

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

PEDRO LUCAS PRUNUNCIATI

**VIABILIDADE DA ESTIMATIVA DE VAZÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL POR MEIO DE CORRELAÇÕES COM
PARÂMETROS DO ENSAIO DE ESPALHAMENTO**

SOROCABA/SP

2023

PEDRO LUCAS PRUNUNCIATI

**VIABILIDADE DA ESTIMATIVA DE VAZÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL POR MEIO DE CORRELAÇÕES COM
PARÂMETROS DO ENSAIO DE ESPALHAMENTO**

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Ciência e
Tecnologia de Materiais da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Steven Frederick Durrant
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Henrique Geraldo

SOROCABA/SP

2023

P972v

Prununciati, Pedro Lucas

Viabilidade da estimativa de vazão de concreto
autoadensável por meio de correlações com parâmetros do
ensaio de espalhamento / Pedro Lucas Prununciati. --
Sorocaba, 2023
89 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Steven Frederick Durrant
Coorientador: Rodrigo Henrique Geraldo

1. Materiais de construção. 2. Concreto. 3. Reologia. I.

Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PEDRO LUCAS PRUNUNCIATI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 31 dias do mês de janeiro do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PEDRO LUCAS PRUNUNCIATI, intitulada **"Viabilidade da estimativa de vazão de concreto autoadensável por meio de correlações com parâmetros do ensaio de espalhamento"**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. STEVEN FREDERICK DURRANT (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / ICT - Unesp Sorocaba, Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO DE MILITO (Participação Virtual) do(a) Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS), Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sorocaba Unesp. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. STEVEN FREDERICK DURRANT

Dedico esse trabalho ao meu pai, Augusto, pelo apoio e incentivo durante jornada e por me ajudar a desenvolver os ensaios durante os momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me mostrar o caminho e por estar sempre presente durante essa jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais “POSMAT”, pela oportunidade de realizar o mestrado.

Aos meus pais, Augusto e Salete, pelo apoio, incentivo e pelos conselhos.

Ao meu irmão, Guilherme, grande companheiro, pelo incentivo incessante a buscar sempre o melhor.

Ao Prof. Dr. Steven F. Durrant, por aceitar o desafio dessa orientação, por compartilhar seus conhecimentos acadêmicos na área de física, e por estar sempre à disposição para contribuir no desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Rodrigo H. Geraldo, por estar à disposição como coorientador, por compartilhar seus conhecimentos na área de concreto e ajudar, contribuindo de forma positiva para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos João e Geraldo, pelo incentivo de seguir em frente e continuar com o desenvolvimento da ideia desse trabalho.

Ao Lemat da Facens, pela execução de ensaios de caracterização dos materiais e resistência à compressão axial do concreto e por fornecer os equipamentos para o ensaio de espalhamento.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para o desenvolvimento e realização desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Para tentar contribuir com o desenvolvimento do controle de volume de concreto entregue na obra, o presente trabalho mostra um estudo inicial para verificar a possibilidade de medição de vazão (e consequentemente o volume, considerando que o tempo de vazão pode ser medido) de concretos autoadensáveis que escoam dentro de um tubo de volume conhecido, a partir da correlação entre a velocidade média de espalhamento (obtida por meio dos ensaios de espalhamento) e a velocidade de escoamento, obtida pelo ensaio de vazão sugerido. Para tal, quatro traços-base foram desenvolvidos (nomeados I a IV) e quatro combinações de aditivos superplastificantes e modificador de viscosidade foram aplicadas em cada um deles (resultando em dezesseis “situações”, nomeadas “S1” a “S16”). Os resultados revelaram dezesseis traços estáveis, sendo oito classificados como SF1 e oito como SF2 (de acordo com a NBR 15823-1). Após as correlações da velocidade de espalhamento com a velocidade de vazão, foi possível desenvolver quatro cenários para mensurar a vazão: o primeiro, utiliza a classificação de espalhamento SF1 e SF2 e a velocidade média de espalhamento medida até a marca de 500 mm. Essa combinação resultou uma equação capaz de estimar uma relação média de 1,00 entre a vazão estimada/vazão ensaiada dos traços, com desvio padrão de 0,15. No segundo cenário, em que a classificação de espalhamento da norma não foi considerada (e a velocidade média de espalhamento medida até a marca de 500 mm), a relação média foi de 1,01 e o desvio padrão de 0,23. No terceiro cenário (que considera a classificação de espalhamento da norma) e no quarto (que não separa os traços pela classificação de espalhamento), a velocidade média de espalhamento está vinculada ao diâmetro final que o concreto atinge no término do ensaio. Nesses cenários, a relação média entre a vazão estimada/ vazão ensaiada dos traços foi de 1,00 e 1,01, respectivamente, com desvio padrão de 0,17 e 0,25.

Palavras-chave: concreto autoadensável, reologia, vazão de concreto.

ABSTRACT

Attempting to control the delivered volume of concrete on construction sites, the present work shows an initial study to verify the possibility to measure self-compacting concrete flow rates (and consequently the volume, considering that the flow time can be measured) inside a tube of known volume, by correlating the spreading diameter average speed (obtained from slump cone tests) and average flow speed, obtained by the abovementioned flow rate test. To do this, four standard-mixtures were developed (named I to IV) and four combinations of superplasticizer and viscosity modifier admixtures were applied to each (resulting in sixteen “situations”, named “S1” to “S16”). The results revealed sixteen stable mixtures, eight classified as SF1 and eight as SF2 (according to NBR 15823-1). From the average speed of the spreading diameter and flow rate average speed correlations, it was possible to develop four scenarios to determine the flow rate: the first uses the SF1 and SF2 spreading classifications and the average spreading diameter speed, determined when the concrete reached the 500 mm mark. This combination resulted in an equation capable of estimating one average relation between the estimated flow rate/tested flow rate of 1.00, with a standard deviation of 0.15. The second scenario, in which the spreading classifications were not considered (and the average spreading diameter speed was determined when the concrete reached the 500 mm mark), the average relation was 1.01 with a 0.23 standard deviation. For the third scenario (which considers the spreading classifications) and the fourth (which does not separate the mixtures by the spreading classifications), the average speed of the spreading diameter is related to the final diameter that the concrete reached at the end of the test. For these scenarios, the average relations between the estimated flow rate/tested flow rate were 1.00 and 1.01, respectively, and the standard deviation were 0.17 and 0.25.

Keywords: self-compacting concrete, rheology, concrete flow.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	12
2 - OBJETIVOS	14
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 - O concreto	16
3.1.1 - Cimento Portland	18
3.1.2 - Agregado miúdo	19
3.1.3 - Agregado graúdo	19
3.1.4 - Mistura	20
3.2 - Tecnologia para concretos	22
3.2.1 - Sílica ativa.....	23
3.2.2 - Modificador de viscosidade	24
3.2.3 - Superplastificante.....	25
3.3 - Reologia do concreto.....	26
3.3.1 - Concreto no estado fresco e suas propriedades.....	28
3.4 - Controle de qualidade.....	28
3.4.1 - Ensaio resistência à compressão axial	29
3.4.2 - Ensaio de espalhamento.....	31
4 - Hipótese proposta.....	35
4.1 - Velocidade média de espalhamento.....	35
4.2 - Velocidade média de vazão.....	37
5 - MATERIAIS E MÉTODOS	39
5.1 - Caracterização dos materiais	39
5.1.1 - Cimento Portland	39
5.1.2 - Sílica ativa.....	39
5.1.3 - Água.....	40
5.1.4 - Areia (agregado miúdo).....	41
5.1.5 - Brita (agregado graúdo)	42
5.1.6 - Aditivo Modificador de Viscosidade.....	43
5.1.7 - Aditivo Superplastificante	43
5.2 - Produção dos concretos	44

5.3 - Determinação dos traços de concreto	45
5.3.1 - Composição dos traços.....	46
5.4 - Métodos.....	46
5.4.1 - Ensaio de espalhamento modificado	46
5.4.2 - Ensaio de vazão.....	48
5.4.3 - Construção do equipamento de medição de vazão	48
5.4.4 - Execução do ensaio de vazão	53
5.4.5 - Moldagem dos corpos de prova	55
5.4.6 - Apresentação dos dados	56
6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
6.1 - Cálculo das velocidades de espalhamento e de vazão	64
6.2 - Comparação entre velocidade de vazão e velocidade de espalhamento	66
7 - CONCLUSÕES.....	75
8 - REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A – DENSIDADE DOS TRAÇOS DE CONCRETO.....	84
APÊNDICE B – RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICAS À COMPRESSÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO	85
APÊNDICE C – REAPROVEITAMENTO DE MATERIAIS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Representação do interior da betoneira.....	20
Figura 3.2	Traço de concreto com e sem aditivo modificador de viscosidade.	25
Figura 3.3	Ação do aditivo superplastificante.....	26
Figura 3.4	Comportamento de um fluido Binghamiano e um Newtoniano.	27
Figura 3.5	Ensaio de resistência à compressão axial conforme NBR 5739.....	30
Figura 3.6	Cone de Abrams.	32
Figura 3.7	Ensaio de espalhamento.	33
Figura 4.1	Medição da velocidade média no ensaio de espalhamento.....	36
Figura 4.2	Medição da velocidade média no ensaio de vazão.	38
Figura 5.1	Curva granulométrica dos agregados miúdos empregados.....	41
Figura 5.2	Curva granulométrica do agregado graúdo empregado.	42
Figura 5.3	Ensaio de espalhamento modificado.	47
Figura 5.4	Projeto do equipamento para ensaio.	49
Figura 5.5	Tubo para ensaio de vazão.	50
Figura 5.6	Vista Superior do equipamento sem o tubo de PVC para ensaio.	51
Figura 5.7	Vista superior do equipamento com o tubo acoplado.	51
Figura 5.8	Modelo de tubo para ensaio de vazão.....	52
Figura 5.9	Perspectiva do equipamento acoplado à estrutura de suporte.	53
Figura 5.10	Esquema de execução do ensaio de vazão.	54
Figura 6.1	Espalhamento traço-base I.	60
Figura 6.2	Espalhamento traço-base II.	61
Figura 6.3	Espalhamento traço-base III.	62
Figura 6.4	Espalhamento traço-base IV.....	63
Figura 6.5	Velocidade de espalhamento V_{500} SF1 x velocidade de vazão.	67
Figura 6.6	Velocidade de espalhamento V_{500} SF2 x velocidade de vazão.	67
Figura 6.7	Velocidade de espalhamento V_{500} x velocidade de vazão.	68
Figura 6.8	Velocidade de espalhamento V_{total} SF1 x velocidade de vazão.....	68
Figura 6.9	Velocidade de espalhamento V_{total} SF2 x velocidade de vazão.....	69
Figura 6.10	Velocidade de espalhamento V_{total} x velocidade de vazão.	69
Figura C1	Placas de piso não estruturais moldadas com sobras de concreto.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Idade para ensaio dos corpos de prova.	30
Tabela 3.2 Fator de correção altura/diâmetro.	31
Tabela 5.1 Propriedades físicas do cimento Portland e sílica ativa empregados.....	40
Tabela 5.2 Composição química cimento Portland e da sílica ativa empregados.....	40
Tabela 5.3 Características físicas dos agregados miúdos empregados.	41
Tabela 5.4 Características físicas do agregado graúdo empregado.	42
Tabela 5.5 Dados técnicos do aditivo Centrament Stabi 520.....	43
Tabela 5.6 Dados técnicos do aditivo MC-PowerFlow 4001.	43
Tabela 6.1 Proporção e quantidade de materiais Traço-base I.....	57
Tabela 6.2 Proporção e quantidade de materiais Traço-base II.....	57
Tabela 6.3 Proporção e quantidade de materiais Traço-base III.....	58
Tabela 6.4 Proporção e quantidade de materiais Traço-base IV.	58
Tabela 6.5 Densidade dos traços.....	58
Tabela 6.6 Espalhamentos dos traços ensaiados.....	59
Tabela 6.7 Tempo e velocidade média dos traços no ensaio de espalhamento.	65
Tabela 6.8 Tempo e velocidade de vazão no ensaio proposto.	65
Tabela 6.9 Vazões estimadas a partir dos cenários 1 e 2.....	70
Tabela 6.10 Vazões estimadas a partir dos cenários 3 e 4.....	71
Tabela 6.11 Comparação entre volume de concreto estimado no cenário 1 e ensaio.....	72
Tabela 6.12 Comparação entre volume de concreto estimado no cenário 3 e ensaio.....	73
Tabela A1 Densidade do concreto fresco nos corpos de prova (g/cm ³).....	84
Tabela B1 Dados Traço I	85
Tabela B2 Dados Traço II	86
Tabela B3 Dados Traço III	87
Tabela B4 Dados Traço IV	88

1 - INTRODUÇÃO

Na engenharia civil, é muito importante conhecer os materiais que serão utilizados para executar uma obra, uma vez que as suas propriedades influenciarão da estabilidade estrutural, além de interferir no conforto térmico e acústico, durabilidade e outras características de desempenho da edificação (ABNT, 2021).

No Brasil e em outros países o concreto é muito utilizado, sendo considerado o material de construção civil mais consumido no mundo (ABCP, 2013). Seu emprego se adapta a várias situações de trabalho, possuindo a característica de ser moldado em qualquer forma enquanto fresco, propriedade crucial para execução de obras com arquitetura complexa.

Devido ao uso em larga escala, faz-se necessário a utilização de métodos para o controle de qualidade do material em muitas de suas propriedades como resistência à compressão, padronizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018a), por exemplo, que oferece um melhor entendimento para a previsão de como será o desempenho no estado endurecido.

Existem três formas básicas para se produzir concretos: manualmente (com o uso de enxada ou colher de pedreiro), mecanicamente (com o uso de misturadores mecânicos, como betoneiras) e o dosado em central (ou usinado, que é produzido em centrais e entregue na obra no estado fresco para sua aplicação). Segundo Mascolo; Masuero & Dal Molin (2013), a maior parte do concreto utilizado nos grandes centros urbanos é produzido em centrais dosadoras.

Para o controle de quantidade do concreto usinado, buscam-se métodos para determinar o volume entregue pelos caminhões betoneira de maneira mais precisa, já que em muitos casos, especialmente em obras que não utilizam fôrmas para moldagem das peças, é difícil conferir o volume exato que será utilizado.

Dessa forma, podem surgir conflitos entre o cliente e a empresa fornecedora do concreto para descobrir se o erro está na quantidade solicitada ou na recebida.

Tratando-se de um material composto por “partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento)” (CASTRO; LIBORIO & PANDOLFELLI, 2011) abrasivo e de composição variável de acordo com as

necessidades de projeto, é muito difícil encontrar um dispositivo medidor de vazão capaz de manter a precisão suportando a adversidade do meio e ainda ser economicamente viável.

Nesse sentido, verifica-se a possibilidade de se correlacionar parâmetros indiretos que envolvam a reologia do concreto (como a velocidade de escoamento, por exemplo) obtidos através de ensaios de controle de qualidade realizados no canteiro de obra e a vazão do concreto para se obter um controle do volume de material que será entregue.

2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal verificar se é possível estimar os volumes de concretos autoadensáveis que escoam dentro de um tubo a partir da correlação entre a velocidade de escoamento, obtida pelo ensaio de vazão sugerido e a velocidade média de espalhamento (em traços padronizados entre 600 e 750 mm), obtida por meio dos ensaios de espalhamento, normatizados pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017b).

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando se fala em engenharia, vem à ideia de precisão, relacionando a manufatura de um produto, entregando-o de forma adequada para uso, de forma segura e confortável (ABNT, 2021) - além de ser economicamente viável - ou atrelada à execução de um serviço, cumprindo prazos, evitando o desperdício de materiais e mitigando a geração de resíduos.

Na engenharia civil, em um mercado competitivo em que a prioridade é evitar custos excessivos, a tarefa de quantificar corretamente os materiais que serão utilizados em dada situação pode ser um desafio para os engenheiros.

Na década de 90, Koskela (1992) falava sobre uma “nova filosofia de produção para construção” – ou “*lean construction*” (construção enxuta), conforme apontado por Li; Fang & Wu (2020) e Ribeiro *et. al.* (2020) -, baseada nos sistemas japoneses aplicados na fabricação de carros: “*Just-in-time*” e “*Total-Quality-Control*”. Segundo Mohsen; Naumets & Hamzeh (2022), a essência da filosofia “Lean” é eliminar todos os tipos de desperdícios (de material, mão-de-obra ou tempo, por exemplo), deficiências nos processos e quaisquer atividades que não agreguem valor ao que está sendo produzido.

Neste sentido, o controle do volume de concreto utilizado em obra é um tema ainda pouco estudado. Isso ocorre, possivelmente, à necessidade de se compreender as variantes da composição do concreto, juntamente ao efeito que esses parâmetros podem causar na mistura quanto à sua fluidez enquanto no estado fresco e como isso irá afetar a trabalhabilidade do material. Segundo Neville (2016), os fatores que podem influenciar na trabalhabilidade de um concreto são o teor de água na mistura e a granulometria, forma e textura dos agregados.

Romano; Cardoso & Pileggi (2011) relacionam a trabalhabilidade com a “adequação dos concretos a todas as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento” e consistência com a “facilidade de escoamento do material e com a coesão do mesmo”. Os autores ainda relacionam a reologia¹ do concreto diretamente à dosagem e mistura, impactando no transporte e na trabalhabilidade.

¹ Estudo da deformação e do fluxo (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008)

Sendo assim, compreender a reologia do concreto pode ser a chave para o entendimento de como ele escoar e, conseqüentemente, tornar possível medir sua vazão, independentemente da composição da mistura. Entretanto, a coleta de dados reológicos de forma direta é difícil porque os dispositivos de leitura para tais operações são muito sofisticados e relativamente caros, como é o caso dos reômetros (REIS, 2008). Porém, talvez seja possível determinar propriedades reológicas dos traços de concreto de forma indireta, como a classificação de viscosidade plástica aparente de concretos autoadensáveis, sugerida pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), por exemplo.

Ademais, implementar um sistema de medição de vazão de concreto pode ser interessante para melhorar o controle de produção do material, aperfeiçoar questões logísticas de transporte e lançamento, otimizar o uso de mão-de-obra e, assim, contribuir com o sistema de construção enxuta e evitar quaisquer desperdícios e deficiências que possam ser causados pela falta dessa ferramenta de controle.

3.1 - O concreto

O concreto é um material construtivo muito conhecido no meio técnico e amplamente utilizado. Conforme citado por Neville (2016), os materiais essenciais que compõem a mistura de concreto são o cimento Portland, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água. Conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022a), além dos componentes básicos, o concreto também pode conter a presença ou não de adições minerais e aditivos químicos.

Segundo Castro; Liborio & Pandolfelli (2011), o concreto pode ser definido como “uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) e um líquido viscoso (pasta de cimento)” que apresenta dois estados básicos: fresco e endurecido. Pode-se dizer que, quando endurecido, o concreto possui propriedades mecânicas e torna-se semelhante a rochas naturais (PEDROSO, 2009). O que o faz obter essas características é o cimento Portland, “deduz-se que ele é constituído principalmente de material calcário, como a rocha calcária ou giz e de alumina e sílica encontradas em argilas ou folhelhos” (NEVILLE, 2016). O material originado, quando combinado com a água, reage quimicamente e resulta em uma pasta que

endurecerá com o passar do tempo. Essa pasta envolve os agregados e, quando endurecida, desenvolve uma determinada resistência mecânica.

Quando em seu estado fresco, isto é, quando as reações decorrentes da hidratação do cimento Portland que ocasionam o seu endurecimento não estão concluídas, a mistura do concreto toma a forma de um composto plástico que pode ser moldado em formatos aleatórios de acordo com a necessidade do projeto (PEDROSO, 2009). O autor também cita que, no Brasil, 30 milhões de m³ de concreto saíam das centrais dosadoras.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) estima que em 2012 as concreteiras produzissem 51 milhões de m³ de concreto. O elevado uso coloca o concreto como o segundo material mais consumido no mundo (ABCP, 2013).

O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) indica que em 2008 foram consumidos no Brasil aproximadamente 51,5 milhões de toneladas de cimento Portland, dos quais 8,7 milhões foram destinadas a concreteiras (SNIC, 2008). Em 2012, o relatório aponta que das 69 milhões de toneladas consumidas no território nacional, 13,4 milhões foram para as centrais produtoras de concreto (SNIC, 2012).

A ABCP aponta que no ano de 2021 foram vendidas em torno 64,7 milhões de toneladas de cimento Portland no Brasil (ABCP, 2022), das quais, cerca de 11,5 milhões de toneladas foram destinadas a concreteiras (SNIC, 2021). Considerando os dados anteriores, sem levar em conta as variações no mercado e o avanço da tecnologia no setor para a substituição de cimento Portland na mistura, por simples interpolação linear pode-se dizer que em 2021 aproximadamente 42,5 milhões de m³ de concreto foram produzidos nas centrais brasileiras.

