1000 mm, como ilustra a Figura 18. O diâmetro nominal de 1000 mm foi selecionado com o objetivo de facilitar o processo de produção, uma vez que a fábrica mantém o conjunto de peças e de armaduras disponíveis para este diâmetro devido sua ampla utilização. O volume estimado de cada tubo de concreto é de 0,5292 m³.

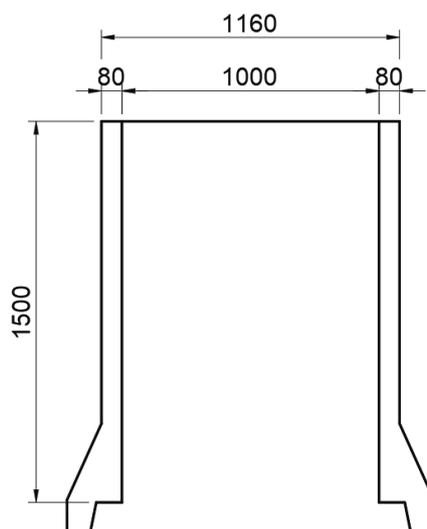


Figura 18 - Principais dimensões (em mm) de tubos de concreto PA2 produzidos.

Estudos com tubos de concreto com diâmetro nominal de 1000 mm são encontrados na bibliografia [3]. Os tubos são classificados como PA2, a partir da classe de resistência, destinados para atender o transporte de águas pluviais, conforme a norma ABNT NBR 8890 [9]. O reforço estrutural com armadura foi idêntico para todos os tubos produzidos, conforme o modelo padrão da fábrica para tubos PA2. A composição deste reforço foi determinada conforme a ABNT NBR 8890 [9].

Além disso, para manter o padrão de produção, os tubos foram moldados a partir do procedimento de produção da fábrica. Dessa forma, os materiais foram provenientes da mesma fonte, os tubos foram moldados no mesmo dia, de forma subsequente, e a partir dos mesmos equipamentos e mão de obra. Os materiais e dosagens empregados são conforme o descrito no item 6.1.

7.3. Processo de produção de tubos de concreto

Em primeiro lugar, o aço foi cortado e a armadura foi previamente montada na Fermix Tubos por uma equipe especializada. Posteriormente, a armadura foi fixada no interior do molde do tubo de concreto, com o auxílio de um anel, como mostra a Figura 19.a. Em seguida o conjunto (molde e armadura) foi transportado para o interior da máquina de vibro-compressão, com o auxílio do sistema de pontes rolantes, como apresenta a Figura 19.b.

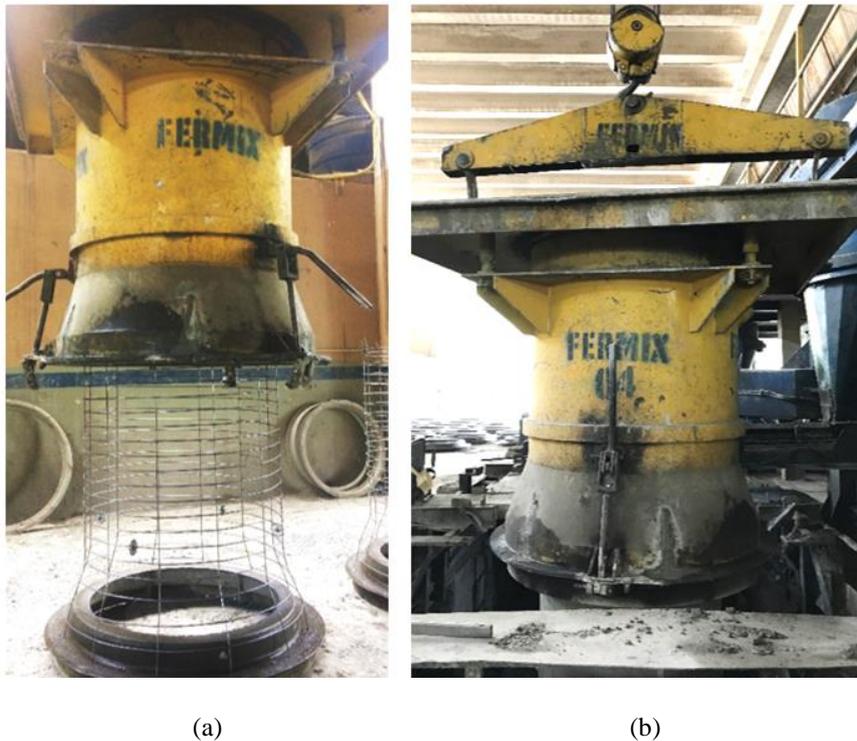


Figura 19 - Montagem do conjunto molde e armadura para fabricação de tubos de concreto: (a) fixação da armadura no molde; (b) transporte do conjunto para a máquina de vibro-compressão.

Após o posicionamento correto do molde, foi iniciada a produção de concreto. Para tal, foi utilizada a máquina disponível na fábrica do modelo VRF e marca Menegotti. A primeira etapa do processo automático de produção do concreto consiste no lançamento do cimento no misturador, como mostra a Figura 20.



Figura 20 - Lançamento do cimento no misturador para a produção do concreto para tubos.

A segunda etapa do processo consiste no lançamento de agregados no misturador a partir da esteira, como apresenta a Figura 21.a. O processo de mistura dos materiais foi de 150 s para a produção de 1 m³ de concreto. Previamente, o aditivo compensador de retração foi pesado manualmente, a partir de balança eletrônica portátil, e foi colocado no misturador por um operador no início da mistura, como mostra a Figura 21.b.



(a)

(b)

Figura 21 - Processo de produção do concreto para tubos: (a) transporte de agregados na esteira; (b) lançamento direto do aditivo no misturador.