Uma importante observação é que esses dados se referem à produção de concreto somente das concreteiras, sem considerar o material produzido no canteiro de obras.

Mundialmente falando, Li (2012) aponta que a quantidade de concreto produzida para construções em 2012 girou em torno de 12 bilhões de toneladas. Li (2012) também cita a Danyang-Kunshan Grand Bridge na China, que hoje é considerada a maior ponte do mundo com 164 km de extensão, de acordo com o Guinness Book (2011), e o maior prédio do mundo, o Burj Khalifa Tower, com 828 m de altura de

acordo com o Guinness Book (2010), como exemplos de construções feitas com estruturas de concreto.

No Brasil, pode-se citar as usinas hidrelétricas de Itaipú e de Belo Monte, que utilizaram 12,7 milhões de m³ de concreto (ITAIPU BINACIONAL, 2023) e 3 milhões de m³ de concreto (UHE BELO MONTE – ENERGIA DO XINGU, 2021), como exemplos de construções com concreto.

O que se nota é que esse é um material versátil, que pode ser usado em diversos tipos de construção. Além disso, é capaz de colaborar com o desenvolvimento da sociedade, indiretamente, contribuindo com o direito de ir e vir, com a geração de energia e com a construção de obras de arte que se tornam pontos turísticos, por exemplo.

3.1.1 - Cimento Portland

Cimento Portland é o “aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante essa operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais” (ABNT, 2018b). O sulfato de cálcio, por sua vez, tem a função de regular o processo de pega (início da formação de cristais hidratados na pasta cimentícia).

Para padronizar os tipos de cimento Portland, dependendo da composição química e respectiva porcentagem de massa presente, a NBR 16697 (ABNT, 2018b) determina as seguintes nomenclaturas:

- Cimento CP-I: é produzido a partir da mistura de clínquer e sulfato de cálcio (gesso). Este pode apresentar até 5% de escória de alto-forno na mistura, material pozolânico ou material carbonático (na maioria, carbonato de cálcio) em sua composição. Pode também ser encontrado como CP-I S. Este pode ser composto por material carbonático na ordem de 6% a 10%.
- Cimento CP-II: cimento que possui a adição de escória de alto-forno, material pozolânico ou material carbonático em maiores quantidades em relação ao CP-I S. Vem com o nome de CP-II E, quando é adicionado escória de alto-forno na mistura (até 34% da composição),

CP-II Z, quando se adiciona material pozolânico (até 14% da composição) e CP-II F pela presença do material carbonático (de 11% a 25%);

- CP-III: Possui em sua composição escória de alto-forno, variando nas proporções entre 35% e 75%.
- CP-IV: possui em sua composição a presença de pozolana, variando nas proporções de 15% a 50%.
- CP-V ARI: Pode apresentar em sua composição, além do clínquer e do sulfato de cálcio, até 10% de material carbonático.

3.1.2 - Agregado miúdo

Conforme NBR 7211 (ABNT, 2022b), “o agregado miúdo é todo aquele cujo grão passa pela peneira de malha de 4,75 mm e fica retido na peneira de malha de 150 μ m”. A norma que regula o ensaio de granulometria é a NM 248 (AMN, 2001).

O agregado miúdo deve ser quimicamente inerte, de maneira a garantir que não desenvolva reações que possam comprometer as propriedades do concreto. Também deve ser composto por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos (ABNT, 2022b). Para mistura do concreto, é comum utilizar-se areia natural ou artificial como agregado miúdo.

3.1.3 - Agregado graúdo

O agregado graúdo (britas) é formado por fragmentos de rocha obtidos por meio de um processo de trituração denominado britagem. Assim como o agregado miúdo, o agregado graúdo deve ser composto por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis, limpos e inertes (ABNT, 2022b).

A NBR 7211 (ABNT, 2022b) define agregado graúdo como “aquele material em que os grãos que o compõem passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm”.

Um ponto importante a ser observado quanto à incorporação da brita à mistura do concreto diz respeito às dimensões do agregado que será utilizado, pois isso impactará diretamente no comportamento da peça que será moldada, bem como na

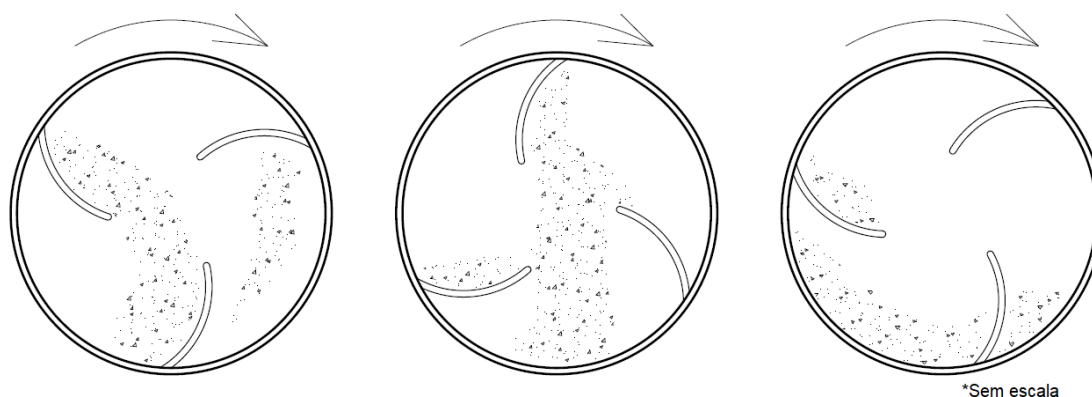
difficuldade de lançamento do concreto, dependendo da geometria da peça a ser preenchida.

3.1.4 - Mistura

Usualmente são três maneiras mais comuns de misturar concreto: manual (com o uso de enxada ou colher de pedreiro), mecânica (com o uso de uma betoneira) e o dosado em central ou em trânsito. De acordo com Mascolo; Masuero & Dal Molin (2013), o concreto dosado em central pode ser produzido em uma central e transportado até a obra com um caminhão agitador ou misturado durante o transporte em um caminhão betoneira.

A betoneira é uma espécie de tambor motorizado que gira em torno do próprio eixo e possui abas que auxiliam no processo de mistura, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Representação do interior da betoneira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, nos grandes centros urbanos, grande parte do concreto utilizado em obras vem de centrais dosadoras e é misturada durante o transporte no caminhão betoneira (MASCOLO; MASUERO & DAL MOLIN, 2013). Segundo os autores, a partir da industrialização da produção do concreto é possível racionalizar o processo de produção, reduzir os custos e aumentar a capacidade de produção, mantendo o desempenho e a qualidade exigida do concreto.

Uma possível vantagem de se misturar em trânsito sobre a mistura na central é que, neste último caso, o concreto que vem da central já sai pronto e, durante o transporte até a obra, as reações de endurecimento podem começar mesmo antes de o concreto ser entregue, e isso pode dificultar o manejo do material no canteiro de obras. Já o concreto misturado em trânsito apresenta a possibilidade de programar a adição de água gradualmente durante o trajeto até o canteiro de obra e assim, evitar que as reações aconteçam no percurso.

Embora não exista um padrão sobre a ordem em que os materiais devem ser adicionados (NEVILLE & BROOKS, 2010), em linhas gerais, a mistura do concreto deve garantir que os agregados estejam revestidos pela pasta de cimento (cimento + água). Nas primeiras horas, essa mistura é capaz de ser moldada em diversas formas geométricas e, após as reações da água com o cimento, começa a endurecer e adquirir resistência mecânica (HELENE & ANDRADE, 2010).

De acordo com Neville & Brooks (2010), os principais componentes do cimento Portland, dentre os responsáveis pelo endurecimento quando hidratados, são os Silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), também conhecido como alita (DE ANTONI, 2021), e o Silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), também conhecido como belita (DE ANTONI, 2021).

As reações de hidratação aproximadas desses componentes podem ser descritas da seguinte forma:

Para o Silicato tricálcico:



Para o Silicato dicálcico:



Antunes (2021) denomina os principais produtos das reações de hidratação do cimento como uma matriz de silicato dicálcico e tricálcico hidratadas e hidróxido de cálcio. Já Neville & Brooks (2010) denominam o resultado como um composto hidratado microcristalino, que também pode ser denominado como gel de tobermorita, e cal na forma cristalina.

3.2 - Tecnologia para concretos

Com o avanço da tecnologia no concreto, desenvolveram-se maneiras para incluir na mistura adições minerais e aditivos químicos “que fornecem uma variedade de propriedades e características especiais ao material” (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

Adições minerais são originárias de compostos que podem ser adicionados à mistura do concreto. Segundo Raisdorfer (2015), elas podem ser utilizadas como adição ou substituição parcial do cimento Portland, dependendo do efeito desejado. Quando incluída na mistura do concreto, espera-se que haja alterações nas reações químicas, visando adquirir alguma característica particular, como resistência à umidade, por exemplo, ou simplesmente utiliza-se uma adição mineral a fim de preencher os espaços vazios, resultando em uma mistura mais densa, por exemplo (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

A NBR 11768-1 (ABNT, 2019) define aditivo como “produto adicionado e misturado ao concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto”. Sua aplicação atua em propriedades como a trabalhabilidade, por exemplo (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009), que está diretamente relacionada ao manuseio do concreto, além de também oferecer a possibilidade de alterar as características da mistura conforme requisitos de projeto. Existem aditivos capazes de melhorar propriedades mecânicas, acelerar ou retardar o processo de pega, melhorar a trabalhabilidade, modificar a viscosidade (NEVILLE & BROOKS, 2010), entre outras características que podem ser exploradas de acordo com a necessidade especificada em projeto.

É uma tecnologia consagrada no mercado e que está em constante desenvolvimento e que podem trazer vantagens físicas e econômicas consideráveis para a produção de concreto (NEVILLE, 2016). O uso de adições minerais e aditivos químicos contribuíram para o que atualmente é conhecido como “concretos de alto desempenho” (CAD). Segundo Tutikian; Isaia & Helene (2011), o desempenho de um concreto está vinculado às propriedades de resistência mecânica, trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade, e durabilidade do material.

Um exemplo de CAD é o tipo autoadensável, que são materiais capazes de escoar devido somente ao seu peso próprio e serem adensados sem a necessidade de energia externa (vibração). Esse tipo de concreto é composto pelos materiais básicos da mistura (cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo e água) e aditivos plastificantes, superplastificantes ou modificadores de viscosidade (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008). De acordo com Khatib (2008), deve-se sempre utilizar aditivos químicos em concreto autoadensáveis para atingir melhores trabalhabilidades e evitar a segregação do material.

É importante ressaltar que o aumento desses aditivos para produção desse tipo de concreto não vai necessariamente resultar em melhores índices de fluidez. Cada traço tem sua capacidade de dosagem de aditivos e isso deve ser respeitado para garantir a homogeneidade durante as etapas de transporte, lançamento e execução (ABNT, 2017a). Usar aditivos em doses excedentes à capacidade do traço pode causar efeitos indesejáveis como perdas de abatimento rápidas e irreversíveis, grande retardamento de pega, segregação severa ou exsudação excessiva (PRINCE; EDWARDS-LAJNEF & AİTCIN, 2002).

3.2.1 - Sílica ativa

Um exemplo de adição mineral é a sílica ativa. A NBR 13956-1 (ABNT, 2012) classifica esse material como um tipo de pozolana com no mínimo 85% de dióxido de silício (SiO_2) em sua composição, sendo subproduto do processo de produção de silício metálico ou ligas de ferro-silício 75%. É formado por partículas esféricas de diâmetro menor que 1 micrômetro e que pode trazer vários benefícios para a mistura do concreto. Quando utilizado em proporções recomendadas, pode aumentar a resistência mecânica (compressão e flexão), a resistência ao ataque de sulfatos e o nível de impermeabilidade, por exemplo.

As adições minerais, de modo geral, possuem duas funções básicas quando utilizada em concretos: um que traz efeitos físicos e efeitos químicos (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

O efeito físico acontece uma vez que a adição mineral (incluindo a sílica ativa) é mais fina que o cimento. Ela entra na mistura com a função de preencher espaços vazios entre os outros componentes, desenvolvendo uma mistura mais compacta.

O efeito químico é oriundo da reação da adição mineral (incluindo a sílica ativa) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) produzido durante a hidratação do cimento. O produto dessas reações torna as fases químicas da mistura mais estáveis e com maior poder aglomerante (CARMO & PORTELLA, 2008).

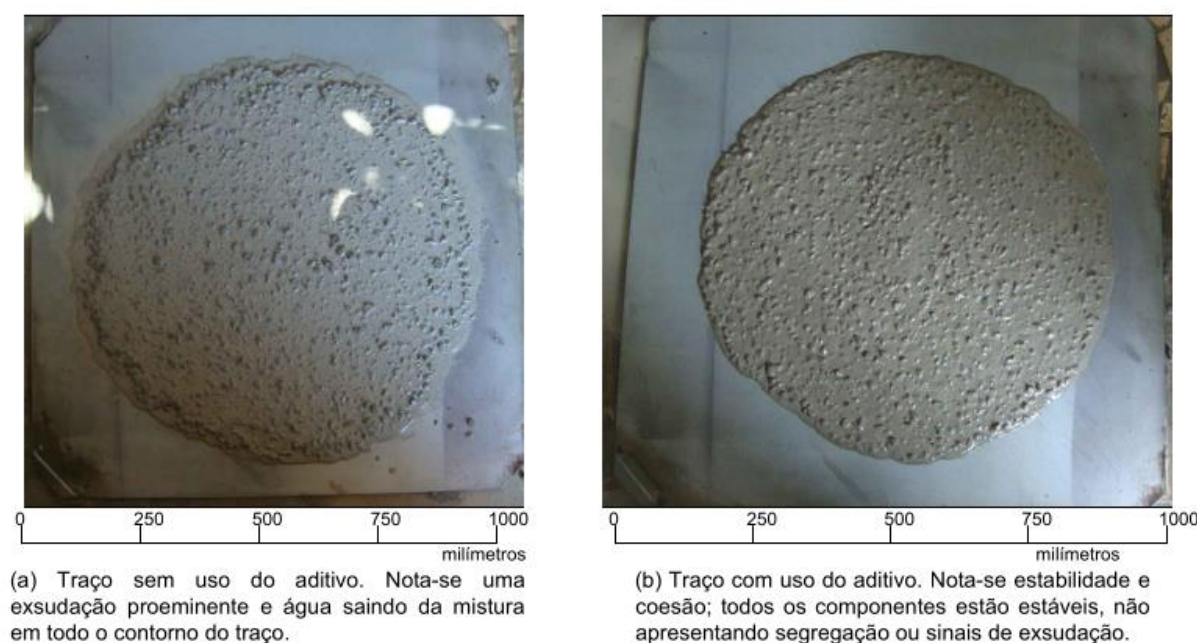
3.2.2 - Modificador de viscosidade

Segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019) os modificadores de viscosidade podem ser classificados em dois tipos: “retentores de água”, que diminui o efeito de exsudação e “antisegregante”, que reduz a segregação.

Trata-se de “polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica que tem como função tornar a mistura de concreto mais coeso no estado fresco” (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008). Em outras palavras, ele altera a viscosidade a fim de manter os componentes estáveis e dentro da mistura, evitando efeitos de exsudação e segregação. A Figura 3.2 demonstra os efeitos do uso do aditivo modificador de viscosidade na mistura.

Segundo Garcia (2021), os materiais finos são responsáveis por criar a viscosidade de uma mistura. Com quantidades apropriadas do aditivo, é possível então corrigir eventuais deficiências na dosagem dos finos, modificar a relação água/aglomerantes sem perder coesão ou então manter a dosagem dos materiais e melhorar a fluidez sem apresentar segregação (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

Figura 3.2 Traço de concreto com e sem aditivo modificador de viscosidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 - Superplastificante

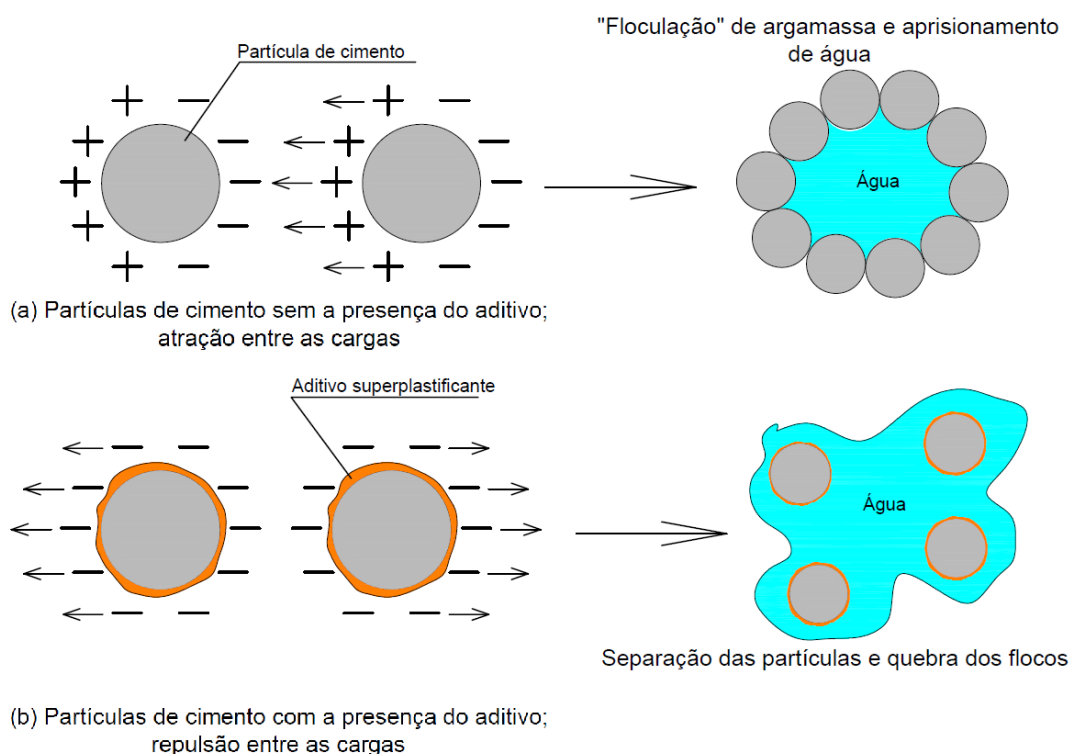
Os aditivos superplastificantes ou redutores de água, conforme categoriza a NBR 11768-1 (ABNT, 2019) podem beneficiar a mistura do concreto de duas formas: reduzir a quantidade de água de amassamento ou então manter a quantidade de água e modificar a consistência, aumentando o abatimento e a fluidez.

De acordo com Tutikian & Dal Molin (2008) o tipo mais comum de superplastificante são os baseados em policarboxilatos, e sua composição é formulada para ser absorvida pelas partículas de cimento Portland. Quando esses tensoativos são absorvidos pelas partículas de cimento, as deixam carregadas negativamente, resultando na repulsão por cargas iguais (NEVILLE & BROOKS, 2010).

Em um traço de concreto sem a utilização desse aditivo, parte da água misturada no cimento é aprisionada pela formação de flocos (GARCIA, 2021). Devido às características de repulsão que o aditivo impõe à mistura, as partículas de água ficam livres dos flocos. Algumas são atraídas pelas cargas negativas, criando uma camada que separa as partículas de cimento e outras transitam livremente,

melhorando a fluidez e trabalhabilidade (NEVILLE & BROOKS, 2010). A Figura 3.3 demonstra a ação do superplastificante quando em contato com o cimento e água.

Figura 3.3 Ação do aditivo superplastificante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 - Reologia do concreto

Reologia é o estudo da deformação e escoamento da matéria e como os materiais respondem à aplicação de uma determinada tensão ou deformação. A palavra reologia deriva do grego "*rhein*", que significa "escorrer" (ROMANO; CARDOSO & PILEGGI, 2011). Segundo Reis (2008), o termo reologia foi aplicado por Bingham em 1929.

Quando se aplica o conceito em análises do concreto em seu estado fresco, Barbosa *et. al.* (2011), em sua pesquisa, conseguiu definir o concreto como um fluido não-newtoniano (tipo que apresentam proporcionalidade não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento) e reometria de comportamento Binghamiano. Ferraris (1999) também cita a mesma classificação.

O fluido Binghamiano possui características semelhantes aos newtonianos, porém, para fluir, necessita que seja aplicada uma tensão de cisalhamento inicial (tensão de escoamento), suficiente para romper a tensão mínima que se forma devido à sua formação de uma estrutura tridimensional. Quando esse fluido se encontra em repouso, apresenta um caráter sólido elástico rígido e quando a tensão mínima é rompida, o comportamento passa a ser o de um fluido Newtoniano (CASTRO; LIBORIO & PANDOLFELLI, 2011). A Figura 3.4 representa um gráfico de comportamento de fluido Binghamiano e um Newtoniano e a Equação 3 representa o comportamento do fluido Binghamiano.

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (3)$$

Em que:

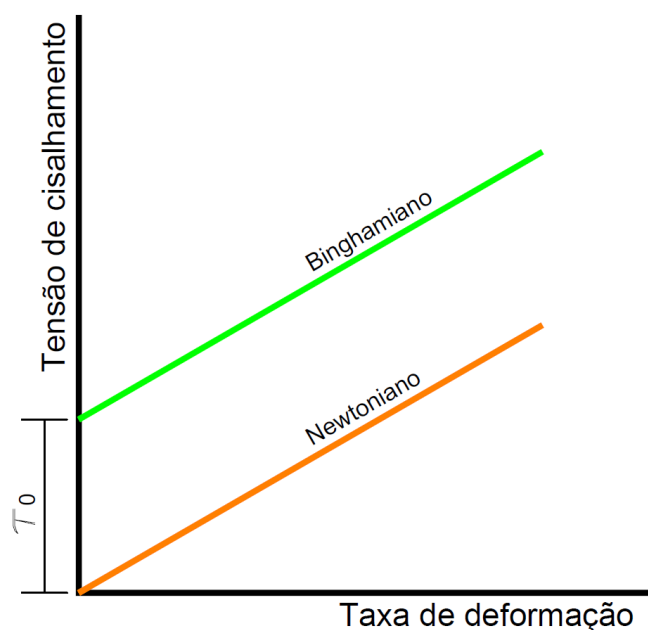
τ = tensão de cisalhamento;

τ_0 = tensão de escoamento;

μ = viscosidade;

γ = taxa de cisalhamento.

Figura 3.4 Comportamento de um fluido Binghamiano e um Newtoniano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Castro; Liborio & Pandolfelli (2011), apesar do concreto se aproximar de um fluido Binghamiano, esse modelo não está ausente de erros estatísticos, pois como se trata de um material relativamente heterogêneo (BATTAGIN & SILVEIRA, 2017), com quantidades de sólidos em suspensão variáveis de traço para traço, a consideração desse único meio para aferir os parâmetros reológicos do concreto pode não ser ideal.

3.3.1 - Concreto no estado fresco e suas propriedades

O concreto possui duas fases: no estado fresco e no estado endurecido.

A fase do estado fresco remete ao intervalo de tempo em que é possível trabalhar o concreto na mistura, transporte, lançamento e adensamento. Geralmente essa fase dura por volta de 1 a 5 horas (HELENE & ANDRADE, 2010).

A principal característica do concreto que determina a sua aptidão para ser manuseado é a consistência (HELENE & ANDRADE, 2010), que segundo Romano; Cardoso & Pillegi (2011) está relacionada com a facilidade de escoamento e coesão do material.

Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), em concretos autoadensáveis é necessário comprovar as características de fluidez, viscosidade plástica aparente e estabilidade visual, padronizados pelo “ensaio de espalhamento” da NBR 15823-2 (ABNT, 2017b). A norma também cita a habilidade passante, utilizando o “ensaio do anel J” da NBR 15823-3 (ABNT, 2017c), entre outros.

3.4 - Controle de qualidade

Para garantir a qualidade do concreto entregue (ou produzido) na obra, é necessário aferir algumas características do material. A principal característica de um concreto será a resistência à compressão (ANDOLFATO, 2002). Em outras palavras, alterar a proporção na dosagem, colocar adições minerais ou aditivos para melhorar a trabalhabilidade no estado fresco (ou alguma outra característica no estado endurecido) de nada adianta se o concreto não desempenhar seu papel resistindo aos esforços mecânicos da estrutura na qual está inserido.

O ensaio para determinação da resistência à compressão dos concretos é padronizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Além de garantir a resistência mecânica proposta em projeto, é importante atingir uma consistência adequada ao uso pretendido. Essa é a propriedade que garante a trabalhabilidade e certifica a possibilidade do concreto poder ser transportado, lançado, adensado e acabado sem apresentar problemas na mistura, como a segregação, por exemplo (NEVILLE & BROOKS, 2010).

Para concretos autoadensáveis, a NBR 15823 (ABNT, 2017) apresenta uma gama de ensaios, como: ensaio de espalhamento, anel J, caixa L e U, funil V, coluna de segregação e peneira, cada um apresentando um parâmetro de consistência.

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) coloca dois ensaios mínimos: espalhamento, para aferir as propriedades de fluidez e estabilidade visual e anel J, para determinar a habilidade passante do concreto. Por sua vez, essas propriedades estão relacionadas à capacidade de o concreto preencher as formas e penetrar entre as armaduras. Se um concreto autoadensável não atender os requisitos de projeto relacionados à consistência, possivelmente não irá preencher todos os espaços e pode assim comprometer a integridade do elemento.

3.4.1 - Ensaio resistência à compressão axial

Para determinar a resistência à compressão do concreto, a NBR 5739 (ABNT, 2018a) padroniza a utilização de moldagem de corpos de prova cilíndricos, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Quando o corpo de prova atingir a idade de ensaio conforme apresenta a Tabela 3.1, ele deve ser preparado para o ensaio de resistência à compressão, de forma que as superfícies superior e inferior se tornem planas e perpendiculares ao eixo longitudinal, porém sem perder suas propriedades (ABNT, 2015). Depois de preparado, deve-se medir o diâmetro e a altura do corpo de prova com precisão de 0,1 milímetro.

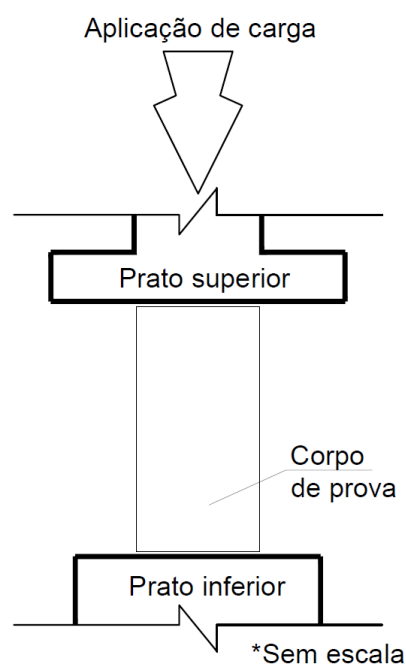
Tabela 3.1 Idade para ensaio dos corpos de prova.

Idade de ensaio (dias)	Tolerância permitida (h)
1	1
3	2
7	6
28	24
63	36
91	48

Fonte: Adaptado de NBR 5739 (ABNT, 2018a).

A Figura 3.5 apresenta o esquema do ensaio de resistência à compressão axial.

Figura 3.5 Ensaio de resistência à compressão axial conforme NBR 5739.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O corpo de prova é colocado no centro do prato inferior da prensa. “O carregamento deve aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa. O ensaio termina quando houver queda de força que indique a ruptura” (NBR 5739, 2018a).

Para determinar a resistência, a norma em questão apresenta a Equação 4.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (4)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão (MPa);

F = força máxima alcançada (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

Nos casos em que a relação altura/diâmetro do corpo de prova não seja igual a 2, conforme estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2015), são apresentados na Tabela 3.2 os fatores de correção que devem multiplicar a força “F” na Equação 4.

Tabela 3.2 Fator de correção altura/diâmetro.

Relação altura/diâmetro	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2018a).

3.4.2 - Ensaio de espalhamento

Um dos ensaios mais comuns para a classificação dos concretos autoadensáveis é o ensaio de espalhamento, que apresenta uma execução simples e não necessita de muitos equipamentos.

A NBR 15823-2 (ABNT, 2017b) apresenta o método utilizando o cone de Abrams, com dimensões conforme Figura 3.6, e uma chapa metálica plana e quadrada com 1,5 mm de espessura, medindo no mínimo 900 × 900 mm e com marcação de dois círculos concêntricos entre si e com a chapa: um de 200 mm e outro de 500 mm.

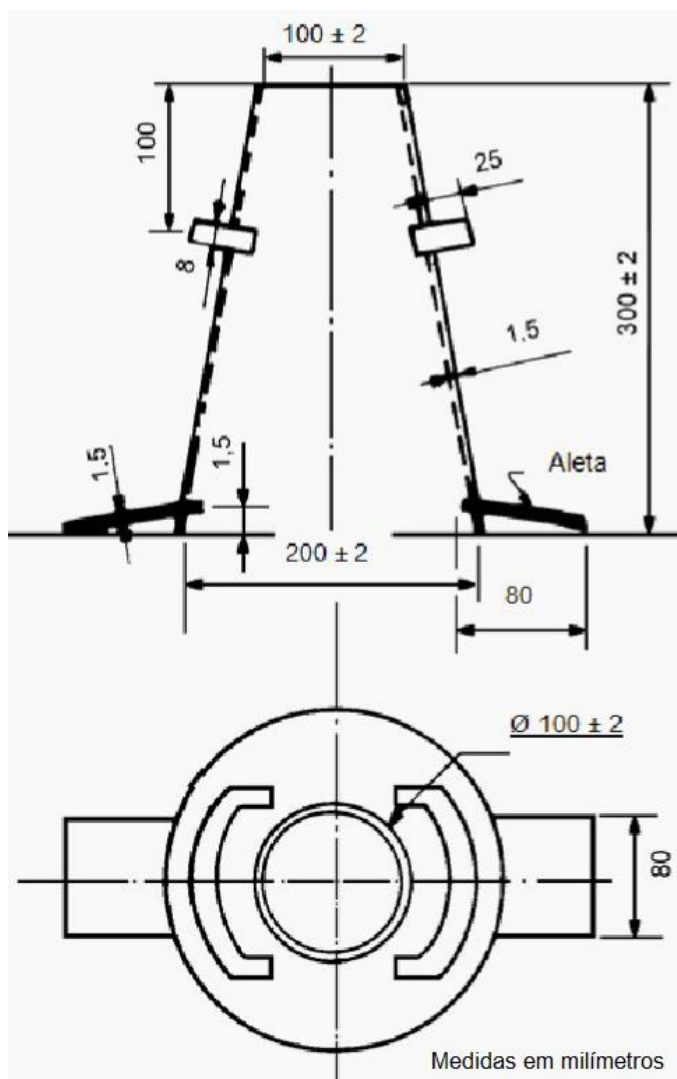
A execução do ensaio consiste em nivelar a chapa, umedecê-la, colocar o cone de Abrams sobre a marcação de 200 mm e encher o cone de concreto autoadensável. Com a ajuda de outro operador, o cone deve ser segurado pelas abas, de modo a não permitir que o concreto escoe pelo espaço entre a chapa e o cone.

Em seguida, rasa-se a superfície do cone para tirar o excesso de concreto. Caso a chapa apresente resíduos de concreto devido ao processo de rasamento, deve-se limpar a chapa.

O operador que está segurando o cone deve então levantá-lo na vertical, em velocidade constante e em um intervalo de tempo de 3 ± 1 s e sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. Quando o concreto atingir uma situação aparente de repouso, obtém-se o diâmetro de espalhamento atingido a partir da média de duas medidas perpendiculares entre si (ABNT, 2017b).

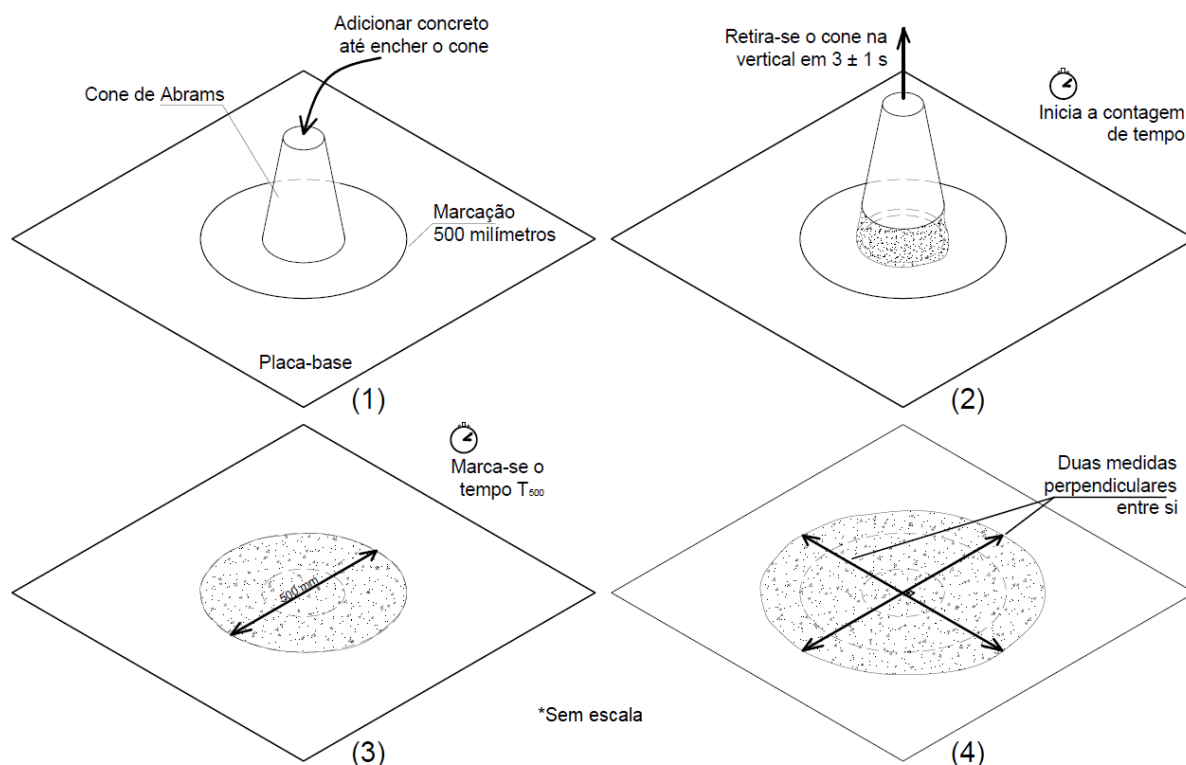
A Figura 3.7 demonstra a execução do ensaio de espalhamento explanado.

Figura 3.6 Cone de Abrams.



Fonte: Adaptado de NBR 16889 (ABNT, 2020).

Figura 3.7 Ensaio de espalhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o ensaio e ao final dele, algumas observações podem ser feitas:

- Tempo de escoamento " T_{500} ": é o tempo que o concreto leva para atingir a marca de 500 mm da prancha;
- Índice de estabilidade visual: analisa-se visualmente a consistência e a estabilidade quando o traço atingir seu diâmetro final. O Quadro 3.1 apresenta os parâmetros de classificação do traço de acordo com a análise;
- Dependendo do diâmetro de espalhamento, a NBR 15823-1 classifica o concreto em categorias, conforme apresentado no Quadro 3.2.

Quadro 3.1 Classes de índice de estabilidade visual (IEV).

Classe	IEV
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (instável)	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa ≥ 10 mm)

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2017a).

Quadro 3.2 Classe de espalhamento (*slump flow*).

Classe	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2017a).

4 - HIPÓTESE PROPOSTA

Conforme exposto anteriormente, mensurar parâmetros reológicos do concreto ainda pode ser um processo difícil, oneroso ou pouco preciso.

Supondo que os traços de concreto mantenham suas características de fluidez independente do ensaio que são submetidos, isto é, se aplicados nas mesmas condições, um determinado traço de concreto vai apresentar as mesmas características reológicas em qualquer situação imposta. A partir da ideia anterior, desde que os parâmetros do concreto possam ser padronizados a partir de um espaço amostral capaz de retornar uma equação e/ou um ábaco, pode ser possível estimar a vazão desse material, independente das dimensões do meio em que está fluindo, desde que estas também sejam conhecidas.

Portanto, para verificar a possível existência de um padrão de relações e desenvolver um método capaz de estimar a vazão do concreto – e consequentemente o volume - propõe-se uma comparação entre duas velocidades: a *velocidade média de espalhamento* e a *velocidade média de vazão*.

Para facilitar a obtenção das características de fluidez dos traços de concreto, a hipótese será restringida à concretos autoadensáveis.

4.1 - Velocidade média de espalhamento

A velocidade média de espalhamento é obtida por meio do ensaio de espalhamento, regido pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017b). Como visto anteriormente, esse ensaio é uma importante ferramenta no controle de qualidade de concretos autoadensáveis e, portanto, está presente em todas as obras que utilizam este material.

No ensaio, o concreto adicionado ao cone está em repouso e, ao remover o cone ele começa a fluir. Com o início do escoamento, o concreto começa a percorrer uma distância até atingir dado diâmetro em um intervalo de tempo (espalhamento 500 mm e T_{500} , por exemplo, conforme indicado pela norma).

Partindo do pressuposto que velocidade média é a distância percorrida por um corpo em um determinado intervalo de tempo, supõe-se que ao dividir o diâmetro atingido pelo concreto pelo tempo que ele levou para atingir esse diâmetro, tem-se a

“velocidade média de espalhamento”, representada pela Equação 5. A Figura 4.1 esquematiza o conceito explanado.

$$V_{esp} = \frac{(\varnothing_{esp} - 20)}{T_{esp}} \quad (5)$$

Em que:

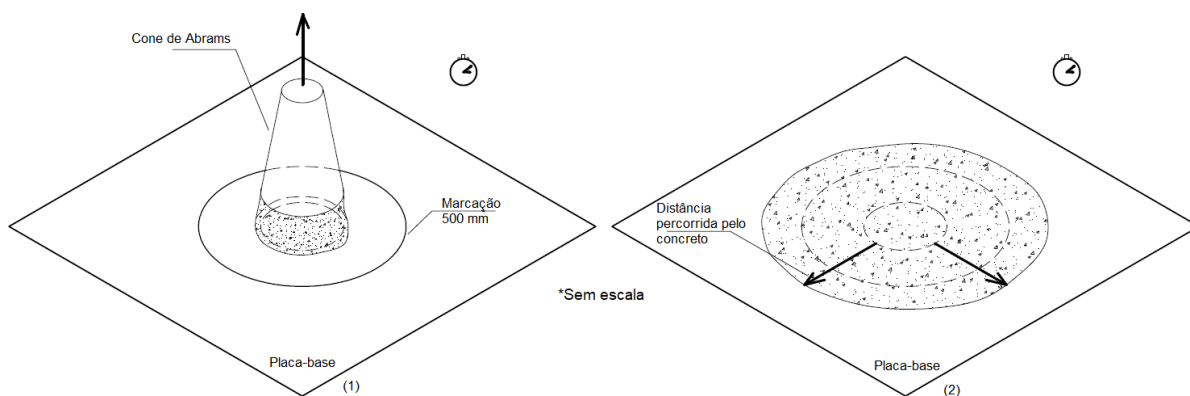
V_{esp} = velocidade média de espalhamento (cm/s);

$\varnothing_{esp}$ = diâmetro de espalhamento (cm);

T_{esp} = tempo necessário para atingir o diâmetro (s).

A Equação 5 considera que o concreto fresco ocupa o espaço de 20 cm enquanto em repouso no cone de Abrams, portanto se subtrai 20 cm do diâmetro de espalhamento.

Figura 4.1 Medição da velocidade média no ensaio de espalhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No momento 1, retira-se o cone para que o concreto escoe. Concomitantemente inicia-se a marcação do tempo.

No momento 2, as setas indicam a distância percorrida pelo concreto considerada. Nesse momento, a contagem do tempo é terminada.

4.2 - Velocidade média de vazão

Partindo do pressuposto de que a vazão pode ser determinada a partir da velocidade de um fluido ao passar em uma seção transversal conhecida em dado um intervalo de tempo, basta definir uma seção transversal em um equipamento (um cilindro, por exemplo) e fixar um volume de concreto que passará por ela.