Em seguida, o concreto foi lançado diretamente no equipamento de vibro-compressão a partir de esteiras automáticas, como apresenta a Figura 22.a. Por fim, o procedimento de compactação da ponta do tubo de concreto, após o preenchimento total do molde, foi realizado a partir de anel giratório. Após a compactação do concreto, o conjunto (tubo de concreto no interior do molde) foi imediatamente transportado para o piso para a retirada do molde, com o auxílio do sistema de pontes rolantes, como mostram as Figura 22.b e Figura 22.c.



(a)

(b)

(c)

Figura 22 - Processo de moldagem do tubo de concreto: (a) lançamento do concreto no molde metálico; (b) e (c) retirada do molde do tubo.

Observou-se que durante o processo de produção dos tubos com 3% de aditivo, a consistência do concreto desses tubos foi similar em relação aos tubos sem aditivo. Por outro lado, observou-se que o processo de produção dos tubos com 5% de aditivo apresentou um concreto mais consistente durante a moldagem, em relação ao tubo de referência.

Dessa forma, foi possível a moldagem de todos os tubos sem a adição de água em relação à dosagem prevista. O uso da mesma dosagem para todos os tubos permite comparar de forma efetiva o efeito do aditivo nas amostras em questão.

Após a retirada dos moldes, os tubos receberam acabamento final, realizado por um operador, com o uso de desempenadeira e broxa plásticas, como mostra a Figura 23.a. Assim, o tubo de concreto foi coberto com lona plástica por dois dias para evitar a perda de água, como mostra a Figura 23.b. Os tubos foram mantidos em local coberto e expostos ao ar até a realização dos ensaios.



Figura 23 - Produção de tubos de concreto: (a) acabamento final com auxílio de desempenadeira e (b) cobertura do tubo com lona plástica após o acabamento.

7.4. Métodos

7.4.1. Compressão diametral

A análise de compressão diametral permite determinar a influência do aditivo nas propriedades mecânicas dos tubos de concreto, de acordo com a ABNT NBR 8890 [9]. O ensaio de compressão diametral foi realizado na Fermix Tubos a partir do método de três cutelos com a máquina da marca Kratus e com célula de carga de 60 ton. A velocidade de aplicação de carga durante o ensaio foi igual a 20 kN/min, como recomenda a ABNT NBR 8890 [9].

Neste método de ensaio, o tubo de concreto foi apoiado em dois cutelos de madeira inferiores, separados em 20 cm, e um cutelo de madeira superior centralizado, acoplado ao equipamento articulado. O deslocamento vertical foi medido no ensaio conforme o deslocamento do pistão, como mostra a Figura 24.a e Figura 24.b.



(a)

(b)

Figura 24 - Ensaio de compressão diametral para tubo de concreto: (a) tubo posicionado na máquina de ensaio com painel de controle e (b) destaque para o apoio de três cutelos.

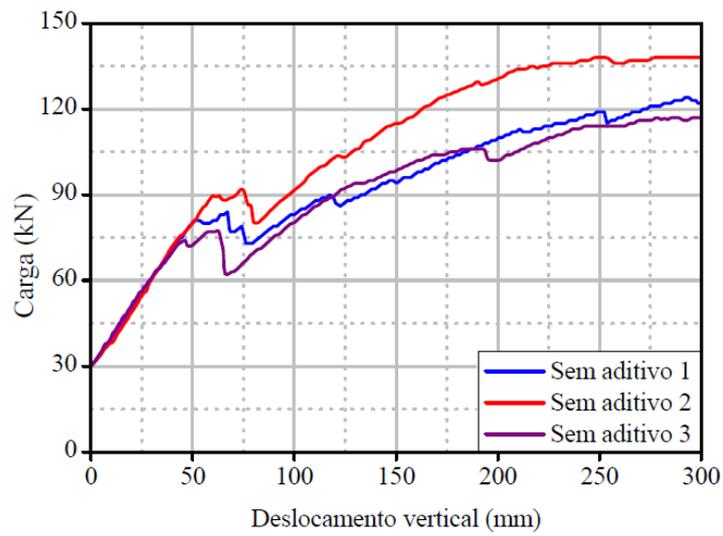
7.4.2. Absorção após imersão e fervura e índice de vazios

A influência do aditivo nos tubos de concreto foi determinada conforme a ABNT NBR 9778 [61]. Para tal, foram extraídos 3 testemunhos de cada conjunto de tubos de concreto, em torno de 1 kg cada, como determina a ABNT NBR 8890 [9]. Os corpos de prova foram analisados em relação à absorção de água e índice de vazios, após saturação e fervura, conforme descrito no item 6.2.2.