Supondo que os parâmetros citados são conhecidos, a velocidade média de vazão pode ser estimada conforme Equação 6.

$$V_{vazão} = \frac{Vol_{vazão}}{AT_{vazão}} \quad (6)$$

Em que:

$V_{vazão}$ = velocidade média de vazão (cm/s);

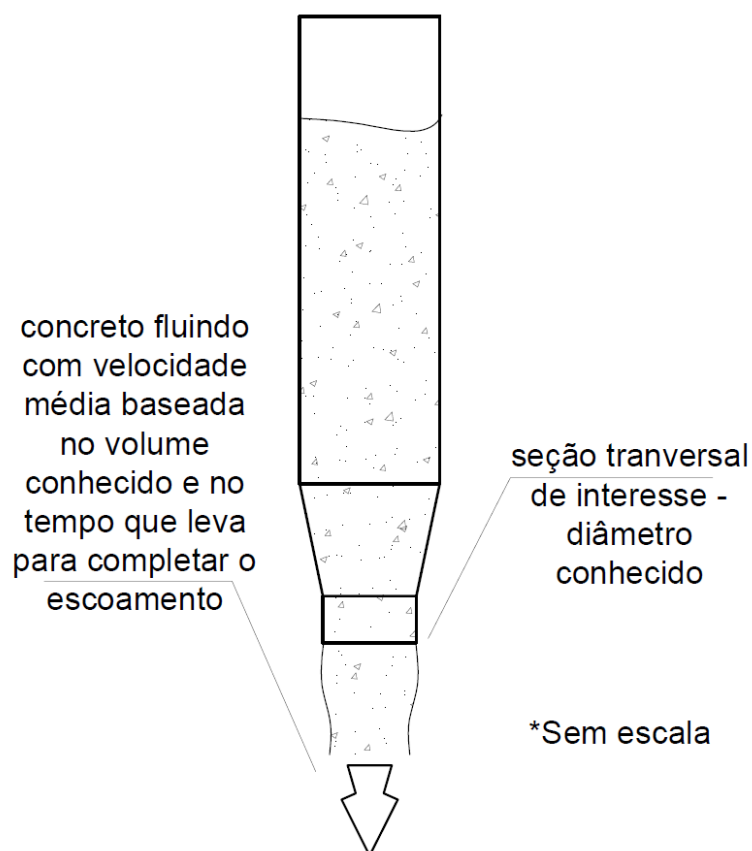
$Vol_{vazão}$ = volume de vazão (cm³);

A = área da seção transversal (cm²).

$T_{vazão}$ = tempo do ensaio (s);

A Figura 4.2 esquematiza a medição da velocidade média de vazão em um ensaio.

Figura 4.2 Medição da velocidade média no ensaio de vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa hipótese, a velocidade média de vazão possui duas variáveis fixas e depende apenas do tempo. Desta forma, poderia ser considerada a comparação entre vazão (que também só depende da variável tempo, uma vez que o volume do ensaio foi estabelecido) e a velocidade de espalhamento. Porém, para facilitar o entendimento, optou-se por comparar duas grandezas iguais obtidas em cada um dos ensaios, isto é, duas velocidades.

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a estruturação das etapas para a obtenção de dados e descreve como os ensaios foram realizados.

A fim de demonstrar a hipótese proposta, sugere-se a utilização de ensaios padronizados, de maneira que em todas as etapas e para todos os casos, os ensaios não possam exercer influência sobre os resultados.

5.1 - Caracterização dos materiais

Para a produção dos traços de concreto desta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, água, areia, brita, sílica ativa, aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade.

5.1.1 - Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CP-II F, marca Votoran, da empresa Votorantim Cimentos. O produto foi adquirido em sacos de 50 quilos.

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram algumas características físicas e químicas do material utilizado, respectivamente.

A composição química em óxidos do cimento Portland foi quantificada por Espectroscopia de Raios-X por dispersão em energia (EDX). O ensaio foi conduzido no Laboratório de Química do Centro Universitário FACENS e o equipamento utilizado foi o modelo Supermini 200 da marca Rigaku.

5.1.2 - Sílica ativa

A sílica ativa utilizada neste trabalho foi a comercializada pela empresa Tecnosil. Os resultados de caracterização da sílica ativa são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Assim como para o cimento Portland, o ensaio EDX foi conduzido no Laboratório de Química do Centro Universitário FACENS e o equipamento utilizado foi o modelo Supermini 200 da marca Rigaku.

Tabela 5.1 Propriedades físicas do cimento Portland e sílica ativa empregados.

Propriedade	Valor Obtido		Referência
	Cimento Portland	Sílica ativa	
Massa específica (kg/m ³) ²	2985	2120	NBR 16605 (ABNT, 2017d)
Massa unitária (kg/m ³) ³	881	510	NBR 12127 (ABNT, 2017e) ⁴

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.2 Composição química cimento Portland e da sílica ativa empregados.

Óxido	Composição (% m/m)	
	Cimento Portland	Sílica ativa
CaO	61,67	0,94
SiO ₂	14,12	91,84
Fe ₂ O ₃	6,03	0,13
SO ₃	4,05	0,23
MgO	4,04	0,63
Al ₂ O ₃	3,03	0,40
Na ₂ O	1,10	0,83
K ₂ O	0,84	1,50
Cl	0,34	0,32
Outros	0,87	0,34
Perda ao fogo	3,91	2,84

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 - Água

A água utilizada na produção dos traços de concreto foi a fornecida pelo sistema de abastecimento de água da cidade de Capela do Alto/SP.

² Massa da unidade de volume absoluto do material.

³ Massa da unidade de volume aparente do material.

⁴ O ensaio de massa unitária para o cimento foi adaptado, seguindo os procedimentos da NBR 12127 – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó (ABNT, 2017e).

5.1.4 - Areia (agregado miúdo)

Foram empregadas areias naturais de leitos de rios comercializadas na cidade de Capela do Alto/SP.

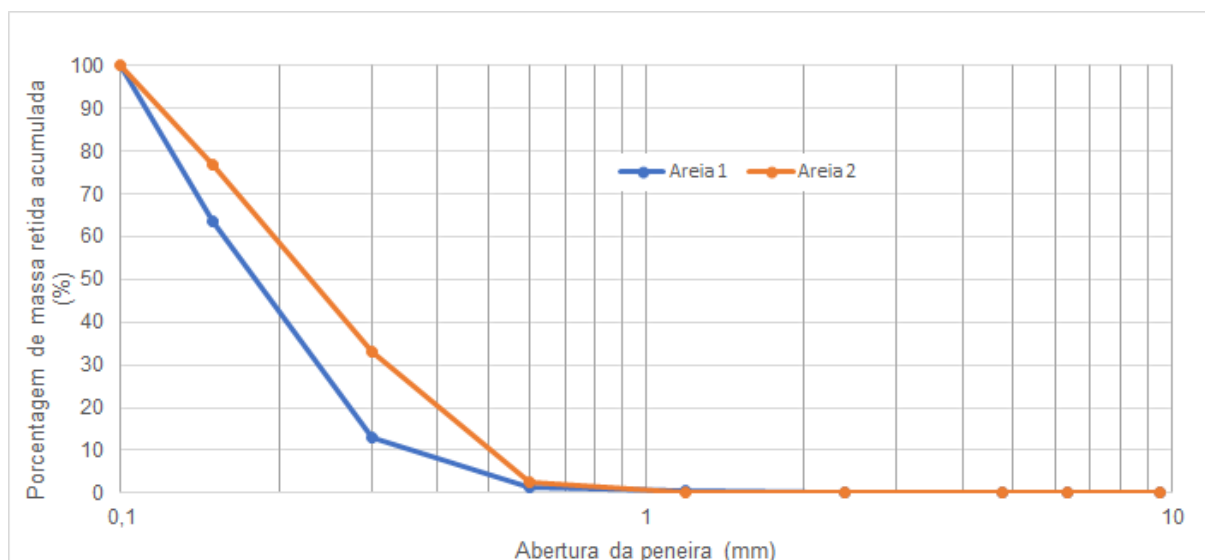
A Figura 5.1 e a Tabela 5.3 mostram algumas características físicas das areias, adquiridas por meio de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário FACENS (LEMAT).

Tabela 5.3 Características físicas dos agregados miúdos empregados.

Propriedade	Valor Obtido		Referência
	Areia 1	Areia 2	
Massa específica (kg/m ³)	2618	2632	NM 52 (AMN, 2009a)
Massa unitária (kg/m ³)	1540	1520	NM 45 (AMN, 2006)
Módulo de finura ⁵	0,79	1,13	NBR 7211 (ABNT, 2022b)
DMC ⁶ (mm)	0,60	0,60	NBR 7211 (ABNT, 2022b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1 Curva granulométrica dos agregados miúdos empregados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

⁵ Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100 (ABNT, 2022b).

⁶ Dimensão máxima característica associada à distribuição granulométrica do agregado (ABNT, 2022b).

O agregado identificado como “areia 1” foi adquirido como areia fina e o agregado identificado como “areia 2” foi adquirido como areia média.

5.1.5 - Brita (agregado graúdo)

As britas foram adquiridas em uma loja de materiais de construção na cidade de Capela do Alto/SP.

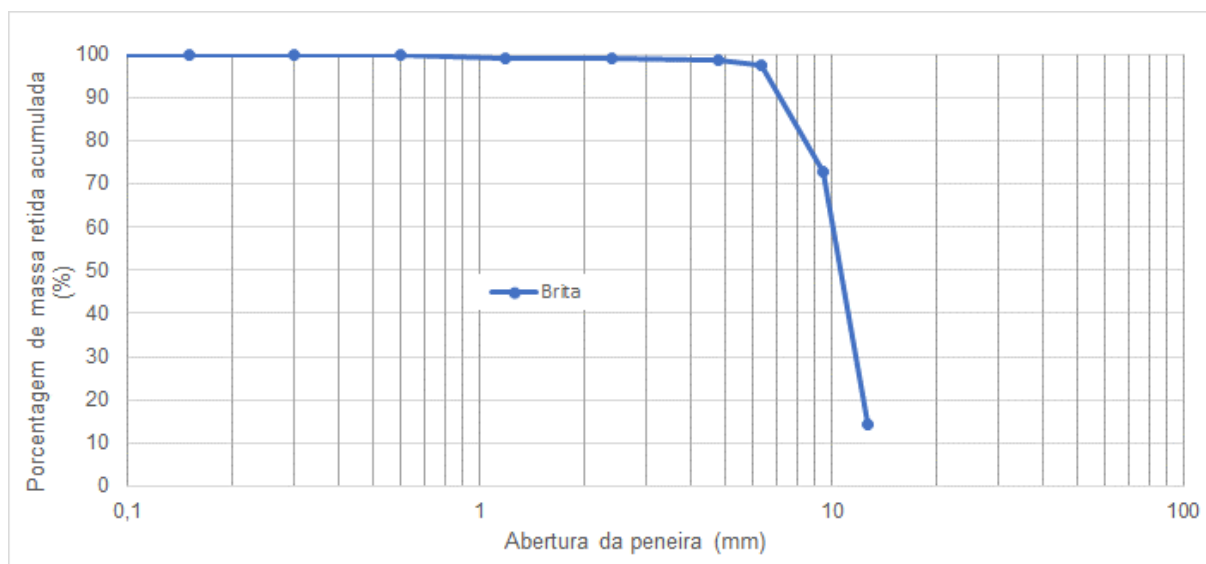
Todos os traços de concreto foram dosados utilizando material do mesmo lote. A Figura 5.2 e a Tabela 5.4 mostram algumas características físicas desse material, adquiridas por meio de ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário FACENS (LEMAT).

Tabela 5.4 Características físicas do agregado graúdo empregado.

Propriedade	Valor Obtido	Referência
Massa específica (kg/m ³)	15435	NM 53 (AMN, 2009b)
Massa unitária (kg/m ³)	1380	NM 45 (AMN, 2006)
DMC (mm)	12,7	NBR 7211 (ABNT, 2022b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.2 Curva granulométrica do agregado graúdo empregado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022b), a dimensão máxima característica (DMC) do agregado deveria ser aquela referente à peneira que mostrasse a porcentagem retida acumulada de 5% ou imediatamente inferior. No caso do agregado graúdo ensaiado, a peneira de 19 mm não reteve material e a próxima peneira (12,7 mm) reteve aproximadamente 14,35%. Portanto, o DMC adotado foi 12,7 mm.

5.1.6 - Aditivo Modificador de Viscosidade

O aditivo modificador de viscosidade utilizado neste trabalho foi o “Centrament Stabi 520 – aditivo modificador”, da empresa MC-Bauchemie Brasil. Possui coloração transparente e é encontrado no estado líquido. A Tabela 5.5 mostra alguns dados técnicos do aditivo.

Tabela 5.5 Dados técnicos do aditivo Centrament Stabi 520.

Propriedade	Valor Obtido	Observações
Densidade (kg/L)	1,00	NBR 10908 (ABNT, 2008)
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 1,5\%$	Sobre o peso do cimento

Fonte: Adaptado de (MC BAUCHEMIE, 2019a).

5.1.7 - Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado neste trabalho foi o “MC-PowerFlow 4001 – aditivo superplastificante de alto desempenho”, da empresa MC-Bauchemie Brasil. Possui coloração marrom e é encontrado no estado líquido. A Tabela 5.6 mostra alguns dados técnicos do aditivo.

Tabela 5.6 Dados técnicos do aditivo MC-PowerFlow 4001.

Propriedade	Valor Obtido	Observações
Densidade (kg/L)	1,12	NBR 10908 (ABNT, 2008)
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 5,0\%$	Sobre o peso do cimento

Fonte: Adaptado de (MC BAUCHEMIE, 2019b).

5.2 - Produção dos concretos

Conforme descrito anteriormente, segundo Neville & Brooks (2010), não existe uma regra para a ordem que os materiais devem ser adicionados durante uma mistura de concreto. Neste trabalho, optou-se por utilizar a seguinte sequência:

Traços com sílica ativa na composição:

- Adicionar em um recipiente toda a quantidade de brita, areia e cimento nesta ordem;
- Adicionar um terço do volume de água do traço, concomitantemente a todo o volume de aditivo superplastificante;
- Adicionar o segundo terço do volume de água;
- Adicionar todo o volume do aditivo modificador de viscosidade (se houver na composição do traço);
- Adicionar a sílica ativa;
- Adicionar o restante do volume de água.

Traços sem sílica ativa na composição:

- Adicionar em um recipiente toda a quantidade de brita, areia e cimento nesta ordem;
- Adicionar metade do volume de água do traço, concomitantemente a todo o volume de aditivo superplastificante;
- Adicionar o volume restante de água;
- Adicionar todo o volume de aditivo modificador de viscosidade (se houver na composição do traço).

Os traços propostos foram misturados manualmente dentro de um recipiente com a utilização de uma colher de pedreiro.

O tempo de mistura foi de, aproximadamente, 40 min. para todos os traços, contados a partir do momento da adição da brita no recipiente até a completa homogeneização.

As etapas de mistura foram padronizadas por tempo, conforme o seguinte cronograma:

Traços com sílica ativa na composição:

- Mistura da brita, areia e cimento: 5 min.;
- Mistura da água e aditivo superplastificante: 10 min.;
- Mistura com adição de mais água: 5 min.;
- Mistura com adição de modificador de viscosidade (se houver): 5 min.;
- Mistura com sílica ativa: 5 min.;
- Mistura com o restante do volume de água: 10 min.

Traços sem sílica ativa na composição:

- Mistura da brita, areia e cimento: 5 min.;
- Mistura da água e aditivo superplastificante: 10 min.;
- Mistura com adição do restante de água: 5 min.;
- Mistura com adição de modificador de viscosidade (se houver): 5 min.;
- Misturar por mais 15 min. (20, caso o traço não necessite de modificador de viscosidade).

5.3 - Determinação dos traços de concreto

Inicialmente, as dosagens de concreto foram determinadas com base nos traços apresentados por Mendes; Bauer & Silva (2017). No entanto, como os materiais utilizados pelo autor citado eram diferentes dos que foram empregados neste trabalho, alguns ajustes foram necessários na dosagem, sendo esses determinados a partir de ensaios preliminares.

Visando a obtenção de um concreto com espalhamento padronizado, algumas condições não foram consideradas como essenciais. Por exemplo, a relação água/cimento - bem como resistências mecânicas - quantidade de aditivos ou de sílica ativa utilizada, ou mesmo o custo por metro cúbico de concreto produzido.

5.3.1 - Composição dos traços

Os traços foram determinados seguindo critérios que assegurassem concretos autoadensáveis com fluidez dentro da faixa esperada, conforme classificação da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), sem segregação ou exsudação.

Para efeito de comparação, foi proposta a dosagem de 4 traços-base, cada um deles com uma proporção de cimento Portland, brita, areia e água. Os quatro traços foram dosados utilizando os mesmos materiais. Em dois deles foi empregada uma areia média, enquanto em outros dois, houve o uso de areia fina. Nos traços com areia média, a sílica ativa foi utilizada como uma adição pozolânica.

Os 4 traços-base foram submetidos à quatro “situações”:

- Adição de aditivo superplastificante;
- Adição de aditivo superplastificante (na mesma quantidade anterior) e aditivo modificador de viscosidade;
- Adição de aditivo superplastificante (maior quantidade que a anterior);
- Adição de aditivo superplastificante (mesma quantidade da terceira situação) e aditivo modificador de viscosidade (mesma quantidade da segunda situação).

Ao final, foram obtidos 16 diferentes traços de concreto autoadensável.

O volume de aditivos necessário foi definido de acordo com o espalhamento desejado. Isto é, conforme o diâmetro de espalhamento requerido foi feito o ajuste de aditivos.

Cada traço foi dosado para que o volume final de concreto misturado fosse de aproximadamente 15 litros e, para quantificar o material, utilizou-se uma balança de precisão de 0,001 kg.

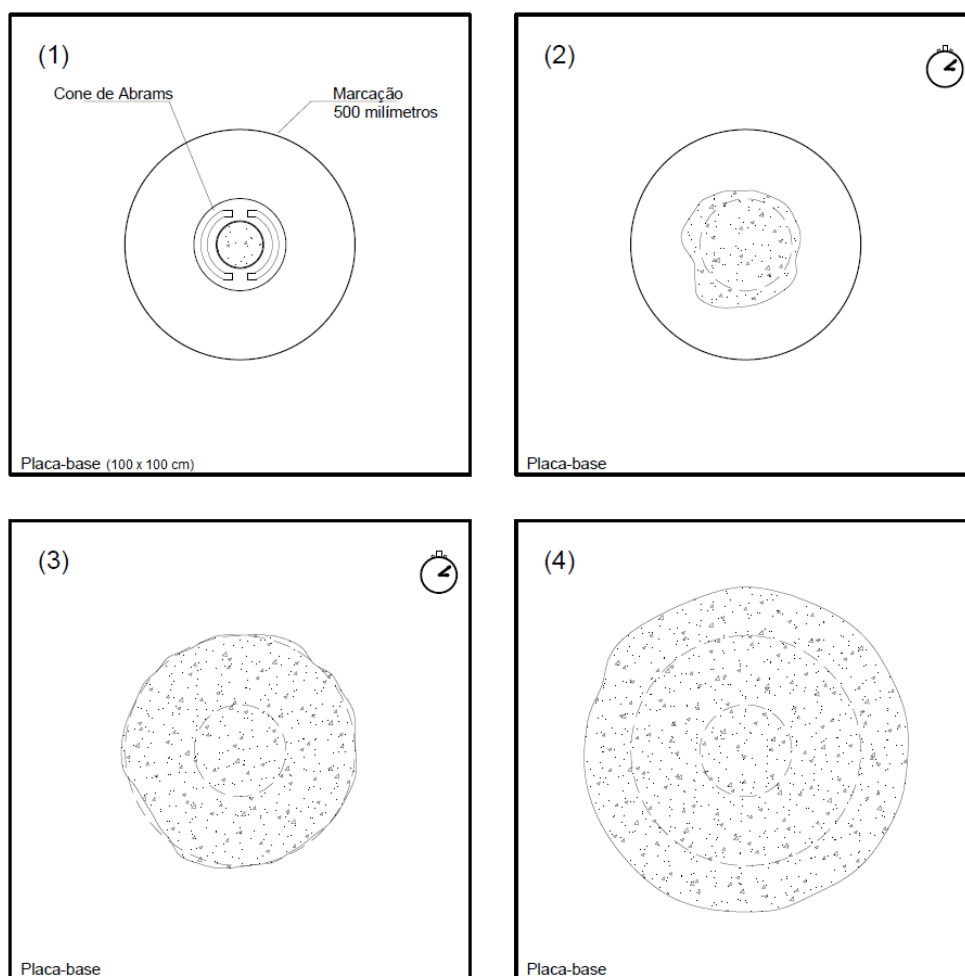
5.4 - Métodos

5.4.1 - Ensaio de espalhamento modificado

Após 40 min. de mistura manual, a fluidez dos concretos foi obtida pelo ensaio de espalhamento (*slump flow test*) conforme procedimentos da NBR 15823-2 (ABNT, 2017b).

Além de anotar o tempo decorrente para o concreto atingir a marcação de 500 mm de diâmetro, foi marcado também o tempo que o concreto levou para atingir seu diâmetro final, conforme ilustrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 Ensaio de espalhamento modificado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.3, o momento 1 mostra a placa-base e o cone de Abrams posicionados e com o concreto pronto para ser ensaiado.

Conforme indicado na NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), inicia-se a contagem do tempo concomitantemente à retirada do cone de Abrams (momento 2).

Quando o concreto atinge a marcação de 500 mm de diâmetro, anota-se o tempo (momento 3).

Quando o concreto atinge o diâmetro máximo de espalhamento (momento 4), anota-se o tempo final.

Conforme indicado na NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), quando o espalhamento do concreto é finalizado, mede-se o diâmetro final com duas medidas perpendiculares. Neste trabalho, foi utilizada uma régua metálica com precisão de 1 milímetro.

5.4.2 - Ensaio de vazão

Depois da execução do ensaio de espalhamento, o concreto foi submetido ao ensaio de vazão.

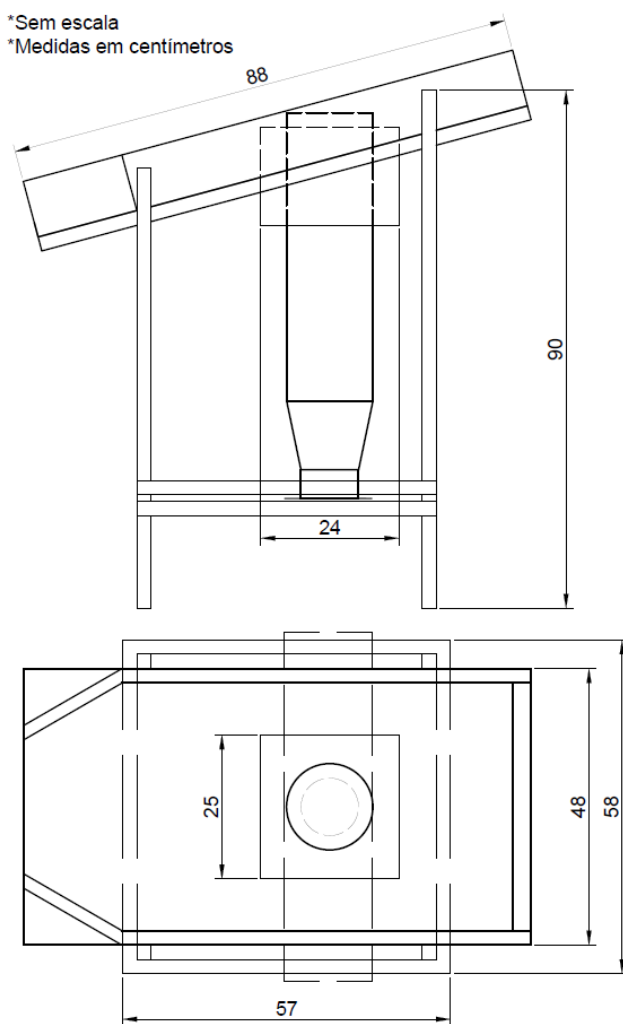
Para comparar a velocidade de espalhamento com a velocidade de vazão, um equipamento com dimensões padronizadas foi construído como descrito a seguir.

5.4.3 - Construção do equipamento de medição de vazão

Tanto para a construção do equipamento quanto para a estrutura de suporte foram utilizadas tábuas de madeira Pinus, na espessura de 25 mm.

A Figura 5.4 demonstra as dimensões do equipamento criado.

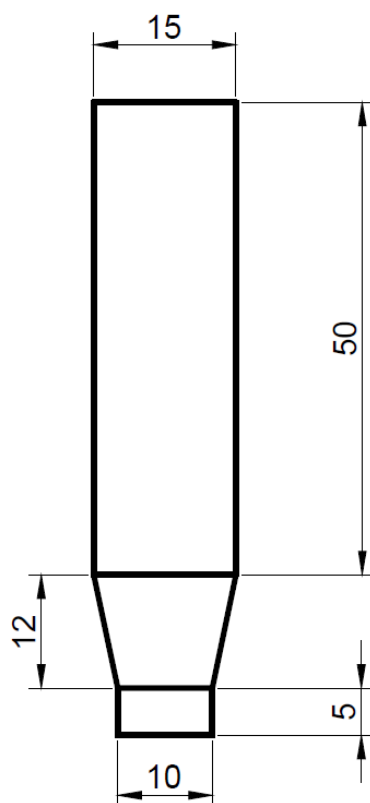
Figura 5.4 Projeto do equipamento para ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tubo utilizado para ser preenchido de concreto é de PVC (policloreto de vinila) e seu formato é de um cilindro com comprimento de 50 cm e diâmetro de 15 cm, uma redução (tronco cone) para o diâmetro de 10 cm com comprimento de 12 cm e outro cilindro, com comprimento de 5 cm e diâmetro de 10 cm, conforme mostrado na Figura 5.5.

Figura 5.5 Tubo para ensaio de vazão.



*Sem escala

*Medidas em centímetros

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.6, nota-se o mecanismo de acoplamento do equipamento construído. O sistema consiste na utilização de 4 parafusos verticalmente fixados nas abas do retângulo interno, enquanto junto ao tubo, a uma distância de 5 cm abaixo da extremidade superior, soldou-se uma placa de madeira com 4 furos, posicionados de modo a encaixar nos parafusos citados anteriormente, conforme mostra a Figura 5.7. Esse sistema garante que o tubo fique fixo e estável na posição vertical durante os ensaios de vazão.

Figura 5.6 Vista Superior do equipamento sem o tubo de PVC para ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.7 Vista superior do equipamento com o tubo acoplado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Figuras 5.6 e 5.7, nota-se a superfície inclinada. Esta tem a função de coletar o concreto que possa ser despejado fora do tubo durante o processo de

enchimento. O afunilamento no final permite um melhor controle na coleta do concreto que escoar, permitindo usar reservatórios com larguras menores.

A Figura 5.8 representa o tubo de dimensões conhecidas (conforme Figura 5.5). Nota-se, à distância de 5 cm da extremidade superior, a placa de madeira soldada perpendicularmente ao tubo citada anteriormente.

Figura 5.8 Modelo de tubo para ensaio de vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.9 está representado o equipamento finalizado e preso à estrutura de suporte.

A chapa metálica se movimenta em apenas uma direção (entre as duas ripas de madeira) e possui a finalidade de tampar a extremidade inferior do tubo, permitindo iniciar a vazão de concreto a qualquer momento. Para isso, basta puxar a chapa até liberar a extremidade inferior do tubo.

Figura 5.9 Perspectiva do equipamento acoplado à estrutura de suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.4 - Execução do ensaio de vazão

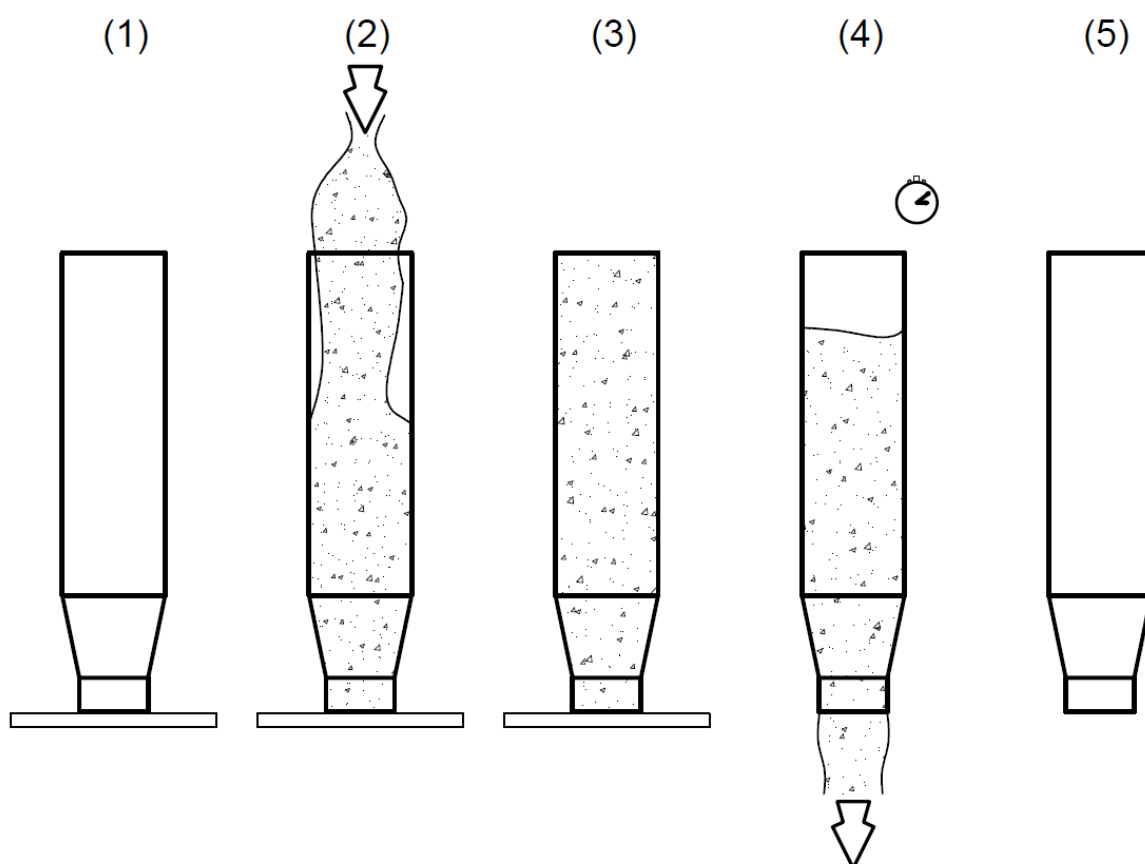
Para cada traço proposto, encheu-se o tubo (previamente umedecido) com concreto autoadensável fresco. Obrigatoriamente, este tubo tinha volume conhecido, estava posicionado na vertical, e estava com a extremidade inferior fechada.

Ao abrir a extremidade inferior do tubo, deu-se início a contagem do tempo que o concreto levou para escoar totalmente para fora do tubo.

O volume de concreto que sair do tubo foi coletado em um reservatório para ser utilizado na moldagem de corpos de prova.

A Figura 5.10 representa o esquema de execução do ensaio de vazão.

Figura 5.10 Esquema de execução do ensaio de vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No momento 1, o tubo está vazio e com a extremidade inferior bloqueada, pronto para iniciar o ensaio.

No momento 2, despeja-se concreto pela extremidade superior até encher o tubo.

No momento 3, retira-se o excesso de concreto rasando a superfície superior.

Com o tubo cheio de concreto, retira-se a chapa que bloqueia a extremidade inferior para que o concreto escoe (momento 4). Para contabilizar o tempo que o volume de concreto leva para escoar, um cronômetro deve ser acionado no mesmo instante em que se retira o bloqueio da extremidade inferior.

Após todo o concreto escoar pelo tubo, o cronômetro deve ser parado e o ensaio se encerra com o tubo vazio (momento 5).

Após a execução do ensaio, os equipamentos utilizados devem ser lavados para não reter resíduos de ensaios anteriores.

5.4.5 - Moldagem dos corpos de prova

Nesta etapa do programa experimental, para cada traço, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme procedimento da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para obtenção da densidade de massa, os moldes de concreto foram pesados, inicialmente vazios e depois preenchidos com concreto. Uma vez que o volume e a massa do molde são conhecidos, para determinar o parâmetro de densidade do concreto no estado fresco, basta subtrair a massa do molde vazio da massa do molde cheio concreto e dividir o resultado pelo volume do molde, conforme mostra a Equação 7:

$$D = \frac{m_t - m_v}{V_{molde}} \quad (7)$$

Em que:

D = densidade de massa (g/cm³);

m_t = massa do molde cheio (g);

m_v = massa do molde vazio (g);

V_{molde} = volume do molde (cm³).

Os corpos de prova moldados ficaram 24 horas em um local plano, livre de intempéries e vibrações. Passado esse período, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário FACENS (LEMAT), onde foram estocados em uma câmara isolada, com temperatura controlada e teor de umidade relativa do ar superior a 95%, conforme indicado pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, seguindo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018a). Esse ensaio foi realizado no LEMAT e o equipamento utilizado foi uma

máquina universal de ensaios, da marca Forney - modelo F-250C-LC1, com carga máxima de 1000 kN.

5.4.6 - Apresentação dos dados

A partir dos dados coletados, as velocidades médias de espalhamento e de vazão de cada traço foram calculadas. Essas, por sua vez, foram apresentadas em pares (conforme cada traço) - com a velocidade média de vazão em função da de espalhamento - em um gráfico de dispersão elaborado no programa Excel da Microsoft.

Com o uso equação gerada pela linha de tendência do gráfico foi possível estimar uma velocidade média de vazão em função das velocidades médias de espalhamentos calculadas para cada traço. Como a área da seção transversal é conhecida, foi então possível estimar uma vazão para cada traço.

Ambas as vazões (calculadas a partir do ensaio e estimadas) foram comparadas para aferir o grau de veracidade da hipótese proposta. Foi então apresentada uma média entre as relações das vazões de ensaio e estimada (a partir da equação de velocidade média de vazão) de todos os traços, juntamente com o desvio padrão.

Por último, a partir da vazão estimada e, com o tempo de vazão medido experimentalmente, estimou-se um volume de concreto para todos os traços, que foi comparado com o volume original de ensaio. Foi então apresentada uma média entre as relações dos volumes, juntamente com o desvio padrão.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os traços determinados, bem como a quantidade de material utilizado para a produção de cada um. Seguindo a ordem dos ensaios, são apresentados os diâmetros de espalhamento, o tempo de escoamento “ T_{500} ” e o tempo final de cada traço, seguidos pelo tempo de vazão coletado no ensaio estipulado.

A Tabelas 6.1 a 6.4 mostram os 16 traços de concreto, dosados conforme condições propostas anteriormente. Eles foram numerados de 1 a 4 conforme traço-base estipulado e cada situação foi identificada de S1 até S16.

A Tabela 6.5 apresenta a densidade de cada traço, e os valores de resistência à compressão podem ser encontrados junto ao Apêndice B deste trabalho.

Tabela 6.1 Proporção e quantidade de materiais Traço-base I.

Material	Traço unitário	S1 (kg)	S2 (kg)	S3 (kg)	S4 (kg)
Cimento	1,000	7,000	7,000	7,000	7,000
Areia Fina	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Areia Média	2,000	14,000	14,000	14,000	14,000
Brita 0	1,953	13,670	13,670	13,670	13,670
Água	0,497	3,479	3,479	3,479	3,479
Sílica ativa	0,037	0,256	0,256	0,256	0,256
SP	variável	0,062	0,062	0,054	0,054
MV	variável	0,000	0,030	0,000	0,030

SP = superplastificante MV = modificador de viscosidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.2 Proporção e quantidade de materiais Traço-base II.

Material	Traço unitário	S5 (kg)	S6 (kg)	S7 (kg)	S8 (kg)
Cimento	1,000	7,000	7,000	7,000	7,000
Areia Fina	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Areia Média	1,667	11,670	11,670	11,670	11,670
Brita 0	1,939	13,570	13,570	13,570	13,570
Água	0,439	3,076	3,076	3,076	3,076
Sílica ativa	0,068	0,476	0,476	0,476	0,476
SP	variável	0,065	0,065	0,060	0,060
MV	variável	0,000	0,020	0,000	0,020

SP = superplastificante MV = modificador de viscosidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.3 Proporção e quantidade de materiais Traço-base III.

Material	Traço unitário	S9 (kg)	S10 (kg)	S11 (kg)	S12 (kg)
Cimento	1,000	7,000	7,000	7,000	7,000
Areia Fina	2,000	14,000	14,000	14,000	14,000
Areia Média	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Brita 0	1,953	13,670	13,670	13,670	13,670
Água	0,497	3,479	3,479	3,479	3,479
Sílica ativa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SP	variável	0,065	0,065	0,081	0,081
MV	variável	0,000	0,070	0,000	0,070

SP = superplastificante MV = modificador de viscosidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.4 Proporção e quantidade de materiais Traço-base IV.

Material	Traço unitário	S13 (kg)	S14 (kg)	S15 (kg)	S16 (kg)
Cimento	1,000	7,000	7,000	7,000	7,000
Areia Fina	1,667	11,670	11,670	11,670	11,670
Areia Média	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Brita 0	1,939	13,570	13,570	13,570	13,570
Água	0,439	3,076	3,076	3,076	3,076
Sílica ativa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SP	variável	0,065	0,050	0,050	0,065
MV	variável	0,000	0,000	0,050	0,050

SP = superplastificante MV = modificador de viscosidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista as diferenças entre os traços I e III e II e IV, o que se nota é a proporção de aditivos adicionada para estabilizar a mistura e conseguir um valor de espalhamento parecido.

Tabela 6.5 Densidade dos traços.

Densidade (kg/m³)							
S1	2316 ± 10	S5	2367 ± 14	S9	2279 ± 9	S13	2329 ± 19
S2	2287 ± 2	S6	2309 ± 6	S10	2329 ± 6	S14	2323 ± 12
S3	2324 ± 20	S7	2345 ± 29	S11	2323 ± 19	S15	2316 ± 2
S4	2286 ± 5	S8	2321 ± 23	S12	2317 ± 17	S16	2341 ± 7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os traços apresentados estão dentro da faixa variável entre 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³, que a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) considera para que seus conceitos sejam aplicados.

A Tabela 6.6 apresenta os valores dos espalhamentos. Conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) os traços de S1 a S16 foram classificados nas classes SF1 e SF2.

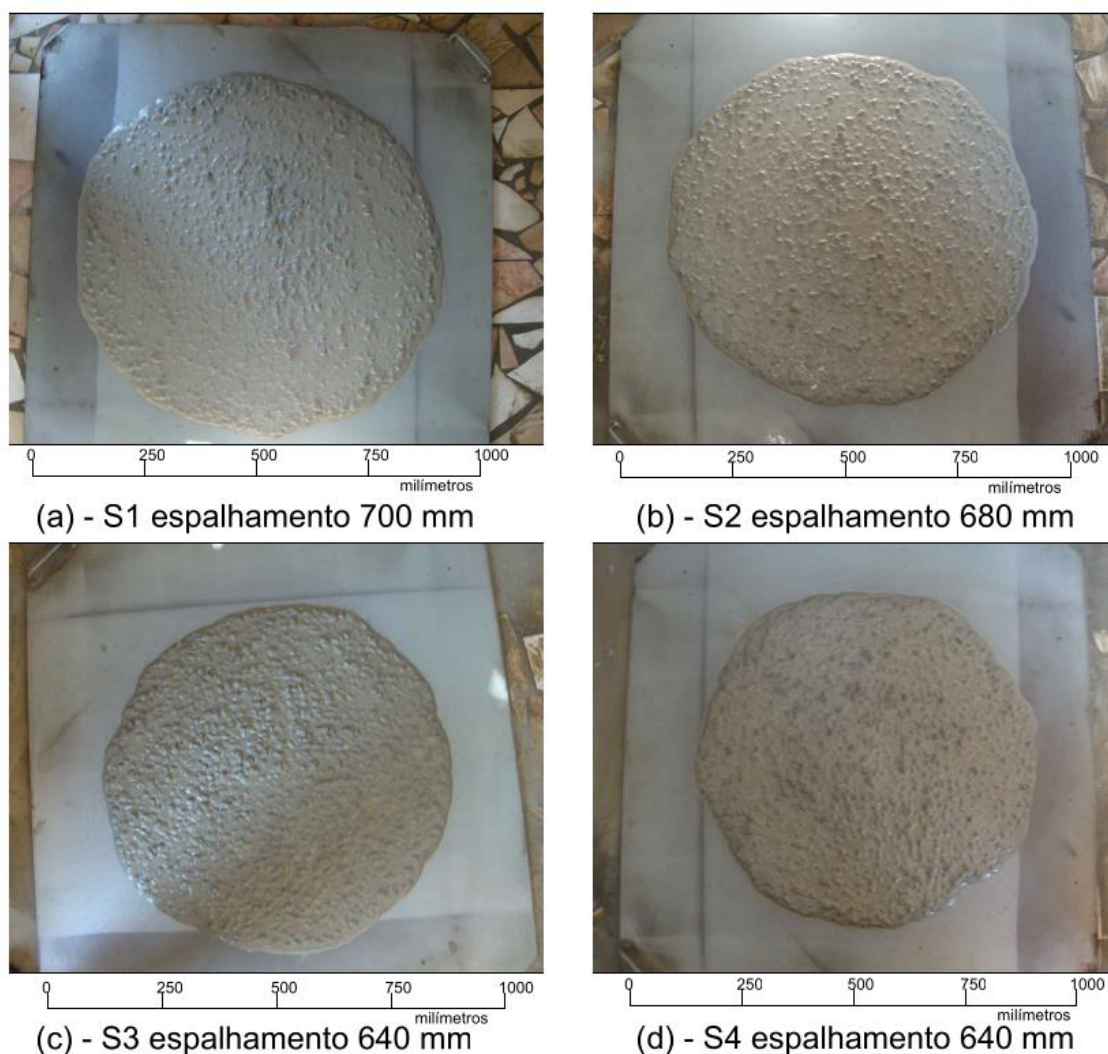
Tabela 6.6 Espalhamentos dos traços ensaiados.