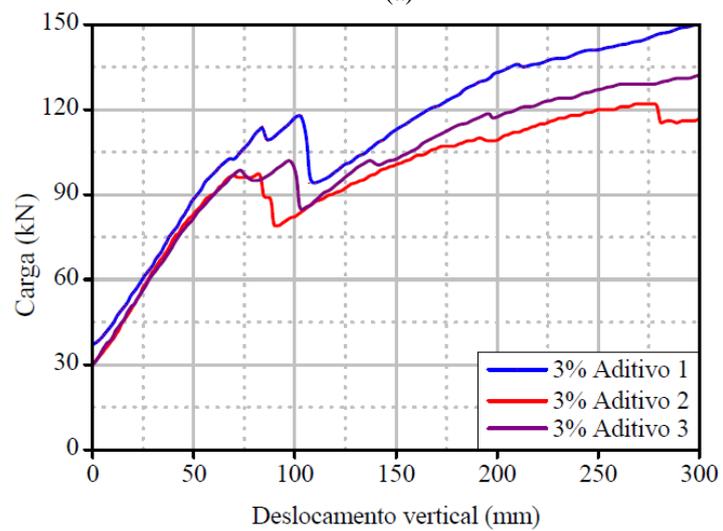
7.5. Resultados

7.5.1. Compressão diametral

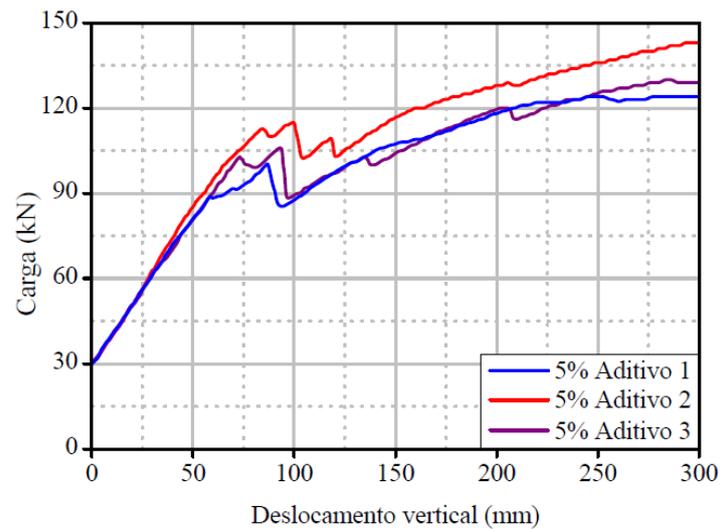
A Figura 25.a apresenta os resultados de compressão diametral individuais de três tubos de concreto para a amostra sem aditivo. Observa-se que os três tubos apresentaram comportamento diferente ao longo de todo deslocamento, principalmente os tubos “sem aditivo 2” e “sem aditivo 3”.



(a)



(b)



(c)

Figura 25 - Resultados de compressão diametral de três tubos de concreto: (a) amostra sem aditivo; (b) amostra com 3% de aditivo e (c) amostra com 5% de aditivo.

Além disso, nota-se na Figura 25.a que após a carga de pico, os tubos apresentaram redução na capacidade de resistência até o deslocamento de 75 mm, aproximadamente. Esse fato ocorre devido o posicionamento central da armadura metálica em relação à espessura do tubo, sendo necessário que ocorra um nível de abertura inicial de fissura para sollicitar a armadura [4].

A Figura 25.b mostra os resultados de compressão diametral individuais de três tubos de concreto para a amostra com 3% de aditivo. Nota-se que após a carga de pico os tubos apresentaram redução na capacidade de resistência até o deslocamento de 100 mm, aproximadamente. Assim, observa-se que a amostra com 3% de aditivo apresentou carga de pico para um deslocamento maior em relação à amostra sem aditivo.

A Figura 25.c apresenta os resultados de compressão diametral individuais de três tubos de concreto para a amostra com 5% de aditivo. Observa-se que após a carga de pico os tubos apresentaram redução na capacidade de resistência até o deslocamento, aproximadamente, de 100 mm. Assim, nota-se que a amostra com 5% de aditivo apresentou carga de pico para um deslocamento maior em relação à amostra sem aditivo.

A Figura 26 mostra as curvas típicas das amostras de tubo sem aditivo, com 3% e 5% de aditivo, conforme o ensaio de compressão diametral. A curva típica selecionada para cada amostra foi a respectiva curva que apresentou comportamento intermediário entre os três tubos ensaiados por amostra. Nota-se que as amostras de tubos com 3% de aditivo e 5% de aditivo apresentaram valores de carga maiores em relação ao tubo de concreto sem aditivo.

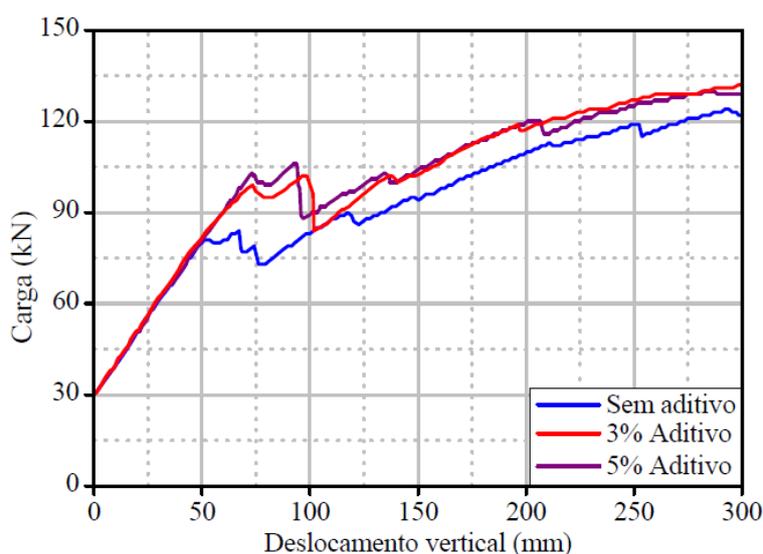


Figura 26 - Comparação de resultados de compressão diametral de três tubos de concreto entre as amostras sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.

Na Figura 26, observa-se que na região de deslocamento entre 50 e 100 mm a carga de pico foi maior para as amostras com aditivo com 3% e 5% de aditivo. Tal fato ocorre porque esta região do gráfico refere-se ao comportamento do concreto pós-fissuração que foi alterado entre as amostras a partir do uso de aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado [4].