ESPALHAMENTO (mm)		ESPALHAMENTO (mm)	
S1	700 (SF2)	S9	650 (SF1)
S2	680 (SF2)	S10	650 (SF1)
S3	640 (SF1)	S11	695 (SF2)
S4	640 (SF1)	S12	650 (SF1)
S5	700 (SF2)	S13	720 (SF2)
S6	650 (SF1)	S14	655 (SF2)
S7	620 (SF1)	S15	680 (SF2)
S8	620 (SF1)	S16	710 (SF2)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 6.1 a 6.4 mostram o resultado do ensaio de espalhamento, isto é, o diâmetro final medido.

Figura 6.1 Espalhamento traço-base I.

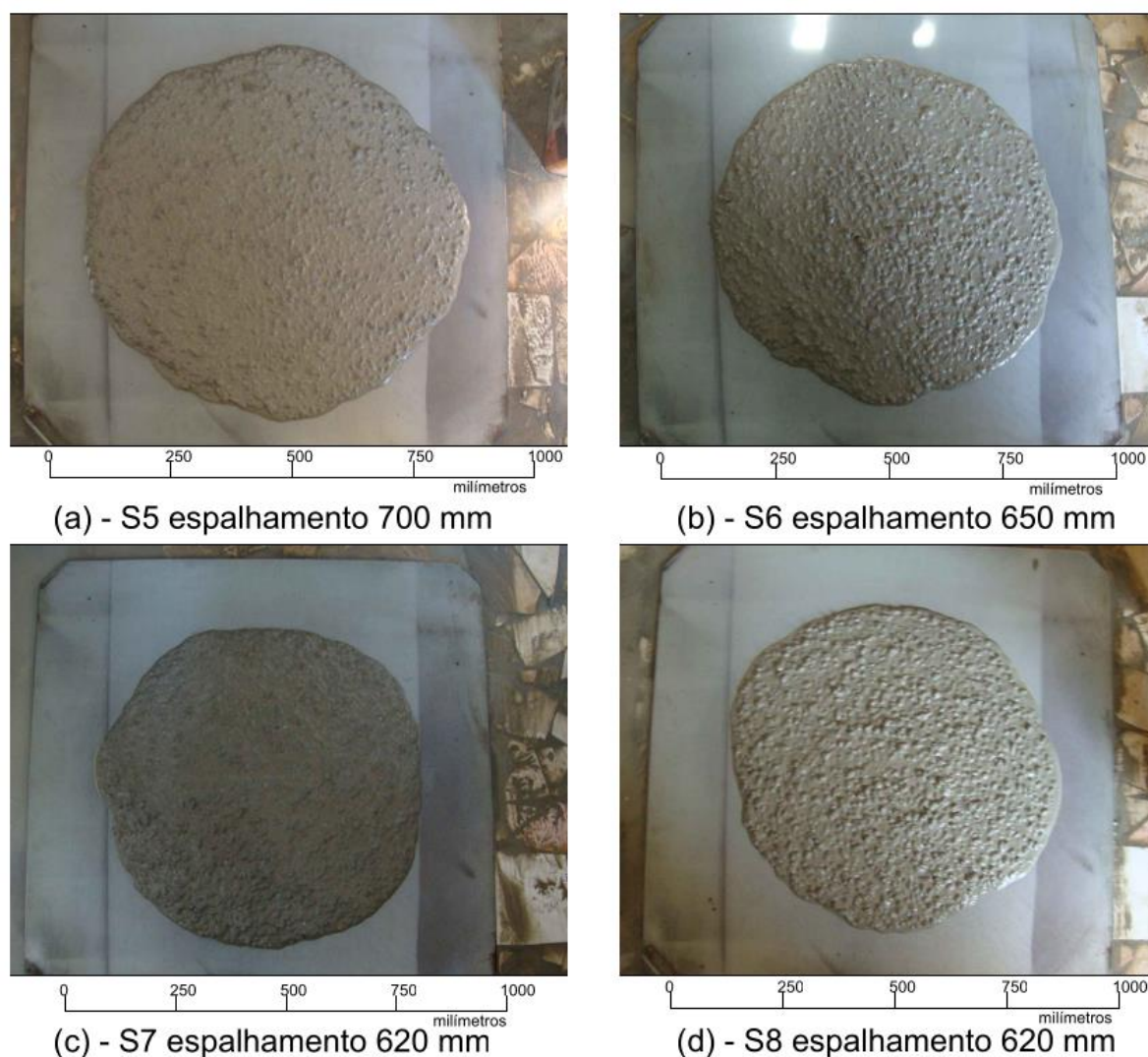


Fonte: Elaborado pelo autor.

As situações do traço-base I não apresentam sinais de exsudação ou segregação. Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), a classe de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre) que pode ser atribuída é IEV 0 – Sem evidência de segregação ou exsudação.

Observa-se que nas situações que contém o aditivo modificador de viscosidade (S2 e S4), o traço apresenta uma cor amarelada em comparação com os outros dois.

Figura 6.2 Espalhamento traço-base II.

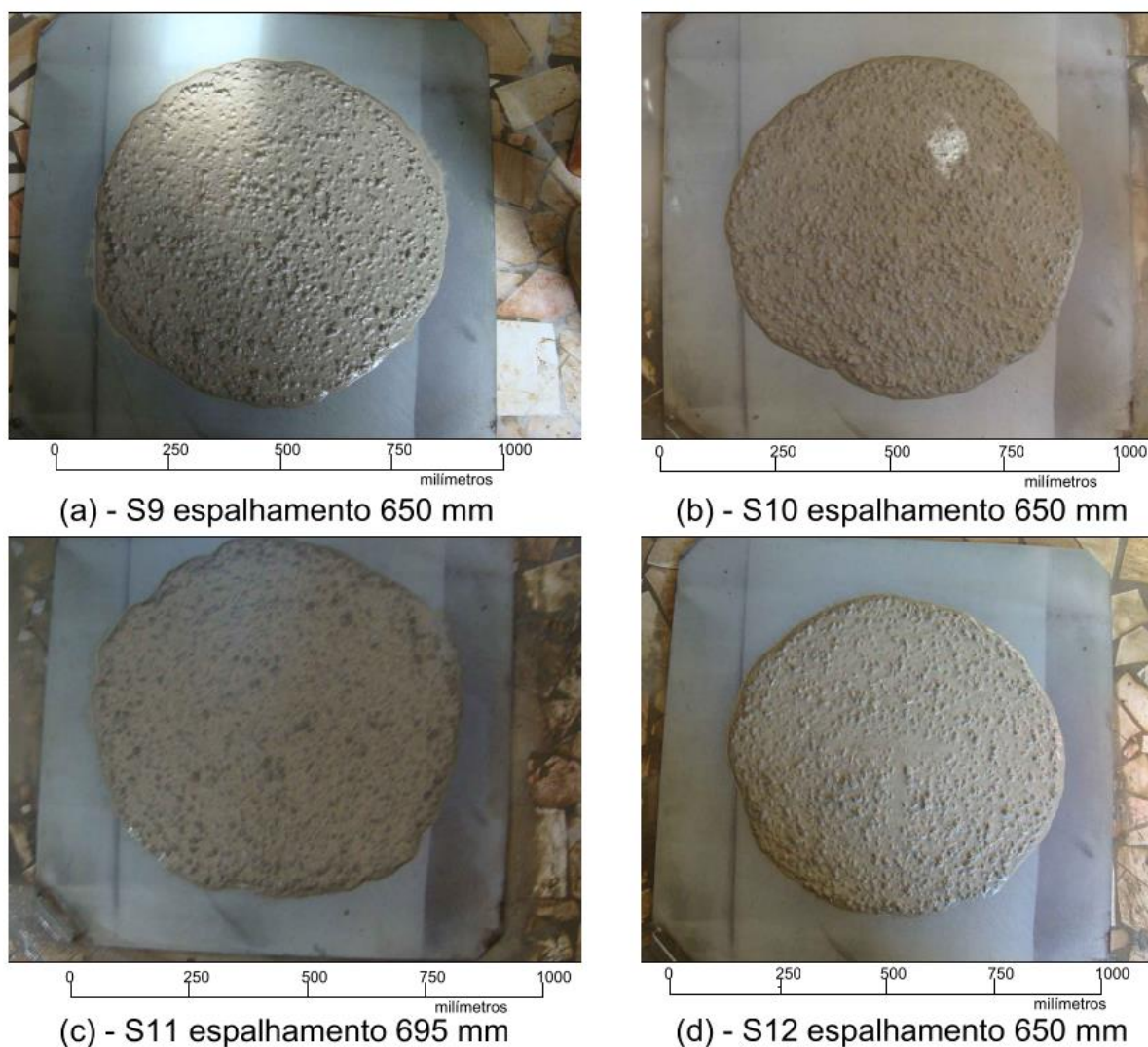


Fonte: Elaborado pelo autor.

As situações do traço-base II não apresentam sinais de exsudação ou segregação. Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), a classe de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre) que pode ser atribuída é IEV 0 – Sem evidência de segregação ou exsudação.

Observa-se que, diferente dos traços-base da situação I, o traço que apresentou coloração amarela foi o S5, que não leva o aditivo modificador de viscosidade em sua composição. O S7, que também não leva aditivo modificador de viscosidade apresenta coloração cinza escuro.

Figura 6.3 Espalhamento traço-base III.



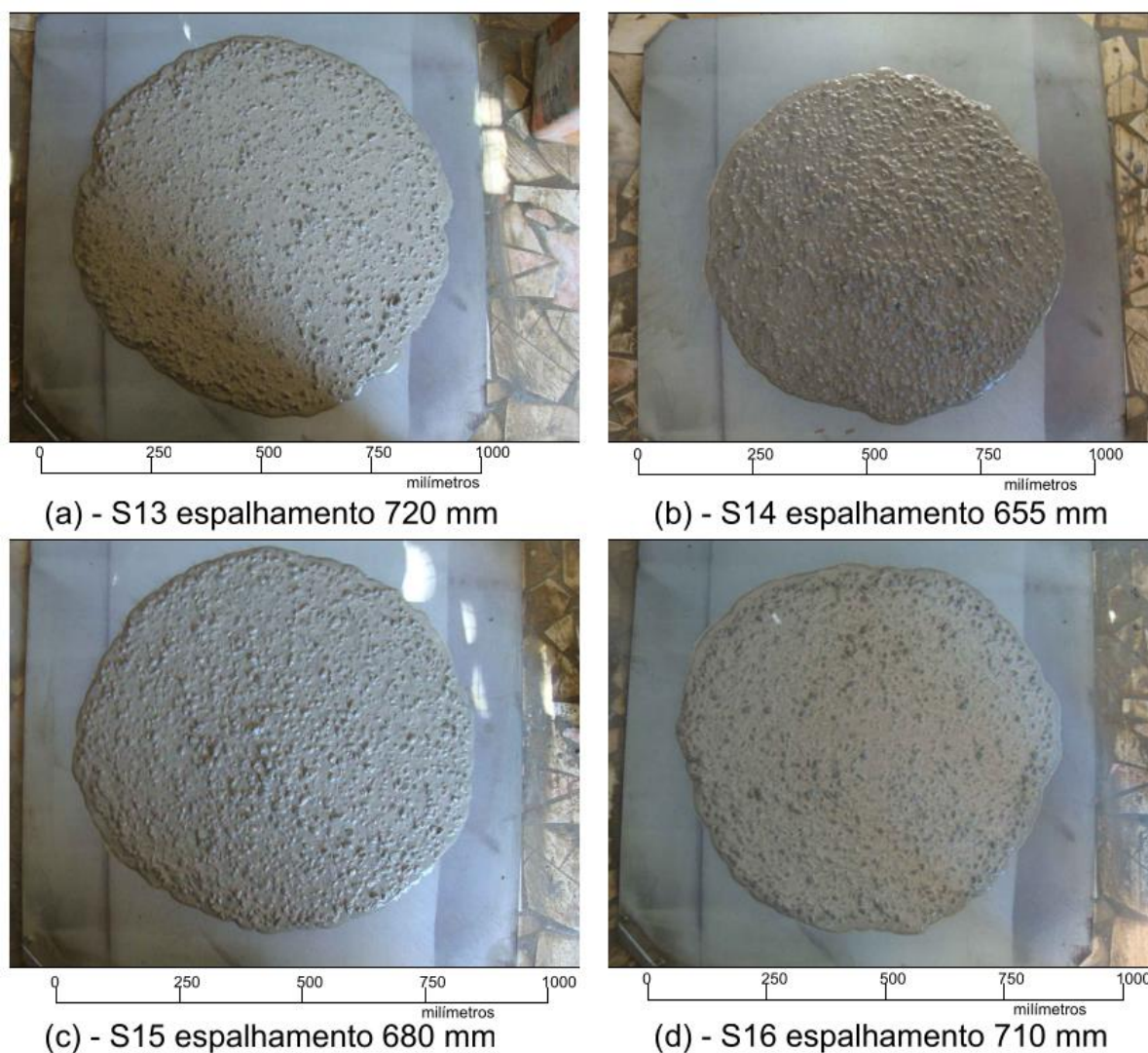
Fonte: Elaborado pelo autor.

As situações S9 e S11 do traço-base III apresentam leve exsudação. Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), a classe de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre) que pode ser atribuída é IEV 1 – Sem evidência de segregação e leve exsudação. S10 e S12 não apresentam tais evidências e podem ser classificados em IEV 0.

Diferente dos traços-base I e II, o traço-base III apresenta quatro situações com colorações parecidas, independentemente do uso de aditivo ou não.

No traço-base III fica evidente o efeito do aditivo modificador de viscosidade. Ao comparar S11 e S12 (situações com e sem tal aditivo), nota-se a diferença na uniformidade do espalhamento, apesar de o diâmetro final ter diminuído.

Figura 6.4 Espalhamento traço-base IV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O traço-base IV, com exceção da situação S16 que se enquadra na classe IEV1, todas as outras podem ser classificadas como IEV 0.

Na mesma lógica do traço-base III, o IV não apresenta variações de coloração consideráveis.

Com os traços estabilizados em todas as situações, nota-se que o uso do aditivo superplastificante em maiores quantidades cumpriu o seu papel e aumentou o diâmetro de espalhamento. Ao comparar o espalhamento das situações do mesmo traço que tinha somente o aditivo superplastificante na mistura (S1 e S3; S5 e S6; S9 e S11; S13 e S14), em todos os casos o traço com maior teor de aditivo resultou um maior diâmetro final no ensaio.

Em relação ao uso do aditivo modificador de viscosidade foi observado que ele diminui ou mantém o diâmetro final de espalhamento. Com exceção do caso S14 e S15, em que a utilização do aditivo modificador de viscosidade fez o espalhamento aumentar, em todas as outras situações que apresentam o traço diferenciado somente pela presença do modificador de viscosidade (S1 e S2; S5 e S6, por exemplo), o diâmetro diminui ou se mantém. Em alguns casos, a diminuição é mais acentuada chegando a 50 mm de diferença (S5 e S6, por exemplo).

Além disso, ao tomar as situações S5 e S8 por exemplo: enquanto S5 apresentou um espalhamento de 700 mm em pouco mais de 49 s contendo 65 gramas de aditivo superplastificante (aproximadamente 0,93% em relação à quantidade de cimento), o S8, contendo 5 gramas a menos de superplastificante (60 gramas; aproximadamente 0,86% em relação à quantidade de cimento) e 20 gramas de aditivo modificador de viscosidade (aproximadamente 0,29% em relação à quantidade de cimento) apresentou um espalhamento de 620 mm em pouco mais de 51 s. Portando fica clara a influência que o teor de aditivos pode exercer sobre os traços de concreto.

Apesar de apenas o traço-base I (S1, S2, S3 e S4) ter apresentado um equilíbrio entre as categorias de classificação SF1 e SF2, no geral, entre os 16 traços nota-se um equilíbrio de 8 para cada classe.

6.1 - Cálculo das velocidades de espalhamento e de vazão

A Tabela 6.7 mostra os valores de velocidade média de espalhamento, calculados conforme Equação 5, utilizando o tempo que o traço levou para atingir a marca de 500 mm da chapa (T_{500}) para calcular a velocidade média do traço até a

marca (V_{500}), e o tempo até atingir o diâmetro final de espalhamento (T_{total}) para calcular a velocidade média de espalhamento até o diâmetro final (V_{total}).

Tabela 6.7 Tempo e velocidade média dos traços no ensaio de espalhamento.

Traço	T_{500} (s)	V_{500} (cm/s)	T_{total} (s)	V_{total} (cm/s)	Traço	T_{500} (s)	V_{500} (cm/s)	T_{total} (s)	V_{total} (cm/s)
S1	2,1	14,3	24,1	2,1	S9	6,1	4,9	39,7	1,1
S2	2,0	15,0	24,0	2,0	S10	4,8	6,3	42,6	1,1
S3	3,4	8,8	23,1	1,9	S11	4,2	7,1	33,9	1,5
S4	2,9	10,3	28,5	1,5	S12	7,5	4,0	46,2	1,0
S5	4,3	7,0	49,1	1,0	S13	4,3	7,0	43,1	1,2
S6	4,9	6,1	50,1	0,9	S14	7,2	4,2	45,7	1,0
S7	5,1	5,9	45,1	0,9	S15	6,8	4,4	45,7	1,1
S8	7,9	3,8	51,1	0,8	S16	5,2	5,8	45,5	1,1

*Tempos considerando desvio de padrão de $\pm 0,2s$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6.8 apresenta os tempos que foram contabilizados no ensaio de vazão de cada traço e as velocidades médias de escoamento que foram calculadas com base na Equação 6.

Tabela 6.8 Tempo e velocidade de vazão no ensaio proposto.

	$T_{vazão}$ (s)	Vazão (l/s)	$V_{vazão}$ (cm/s)		$T_{vazão}$ (s)	Vazão (l/s)	$V_{vazão}$ (cm/s)
S1	2,0	5,36	68,2	S9	4,3	2,49	31,7
S2	1,7	6,31	80,3	S10	3,3	3,25	41,4
S3	2,6	4,12	52,5	S11	3,8	2,82	35,9
S4	2,3	4,66	59,3	S12	3,5	3,06	39,0
S5	5,7	1,88	23,9	S13	4,2	2,55	32,5
S6	4,3	2,49	31,7	S14	7,8	1,37	17,5
S7	4,2	2,55	32,5	S15	7,1	1,51	19,2
S8	4,2	2,55	32,5	S16	3,7	2,90	36,9
Área da seção transversal = 78,54 cm ²							
Volume de concreto ensaiado = 10,72 l							

*Tempos considerando desvio de padrão de $\pm 0,2s$.

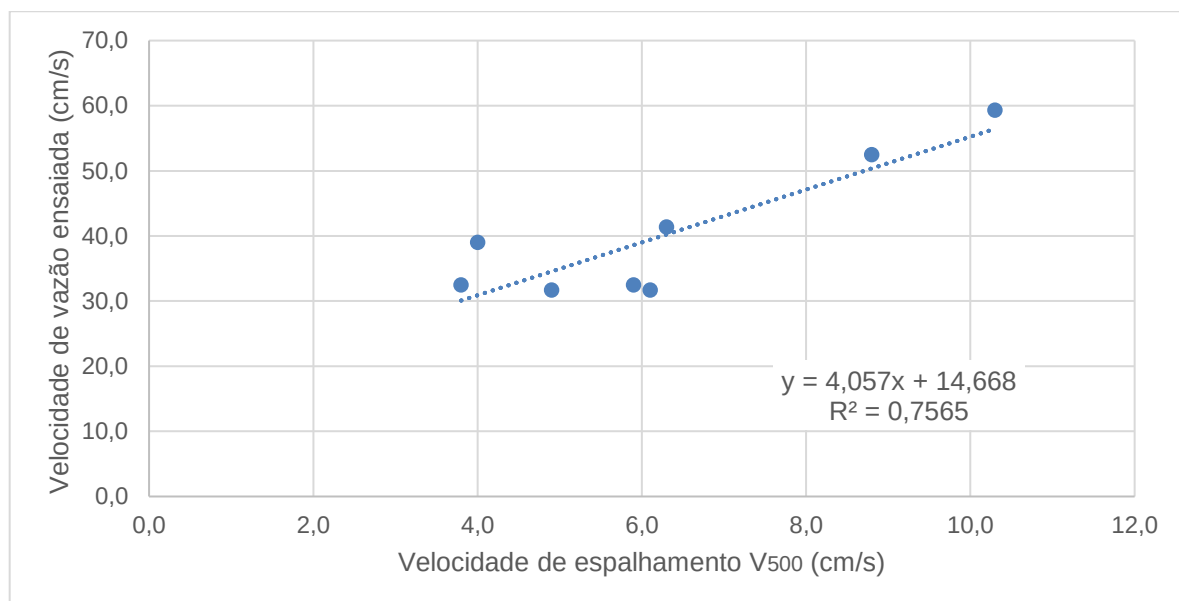
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 - Comparação entre velocidade de vazão e velocidade de espalhamento

As Figuras 6.5 a 6.10 apresentam comparações entre as velocidades demonstradas na Tabela 6.7 e 6.8. A estratégia adotada foi a de admitir quatro cenários:

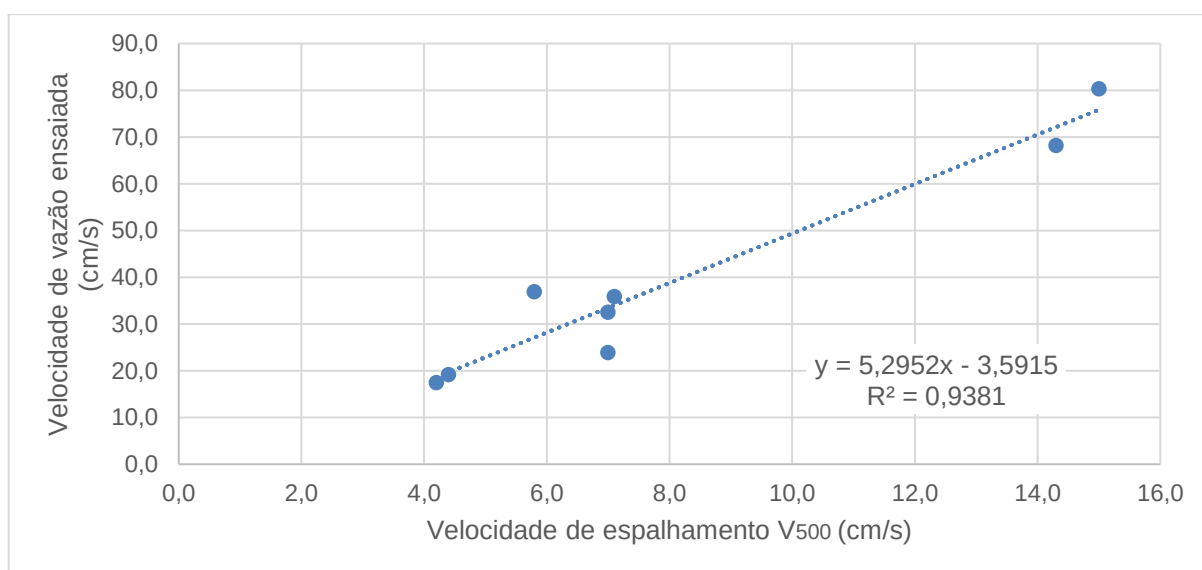
- Apresentado nas Figuras 6.5 e 6.6, o primeiro cenário compara as velocidades de espalhamento V_{500} com a velocidade de vazão para os traços classificados como SF1 e SF2, conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) separadamente;
- Apresentado na Figura 6.7, o segundo cenário compara as velocidades de espalhamento V_{500} com a velocidade de vazão em todos os traços juntos. Isto é, sem levar em consideração à classificação da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a);
- Apresentado nas Figuras 6.8 e 6.9, o terceiro cenário compara as velocidades de espalhamento V_{total} com a velocidade de vazão para os traços classificados como SF1 e SF2, conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) separadamente;
- Apresentado na Figura 6.10, o quarto cenário compara as velocidades de espalhamento V_{total} com a velocidade de vazão em todos os traços junto. Isto é, sem levar em consideração à classificação da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Figura 6.5 Velocidade de espalhamento V_{500} SF1 x velocidade de vazão.



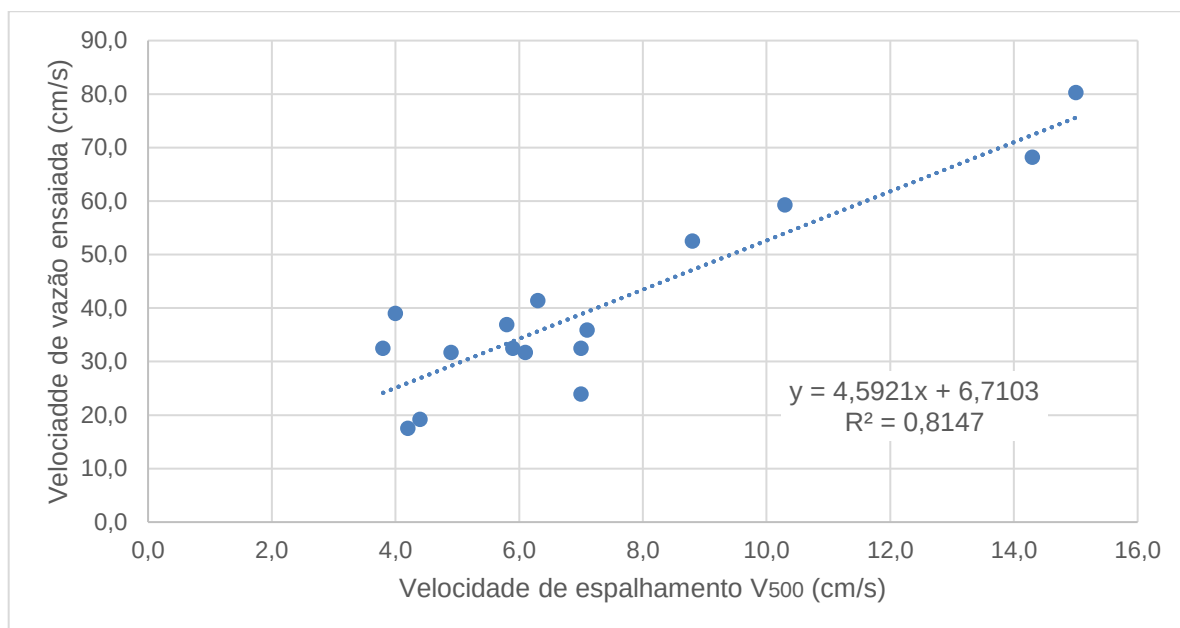
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.6 Velocidade de espalhamento V_{500} SF2 x velocidade de vazão.



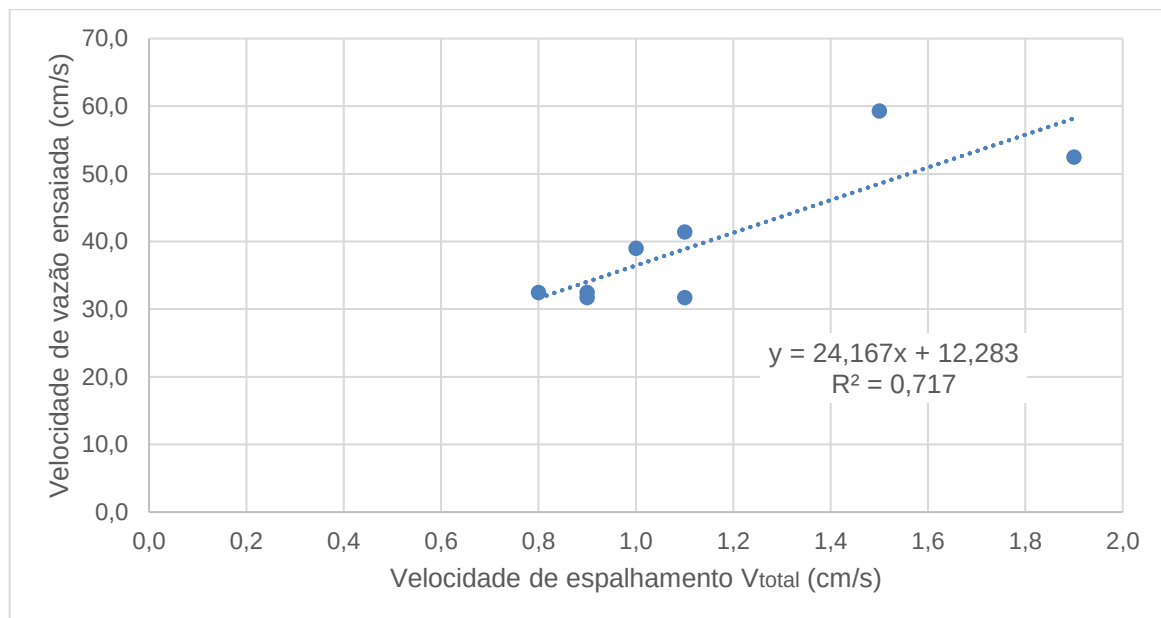
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.7 Velocidade de espalhamento V_{500} x velocidade de vazão.



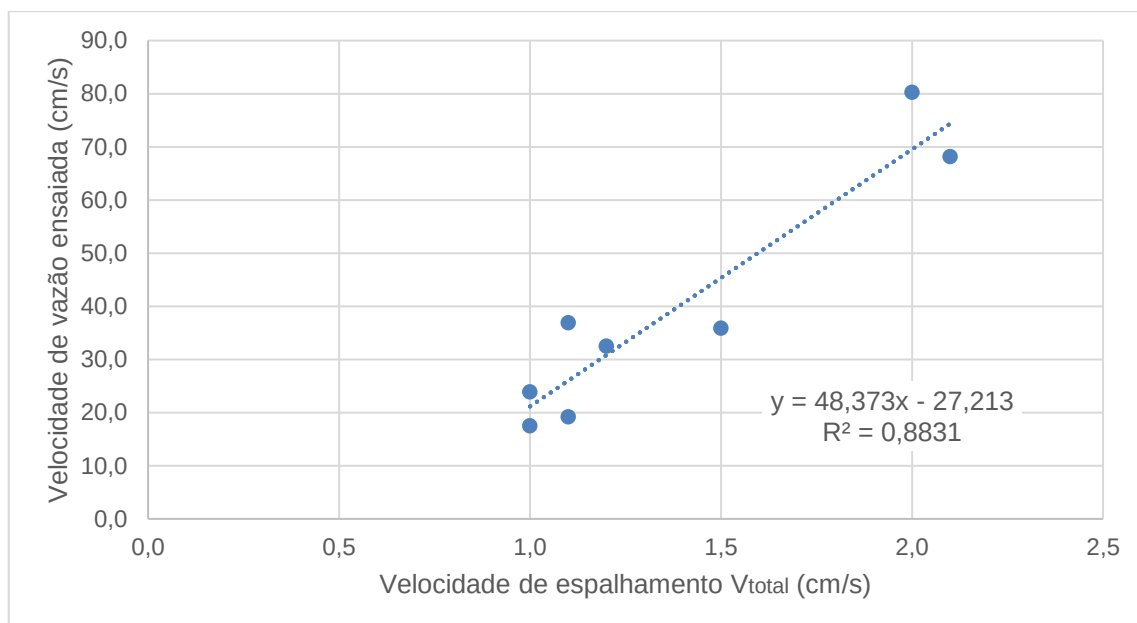
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.8 Velocidade de espalhamento V_{total} SF1 x velocidade de vazão.



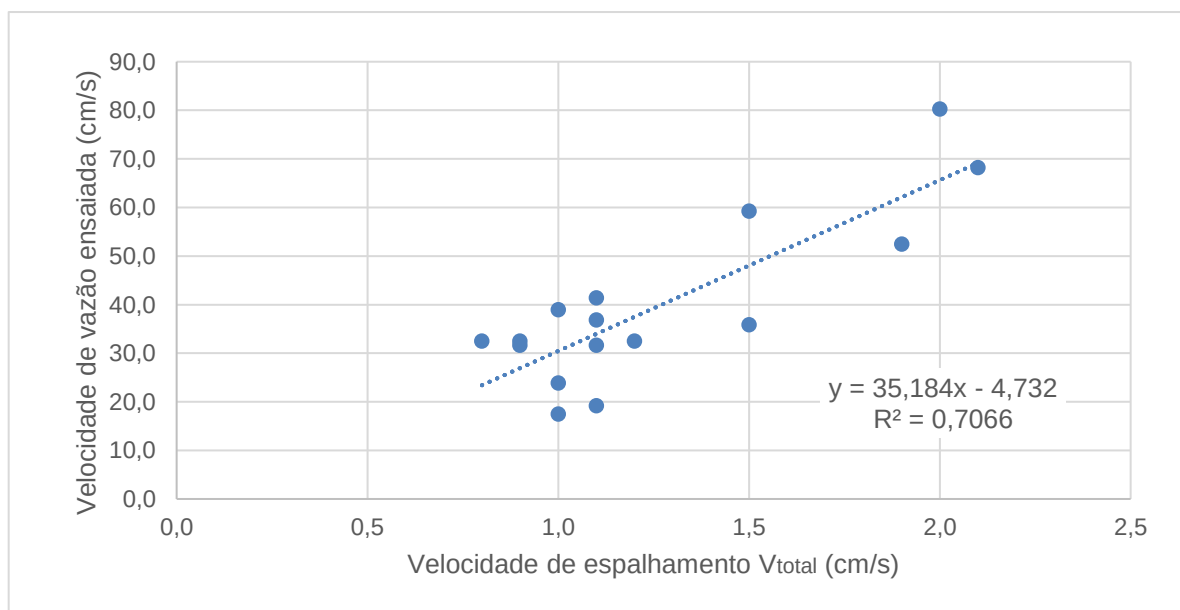
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.9 Velocidade de espalhamento V_{total} SF2 x velocidade de vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.10 Velocidade de espalhamento V_{total} x velocidade de vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final, cada cenário propõe uma equação e uma regressão linear que padroniza a comparação. Se for considerada somente a equação, observa-se nos cenários 1 e 3, em que a proposta é a análise com classificação conforme norma,

um comportamento dos traços classificados como SF2 demonstrando um padrão de comparação de velocidades melhor em relação aos de classificação SF1.

Ao comparar a regressão linear entre V_{500} e V_{total} nos cenários com classificação SF1 e SF2, tem-se que a velocidade para atingir o espalhamento de 500 mm fornece uma equação que melhor representa os valores de velocidade de ensaio em relação à velocidade para atingir o diâmetro máximo.

No cenário 2, observa-se que a respectiva regressão linear propõe uma melhora na padronização dos traços SF1 e uma piora na padronização dos traços SF2. O cenário 4 apresenta uma regressão linear de 0,7066, piorando a padronização dos traços separados em SF1 e SF2, apresentados no cenário 3.

As Tabelas 6.9 e 6.10 apresentam as vazões estimadas utilizando as equações de cada cenário anterior. Nessas duas tabelas, as situações foram organizadas conforme diâmetro de espalhamento, do menor para o maior.

Tabela 6.9 Vazões estimadas a partir dos cenários 1 e 2.

TRAÇO ⁶	V_{500} (cm/s)	Vazão de ensaio (l/s)	Vazão estimada - cenário 1 (l/s)	Vazão de ensaio / vazão cenário 1	Vazão estimada - cenário 2 (l/s)	Vazão de ensaio / vazão cenário 2
S7	5,90	2,55	3,03	0,84	2,65	0,96
S8	3,80	2,55	2,36	1,08	1,90	1,35
S4	10,30	4,66	4,43	1,05	4,24	1,10
S3	8,80	4,12	3,96	1,04	3,70	1,11
S10	6,30	3,25	3,16	1,03	2,80	1,16
S6	6,10	2,49	3,10	0,81	2,73	0,91
S9	4,90	2,49	2,71	0,92	2,29	1,09
S12	4,00	3,06	2,43	1,26	1,97	1,56
S14	4,20	1,37	1,46	0,94	2,04	0,67
S2	15,00	6,31	5,96	1,06	5,94	1,06
S15	4,40	1,51	1,55	0,98	2,11	0,71
S11	7,10	2,82	2,67	1,06	3,09	0,91
S1	14,30	5,36	5,67	0,95	5,68	0,94
S5	7,00	1,88	2,63	0,72	3,05	0,62
S16	5,80	2,90	2,13	1,36	2,62	1,11
S13	7,00	2,55	2,63	0,97	3,05	0,84
Média				1,00	Média	1,01
Desv. Padrão ±				0,15	Desv. pad.	0,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo exposto, o cenário 1 é o mais favorável para estimar a vazão dos traços. Apesar das médias entre os cenários serem bem próximas, o cenário 1 apresenta um desvio padrão menor quando comparado ao cenário 2, consequentemente, um conjunto de dados mais homogêneo.

Tabela 6.10 Vazões estimadas a partir dos cenários 3 e 4.

TRAÇO ⁶	Vtotal (cm/s)	Vazão de ensaio (l/s)	Vazão estimada - cenário 3 (l/s)	Vazão de ensaio / vazão cenário 3	Vazão estimada - cenário 4 (l/s)	Vazão de ensaio / vazão cenário 4
S7	0,90	2,55	2,67	0,95	2,12	1,21
S8	0,80	2,55	2,48	1,03	1,84	1,39
S4	1,50	4,66	3,81	1,22	3,77	1,24
S3	1,90	4,12	4,57	0,90	4,88	0,85
S10	1,10	3,25	3,05	1,06	2,67	1,22
S6	0,90	2,49	2,67	0,93	2,12	1,18
S9	1,10	2,49	3,05	0,82	2,67	0,93
S12	1,00	3,06	2,86	1,07	2,39	1,28
S14	1,00	1,37	1,66	0,83	2,39	0,57
S2	2,00	6,31	5,46	1,15	5,16	1,22
S15	1,10	1,51	2,04	0,74	2,67	0,57
S11	1,50	2,82	3,56	0,79	3,77	0,75
S1	2,10	5,36	5,84	0,92	5,43	0,99
S5	1,00	1,88	1,66	1,13	2,39	0,79
S16	1,10	2,90	2,04	1,42	2,67	1,09
S13	1,20	2,55	2,42	1,05	2,94	0,87
Média				1,00	Média	1,01
Desv. Padrão ±				0,17	Desv. pad.	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo exposto, o cenário 3 é o mais favorável para estimar a vazão dos traços. Apesar das médias entre os cenários serem bem próximas, o cenário 3 apresenta um desvio padrão menor quando comparado ao do cenário 4, consequentemente, um conjunto de dados mais homogêneo.

Uma importante observação é que em ambos os casos, seja considerando estimar a vazão por meio da velocidade média até o diâmetro 500 (V_{500}) ou pela velocidade média até o diâmetro máximo (V_{total}), o cenário mais favorável é aquele

que considera a classificação do traço de acordo com o espalhamento em SF1 e SF2.

Apesar de ambos os cenários (1 e 3) apresentarem a mesma média para a relação vazão cenário/vazão de ensaio e o mesmo número de valores fora do desvio padrão (5), nota-se que o cenário 1 apresenta uma margem no desvio padrão levemente menor e que a do cenário 3, portanto, é o que melhor estima a vazão de concreto para as situações demonstradas nesse trabalho.

Ao final, comparou-se o volume de concreto estimado pela proposta dos cenários 1 e 3 com o volume de ensaio apresentado na Tabela 6.8 (10,72 l). As Tabelas 6.11 e 6.12 expressam os resultados alcançados.

Tabela 6.11 Comparação entre volume de concreto estimado no cenário 1 e ensaiado.

TRAÇO⁶	Volume estimado - cenário 1 (l)	Volume ensaiado / Volume estimado
S7	12,73	0,84
S8	9,92	1,08
S4	10,20	1,05
S3	10,29	1,04
S10	10,43	1,03
S6	13,31	0,81
S9	11,67	0,92
S12	8,49	1,26
S14	11,42	0,94
S2	10,13	1,06
S15	10,99	0,98
S11	10,15	1,06
S1	11,33	0,95
S5	14,99	0,72
S16	7,88	1,36
S13	11,04	0,97
Média		1,00
Desv. Padrão ±		0,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.12 Comparação entre volume de concreto estimado no cenário 3 e ensaiado.

TRAÇO⁷	Volume estimado - cenário 3 (l)	Volume ensaiado / Volume estimado
S7	11,23	0,95
S8	10,43	1,03
S4	8,77	1,22
S3	11,88	0,90
S10	10,07	1,06
S6	11,49	0,93
S9	13,13	0,82
S12	10,02	1,07
S14	12,96	0,83
S2	9,28	1,15
S15	14,50	0,74
S11	13,53	0,79
S1	11,68	0,92
S5	9,47	1,13
S16	7,55	1,42
S13	10,17	1,05
Média		1,00
Desv. Padrão ±		0,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar as razões “volume ensaiado/volume estimado” e “vazão ensaiada/vazão estimada”, nota-se a semelhança entre os valores. Isso comprova que partir da análise entre duas grandezas iguais, a fim de facilitar o entendimento, não interfere na estimativa final. Portanto, a ideia é válida.