A Tabela 13 apresenta os valores de cargas de fissura obtidos a partir do ensaio de compressão diametral para cada amostra. Observa-se que os tubos de concretos com 3% e 5% de aditivo apresentaram crescimento de valores máximos de cargas de fissura, respectivamente, de 29,3 e 26,0% em relação ao concreto sem aditivo. Além disso, os tubos de concreto com 3% e 5% de aditivo apresentaram valores superiores de cargas de fissura em relação ao valor mínimo de 60 kN/m, estabelecido na ABNT NBR 8890 [9] para o tipo de tubo em questão.

Tabela 13 - Resultados de carga de fissura a partir do ensaio de compressão diametral.

Amostra de tubo	Carga de fissura (kN/m)	Carga de fissura máxima (kN/m)	Valor médio (kN/m) (Desvio Padrão)	Coefficiente de variação (%)
Sem aditivo	51,3	59,3	55,1 (4,02)	7,29
	54,7			
	59,3			
3% aditivo	66,0	76,7	69,6 (6,15)	8,85
	76,7			
	66,0			
5% aditivo	68,1	74,7	70,2 (3,85)	5,48
	74,7			
	68,0			

A Tabela 14 mostra os valores de cargas de ruptura obtidos no ensaio de compressão diametral para cada amostra. Nota-se que os concretos com 3% e 5% de aditivo apresentaram, respectivamente, valores máximos de cargas de ruptura maiores de 13,8 e 5,8% em relação ao concreto sem aditivo. Ainda, as três amostras apresentaram apenas um resultado de cada tubo ensaiado que apresentou carga de ruptura maior que o limite de 90 kN/m estabelecido na ABNT NBR 8890 [9].

Tabela 14 - Resultados de carga de ruptura a partir do ensaio de compressão diametral.

Amostra de tubo	Carga de ruptura (kN/m)	Carga de ruptura máxima (kN/m)	Valor médio (kN/m) (Desvio Padrão)	Coefficiente de variação (%)
Sem aditivo	80,7	92,0	85,8 (5,75)	6,71
	84,7			
	92,0			
3% aditivo	88,7	104,7	91,6 (11,93)	13,03
	104,7			
	81,3			
5% aditivo	87,3	97,3	89,1 (7,49)	8,41
	97,3			
	82,7			

Conforme a bibliografia [3,4], nota-se que o ensaio de compressão diametral pode apresentar coeficientes de variação consideráveis entre os corpos de prova da mesma amostra, como observado em estudos de tubos de concreto reforçados com armaduras e fibras metálicas.

Em síntese, tubos de concreto com o aditivo apresentaram maiores resistências às cargas de fissura e de ruptura no ensaio de compressão diametral, em relação aos tubos sem aditivo. Tal fato, é observado principalmente nos resultados de carga de fissura e na respectiva região do gráfico, pois esses valores estão relacionados ao desempenho do concreto sem influência da armadura.

Assim como observado nos concretos produzidos em laboratório, o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado gerou aumento de resistência nos tubos de concreto. Tal fato, contribui para preencher os poros da matriz cimentícia e promove o aumento da velocidade de formação e precipitação de C-S-H na matriz. Com isso, é possível concluir que o emprego do aditivo promove aumento de resistência do concreto.

7.5.2. Absorção após imersão e fervura e índice de vazios

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, para corpos de provas preparados a partir de testemunhos extraídos de tubos de concreto, estão apresentados na Figura 27. Concretos produzidos com 3% de aditivo apresentaram valores menores de absorção de água e índice de vazios de 0,68 e 0,76%, respectivamente, em relação à amostra sem aditivo. O emprego de 5% do aditivo em tubos resultou na diminuição da absorção de água e índice de vazios de 8,18 e 7,18%, respectivamente.

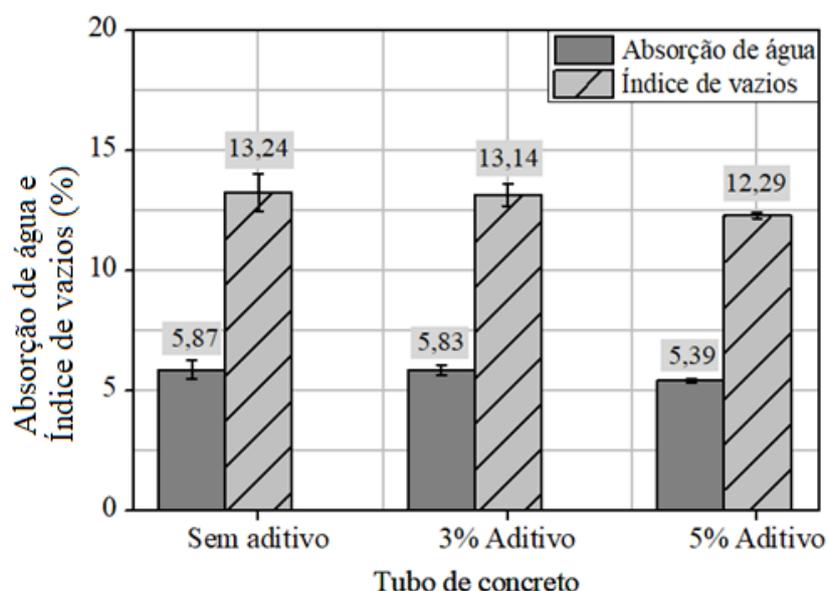


Figura 27 - Resultados médios de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, de amostras de tubos de concreto sem aditivo, com 3% de aditivo e 5% de aditivo.

Nota-se que as amostras extraídas dos tubos com aditivo apresentaram menor absorção de água e índice de vazios em relação a amostra sem aditivo. Também, a diminuição da absorção de água e índice de vazios, gerada pelo uso do aditivo, foi observada nos concretos produzidos em laboratório, uma vez que a aplicação do aditivo promove o preenchimento dos poros de matrizes cimentícias. Assim, os resultados do ensaio estão conforme o observado nos resultados de calorimetria isotérmica e os ensaios realizados nos concretos produzidos em laboratório.

Todavia, estes resultados não apresentaram diferença expressiva, o que dificulta a análise da influência do aditivo nesta propriedade. Todas as amostras estão conforme o limite de absorção de 8% determinado pela ABNT NBR 8890 [9].

7.6. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram avaliados os tubos de concreto produzidos com a amostra sem aditivo e as amostras com 3% e 5% de aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado. O estudo analisou três resultados do ensaio de compressão diametral por amostra. A partir dessas amostras foram extraídos corpos de prova para realizar o ensaio de absorção após imersão e fervura e índice de vazios. Os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral apresentaram comportamento similar ao longo de todo deslocamento para cada amostra.

A partir dos resultados gráficos do ensaio de compressão diametral, observa-se que após a carga de pico, as amostras sem aditivo apresentaram redução na capacidade de resistência até o deslocamento, aproximadamente, de 75 mm. Por outro lado, as amostras com 3% e 5% de aditivo apresentaram redução na capacidade de resistência até o deslocamento, aproximadamente, de 100 mm. Assim, nota-se que as amostras com aditivo apresentaram carga de pico para um deslocamento maior em relação à amostra sem aditivo.

Além disso, nos resultados gráficos do ensaio nota-se na região de deslocamento entre 50 e 100 mm que a carga de pico foi significativamente maior para as amostras com aditivo com 3% e 5% de aditivo em relação à amostra referência. Esta região do gráfico refere-se ao comportamento de pós-fissuração do concreto, o que mostra a influência do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado no comportamento de tubos de concreto [4].

A partir dos valores obtidos no ensaio de compressão diametral nota-se que as amostras com 3% e 5% de aditivo apresentaram valores máximos de cargas de fissura maiores, respectivamente em relação ao concreto sem aditivo, de 29,3 e 26,0%. Ademais, as amostras com o aditivo possuem valores superiores de cargas de fissura, conforme determina a ABNT NBR 8890 [9] para tubos PA2.

Em relação aos resultados obtidos a partir dos ensaios de absorção de água e índice de vazios, por imersão e fervura, nota-se que as amostras com aditivo apresentaram valores menores em relação à amostra sem aditivo. Contudo, os resultados obtidos no ensaio não apresentaram diferença relevante entre as amostras, o que impede a análise da influência do aditivo nas propriedades físicas de tubos de concreto.

8. Procedimento de fabricação, cura e utilização de tubos de concreto com óxido de cálcio supercalcinado

Para a produção de tubos de concreto, é fundamental selecionar materiais adequados, conforme ensaios de laboratório, para a caracterização dos materiais, e normas técnicas pertinentes. Dessa forma, com o desenvolvimento da tecnologia dos materiais, além da aplicação de materiais convencionais para a produção de concreto, são aplicadas adições e aditivos.

A norma ABNT NBR 11768-1 [17] determina a análise de requisitos gerais para aditivos usuais no Brasil. Desse modo, a norma relaciona a propriedade do aditivo com os respectivos métodos de ensaio e requisitos. Em relação ao aditivo composto por óxido de cálcio supercalcinado, é pertinente analisar as propriedades de homogeneidade do material e a uniformidade de sua cor. Ainda, os requisitos específicos para aditivos compensadores de retração são determinados na ABNT NBR 11768-1 [17], conforme a caracterização de aditivos com aspecto de pó.

É fundamental compor a amostragem de aditivos em pó. Para aditivos comercializados em recipientes, como tambores e contêineres, é necessário destacar nestes as respectivas identificações e informações do aditivo. Por outro lado, para aditivos comercializados a granel, é fundamental a transmissão das identificações e informações no momento do despacho.

Além disso, a norma ABNT NBR 8890 [9] determina que aditivos para concreto de tubos devem ser armazenados em locais apropriados. Assim, estes locais devem proteger os aditivos de intempéries, umidade e calor e é necessário respeitar o prazo de validade desses materiais.

Após a seleção dos materiais, é necessário realizar a dosagem do concreto. Para tal, são determinadas as proporções de materiais mais adequadas. Neste estudo, a dosagem de concreto aplicada foi a usual da fábrica para produção de tubos PA2. Vale ressaltar que o aditivo é adicionado, ou seja, não é necessária a substituição parcial sobre a massa de cimento ou agregado miúdo, o que facilita a dosagem de concreto.

Propõem-se que o estudo de dosagem contemple a umidade ótima do concreto com o aditivo. Desse modo, a partir da umidade ótima é possível obter a quantidade de água adequada para a consistência ideal do concreto, o que permite melhor desempenho do tubo. No estudo realizado a quantidade de água foi a mesma para todas as amostras, com o objetivo de comparar as amostras a partir da única variável de uso do aditivo.

Para a produção de tubos de concreto armado, é necessária a montagem prévia do reforço de aço, o que usualmente é produzido na própria fábrica de tubos, como mostra a Figura 28.a. Após a produção do reforço de aço é necessário posicioná-lo no interior do molde, o que possibilita o transporte do conjunto para o interior da máquina de vibração, conforme a Figura 28.b. Deve-se posicionar a armadura para que o seu cobrimento mínimo no tubo seja respeitado.



Figura 28 - Etapas prévias para a produção de tubos de concreto: (a) montagem do reforço de aço; (b) fixação do reforço de aço no molde.

No estudo em questão, foi realizada a produção de tubos de concreto PA2 com o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado. Para tal, o processo de produção do concreto foi realizado a partir da mistura automática dos materiais no misturador, conforme o padrão da fábrica. Durante a mistura do concreto o aditivo, anteriormente pesado de forma manual, foi colocado no misturador por um operador, como mostra a Figura 29.

Lançamento manual
do aditivo em pó no
misturador



Figura 29 - Lançamento manual do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado no misturador para a produção de tubos de concreto.

Contudo, para uma operação em larga escala este método de produção pode causar erros e atrasar o processo de produção, principalmente devido ao trabalho manual. Dessa forma, propõe-se que o aditivo seja armazenado e dosado de acordo com o procedimento usual do cimento aplicado na fabricação de tubos de concreto, uma vez que ambos os materiais possuem aspecto de pó.

É proposto na literatura que o cimento utilizado na produção de tubos de concreto deve ser armazenado em silos metálicos, a granel, o que facilita a dosagem por massa. Ainda, recomenda-se realizar a dosagem gravitacional, bem como posicionar o dosador gravitacional sobre o misturador, a fim de garantir a descarga integral dos materiais, conforme a Figura 30 [29].



Figura 30 - Silo de cimento gravitacional posicionado sobre o misturador para a fabricação de tubos de concreto.

No caso da impossibilidade de utilizar o misturador por gravidade, é recomendado aplicar transportadores helicoidais. Sobretudo, para plantas nas quais o silo de cimento está posicionado em nível diferente do misturador [29].

Em seguida a mistura do concreto, este é lançado diretamente no molde, previamente acoplado na máquina de vibração. O modo de lançamento depende do layout específico da fábrica, como é função do número de moldes que recebem o concreto e tipo de misturador. Este transporte entre a unidade dosadora e o local do sistema produtivo pode ser realizado por vagonetas, skip ou esteiras transportadoras. A partir da fabricação de tubos de concreto com aditivo observou-se que o transporte deste concreto até o molde deve ser realizado conforme o procedimento usual da fábrica, a partir do uso de esteiras rolantes, como mostra a Figura 31.



Figura 31 - Transporte do concreto do misturador para o molde na máquina de vibro-compressão, a partir do uso de esteiras rolantes.

Posteriormente a moldagem do tubo estes devem ser retirados da máquina e posicionados na área destinada para a cura, na posição vertical, como determina a ABNT NBR 8890 [9]. Após a cura os tubos devem ser transportados para a área de estocagem. Este processo não difere para os tubos produzidos com o aditivo.

A cura por proteção superficial é a cura inicial, usualmente aplicada para tubos de concreto. A partir da produção de tubos de concreto com o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado, produzidos neste estudo, observou-se que o procedimento convencional de cura pode ser aplicado para tubos com aditivo, conforme a Figura 32. Assim, o procedimento convencional de acabamento das superfícies internas e externas pode ser aplicado para os tubos produzidos com aditivo.



Figura 32 - Processo de cura de tubos de concreto com cobertura de lona plástica após o acabamento.

8.1. Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi analisado o procedimento de fabricação, cura e utilização de tubos de concreto com óxido de cálcio supercalcinado a partir de estudos e normas técnicas pertinentes, assim como as observações realizadas durante a produção de tubos de concreto com o aditivo na fábrica.

As normas ABNT NBR 11768-1 [17] e ABNT NBR 8890 [9] especificam diretrizes para a análise, amostragem e armazenamento de aditivos com aspecto de pó. Esses requisitos devem ser aplicados para o uso do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado para a produção de tubos de concreto.

A dosagem de concreto utilizada no estudo foi a usual da fábrica para produção de tubos PA2 para o concreto sem o aditivo. Para amostras com 3% e 5% de aditivo de óxido de cálcio supercalcinado a dosagem de concreto não sofreu alterações da quantidade de água ou substituição parcial de outros materiais.

Do mesmo modo, o reforço de aço foi o habitual da fábrica para produção de tubos PA2 para as amostras sem aditivo e com o aditivo. Com o conjunto do reforço de aço posicionado no molde no interior da máquina de vibração foi possível iniciar a mistura do concreto. A produção das amostras com o aditivo difere em relação a inclusão do aditivo de maneira manual. Para tal, o aditivo foi pesado em balança e colocado no misturador por um operador.

Incluir uma etapa manual no processo de produção de tubos pode ser inviável para uma operação em larga escala. Assim, propõe-se que o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado seja armazenado e dosado conforme o procedimento atual da fábrica aplicado para o cimento. Os demais processos de produção dos tubos, cura e armazenamentos não apresentaram diferenças para os tubos com o aditivo.

9. Conclusões

A massa específica do aditivo de óxido de cálcio supercalcinado está de acordo com estudos anteriores [6] e conforme os parâmetros da ABNT NBR 11768-1 [17]. O aditivo apresentou composição mineralógica conforme as diretrizes da ABNT NBR 11768-1 [17].

A inclusão do aditivo em pasta cimentícia acelera a cinética de reações de hidratação do cimento, uma vez que o aditivo é capaz de gerar aumento da concentração do íon Ca^{2+} que acelera o período de indução.

O aditivo não alterou de forma expressiva a composição mineralógica de pastas cimentícias. Contudo, observou-se maior presença de hidróxido de cálcio e C-S-H nas amostras com o aditivo. A amostra com 5% de aditivo de óxido de cálcio supercalcinado foi caracterizada, conforme a determinação da ABNT NBR 11768-1 [17] para aditivos compensadores de retração tipo G.

Concretos produzidos em laboratório com o aditivo apresentaram aumento de resistência à compressão, conforme o observou-se o aumento da velocidade de formação e precipitação de C-S-H na matriz. Todavia, a análise das propriedades físicas de concretos não apresentaram diferenças expressivas.

O uso do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado influenciou as propriedades mecânicas de tubos de concreto, principalmente em relação à pós-fissuração. As amostras de tubo com o aditivo apresentaram incremento de resistência, sobretudo em relação à carga de fissura. A análise física de tubos apresentou resultados similares.

As observações durante o processo de fabricação de tubos de concreto com o aditivo de óxido de cálcio supercalcinado mostraram que o uso do aditivo alterou a etapa de mistura do concreto. Deste modo, com base na literatura, propõe-se a adequação da fábrica para armazenar e dosar o aditivo em pó, conforme a prática usual da indústria para o cimento. Esta adequação é capaz de tornar o processo eficiente em larga escala e com poucas alterações na planta e no processo da fábrica.

9.1. Aplicabilidade da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras

Os resultados obtidos nesse projeto de pesquisa não podem ser extrapolados para toda e qualquer aplicação de aditivos baseados em óxido de cálcio supercalcinado e nem para qualquer dosagem e reforço de tubo de concreto. Desse modo, estudos direcionados devem ser realizados para garantir a aplicação dos resultados em situações específicas.

Para a realização de estudos futuros que relacionam a aplicação do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado com concretos de consistência seca os seguintes temas são sugeridos:

- Comparação desses resultados com os obtidos por meio da produção de tubos de concreto de pequeno diâmetro sem o reforço de armadura.
- Produção de elementos de concreto com consistência seca a fim de avaliar o efeito do aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado na variação dimensional, como o procedimento da norma ASTM C 1581 [62].
- Comparação da durabilidade de tubos de concreto produzidos com e sem o aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

Comparação desses resultados com os obtidos por meio da produção de tubos de concreto com estudo em laboratório do teor ótimo de água para os concretos com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado.

10. Publicações

O projeto em questão resultou em uma publicação de artigo em congresso nacional e um depósito de pedido de patente, respectivamente, conforme as referências:

OLIVEIRA, C. U., POLIZEL M. M., SILVA, C. O., QUARCIONI, V. A., SALVADOR R. P. Aplicação de aditivos compensadores de retração em concretos de consistência seca, 62º Congresso Brasileiro do Concreto. Evento virtual, IBRACON, 2020.

OLIVEIRA, C. U., SILVA, C. O., V. A., SALVADOR R P., VANETTI, R., GIMENEZ, A. B. Produção de tubos de concreto com a adição de aditivo compensador de retração composto por óxido de cálcio supercalcinado. BR n. 20 2020 019004 6. Depositantes: SALVADOR R. P., CHIMICA EDILE DO BRASIL LTDA e FERMIX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Depósito: 23 set. 2020.

11. Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8890**: Tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [2] SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **24º Diagnóstico dos serviços de água e esgotos**, Ministério das Cidades, 2019.
- [3] R. C. Escariz. **Análise comparativa de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com macrofibras poliméricas e fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. <https://doi.org/10.11606/D.3.2011.tde-09042012-122504>.
- [4] R. Monte. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. <https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-18022016-124850>.
- [5] P. C. Aïtcin, R.J. Flatt. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. 1st ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00024-2>.
- [6] C. F. Rubio. **Desarrollo de materiales con retracción compensada a partir del óxido de calcio (CaO)**. Universidade Politécnica da Catalunha, Catalunha, 2017.
- [7] V. A. Quarcioni. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland: estudo em pasta**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [8] R. Bannoki. **Manual Técnico de Drenagem e Esgoto Sanitário**. 1º Edição, Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto, São Paulo, 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8890**: Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [10] P. Helene, T. Andrade. **Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3ª edição, São Paulo, 2017.
- [11] K. Mehta, P. Monteiro. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2008.

- [12] A. M. Neville. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição, Bookman, São Paulo, 2016.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [14] K. Scrivener, A. Bazzoni, B. Mota, J. Rossen. **A Pract Guid to Microstruct**. 1st ed., CRC Press, Boca Raton, 2015. p.351 - 418. <https://doi.org/doi:10.1201/b19074-9>.
- [15] N. Nunes, A. Figueredo. **Retração do concreto de cimento portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2007. p.59.
- [16] V. K. C. B. L. M. Balthar. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16834**: Concreto - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C157**: Standard test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete. Philadelphia, 2017.
- [20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C878**: Standard test method for restrained expansion of shrinkage-compensating, 2014.
- [21] H. Shi, Y. Zhao, W. Li. Effects of temperature on the hydration characteristics of free lime. **Cement and Concrete Research**, v. 32, 2002, p.789-793. <https://doi.org/10.1016/S0008-88460200714-7>.
- [22] E. d'Avignon. **Techniques et pratique de la chaux**, 2ª Edição, 2003.
- [23] R. P. Salvador, S. H. P. Cavalari, I. Segura, A. D. Figueiredo, J. Pérez. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. **Construction Build Materials**, v. 111, 2016, p.386–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.101>.
- [24] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 223R-10**. Guide for the use of shrinkage-compensating concrete, 2010.
- [25] R. Troli, M. Collepardi. **Shrinkage-compensating concretes for special structures**, 2008.
- [26] J. M.A. Netto. **Cronologia dos serviços de esgotos, com especial menção ao Brasil**. Departamentos de Águas e Esgotos, São Paulo, 33ª edição, 1959, p.15–19.

- [27] M. T. D. Chama Neto. **Histórico e Produção de Tubos. Manual Técnico de Drenagem e Esgoto Sanitário**, Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto, 2008.
- [28] C. E. M. Tucci. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. 1º edição, Ministério das Cidades, 2005.
- [29] A. D. Figueiredo, P. J. C. Neto. **Critérios de projeto e dimensionamento de tubos de concreto para esgotos sanitários**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [30] B. M. Toralles, et al.. Estudo comparativo de diferentes métodos de dosagem de concretos convencionais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. 10 ed., São Paulo, 2018, p.184-198.
- [31] B. F. Tutikian, P. Helene. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia - IBRACON**. 12 ed., São Paulo, 2011.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- [33] R. Snellings. X-ray powder diffraction applied to cement. **A Pract Guid to Microstruct. Cement Materials**, CRC Press, 2015, p. 107-176. <https://doi.org/doi:10.1201/b19074-5>.
- [34] A. G. de la Torre, M. A. G. Aranda. The superstructure of C3S from synchrotron and neutron powder diffraction and its role in quantitative analysis. **Cement and Concrete Research**, 32 ed., 2002. [https://doi.org/doi:10.1016/S0008-8846\(02\)00796-2](https://doi.org/doi:10.1016/S0008-8846(02)00796-2)
- [35] H. K. T. Tsurumi, Y. Hirano. **Crystal structure and hydration of belite**, 40 ed., 1994.
- [36] W. G. Mumme, R. J. Hill, G. Bushnell-Wye, E. R. Segnit. Rietveld crystal structure refinements, crystal chemistry and calculated powder diffraction data for the polymorphs of dicalcium silicate and related phases. **Journal Neues Jahrbuch fuer Mineralogie - Abhandlungen**. 169 ed., 1995, p.35-68. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [37] P. Mondal, J. W. Jeffery. **The crystal structure of tricalcium aluminate, Ca₃Al₂O₆**. 126 ed., 1975, p.1924. <https://doi.org/10.1107/S0567740875003639>
- [38] F. Nishi, Y. Takéuchi. The Al₆O₁₈ rings of tetrahedral in the structure of Ca_{8.5}NaAl₆O₁₈. **Acta Crystallographica Section B**, 31 ed., 1975, p.1169-1173. <https://doi.org/10.1107/S0567740875004736>
- [39] S. G. A. A. Colville. **The crystal structure of brownmillerite, Ca₂FeAlO₅**. 27 ed., 1971, p.2315. <https://doi.org/10.1107/S056774087100579X>

- [40] A. G. de la Torre. **Structure and microstructure of gypsum and its relevance to Rietveld quantitative phase analyses**. 19 ed., 2004.
- [41] H. Weiss, M. F. Bräu. Hemihydrate - How much water does calcined gypsum contain. **Angew. Chem. Int.**, 48 ed., 2009, p.3520-3524.
- [42] R.. Hawthorne, F.C. Ferguson. Anhydrous Sulfates II. Refinement of the Crystal Structure of Anhydrite, **Can. Mineral**, 13 ed., 1975, 289-292.
- [43] R. Wartchow. **Datensammlung nach der “learnt profile”-methode(LP) für calcit und vergleich mit der “background peak background”-methode (BPB)**. 186 ed., 1989.
- [44] H. Effenberger, A. Kirfel, G. Will. Dolomite - Studies of the electron density distribution of dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. **Miner. Pet.**, 31 ed., 1983, p.151-164.
- [45] Q. Huang, O. Chmaissem, J. J. Capponi, C. Chaillout, M. Marezio, J. L. Tholence, A. Santoro. **Lime - Neutron powder diffraction study of the crystal structure of $\text{HgBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{12+6}$ at room temperature and at 10 K**. **Phys. C**. 227, 1994, p.1-9.
- [46] H.E. Petch. The hydrogen positions in portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, as indicated by the electron distribution. **Acta Cryst**, 14 ed., 1961, p.950-957.
- [47] F. Goetz-Neunhoeffler, J. Neubauer. Refined ettringite structure for quantitative X-ray diffraction analysis. **Powder Diffraction**, 21 ed., 2006, p.4-11.
- [48] R. Allmann. Die Doppelschichtstruktur der plaettchenfoermigen Calcium-Aluminium-H Salze am Beispiel des $(\text{CaO})_3.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_{12}$. **Neues Jahrbuch fuer Mineralogie**, 4 ed., 2012.
- [49] T. Runcevski, R. E. Dinnebier, O. V. Magdysyuk, H. Poellmann. Crystal structures of calcium hemicarboaluminate and carbonated calcium hemicarboaluminate from synchrotron powder diffraction data. **Acta Crystallographica**, Section B: Structural Science, 68 ed., 2012, p. 493-500.
- [50] M. François, G. Renaudin, O. Evrard, A cementitious compound with composition $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaCO}_3.11\text{H}_2\text{O}$. **Acta Crystallographica**, Section C: Crystal Structure Communications 54 ed., 1998, p.1214-1217.
- [51] E. N. Maslen, V. A. Streltsov, N. R. Streltsova, N. Ishizawa, Y. Satow. Synchrotron X-ray study of the electron density in alpha- Al_2O_3 . **Acta Crystallographica**, Section B, 49 ed., 1993, p.973–980. doi:10.1107/S0108768193006901.

- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [54] R. P. Salvador, D. A. S. Rambo, R. M. Bueno, K. T. Silva, A. D. de Figueiredo. On the use of blast-furnace slag in sprayed concrete applications. **Construction Build Materials**, 218 ed., 2019, 543-555 ed.. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.132>.
- [55] M. H. Maciel, G. S. Soares, R. C. O. Romano, M. A. Cincotto. Monitoring of Portland cement chemical reaction and quantification of the hydrated products by XRD and TG in function of the stoppage hydration technique. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, J. 136, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7734-5>.
- [56] R. P. Salvador, S. H. Cavalaro, M. Cincotto, A. D. Figueiredo. Parameters controlling early age hydration of cement pastes containing accelerators for sprayed concrete. **Cement and Concrete Research**, J. 89, 2016, p.230-248. <https://doi.org/10.1016>.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16834**: Concreto - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [60] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [61] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [62] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1581/C1581M - 09a**: Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage. Philadelphia, 2009.