⁷ T-B I (kg): C=7,000; AF=0,000; AM=14,000; B0=13,670; A=3,479; SA=0,256 – S1: SP=0,062; MV=0,000 – S2: SP=0,062; MV=0,030 – S3: SP=0,054; MV=0,000 – S4: SP=0,054; MV=0,030
T-B II (kg): C=7,000; AF=0,000; AM=11,670; B0=13,570; A=3,076; SA=0,476 – S5: SP=0,065; MV=0,000 – S6: SP=0,065; MV=0,020 – S7: SP=0,060; MV=0,000 – S8: SP=0,060; MV=0,020
T-B III (kg): C=7,000; AF=14,000; AM=0,000; B0=13,670; A=3,479; SA=0,000 – S9: SP=0,065; MV=0,000 – S10: SP=0,065; MV=0,070 – S11: SP=0,081; MV=0,000 – S12: SP=0,081; MV=0,070
T-B IV (kg): C=7,000; AF=11,670; AM=0,000; B0=13,570; A=3,076; SA=0,000 – S13: SP=0,065; MV=0,000 – S14: SP=0,050; MV=0,000 – S15: SP=0,050; MV=0,050 – S16: SP=0,065; MV=0,050

De modo geral, as médias apontam um resultado otimista, uma vez que todos os cenários apresentaram valores muito próximos ou iguais a 1,00, o que significa dizer que, em média, a vazão estimada é igual a vazão de ensaio.

O que resta é aplicar o conceito em escalas maiores e esperar que os resultados a partir deste novo estudo se mostrem válidos conforme visto neste trabalho e talvez com um desvio padrão ainda menor, confirmando a hipótese.

7 - CONCLUSÕES

Diante das análises realizadas neste trabalho, conclui-se que em alguns dos casos a comparação entre as velocidades médias de espalhamento e de vazão durante esse ensaio podem ser um indicativo da vazão real.

Considerando todos os concretos autoadensáveis ensaiados em um mesmo espaço amostral, a relação entre a vazão de ensaio e a vazão estimada por meio do conceito mostrado na hipótese deste trabalho e definida nos cenários 2 e 4 (baseados na velocidade até a marca de 500 mm e no diâmetro total, respectivamente, e sem considerar a classificação SF-1 e SF-2 da NBR 15823-1), apresentaram um desvio padrão 23% e 25%, respectivamente. Tratando-se de volume, isso quer dizer que cada metro cúbico de concreto entregue pode ser qualquer volume entre 0,770 e 1,230 m³ ou 0,750 e 1,250 m³. Nesses casos, a incerteza está elevada e talvez não seja ideal para uma padronização.

Ao separar a gama de traços ensaiada nesse trabalho conforme a classificação SF1 e SF2 da NBR 15823-1, nos cenários 1 e 3, os desvios padrões entre a vazão de ensaio e a vazão estimada foram de 15% e 17%, respectivamente. Nesses casos, cada metro cúbico de concreto entregue pode ser qualquer volume entre 0,850 e 1,150 m³ ou 0,83 e 1,17 m³, o que representam melhores padrões em relação ao apresentado nos cenários 2 e 4.

Utilizar a classificação dos concretos conforme a NBR 15823-1 mostrou sua importância ao baixar o desvio padrão em 8% entre os cenários 1 e 2 e entre os cenários 3 e 4.

O que poderá definir o melhor cenário entre o 1 e 3 será a aplicação em escalas maiores e semelhantes às encontradas no mercado. Seria necessário desenvolver um ensaio de vazão em um equipamento semelhante ao utilizado neste trabalho, porém, com um volume de concreto muito maior. Seria interessante desenvolver um método que mantenha uma altura de coluna de concreto fixa, evitando assim variações na vazão referente à variação de energia do sistema. Com grandes volumes de concreto e, ao garantir que as propriedades durante todo o ensaio de vazão sejam mantidas, pode ser que a margem de erro diminua e um cenário mais preciso se desenvolva.

Já que obter parâmetros reológicos do concreto sem o uso de equipamentos sofisticados é um processo complexo em laboratórios e quase impossível no canteiro de obras, utilizar a “velocidade de espalhamento”, que é obtida por meio de um ensaio simples e corriqueiro, pode ser a chave para mensurar a vazão e, conseqüentemente, determinar o volume de concreto entregue. Ainda que não seja possível definir qual o melhor cenário para a medição de vazão, visto que este trabalho apresenta um estudo inicial realizado em escala de laboratório e os traços utilizados representam uma gama muito pequena em relação ao que se encontra no mercado atual da construção civil, conseguir estimar a vazão de concreto em 2 cenários com um desvio padrão de 15% e 17% em relação à vazão de ensaio do traço é um cenário otimista.

Contudo, o estudo de um método para medir o volume de concreto que sai do caminhão betoneira na obra é necessário, pois assim o controle dos custos e do cronograma da obra podem ser melhorados a fim de evitar surpresas indesejáveis. Principalmente em épocas atuais em que a busca por racionalização de custos está cada vez maior.

8 - REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.** São Paulo, 28 de Agosto de 2013. Disponível em: <<https://abcp.org.br/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:14.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Vendas de cimento crescem 6,6% em 2021.** São Paulo, 12 de Janeiro de 2022. Disponível em: <<https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-66-em-2021/>>. Acesso em: 15/12/2022 às 20:31.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento portland em concreto, argamassa e pasta - parte 1: requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável - parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável - parte 2: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3: Concreto autoadensável - parte 3: determinação da habilidade passante - método do anel j.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó** - determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127: Gesso para construção civil** - determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro: ABNT, 2017e.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland** - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento portland - parte 1**: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto** - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – desempenho – parte 1**: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto** - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

AMN - ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 248: Agregados**- determinação da composição granulométrica. São Paulo: AMN, 2001.

AMN - ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 45: Agregados** - determinação de massa unitária e do volume de vazios. São Paulo: AMN, 2006.

AMN - ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 52: Agregado miúdo** - determinação de massa específica e massa específica aparente. São Paulo: AMN, 2009a.

AMN - ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 53: Agregado graúdo** - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. São Paulo: AMN, 2009b.

ANDOLFATO, R. P. **Concreto tecnológico básico do concreto**. Ilha Solteira: “Núcleo de ensino e pesquisa da alvenaria estrutural” NEPAE, 2002. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/controle-tecnologico-basico-do-concreto.pdf>>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:39.

ANTUNES, T. B. M. **Influência da temperatura nas propriedades físico-químicas de cimentos à base de silicato de cálcio**, 2021. 124f. Dissertação (Mestrado em Clínica odontológica) – Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Piracicaba, 2021.

BARBOSA, M. P., et. al. *Determinação de parâmetros reológicos de argamassas e concreto através de técnicas alternativas*. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo, v.4, n.3, p. 440-480, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/riem/a/6z7dQhy4DRXDJFXyYxrRQgQ/?format=pdf&lang=pt>> Acesso em: 20/12/2022 às 22:39.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z. P. *Muito além do controle tecnológico convencional do concreto*. **Concreto e Construções**, São Paulo, ano XLV, n. 86, p. 66, Abr-Jun. 2017. Disponível em: <http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/revista86.pdf>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:40.

CARMO, J. B. M. do.; PORTELLA, K. F. *Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto*. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 54, n. 331, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/GXJkkmZfvGB3K9VCvm9mdNd/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:40.

DE ANTONI, C. *Cimento de reduzido impacto ambiental em casa*. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2021. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/ecocimentos/bienc-carolina/>>. Acesso em: 13/02/2023 às 19:52.

CASTRO, A. L.; LIBORIO J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. *Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – revisão*. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/DwRsDL7PvNrDL9GHsSLpNJP/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:41.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. *Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil*. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 333, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/6jsRNJDKJHCNCczb3fMfLFv/?format=pdf&lang=pt>>.

FERRARIS, C. F. *Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report*. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, Gaithersburg, v.104, n.5, p. 461-478, 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/2378156_Measurement_of_the_Rheological_Properties_of_High_Performance_Concrete_State_of_the_Art_Report>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:41.

GARCIA, M. L. G. **O novo manual de aditivos para concreto**. Palestrante: Maurício Luiz Grochoski Garcia. São Paulo: Engenharia civil Mackenzie, 2021. 1 vídeo (72 min.). Transmido ao vivo em 15 de Outubro de 2021 pelo canal Engenharia civil Mackenzie. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2SRq6K0d9aY&ab_channel=EngenhariaCivilMackenzie>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:41.

GUINNESS WORLD RECORDS – **Longest Bridge**, 2011.

Disponível em:

<<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/longest-bridge>>. Acesso em: 13/02/2023 às 19:37.

GUINNESS WORLD RECORDS – **Tallest Building**, 2010.

Disponível em:

<<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/tallest-building>>. Acesso em: 13/02/2023 às 19:38.

HELENE, P.; ANDRADE, T. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. IBRACON, São Paulo, cap.29, 2010.

ITAIPÚ BINACIONAL – **Curiosidades**.

Disponível em: < <https://www.turismoitaipu.com.br/pt/curiosidades>>.

Acesso em: 13/02/2023 às 19:35.

KHATIB, J. M. *Performance of self-compacting concrete containing fly ash*. Revista **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 9, 2008. Disponível em:

<<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061807001948?token=C68923625E4AFE6A076F7E6D427F5F65356A902660A639E9543E2B2FA5B88960024E5823EA7D45E21DB76151666EF281&originRegion=us-east-1&originCreation=20221117194843>>. Acesso em: 13/02/2023 às 20:51.

KOSKELA, L. **Application of the new production philosophy to construction**. CIFE Technical Report. No. 72. Stanford University. Stanford. CA., 1992.

Li, V. C., *Can Concrete Be Bendable? The notoriously brittle building material may yet stretch instead of breaking*, **American Scientist**, v.100(6), p.484-493, 2012.

Disponível em: <

https://www.researchgate.net/publication/298477728_Can_Concrete_Be_Bendable_The_notoriously_brittle_building_material_may_yet_stretch_instead_of_breaking>.

Acesso em: 13/02/2023 às 19:49.

LI, S.; FANG, Y.; WU, X. *A systematic review of lean construction in Mainland China*. **Journal of Cleaner Production**, Tianjin - China, v.257, p. 01-16, 2020. Disponível em:

<<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652620306284?token=776F74BDB71EA1A7C58B7142FDE1540DA4E0A0BA2860FDE8E77528D79F96337616B48D72F14D98A2F3CC2DC525E1EBA2&originRegion=us-east-1&originCreation=20230213180314>>

Acesso em: 13/02/2023 às 15:03.

MASCOLO, R.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. *Concreto usinado: análise da variação de resistência à compressão e de propriedades físicas ao longo da descarga do caminhão betoneira*. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo, v.6, n.2, p. 194-210, 2013. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/riem/a/LGwCXmK96cvPmbKcWBGgY7R/?format=pdf&lang=pt>> Acesso em: 20/12/2022 às 22:44.

MC BAUCHEMIE. *Ficha técnica Aditivo modificador de viscosidade Centrament Stabi 520*, São Paulo, 2019a. Disponível em:

<https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/Centrament%20Stabi%20520.pdf>.

Acesso em: 20/12/2022 às 22:44.

MC BAUCHEMIE. *Ficha técnica Aditivo superplastificante MC-Powerflow 4001*, São Paulo, 2019b. Disponível em:

<https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%204001.pdf>.

Acesso em: 20/12/2022 às 22:44.

MENDES, M. BAUER, E; SILVA, F. *Avaliação dos parâmetros de autoadensibilidade e de reologia do concreto autoadensável*. **Revista Matéria**, Rio De Janeiro, v. 22, n. 04, 2017. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rmat/a/mj5zYLmRfywz9N4rd9LvzXd/?format=pdf&lang=pt>>.

Acesso em: 20/12/2022 às 22:45.

MOHSEN, O.; NAUMETS, S.; HAMZEH, F. *Lean thinking to improve curriculum delivery in civil engineering using Monte Carlo simulation*. Proceedings of the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC30), 1–12, Edmonton – Canadá, 2022.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PEDROSO, F. L. *Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem*. **Concreto e Construções**, São Paulo, ano XXXVII, n. 53, p. 14, Jan/Fev/Mar. 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:46.

PRINCE, W.; EDWARDS-LAJNEF, M.; AİTCIN, P. -C. *Interaction between ettringite and a polynaphtalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste*. **Cement and Concrete Research**, v.32, n.1, p. 79-85, 2002. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0008884601006329?token=D8198C5574EE9F3DB02BE2C6DB6E4A88EB9E5195DEB21CC311B0935E444F62FD7C9198299D9E68A9C49203E343551073&originRegion=us-east-1&originCreation=20230213182535>> Acesso em: 13/02/2023 às 15:24.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland**: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos, 2015. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso**, 2008. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2008.

REVISTA UHE BELO MONTE – ENERGIA DO XINGU. **Xingu+** - Conheça os números da usina hidrelétrica Belo Monte. P.36-37. Ed. 6. Maio, 2021. Disponível em: <<https://www.calameo.com/read/00563182738f3f91bfcc1>>. Acesso em: 13/02/2023 às 19:30.

RIBEIRO, A. A. *et. al. Lean construction na indústria da construção civil brasileira: uma revisão sistemática da literatura*. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v.12, n.4, p. 279-290, 2020. Disponível em: <<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/16970/209209213908>> Acesso em: 13/02/2023 às 14:53.

ROMANO, R. C. O; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. **Propriedades do concreto no estado fresco**. São Paulo: Concreto: ciência e tecnologia, 2011.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *Relatório anual 2008*. **SNIC**, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2008.pdf>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:46.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *Relatório anual 2012*. **SNIC**, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2012.pdf>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:46.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *Perfil da distribuição de cimento por regiões e estados*. **SNIC**, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1660573953.pdf>>. Acesso em: 20/12/2022 às 22:47.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. **IBRACON**, São Paulo, cap.36, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. **Concreto auto-adensável**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

APÊNDICE A – DENSIDADE DOS TRAÇOS DE CONCRETO

Os dados de densidade do concreto fresco apresentados na Tabela 5.5 foram admitidos com base na média e desvio padrão dos valores apresentados na Tabela A1. Para cada situação, foram moldados 3 corpos de prova, numerados de 1 a 3.

Tabela A1 Densidade do concreto fresco nos corpos de prova
(g/cm³)

S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3	S4-1	S4-2	S4-3
2,30	2,32	2,33	2,29	2,28	2,29	2,32	2,30	2,35	2,28	2,28	2,29
S5-1	S5-2	S5-3	S6-1	S6-2	S6-3	S7-1	S7-2	S7-3	S8-1	S8-2	S8-3
2,37	2,38	2,35	2,30	2,32	2,31	2,38	2,34	2,31	2,35	2,30	2,31
S9-1	S9-2	S9-3	S10-1	S10-2	S10-3	S11-1	S11-2	S11-3	S12-1	S12-2	S12-3
2,29	2,27	2,27	2,34	2,32	2,33	2,34	2,30	2,33	2,33	2,29	2,33
S13-1	S13-2	S13-3	S14-1	S14-2	S14-3	S15-1	S15-2	S15-3	S16-1	S16-2	S16-3
2,36	2,31	2,32	2,32	2,31	2,34	2,32	2,32	2,31	2,33	2,34	2,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICAS À COMPRESSÃO DOS TRAÇOS DE CONCRETO

Conforme item 5.4.5 “moldagem de corpos de prova”, as Tabelas B1 a B4 apresentam os resultados de resistência à compressão dos traços ensaiados. Os corpos de prova ensaiados são os mesmos apresentados no apêndice A.

Tabela B1 Dados Traço I

	Data de Moldagem	Data de ensaio (28 dias +/- 24 horas)	Data de ensaio	Resistência à compressão		RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)		
				kN	MPa			
S1-1	11/07/21 10:00	08/08/21	09/08/21	205,10	26,11	25,97	±	0,98
S1-2	11/07/21 10:00	08/08/21	09/08/21	211,10	26,88			
S1-3	11/07/21 10:00	08/08/21	09/08/21	195,80	24,93			
S2-1	13/07/21 10:00	10/08/21	10/08/21	157,30	20,03	19,93	±	0,45
S2-2	13/07/21 10:00	10/08/21	10/08/21	152,60	19,43			
S2-3	13/07/21 10:00	10/08/21	10/08/21	159,60	20,32			
S3-1	11/07/21 12:40	08/08/21	09/08/21	269,20	34,28	34,43	±	0,24
S3-2	11/07/21 12:40	08/08/21	09/08/21	269,50	34,31			
S3-3	11/07/21 12:40	08/08/21	09/08/21	272,60	34,71			
S4-1	11/07/21 11:40	08/08/21	09/08/21	236,20	30,07	30,78	±	0,80
S4-2	11/07/21 11:40	08/08/21	09/08/21	240,60	30,63			
S4-3	11/07/21 11:40	08/08/21	09/08/21	248,60	31,65			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B2 Dados Traço II

	Data de Moldagem	Data de ensaio (28 dias +/- 24 horas)	Data de ensaio	Resistência à compressão		RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)		
				kN	MPa			
S5-1	13/07/21 12:15	10/08/21	10/08/21	307,30	39,13			
S5-2	13/07/21 12:15	10/08/21	10/08/21	304,50	38,77	39,75	±	1,40
S5-3	13/07/21 12:15	10/08/21	10/08/21	324,80	41,35			
S6-1	15/07/21 10:00	12/08/21	12/08/21	312,30	39,76			
S6-2	15/07/21 10:00	12/08/21	12/08/21	330,60	42,09	40,82	±	1,18
S6-3	15/07/21 10:00	12/08/21	12/08/21	318,90	40,60			
S7-1	15/07/21 12:35	12/08/21	12/08/21	381,50	48,57			
S7-2	15/07/21 12:35	12/08/21	12/08/21	386,30	49,19	47,85	±	1,81
S7-3	15/07/21 12:35	12/08/21	12/08/21	359,60	45,79			
S8-1	15/07/21 15:20	12/08/21	12/08/21	292,10	37,19			
S8-2	15/07/21 15:20	12/08/21	12/08/21	302,40	38,50	37,19	±	1,32
S8-3	15/07/21 15:20	12/08/21	12/08/21	281,70	35,87			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B3 Dados Traço III

	Data de Moldagem	Data de ensaio (28 dias +/- 24 horas)	Data de ensaio	Resistência à compressão		RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	
				kN	MPa		
S9-1	18/07/21 10:10	15/08/21	16/08/21	231,80	29,51	28,30	± 1,13
S9-2	18/07/21 10:10	15/08/21	06/08/21	214,10	27,26		
S9-3	18/07/21 10:10	15/08/21	16/08/21	220,90	28,13		
S10-1	18/07/21 11:35	15/08/21	16/08/21	257,90	32,84	32,04	± 1,31
S10-2	18/07/21 11:35	15/08/21	16/08/21	257,30	32,76		
S10-3	18/07/21 11:35	15/08/21	16/08/21	239,80	30,53		
S11-1	18/07/21 12:30	15/08/21	16/08/21	195,50	24,89	25,04	± 0,48
S11-2	18/07/21 12:30	15/08/21	16/08/21	193,60	24,65		
S11-3	18/07/21 12:30	15/08/21	16/08/21	200,90	25,58		
S12-1	20/07/21 09:50	17/08/21	17/08/21	171,60	21,85	21,80	± 0,32
S12-2	20/07/21 09:50	17/08/21	17/08/21	168,50	21,45		
S12-3	20/07/21 09:50	17/08/21	17/08/21	173,50	22,09		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B4 Dados Traço IV

	Data de Moldagem	Data de ensaio (28 dias +/- 24 horas)	Data de ensaio	Resistência à compressão		RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)
				kN	MPa	
S13-1	20/07/21 10:55	17/08/21	17/08/21	180,60	22,99	23,18 ± 0,43
S13-2	20/07/21 10:55	17/08/21	17/08/21	179,70	22,88	
S13-3	20/07/21 10:55	17/08/21	17/08/21	186,00	23,68	
S14-1	22/07/21 09:40	19/08/21	19/08/21	251,30	32,00	31,92 ± 0,26
S14-2	22/07/21 09:40	19/08/21	19/08/21	248,40	31,63	
S14-3	22/07/21 09:40	19/08/21	19/08/21	252,40	32,14	
S15-1	22/07/21 10:50	19/08/21	19/08/21	251,10	31,97	32,09 ± 0,14
S15-2	22/07/21 10:50	19/08/21	19/08/21	251,80	32,06	
S15-3	22/07/21 10:50	19/08/21	19/08/21	253,20	32,24	
S16-1	22/07/21 12:00	19/08/21	19/08/21	193,90	24,69	24,94 ± 0,36
S16-2	22/07/21 12:00	19/08/21	19/08/21	199,20	25,36	
S16-3	22/07/21 12:00	19/08/21	19/08/21	194,60	24,78	

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – REAPROVEITAMENTO DE MATERIAIS

Ao final da execução do ensaio de vazão, foram moldados corpos de prova e o restante do concreto foi reutilizado na moldagem de placas de piso não estruturais, conforme mostrado na Figura C.1.

Figura C1 Placas de piso não estruturais moldadas com sobras de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor.