

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

CARLOS EDUARDO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DE LOTES DE
CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE
PASTAS CIMENTÍCIAS E CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

CARLOS EDUARDO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DE LOTES DE
CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE
PASTAS CIMENTÍCIAS E CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientadora:
Prof^a. Juliana Machado Casali, Dr^a.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Nascimento, Carlos Eduardo

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DE LOTES
DE CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE PASTAS CIMENTÍCIAS
E CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO / Carlos
Eduardo Nascimento; orientação de Juliana Machado
Casali. - Florianópolis, SC, 2023.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico
de Construção Civil.

Inclui Referências.

1. Reologia. 2. Concreto de alto desempenho. 3.
Superplastificantes. I. Casali, Juliana Machado. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. III. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA
DA VARIABILIDADE DE LOTES DE CIMENTO PORTLAND
NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE PASTAS CIMENTÍCIAS
E CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO.

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DE LOTES DE CIMENTO
PORTLAND NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE PASTAS CIMENTÍCIAS E
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**

CARLOS EDUARDO NASCIMENTO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 26 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof^a. Juliana Machado Casali, Dr^a.

Prof^o. Alexandre Lima de Oliveira, Dr^o.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof^a. Andrea Murillo Betioli, Dr^a.
Instituto Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, Saumir e Margarete, e à
minha irmã Maria Eduarda, que sempre
acreditaram no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, que sempre esteve ao meu lado, seu amor incondicional, encorajamento constante e apoio emocional foram cruciais para que eu pudesse superar os desafios e obstáculos que surgiram ao longo dos caminhos percorridos até aqui. Sem a presença de vocês, eu não teria alcançado este marco importante na minha vida, sou profundamente grato por tudo que fizeram por mim.

Aos amigos e colegas de classe que também desempenharam um papel significativo na minha jornada. Agradeço por estarmos juntos durante todo o percurso, compartilhando conhecimentos, experiências e nos apoiando mutuamente, suas contribuições e discussões sem dúvidas foram fatores essenciais para enriquecer meu aprendizado.

Gostaria de expressar também minha gratidão aos professores e servidores do Instituto Federal de Santa Catarina, cujo comprometimento com a excelência acadêmica e dedicação em transmitir conhecimento foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Agradeço especialmente a professora Juliana Machado Casali, que me orientou de forma bastante solícita e deu grandes contribuições durante a elaboração deste trabalho, agradeço também aos membros da banca examinadora que se disponibilizaram a avaliar este trabalho.

Aos colegas de profissão com quem tive o privilégio de trabalhar, suas trocas de experiências, debates e colaborações foram fundamentais para o meu crescimento profissional.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todos que, de alguma forma, estiveram presentes durante esta jornada, seu apoio, estímulo e compreensão foram fundamentais para a conclusão desta etapa da minha vida. Sou profundamente grato por toda a confiança depositada em mim e pelas oportunidades que me foram concedidas. Este trabalho de conclusão de curso representa o fim de um período intenso e desafiador, e cada um de vocês teve um papel significativo nesta conquista.

“Qual o valor de viver, se não for para lutar por causas nobres e fazer deste mundo confuso um lugar melhor para aqueles que viverão nele depois de termos partido.”

(Winston Churchill)

RESUMO

Uma demanda cada vez maior por eficiência e variedade de produtos pode ser notada através dos diferentes tipos de cimento Portland e aditivos químicos, como os plastificantes e superplastificantes disponíveis no mercado. A norma que dá as diretrizes a respeito da classificação do cimento Portland no Brasil permite composições abrangentes, fazendo com que cimentos Portland com composições diferentes ainda sejam classificados em um mesmo tipo. Esta variação na composição é capaz de fazer com que cimentos Portland de mesma marca e tipo, mas de lotes diferentes possam apresentar comportamentos distintos, dificultando a padronização da dosagem e previsibilidade de comportamento da mistura. A avaliação de parâmetros reológicos capazes de determinar variáveis como tensão de escoamento, viscosidade e tensão de cisalhamento vêm se tornando uma alternativa viável para avaliação da compatibilidade do cimento Portland com aditivos superplastificantes. Este trabalho tem como objetivo então fazer um estudo de comparação entre cimentos Portland de diferentes tipos e lotes no comportamento de pastas cimentícias e de concretos de alto desempenho. A partir dos resultados obtidos observou-se para um tipo de cimento Portland variabilidade na tensão de escoamento e da viscosidade das pastas de diferentes lotes avaliadas. Essa variabilidade foi também observada na consistência, parâmetros reológicos e resistência à compressão dos concretos de alto desempenho produzidos com lotes distintos. Demonstrando assim, a variabilidade observada também na produção desses concretos nas centrais dosadoras de concreto.

Palavras-chave: Reologia. Concreto de alto desempenho. Superplastificantes.

ABSTRACT

An increasing demand for efficiency and variety of products can be noticed through the different types of Portland cement and chemical admixtures, such as plasticizers and superplasticizers available in the market. The standard that gives guidelines on the classification of Portland cement in Brazil allows broad compositions, so that Portland cements with different compositions are still classified in the same type. This variation in composition is able to make Portland cement of the same brand and type but from different batches may show different behaviors, making it difficult to standardize the dosage and predictability of the mixture behavior. Laboratory tests such as rheology tests capable of determining variables such as yield stress, viscosity and shear stress have become a viable alternative for evaluating the compatibility of Portland cement with superplasticizer admixtures. This paper then aims to make a comparison study between Portland cements of different types and lots in the behavior of cement pastes and high performance concrete. From the results obtained a large variation in yield stress and viscosity of pastes from different batches was observed. Thus, the influence of the batches on the rheological parameters of the analyzed cement pastes is observed.

Keywords: rheology, high performance concrete, superplasticizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de duas pastas de cimento hidratadas, relação água/cimento de 0,65 e 0,25.....	21
Figura 2 - Representação esquemática da zona de transição nos concretos	23
Figura 3 - Exemplos de ruptura: (a) concreto com ruptura pela pasta e (b) concreto com ruptura pelo agregado	25
Figura 4 - Tupia utilizada para mistura das amostras de pasta cimentícia.....	38
Figura 5 - Reômetro Haake Mars 40 utilizado para análise dos parâmetros reológicos das pastas cimentícias.....	38
Figura 6 - Reômetro Pheso utilizado para mistura e análise dos parâmetros reológicos das amostras de concreto de alto desempenho	41
Figura 7 - Velocidade de rotação versus tempo utilizado na Mistura 1	42
Figura 8 - Velocidade de rotação <i>versus</i> tempo utilizado na Mistura 2	42
Figura 9 - Velocidade de rotação versus tempo utilizado na leitura dos parâmetros reológicos.....	43
Figura 10 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,45 a/c - 0,00% SP).....	44
Figura 11 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,45 a/c - 0,20% SP).....	45
Figura 12 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,45 a/c - 0,40% SP).....	46
Figura 13 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,40 a/c).....	47
Figura 14 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,00% SP).....	48
Figura 15 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,20% SP).....	49
Figura 16 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,20% SP).....	50
Figura 17 - Espalhamento das pastas de cimento Portland CP V-ARI RS e CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,00% SP).....	51
Figura 18 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,00% SP).....	52
Figura 19 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP).....	53

Figura 20 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,40% SP).....	54
Figura 21 - Correlação entre o resíduo insolúvel (%) e a tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas sem aditivo superplastificante	57
Figura 22 - Correlação área superficial Blaine (cm ² /g) e tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas sem aditivo superplastificante	57
Figura 23 - Resultados de calorimetria das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP).....	58
Figura 24 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,40 a/c - 0,00% SP).....	59
Figura 25 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,40 a/c - 0,20% SP): (a) escala da tensão de escoamento máxima 300 Pa e (b) escala da tensão de escoamento máxima 40 Pa.....	60
Figura 26 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,40 a/c - 0,40% SP): (a) escala da tensão de escoamento máxima 300 Pa e (b) escala da tensão de escoamento máxima 5 Pa.....	61
Figura 27 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP II-Z 40 analisadas (0,45 a/c - 0,00% SP)	62
Figura 28 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP II-Z 40 analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP)	63
Figura 29 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP II-Z 40 analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP)	63
Figura 30 - Correlação resíduo insolúvel (%) e tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP II Z - 40 analisadas sem aditivo superplastificante	66
Figura 31 - Correlação área superficial Blaine (cm ² /g) e tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP II Z - 40 analisadas sem aditivo superplastificante	66
Figura 32 - Torque <i>versus</i> tempo para a mistura 1 dos concretos analisados	68
Figura 33 - Torque <i>versus</i> tempo para a mistura 2 dos concretos analisados	69
Figura 34 - Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento do cimento Portland CP V ARI RS - Lote 1	69

Figura 35 - Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento do cimento Portland CP V ARI RS - Lote 5	70
Figura 36 - Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento do cimento Portland CP II Z - 40 - Lote 4	70
Figura 37 - Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento dos concretos analisados.....	71
Figura 38 - Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de cisalhamento dos concretos analisados.....	72
Figura 39 - Correlação consistência slump (cm) e resistência à compressão média (MPa) para os concretos de alto desempenho analisados	73
Figura 40 - Correlação tensão de escoamento e resistência à compressão média (MPa) para os concretos de alto desempenho analisados	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do concreto de acordo com sua resistência à compressão	20
Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland.....	28
Tabela 3 - Limites usuais da composição do cimento Portland.....	28
Tabela 4 - Composição e propriedades dos lotes de cimento Portland analisados (CP V-ARI RS)	36
Tabela 5 - Composição e propriedades dos lotes de cimento Portland analisados (CP II-Z 40)	36
Tabela 6 - Características do aditivo químico utilizado	37
Tabela 7 - Traço adotado nas amostras de concreto de alto desempenho.....	39
Tabela 8 - Caracterização física dos agregados utilizados nos concretos de alto desempenho	40
Tabela 9 - Parâmetros reológicos das pastas analisadas com cimento Portland CP V-ARI RS.....	55
Tabela 10 - Parâmetros reológicos das pastas analisadas com cimento Portland CP V-ARI RS e relação água cimento de 0,40 a/c.....	61
Tabela 11 - Parâmetros reológicos das pastas analisadas com cimento Portland CP II-Z 40.....	64
Tabela 12 - Parâmetros reológicos das pastas selecionadas	67
Tabela 13 - Resultados de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone	67
Tabela 14 - Resultados de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone	71
Tabela 15 - Resultados de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Concreto de Alto Desempenho	19
2.1.1	Fase da Pasta de Cimento Hidratada	20
2.1.2	Fase Zona de Transição	23
2.1.3	Fase Agregados.....	25
2.1.4	Interação Entre as Fases	26
2.2	Materiais Constituintes	27
2.2.1	Cimento Portland	27
2.2.2	Agregados.....	29
2.2.3	Adição Mineral	31
2.2.4	Aditivos Químicos	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Pastas Cimentícias	44
4.2	Concretos de Alto Desempenho	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o desenvolvimento científico e tecnológico foi capaz de elevar a expectativa de vida das pessoas, nossa espécie se multiplica e vem dia após dia demandando mais matéria-prima e energia do nosso planeta, pontos como este causam um alerta, visto que os recursos naturais começam a ser percebidos como limitados, sendo necessário aos profissionais das mais diversas áreas que busquem meios eficientes de propiciar as mínimas condições de vida a nossa espécie, visando minimizar o impacto gerado ao meio ambiente.

O concreto possui durabilidade razoável a um custo energético aceitável, ainda mais se comparado com outros tipos de materiais, mas em contrapartida, para sua produção utiliza-se de um volume considerável de matéria-prima (DAFICO, 2001). Além de sua força e resiliência, o concreto tornou-se um dos elementos básicos das construções por ser relativamente simples e barato de se fazer. Estima-se que o consumo de concreto atualmente esteja na ordem de 30 bilhões de toneladas por ano, tornando esta indústria uma das maiores consumidoras mundiais de recursos naturais, e a demanda por concreto vêm crescendo mais a cada ano (FENNELL; DAVIS; MOHAMMED, 2021).

O concreto convencional utilizado na maioria das edificações possui durabilidade limitada, estas obras costumam ser projetadas para terem uma vida útil de aproximadamente 50 anos com um mínimo de manutenção, entretanto, quando estas edificações estão expostas a meios mais agressivos, este tempo de vida útil é reduzido consideravelmente (DAFICO, 2001). Isto fez com que cientistas e pesquisadores fossem em busca de um material que pudesse suportar meios mais agressivos, sem que a resistência e a durabilidade do material fossem afetadas.

Os pesquisadores da área, visando a melhoria deste material imprescindível para o desenvolvimento humano, a partir da década de 60 intensificaram seus estudos e através disto foi então possível a construção da primeira estrutura de concreto de alta resistência. Este material foi empregado na construção dos pilares do edifício Lake Point Tower, localizado em Chicago nos Estados Unidos da América, a construção conta com 70 pavimentos e resistência característica do concreto aos 28 dias de 52 MPa (ISAIA, 1991).

Mas foi só a partir do desenvolvimento dos aditivos plastificantes, superplastificantes e adições minerais que o concreto começou a passar por mudanças significativas. Segundo Baccin (1998) a implementação de aditivos plastificantes, responsáveis por diminuir a tensão superficial da água, possibilitaram uma redução de cerca de 10% no teor de água das misturas, facilitando assim a produção de concretos com menores relação água/cimento, em torno de 0,40, sem que a trabalhabilidade do concreto fosse alterada por isto.

Na década de 70, com o surgimento dos superplastificantes, à base de melamina na Alemanha e à naftaleno sulfonatos no Japão, os teores de água da mistura foram ainda mais reduzidos, para algo em torno de 20% a 25% de redução, possibilitando a produção de concretos com relações água/cimento tão baixas quanto 0,30 (BACCIN, 1998).

A partir desse momento, foi possível obter concretos com resistência à compressão médias na ordem de 50 MPa a 70 MPa, um grande avanço se comparado aos concretos da década de 60 que chegavam em resistências à compressão compreendidas entre 41 MPa e 52 MPa e já recebiam a classificação de concretos de alta resistência.

De acordo com Baccin (1998) o termo “concreto de alta resistência” é amplamente discutido entre os profissionais da área, pois as melhorias ao concreto não se limitam à sua resistência à compressão melhorada, outras propriedades também sofrem melhorias, tais como: facilidade de compactação, maior resistência à ataque de agentes agressivos, permeabilidade, porosidade, durabilidade e deformações. Desta forma, a classificação mais adequada para este tipo de material seria a de “concreto de alto desempenho”, ou CAD de forma abreviada.

Desde as primeiras descobertas na década de 60, a utilização de concretos de alto desempenho vem aumentando a cada dia, isto pode ser explicado pela sua vantajosa relação custo-benefício, a possibilidade de construções mais esbeltas, com reduzido peso próprio, alívio nas cargas das fundações, edifícios mais altos, menor deflexão em edifícios de grandes alturas, possibilidade de construção de vãos mais longos entre pilares, maior velocidade de construção, e como se não bastasse, ainda possui uma durabilidade mais elevada se comparado com os concretos convencionais (ISAIA, 1991).

Um dos principais componentes para a produção do concreto de alto desempenho e concreto convencional é o cimento Portland, que possui uma grande variedade no mercado brasileiro, sendo disponibilizado em diversos tipos específicos para cada situação. A norma que especifica as diretrizes gerais a respeito da produção de cimento Portland no Brasil é a NBR 16697 (ABNT, 2018), que define além de outras informações a porcentagem de massa que compõe cada tipo de cimento Portland, sendo os materiais usualmente utilizados clínquer e sulfatos de cálcio, escória granulada de alto-forno, material pozolânico e material carbonático. Apesar de delimitar os materiais utilizados em cada tipo de cimento, os limites percentuais impostos pela norma são abrangentes, possibilitando que cimentos Portland classificados com um mesmo tipo possuam reações químicas diferentes com os aditivos químicos utilizados em concretos de alto desempenho, isto acontece até mesmo com cimentos Portland de um mesmo fabricante, porém de lotes diferentes. Este comportamento gera dúvidas a respeito do comportamento do cimento Portland e dificulta a padronização e a repetibilidade nas centrais dosadoras de concretos, principalmente em relação às quantidades que deverão ser utilizadas na produção de concretos. A grande variabilidade na produção dos concretos com o mesmo tipo de cimento Portland é observada pelo comportamento diferente, tanto em estado fresco quanto em estado endurecido, dificultando a correta dosagem de materiais nas indústrias de concreto.

Essa variabilidade intrínseca pode afetar as propriedades reológicas das pastas cimentícias, comprometendo o desempenho do concreto final (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As partículas finas adicionadas aos materiais têm a propensão de se agrupar quando em contato com a água. No caso específico do cimento Portland, esses aglomerados são indesejáveis, uma vez que afetam as características reológicas do material em estado fresco e comprometem as propriedades mecânicas e de durabilidade após a sua cura (PARK, NOH e PARK, 2005).

Desta forma, visando produzir suspensões mais estáveis, faz-se necessário aumentar a força repulsiva entre as partículas, de modo a facilitar sua dispersão no meio aquoso, isto pode ser alcançado através do uso de aditivos químicos. As propriedades da superfície do cimento Portland são modificadas pela

presença de compostos adsorvidos, estes compostos interagem com a fase líquida, como a água de mistura, e com outras partículas sólidas, como agregados e adições, afetando as propriedades reológicas e mecânicas do cimento Portland e, conseqüentemente, do concreto endurecido (JOLICOEUR e SIMARD, 1998).

Essas interações na superfície do cimento Portland podem levar à formação de camadas de adsorção, que alteram a composição química e a estrutura da superfície. Essas modificações podem influenciar a taxa de hidratação, a reticulação dos produtos de hidratação e a porosidade da matriz cimentícia (SCRIVENER, JUILLAND e MONTEIRO, 2015).

Muitos estudos têm abordado ainda a influência de fatores como a finura do cimento Portland, a relação água-cimento e o teor de aditivos nas propriedades reológicas das pastas cimentícias (HIGGINSON, 1970), mas ainda são escassas as pesquisas que analisam especificamente a influência da variabilidade dos lotes de cimento Portland no contexto do comportamento reológico da pasta cimentícia e seus efeitos em concretos de alto desempenho.

Portanto, a compreensão dessa influência é essencial para o desenvolvimento de estratégias de controle de qualidade mais precisas na produção de concretos de alto desempenho. Ao avaliar como a variabilidade dos lotes de cimento Portland afetam a viscosidade, a tixotropia, a tensão de escoamento e o tempo de pega das pastas cimentícias, é possível estabelecer parâmetros mais adequados para garantir a consistência e a trabalhabilidade do concreto. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da variabilidade dos lotes de cimento Portland nas propriedades reológicas das pastas cimentícias para concretos de alto desempenho. Após feita a análise em pastas cimentícias, foram selecionadas amostras com comportamento distinto para verificar como estas variabilidades nos lotes afetam o comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco e estado endurecido.

1.1 Justificativa

Como já exposto, a NBR 16697 (ABNT, 2018) que define os percentuais de massa dos diferentes tipos de cimento Portland possui limites abrangentes, podendo ocasionar uma grande variabilidade na produção dos mesmos, fazendo com que cimentos Portland de um mesmo tipo possam ter comportamentos distintos, tanto em estado fresco quanto em estado endurecido, dificultando a correta dosagem de materiais nas indústrias de concreto. Este trabalho visa então realizar um estudo comparativo entre cimentos Portland de diferentes tipos e lotes no comportamento de concretos de alto desempenho, permitindo assim uma melhor compreensão do comportamento deste material, melhorando o produto e possibilitando um consumo de materiais de forma mais racionalizada.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar cimentos Portland de diferentes tipos e lotes no comportamento de concretos de alto desempenho.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar o comportamento de diferentes tipos e lotes de cimento Portland no comportamento no estado fresco de pastas para concreto de alto desempenho com o mesmo aditivo;
- b) Selecionar duas pastas de mesmo tipo com as maiores variações e uma pasta de tipo diferente como referência para avaliação em concretos de alto desempenho;
- c) Avaliar concretos de alto desempenho em estado fresco e endurecido verificando as diferenças entre os lotes e os tipos de cimento Portland.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos concretos de alto desempenho, além dos materiais normalmente utilizados na fabricação de concretos convencionais (cimento, agregados miúdos e graúdos), empregam-se ainda aditivos plastificantes, superplastificantes e adições minerais altamente pozolânicas (sílica ativa). Desta forma, deve-se procurar por materiais com a melhor compatibilidade aditivo-aditivo e cimento-aditivo, optando por cimentos com baixa atividade reológica (velocidade com que o cimento Portland consome as moléculas de água), elevada uniformidade, baixo calor de hidratação e com pequenas alterações no teor de sulfatos e álcalis equivalentes (PAZ, 1998).

Desta forma, serão abordados neste capítulo informações a respeito do concreto de alto desempenho, seus materiais constituintes e a influência do tipo de cimento Portland e dos aditivos superplastificantes no comportamento do material.

2.1 Concreto de Alto Desempenho

O concreto de alto desempenho, como o próprio nome diz, é um material que apresenta desempenho mais elevado durante a sua utilização, se comparado aos concretos convencionais. Este desempenho é compreendido não apenas como uma melhora na resistência mecânica, mas também, melhora em sua trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade e principalmente durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Este material é uma evolução dos concretos convencionais, utilizando basicamente as mesmas matérias-primas e os mesmos princípios de resistência, trabalhabilidade e durabilidade. Em essência, o princípio básico para obtenção de um concreto de alto desempenho está na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação da estrutura dos poros do material (tipos, tamanhos e distribuição), para atingir este objetivo algumas ações são necessárias como: diminuição da relação água/aglomerante, otimização da granulometria dos agregados para obtenção de uma maior compacidade, e reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas pelo uso de adições minerais que provocam o refinamento dos poros (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

De acordo com Xincheng (2017), não é totalmente correto caracterizar um concreto de alto desempenho levando em conta apenas sua resistência à compressão, pois as propriedades de melhoria são muitas, por outro lado, torna-se difícil também caracterizar um concreto de alto desempenho levando em consideração múltiplos fatores devido sua complexidade e dificuldade no dia-a-dia. Como mostrado na Tabela 1, muitos autores utilizam o fator de resistência à compressão como forma de classificação do tipo de concreto devido sua simplicidade, pois muitas das melhorias alcançadas em um concreto de alto desempenho possuem relação direta com um aumento em sua resistência à compressão.

Tabela 1 - Classificação do concreto de acordo com sua resistência à compressão

Classificação do Concreto	Resistência à compressão em 28d (MPa)
Concreto Convencional (CC)	20 - 50
Concreto de Alto Desempenho (CAD)	50 - 150
Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD)	100 - 150
Concreto Excepcional (CE)	> 150

Fonte: Adaptado de Xincheng (2017).

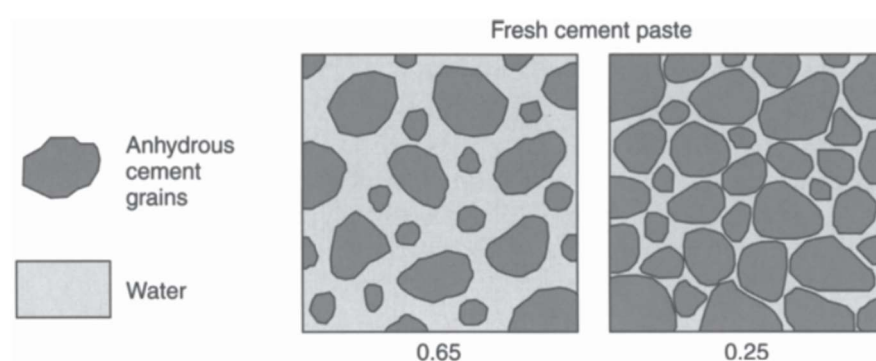
Para que seja possível a transformação de um concreto convencional em um concreto de alto desempenho, além da incorporação de aditivos químicos, adições minerais e agregados de melhor qualidade, faz-se necessário um estudo correto das três fases da mistura (pasta de cimento hidratada, zona de transição e agregados) e da sinergia entre as mesmas, otimizando ao máximo o desempenho de cada uma das fases envolvidas, pois esta é uma importante etapa para obtenção de um concreto de alto desempenho de qualidade (PAZ, 1998).

2.1.1 Fase da Pasta de Cimento Hidratada

Os poros com diâmetro maior que 50 μm , considerados como poros grandes, são os mais prejudiciais na obtenção de concretos compactos e resistentes, principalmente quando estes estão concentrados na interface agregado/pasta. Para reduzir a porosidade da pasta, e conseqüentemente aumentar sua resistência, é preciso reduzir a água e o ar aprisionado na mistura, apenas a título de exemplo, é

possível atingir compósitos com resistência de até 800 MPa, quando estes são curados a 800 °C e a pressões de cerca de 50 MPa (RICHARD & CHEYREZY, 1995), mas claro tais métodos são inviáveis na produção em massa das indústrias, desta forma, para obtenção de pastas de cimento Portland hidratadas para concretos de alto desempenho de até 120 MPa, faz-se necessária a diminuição da relação água/aglomerante para valores abaixo de 0,30 com mistura homogênea e seleção adequada de matéria-prima (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 1 - Representação esquemática de duas pastas de cimento hidratadas, relação água/cimento de 0,65 e 0,25



Fonte: Aïtcin (2004)

De acordo com Baccin (1998), uma diferença que merece destaque entre os concretos convencionais e os de alto desempenho, é que em concretos convencionais a relação água/cimento usualmente utilizada confere à pasta de cimento Portland uma resistência muito inferior à do agregado graúdo, conseqüentemente tem-se a ruptura deste concreto por esgotamento da capacidade da pasta.

Conforme salienta Martins (2005), devido às baixas relações água/aglomerante praticadas e também a grande quantidade de finos presentes nos concretos de alto desempenho, isto faz com que sua pasta de cimento se torne bastante homogênea e pouco porosa, fatores que contribuem para sua capacidade de resistência à compressão e também menos permeabilidade a agentes agressivos, resultando então em uma maior durabilidade do material.

Para Dafico (2001), além da relação água/cimento outro fator importante na análise da porosidade do material é o grau de hidratação da pasta, este é um processo lento e contínuo que produz a redução da porosidade da pasta de cimento pela formação de um gel de silicatos hidratados. Porém, o grau de hidratação não é

um fator independente, ele está relacionado como consequência de vários outros fatores como: compostos presentes no cimento Portland, módulo de finura, adições, relação a/c, temperatura, pressão e umidade.

A porosidade do concreto pode ser ainda resultante dos vazios capilares, estes vazios representam o espaço não preenchido pelos sólidos da pasta, e são formados pela saída da água de mistura em excesso que não participou das reações de hidratação. Desta forma, a porosidade capilar será tão maior quanto maior for a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor for o grau de hidratação da pasta (CAMPITELI, 1987).

Não é necessariamente a porosidade total do material que irá influenciar efetivamente em sua resistência, mas sim a distribuição do tamanho destes poros. A distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação água/aglomerante e pelo grau de hidratação do cimento. Os vazios de ar aprisionados com até 3 mm e os poros maiores que 50 μm influenciam principalmente na resistência à compressão e na permeabilidade do material, já os poros pequenos influenciam mais na retração por secagem e na fluência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Com o objetivo de melhorar as propriedades do concreto, foram desenvolvidos através do tempo várias opções de aditivos, de acordo com Mehta & Monteiro (2008), os aditivos variam amplamente quanto à sua composição química e muitos são capazes de desempenhar até mesmo mais de uma função. Entre as várias funções dos aditivos estão a capacidade de aumentar a plasticidade, fluidificar, incorporar ar, acelerar a cura, retardar a pega, impermeabilizar e provocar expansão.

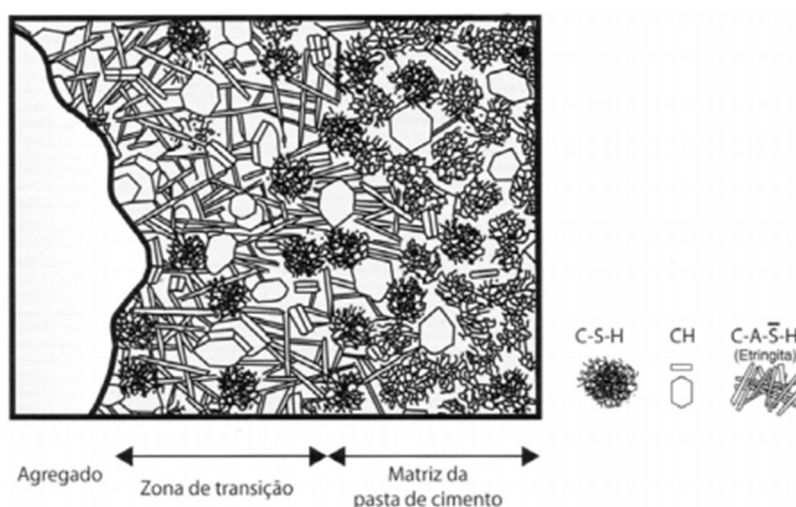
Os principais aditivos utilizados na obtenção de concretos de alto desempenho são os plastificantes e superplastificantes, estes aditivos atuam reduzindo a relação água/cimento proporcionando uma maior resistência ao concreto. Os plastificantes são feitos de lignossulfonatos, ácidos hidroxí-carboxílicos ou polímeros hidrolisados além de outros componentes secundários. Estes aditivos agem defloculando o cimento Portland e formando minúsculas bolhas de ar estáveis que agem como rolamentos diminuindo o atrito interno da pasta. Os aditivos superplastificantes têm em sua composição sais sulfonados de melanina ou condensados de naftaleno-formaldeído, e agem de forma parecida, porém com muito mais eficiência (DAFICO, 2001).

Além da presença de aditivos, a pasta cimentícia conta também com a presença de adições minerais, geralmente pozolânicas como a sílica ativa, cinza volante, metacaulim entre outras. Os efeitos destas adições minerais variam, sendo possível verificar: melhora nas propriedades reológicas da pasta, diminuição da exsudação pela segmentação dos canais de fluxo d'água, refinamento dos vazios devido à presença de C-S-H secundário que segmentam os poros entre as partículas, e refinamento das dimensões dos cristais de hidróxido de cálcio remanescente das reações pozolânicas. Estes efeitos causam um aumento da compacidade e da resistência mecânica com intensidade equivalente à de redução da relação água/cimento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.2 Fase Zona de Transição

A fase de zona de transição é a mais frágil no concreto de alto desempenho, necessitando desta forma de maior atenção para diminuir sua influência negativa. A zona de transição é compreendida como a região situada na interface pasta-agregado, seja este agregado classificado como graúdo ou miúdo. Como a zona de transição depende do tamanho e da forma do agregado, torna-se mais pronunciada em agregados com maior dimensão e formato angular (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 2 - Representação esquemática da zona de transição nos concretos



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

A causa de adesão entre os produtos de hidratação e as partículas de agregado se dão pelas forças de Van der Waals, e a resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e do tamanho dos vazios presentes. Até mesmo em concretos com baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e o tamanho de vazios na zona de transição serão maiores do que os presentes na matriz de argamassa, causando uma menor resistência nesta região. Desta forma, a zona de transição geralmente torna-se o “elo mais fraco da corrente”, e é considerada a fase de resistência limite do concreto. Por conta da presença da zona de transição que o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo que a resistência dos dois constituintes principais, pasta e agregado (DAFICO, 2001).

A zona de transição serve de ponte entre os dois constituintes do concreto, a argamassa matriz e as partículas de agregado graúdo, mesmo em casos onde os constituintes individuais possuem rigidez elevada, a rigidez do material composto pode ser baixa devido a presença de “pontes rompidas”, que são vazios e microfissuras na zona de transição que não permitem a transferência de energia, ocasionando a ruptura do concreto com tensões menores do que a resistida pela pasta de cimento (DAFICO, 2001).

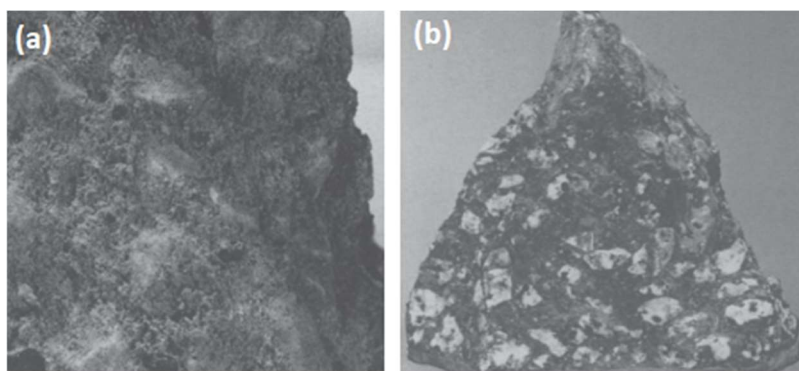
Pode-se afirmar então que a zona de transição é mais porosa, com a presença de microfissuras, que limitam a resistência mecânica e aumentam a deformabilidade do concreto de alto desempenho, outros fatores que podem influenciar na formação da zona de transição são: a relação água/cimento pois quanto maior mais água disponível para exsudação e formação do efeito parede, dimensão máxima característica do agregado pois este estabelece a espessura da zona de transição, e também a natureza mineralógica do agregado pois agregados mais resistentes apresentam curvas tensão-deformação com menor resíduo de deformação plástica (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Desta forma, para que o concreto atue como material composto homogêneo, em que as três fases tenham aproximadamente o mesmo comportamento resistente, é importante que a resistência da zona de transição, assim como do agregado, possua ordens de grandeza semelhantes (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.3 Fase Agregados

À medida em que se aumenta a resistência do concreto, principalmente com a melhoria da pasta de cimento hidratada e da zona de transição, os agregados passam a ser o elo mais frágil da mistura (AITCIN, 2004). A escolha de agregados com melhores propriedades mecânicas irá influenciar não somente na resistência à compressão da mistura, mas também na resistência à abrasão, no módulo de elasticidade a deformações instantâneas e de longa duração, na resistência ao impacto, entre outras propriedades (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 3 - Exemplos de ruptura: (a) concreto com ruptura pela pasta e (b) concreto com ruptura pelo agregado



Fonte: Aïtcin (2004).

Segundo Dafico (2001), em concretos convencionais, a origem do agregado não influencia muito na resistência à compressão do concreto. A maior influência geralmente está ligada a um maior consumo de água pelo concreto, em função da dimensão máxima característica, forma, e distribuição granulométrica, que causam um maior consumo de cimento para uma mesma faixa de resistência de concreto, ou ainda podem causar uma diminuição na resistência para uma mesma composição entre cimento e agregados. Em concretos convencionais, quase sempre a absorção dos agregados utilizados não produz efeitos significativos nem à trabalhabilidade e nem à resistência do concreto.

Em concretos de alto desempenho, deve-se dar atenção especial à resistência do próprio agregado. Os agregados de rochas sedimentares como calcários e arenitos podem possuir resistências à compressão tão baixas quanto 96 MPa e 48 MPa respectivamente (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Por utilizar-se de agregados naturais, torna-se fundamental a escolha de agregados de maior resistência, conhecendo-se as características da rocha mãe. Para isso, é importante analisar a petrografia e a superfície de fratura da rocha, escolhendo sempre as mais sãs e resistentes (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.4 Interação Entre as Fases

Resumidamente, para obtenção de um concreto de alto desempenho, além de outros critérios, faz-se necessária a diminuição da relação água/aglomerante, diminuição da porosidade da pasta de cimento Portland hidratada e a seleção adequada dos agregados utilizados na mistura.

Com todos estes critérios atendidos, utiliza-se ainda aditivos superplastificantes compatíveis com o cimento Portland e adições minerais com a intenção de se reduzir a água da mistura, sem prejudicar as propriedades do concreto no estado fresco, diminuindo assim a exsudação e melhorando o comportamento do material nas fases de zona de transição e pasta de cimento hidratada. As adições minerais também possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , eliminando este cristal frágil da mistura e produzindo mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H) composto responsável pelo aumento da resistência à compressão dos concretos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A correta escolha de todos os constituintes da mistura é essencial para obtenção de um concreto resistente, durável e que apresente condições de trabalhabilidade no estado fresco durante o lançamento do concreto. Os componentes usuais de um concreto de alto desempenho são cimento Portland, adição mineral, aditivo químico, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Ainda podem ser utilizados em algumas misturas pigmentos e fibras, mas tais componentes aplicam-se apenas a casos muito específicos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Os componentes usuais utilizados e como o concreto de alto desempenho é influenciado por estes materiais serão abordados no item 2.2.

2.2 Materiais Constituintes

Como já mencionado anteriormente, o concreto de alto desempenho não utiliza nenhum material especial que já não seja utilizado em concretos convencionais, a única diferença é que existe um estudo mais detalhado das propriedades específicas destes materiais, e como estes reagem entre si. Este item abordará então a respeito dos materiais utilizados na composição de um concreto de alto desempenho, que são: cimento Portland, agregados, adições minerais e aditivos químicos.

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um cimento hidráulico que se torna endurecido através da interação com a água, diferente de outros aglomerantes não hidráulicos tais como o gesso e a cal, este material torna-se durável e quando adicionado a outros componentes é capaz de produzir concretos e argamassas de alta resistência. Ele é feito com cristais minerais finamente pulverizados, compostos principalmente de silicatos de cálcio e de alumínio (NAWY, 1996).

Este material é o produto da calcinação de uma mistura de calcário, composto predominantemente por CaCO_3 e materiais argilosos à base de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 onde também pode-se encontrar outros constituintes secundários como óxido de magnésio, fosfatos, álcalis, entre outros. A mistura dos principais constituintes, juntamente com a adição de outros (areia, cinza de pirita, entre outros) é calcinada em forno rotativo a uma temperatura de cerca de 1450°C , através deste processo obtém-se então novos compostos químicos em forma de esferas denominados clínquer. O clínquer então é resfriado e recebe a adição de uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, sendo moído até se tornar um pó bastante fino, dando assim origem ao chamado cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Apesar do cimento Portland possuir vários compostos de cálcio, os resultados de análise química são geralmente expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. Os quatro principais compostos constituintes do cimento Portland e suas abreviaturas são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2016).

As composições reais dos diversos compostos variam de um cimento Portland para outro, diferentes tipos de cimento Portland podem ser obtidos através da proporção adequada das matérias-primas. A Tabela 3 apresenta a proporção aproximada da composição do cimento Portland, bem como os limites de óxidos utilizados.

Tabela 3 - Limites usuais da composição do cimento Portland

Óxido	Teor (%)
CaO	60 - 67
SiO_2	17 - 25
Al_2O_3	3 - 8
SO_3	2,0 - 3,5
Fe_2O_3	0,5 - 0,6
MgO	0,5 - 0,4
Álcalis como Na_2O	0,3 - 1,2

Fonte: Adaptado de Neville (2016).

Os silicatos (C_3S e C_2S) são praticamente os únicos responsáveis pelas características mecânicas medidas na pasta de cimento, durante a hidratação, eles formam o gel C-S-H, o mais importante componente da pasta de cimento Portland hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Desta forma, deve-se procurar aumentar os silicatos pois eles influenciam diretamente na resistência final da pasta, para isso, reduz-se o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). De acordo com Neville (2016), a presença de elevados teores destes compostos (C_3A e C_4AF) não é desejável por não contribuírem para as resistências finais da pasta.

Também é recomendável a diminuição, ou mesmo o consumo total do Ca(OH)_2 , transformando este componente em C-S-H através das reações pozolânicas.

Visando atender as necessidades da indústria da construção civil, foram ainda desenvolvidos cimentos especiais como os cimentos pozolânicos, os cimentos de escória de alto forno, cimentos de endurecimento rápido e cimentos brancos ou coloridos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Aïtcin (2004), os principais requisitos que devem ser observados na escolha de cimentos Portland para concretos de alto desempenho são:

- Módulo de finura médio, evitar os extremos módulos de finura altos ou baixos;
- Importante ter informações a respeito do C3A e sobre os sulfatos de cálcio que influirão na velocidade de formação da etringita;
- Buscar por cimentos Portland com baixo teor de C3A e preferencialmente em formato cúbico ou cúbico e ortorrômbico, pois este controla a hidratação do C3A;
- Analisar através de ensaios de reologia o comportamento entre água, cimento Portland e superplastificantes, verificando a compatibilidade cimento/aditivo.

De acordo com Paz (1998), ainda que seja possível produzir concretos de alto desempenho com vários tipos de cimento Portland, não se pode em momento algum negligenciar esta etapa, uma escolha impensada do tipo de cimento Portland poderá acarretar em uma maior demanda de água, aumento no consumo de cimento, maior calor de hidratação, surgimento prematuro de fissuras e uma possível redução na vida útil da estrutura.

2.2.2 Agregados

De acordo com Dafico (2001), em um concreto convencional, até três quartos do seu volume é ocupado pelos agregados, desta forma, não é de se surpreender que a qualidade destes seja considerada de grande importância no comportamento do concreto. Em concretos de alto desempenho, a qualidade dos agregados é um dos principais fatores limitantes, tanto na busca por uma boa trabalhabilidade como também por uma alta resistência à compressão.

Na escolha dos agregados miúdos, é importante atentar-se quanto a sua granulometria e forma, pois estas características podem alterar significativamente a quantidade de água da mistura. Um dos critérios de seleção de agregados miúdos baseia-se na menor demanda de água da mistura, isto privilegia agregados com grãos arredondados e textura lisa. Além disso, a granulometria do agregado tem influência direta na reologia do concreto, areias com módulo de finura abaixo de 2,5 produzem concretos de alto desempenho com consistência pegajosa, o que torna difícil a compactação, enquanto que concretos que utilizam areias com módulo de finura próximas à 3,0 apresentam uma melhor trabalhabilidade e maior resistência à compressão (PAZ, 1998).

Para que seja garantida a qualidade da produção de concretos de alto desempenho, é importante manter um apropriado controle no teor de umidade dos agregados, variações de 1% na umidade dos agregados miúdos são capazes de gerar um grande impacto nos valores de resistência do concreto (GJORV, 1994).

De acordo com Paz (1998), quando os agregados miúdos forem obtidos de formas artificiais (areias e pó de pedra proveniente de britagem de rochas), além de realizar o controle granulométrico do agregado, é importante ainda verificar o teor de material pulverulento.

Segundo Neville (2016), todas as partículas de agregados naturais já foram um dia, partes de uma massa maior. Estes se tornaram agregados após a sua fragmentação devido a processos naturais de intemperismo e abrasão ou artificiais de britamento. Desta forma, muitas propriedades dos agregados derivam exclusivamente das propriedades da rocha-mãe, como composição química e mineralógica, características petrográficas, densidade, dureza, resistência, estabilidade química e física, estrutura de poros e cor.

Bauer (2019) salienta ainda que nos agregados industrializados a forma dos grãos depende não somente da natureza da rocha, mas também do tipo de britador. O granito, por exemplo, é capaz de produzir grãos de melhor forma que o basalto, que produz considerável quantidade de grãos lamelares. Quanto ao efeito dos britadores na forma dos agregados, os de mandíbula produzem grãos mais irregulares enquanto que os de martelos produzem grãos em formatos mais regulares. Os britadores tipo cone estão em um meio termo entre estes dois tipos.

Os agregados derivados de cascalhos fluviais, apesar de serem abundantes, possuem superfície lisa devido à ação polidora dos siltes quando transportados pelo fundo dos rios, isto ocasiona uma má aderência entre pasta/agregado. Os agregados rugosos e que possuam maior angulosidade propiciam uma melhor aderência mecânica, entretanto é preciso atentar-se quanto a uma angulosidade acentuada, haja vista a necessidade de alta quantidade de água para melhora da trabalhabilidade (MARTINS, 2005).

Segundo Aitcin (2004), os principais requisitos que devem ser observados na escolha de agregados graúdos para concretos de alto desempenho são:

- Correta escolha do material que compõe o agregado, pois este pode se tornar um fator limitante na obtenção de concretos com resistência à compressão superiores a 100 MPa;
- O agregado miúdo deve possuir, se possível, módulo de finura entre 2,7 e 3,0, com isenção de partículas finas;
- Os agregados graúdos devem possuir a forma mais cúbica possível, podendo para isto serem utilizadas rochas calcárias, dolomíticas, graníticas ou diabásicas;
- Deve-se escolher o menor diâmetro possível dos agregados graúdos, visando diminuir a espessura da zona de transição e fazendo com que ela torne-se mais homogênea, além do fato que partículas de agregado menores apresentam menos microfissuras, poros menores e menos inclusão de materiais frágeis;
- Os diâmetros máximos característicos recomendados são 25 mm para concretos classe I e II, 19 mm para classe III e 12 mm para concretos de classes IV e V.

Os agregados podem ocupar de 60% a 80% do volume do concreto, tornando a correta escolha deste material imprescindível para obtenção de um concreto resistente, estável e durável (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.2.3 Adição Mineral

O nome de adição mineral é dado aos materiais com quantidade superior a 5% da massa do cimento Portland.

Esses materiais podem ter alguma atividade pozolânica e são inseridos na mistura, como pozolanas naturais, cinzas volantes, escória básica granulada de alto-forno, cinzas de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa, entre outros. Ao

adicionarmos um novo material na mistura, logicamente outros precisarão ser retirados, desta forma, a adição mineral pode dar-se por adição ao cimento Portland (quando há retirada de parte dos agregados) ou em substituição ao cimento Portland (quando há retirada de parte do cimento) (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A utilização de adição mineral nos concretos de alto desempenho é feita devido à ação química e física que este material exerce nas partículas da mistura. As adições minerais mais utilizadas atualmente são a sílica ativa e o metacaulim, por apresentarem grãos de pequenas dimensões e possuírem o potencial pozolânico para consumir o Ca(OH)_2 . Por conta do tamanho reduzido, as partículas permitem que as reações ocorram rapidamente, além de proporcionarem uma quebra da inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento Portland se hidratem de forma mais rápida e completa (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Por conta do elevado consumo de cimento Portland, em concretos de alto desempenho faz-se necessário uma preocupação adicional com relação ao calor de hidratação. Através da substituição de parte do cimento Portland por pozolanas, é possível obter uma redução neste calor, além destas serem essenciais para melhoria da microestrutura da pasta e da interface pasta/agregado pela formação do elemento C-S-H através da reação da sílica da pozolana com o Ca(OH)_2 liberado durante o processo de hidratação do cimento (DAFICO, 2001).

A presença de sílica ativa na mistura é capaz de modificar o comportamento do concreto tanto em estado fresco quanto endurecido. Durante o estado fresco, sua presença proporciona alteração do comportamento reológico da pasta, o qual é percebido através de mudanças na trabalhabilidade e exsudação (MORAES, 1990).

De acordo com Moraes (1990), concretos com presença de sílica ativa possuem uma consistência mais adequada para utilização em peças com elevada taxa de armadura e geometrias complexas, além de serem adequadas para utilização em concretos projetados, concretos submersos e ainda apresentarem um maior rendimento.

Segundo Paz (1998), para que se obtenha ganho de resistência pela substituição de parte do cimento Portland por sílica ativa, alguns fatores precisam ser verificados como: relação água/cimento, tipo de cimento Portland utilizado,

porcentagem total de substituição, finura e composição granulométrica da sílica ativa, condições de cura e idade avaliada.

2.2.4 Aditivos Químicos

A NBR 11768 (ABNT, 2019) define os aditivos como produtos que, adicionados em pequenas quantidades a misturas de concreto, modificam algumas de suas propriedades. A norma ainda especifica estes aditivos como plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar, entre outros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

A compreensão de que a utilização de aditivos ao concreto poderia gerar vantagens técnicas e/ou econômicas, sem a presença de efeitos colaterais indesejáveis quando corretamente utilizados, fez com que seu universo de aplicações se ampliasse com o passar do tempo. A razão para o crescente uso de aditivos se dá ao fato de estes serem capazes de adicionar vantagens físicas e econômicas ao concreto, entre estes benefícios, pode-se citar a possibilidade de utilização do material em situações que antes poderiam ser consideradas difíceis ou insuperáveis, além destes possibilitarem o uso de uma maior variedade de componentes na mistura proporcionando melhorias nas características do concreto (NEVILLE, 2016).

A utilização de aditivos químicos requer um conhecimento aprofundado não somente de seus benefícios e efeitos, mas também de suas desvantagens e inconveniências. Por tratarem-se de substâncias químicas capazes de modificar as propriedades químicas e físicas da mistura, este material está sujeito a reações ocasionados pelos diversos componentes dos concretos, além de possíveis alterações em seu desempenho ocasionados por fatores tais como: temperatura, concentração, tempo decorrido após aplicação, entre outros (BUCHER, 1988).

Os aditivos plastificantes possuem como função a melhoria da consistência do concreto sem que se aumente a demanda de água, o aumento das propriedades mecânicas e da durabilidade da mistura, mantendo sua consistência e reduzindo o consumo de cimento Portland para uma determinada resistência. Estas melhorias proporcionadas pelos aditivos plastificantes são benéficas aos concretos de alto desempenho, pois estes normalmente são misturas coesas, com pouca

trabalhabilidade e alto consumo de concreto. Sendo assim, a utilização de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes torna-se quase que obrigatória para obtenção de concretos de alto desempenho (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Os superplastificantes, desenvolvidos nos anos 70 por alemães e japoneses, são uma melhoria dos já existentes aditivos plastificantes. Estes aditivos são tensoativos aniônicos de cadeia longa e massa molecular elevada que quando absorvidos pelas partículas de cimento Portland conferem uma forte carga negativa, que auxilia reduzindo consideravelmente a tensão superficial da água circundante e aumentando a fluidez da mistura. A dispersão das partículas do cimento Portland no sistema acelera a taxa de hidratação, sendo comum ocorrer a aceleração da pega e do endurecimento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Paz (1998), os aditivos superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias de acordo com sua composição química:

- Condensados de Formaldeído Melamina Sulfonados (MSF), desenvolvido pelos alemães, podem eventualmente incorporar pequenas quantidades de ar;
- Condensados de Formaldeído Naftaleno Sulfonado (NSF), desenvolvido pelos japoneses, não incorporam ar e praticamente não interferem no tempo de pega do cimento, porém, quando utilizado em altas dosagens podem retardar o tempo de pega;
- Lignossulfonatos Modificados, estas substâncias geralmente incorporam ar e retardam o tempo de pega;
- Outros, com adição de componentes como ácidos e ésteres sulfônicos e ésteres carboxílicos.

Durante a utilização de aditivos químicos, torna-se necessária a análise das interações aditivo/aditivo, quando mais de um produto é incorporado ao mesmo concreto, e as interações aditivo/cimento Portland, pelo fato de um mesmo tipo de aditivo ser capaz de apresentar comportamentos diferentes em combinação com os diversos cimentos Portland disponíveis comercialmente (BUCHER, 1988).

A compatibilidade química entre a composição do cimento Portland utilizado no concreto e o aditivo superplastificante é um fator de grande importância, pois para cada tipo de aditivo existirá um ponto de saturação para um determinado cimento Portland. O ensaio mais utilizado para verificação desta propriedade é a determinação do tempo de fluxo da pasta de cimento Portland que passa no cone de

Marsh. O ensaio geralmente é realizado nos tempos de 5 min e 60 min após a mistura dos materiais, tentando simular a ação do aditivo em uma utilização real durante obra, considerando o tempo de descarga do caminhão betoneira e a respectiva perda de trabalhabilidade ao decorrer do tempo (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Como já exposto, a compatibilidade entre o cimento Portland e os aditivos químicos é um ponto que merece muita atenção, pois muitos superplastificantes são compostos à base de sais sulfonados, e um teor elevado de gesso no cimento Portland pode causar um excesso de SO₃ na pasta, causando expansão devido a formação de etringita e, em muitos casos, resultando até na desagregação completa do concreto durante a cura (AITCIN, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de determinar a influência da variabilidade dos lotes de cimento Portland e a adição de aditivos superplastificante nas propriedades reológicas das pastas cimentícias e concreto de alto desempenho, foram selecionadas cinco amostras de lotes distintos de cimento Portland do tipo CP V-ARI RS e cinco amostras de lotes distintos de cimento Portland do tipo CP II-Z 40 coletadas de duas centrais dosadoras de concreto localizadas na região de Florianópolis. A composição e propriedades dos lotes foi disponibilizada pelo fabricante dos materiais e é mostrada na Tabela 4 e Tabela 5. As características do aditivo químico utilizado são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 4 - Composição e propriedades dos lotes de cimento Portland analisados (CP V-ARI RS)

Lote	Propriedades Químicas				Propriedades Físicos e Mecânicos					
	Teores (%)				Finura #200 (%)	Blaine (cm ² /g)	Água de Consistência (%)	Tempo de início de Pega (min)	Resistência à compressão (MPa)	
	PF*	MgO	SO ₃	RI**					7 dias	28 dias
01	5,1	5,7	2,6	13,7	0,2	5140	30,0	220	36,0	46,3
02	5,2	5,8	2,6	13,1	0,2	5120	30,2	230	36,0	-
03	5,0	5,8	2,7	12,9	0,3	5270	30,4	240	36,0	45,4
04	5,2	5,8	2,6	13,0	0,2	5210	30,8	220	36,0	46,1
05	5,1	5,7	2,9	12,1	0,3	4890	31,2	220	37,0	45,6

Massa específica aparente (g/cm³) = 2,98

Fonte: Fabricante do cimento Portland - Adaptado pelo autor, 2023.

Tabela 5 - Composição e propriedades dos lotes de cimento Portland analisados (CP II-Z 40)

Lote	Propriedades Químicas				Propriedades Físicos e Mecânicos					
	Teores (%)				Finura #200 (%)	Blaine (cm ² /g)	Água de Consistência (%)	Tempo de início de Pega (min)	Resistência à compressão (MPa)	
	PF*	MgO	SO ₃	RI**					7 dias	28 dias
01	4,1	6,1	2,6	10,3	0,1	4840	30,0	250	37,7	47,0
02	5,2	6,1	2,6	10,5	0,2	4400	29,8	245	37,4	46,3
03	4,2	6,2	2,5	10,6	0,2	4560	30,3	245	37,8	46,0
04	3,8	6,2	2,4	9,7	0,0	4470	30,0	245	38,0	46,1
05	3,9	5,9	2,5	10,1	0,0	4530	29,9	260	37,2	45,8

Fonte: Fabricante do cimento Portland - Adaptado pelo autor, 2023.

Tabela 6 - Características do aditivo químico utilizado

Tipo de aditivo	Superplastificante
Função	Redução acentuada da água de amassamento para uma mesma consistência, aumento da fluidez com manutenção desta por tempo prolongado e aumento da coesão do concreto.
Base química	Não informado.
Massa específica (g/cm ³)	1,080 - 1,120
Estado físico	Líquido
Cor	Laranja
Dosagem recomendada	0,3 a 0,0%

Fonte: Fabricante do aditivo químico - Adaptado pelo autor, 2023.

A fim de produzir as pastas cimentícias para o estudo, foi estabelecida uma relação água/cimento de 0,45, valor usualmente adotado para a confecção de concretos de alto desempenho nas centrais dosadoras de concreto que disponibilizaram os materiais. Adicionalmente, três teores diferentes de aditivo superplastificante foram considerados: 0,00%, 0,20% e 0,40% em relação à massa de cimento Portland. Essa variação nos teores de aditivo permitiu avaliar o impacto dessas adições nos parâmetros reológicos das pastas e o teor máximo foi definido a partir da exsudação da pasta.

Para o cimento Portland CP V-ARI RS, ainda foi avaliado para dois lotes (Lote 2 e Lote 3) pastas com relação de 0,40 para avaliar a sensibilidade do ensaio para dois lotes com comportamento semelhante com 0,00% de aditivo superplastificante. Nestas pastas também foi possível avaliar quatro teores de aditivo: 0,00%, 0,20%, 0,40% e 0,60% em relação à massa de cimento Portland. Novamente, o teor máximo foi definido a partir da exsudação da pasta.

Para promover a adequada mistura entre água e cimento Portland, utilizou-se um misturador de alta eficiência do tipo tupia com velocidade de rotação constante de 10.000 rpm. Esse processo de mistura foi executado durante um período de 70 segundos, garantindo uma homogeneização completa da pasta antes das análises reológicas.

Figura 4 - Tupia utilizada para mistura das amostras de pasta cimentícia



Fonte: Autor (2023).

Após a etapa de mistura, as pastas foram divididas em duas amostras.

A primeira amostra foi utilizada para análise da fluidez da pasta cimentícia através da realização do ensaio de abatimento de cone Kantro.

A segunda amostra era utilizada para avaliação dos parâmetros reológicos no reômetro Haake Mars 40 (Figura 5), no ensaio de fluxo de reometria rotacional de placas paralelas com três ciclos de cisalhamento com aceleração da taxa de 0 a 50s⁻¹, seguida de uma desaceleração a 0. A partir das curvas de aceleração e desaceleração foram determinadas as áreas de histerese (tixotropia). Também do terceiro ciclo de cisalhamento, na curva de desaceleração, foram analisados, segundo o modelo de Bingham, a tensão de escoamento e viscosidade plástica.

Figura 5 - Reômetro Haake Mars 40 utilizado para análise dos parâmetros reológicos das pastas cimentícias



Fonte: Fabricante (2023).

As amostras de cimento Portland CP V-ARI RS com teor de 0,20% de aditivo superplastificante (0,20% SP) foram ainda armazenadas em um calorímetro semi-adiabático (caixas de poliestireno expandido revestidas com papel alumínio), onde foram verificadas as temperaturas usando termopar tipo K e a obtenção dos dados feita por meio de um data logger com leituras a cada 10 minutos, registrando a evolução da temperatura ao longo do tempo.

Após as análises dos resultados das pastas cimentícias, foram selecionadas duas amostras do cimento Portland CP V-ARI RS que apresentaram comportamento mais distinto para análise em concreto, e também uma amostra do cimento Portland CP II-Z 40 para avaliar as diferenças entre lotes e também de tipos de cimento Portland no comportamento reológico de concretos de alto desempenho e na sua resistência à compressão.

Para a avaliação do concreto de alto desempenho, foi adotado o traço de 1: 1,75: 1,75 (cimento: agregado miúdo: brita), sendo agregado miúdo uma composição de 40% de areia fina e 60% de areia de britagem. Essa composição e os materiais foram obtidos de uma central dosadora de concreto da região da grande Florianópolis. A relação a/c foi fixada em 0,45 e a areia fina estava úmida (4,13%) no momento da mistura, sendo foi ajustado para manter fixa a relação a/c. A quantidade de material utilizado é apresentada na Tabela 7. O teor de aditivo superplastificante utilizado no concreto de alto desempenho foi de 0,20% em relação à massa de cimento, visto que também foi utilizado nas pastas analisadas. Foram selecionados três lotes de cimento Portland, dois lotes do cimento Portland CP V-ARI RS e um lote do cimento Portland CP II-Z 40, a partir dos resultados dos parâmetros reológicos obtidos no estudo em pasta, conforme apresentado no item 3.1 (Tabela 9). No total foram avaliados três concretos de mesma composição, somente com a variação do cimento Portland e lote.

Tabela 7 - Traço adotado nas amostras de concreto de alto desempenho

Material	Peso (kg)
Cimento	5,72
Areia fina	4,16
Areia de britagem	6,00
Brita	10,00
Água	2,40

Fonte: Castro, Liborio e Pandolfelli (2009). Adaptado pelo autor.

Os agregados utilizados na composição do concreto de alto desempenho foram caracterizados através de ensaios como o de determinação do teor de material pulverulento conforme a norma NBR 16973 (ABNT, 2021), determinação de massa específica aparente através do picnômetro conforme NBR 6457 (ABNT, 2016) e granulometria conforme NBR 17054 (ABNT, 2022). As propriedades dos agregados utilizados são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização física dos agregados utilizados nos concretos de alto desempenho

Agregado	Areia Fina		Areia de Britagem		Brita nº 0	
Massa específica (g/cm ³)	2,62		2,63		2,62	
Teor de pulverulento (%)	0,64%		13,51%		1,86%	
Massa da amostra (g)	570,4		630,5		790,4	
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida acumulada	Massa Retida (g)	% Retido	Massa Retida (g)	% Retido
9,52	0	0,00%	0	0,00%	47,8	6,05%
6,35	0	0,00%	1,3	0,21%	211,3	32,85%
4,75	0	0,00%	10,8	1,93%	240,8	63,38%
2,40	0,7	0,12%	142	24,52%	221,7	91,49%
2,00	0,2	0,16%	44,7	31,63%	12	93,01%
1,20	0,9	0,32%	111,4	49,36%	23,4	95,98%
0,60	3,3	0,90%	106,1	66,24%	16,1	98,02%
0,42	4,9	1,76%	46,6	73,52%	4,6	98,61%
0,30	10,1	3,53%	36,9	79,52%	2,5	98,92%
0,15	479,1	87,66%	70,3	90,71%	4,8	99,53%
Fundo	70,3	100,00%	58,4	100,00%	3,7	100,00%

Fonte: Autor (2023).

A mistura dos concretos de alto desempenho analisados ocorreu no próprio reômetro Pheso (Figura 6) em dois processos de mistura: Mistura 1 (com três ciclos conforme apresentados na Figura 7) e Mistura 2 (com quatro ciclos conforme apresentados na Figura 8).

Figura 6 - Reômetro Pheso utilizado para mistura e análise dos parâmetros reológicos das amostras de concreto de alto desempenho



Fonte: Autor (2023).

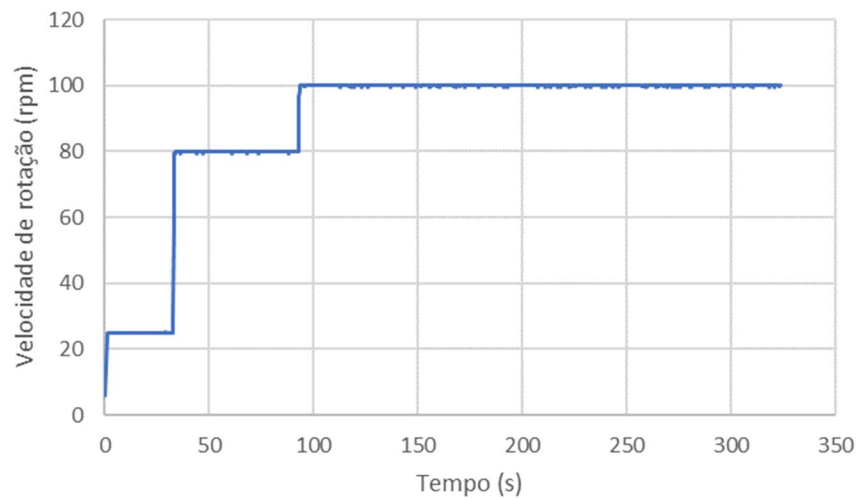
Primeiramente eram adicionados os materiais na cuba do reômetro na seguinte ordem: areia de britagem, areia fina, cimento Portland e por último o pedrisco (brita 0). Após a colocação dos materiais eram iniciados os ciclos da mistura 1 (Figura 7). No ciclo 1 e ciclo 2 eram misturados os materiais secos. Em seguida no ciclo 3, aproximadamente 100 segundos do início da mistura 1, a quantia total de água foi adicionada com uma vazão constante. Ao fim do ciclo 3, finalizando a mistura 1, procedia-se com a mistura manual do concreto de modo a homogeneizar os materiais, além da raspagem da cuba nas laterais e no fundo do recipiente.

Após esse processo, iniciava-se os ciclos da mistura 2 (ciclos de mistura conforme a Figura 8). Após aproximadamente 100 segundos, isto é, ao término do ciclo 1 e ciclo 2, o teor de aditivo superplastificante (0,20% SP) era adicionado.

Com o término da mistura 1 e mistura 2, iniciava-se a análise dos parâmetros reológicos do concreto e para isto utilizou-se um programa de aceleração e desaceleração composto por 7 patamares, com durações de 5 segundos para aceleração e 15 segundos para desaceleração, iniciando com velocidades de rotação de 25 rpm, aumentando sua velocidade gradativamente até o máximo de 450 rpm e depois diminuindo a velocidade até os 25 rpm iniciais, totalizando em 135 segundos de análise, conforme a Figura 9.

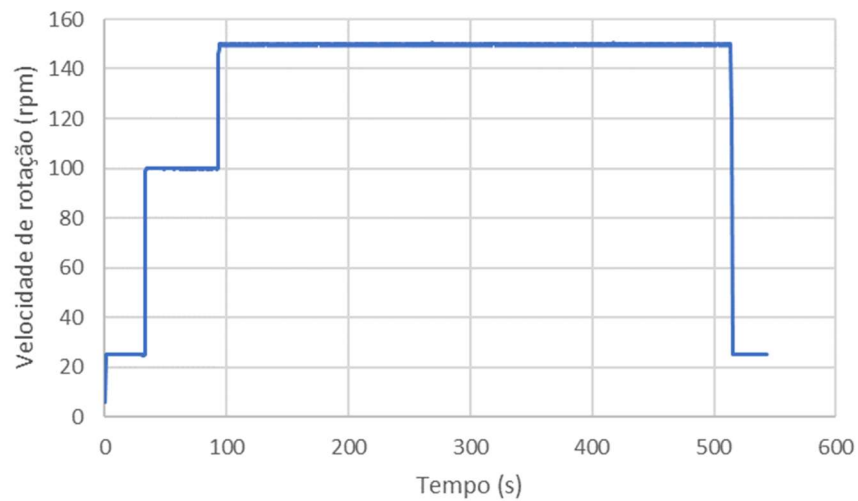
Os parâmetros reológicos do concreto foram obtidos através do ensaio de reometria rotacional. O equipamento possui rotação concêntrica e varia controladamente sua rotação em rpm, transferindo-a por meio de uma pá dentada para a mistura, para que possa ser analisada. O reômetro faz a medição dos valores de torque e rotação, e para obtenção dos parâmetros reológicos da mistura utiliza-se da equação do modelo de Bingham (SCHANKOSKI et al., 2017).

Figura 7 - Velocidade de rotação versus tempo utilizado na Mistura 1



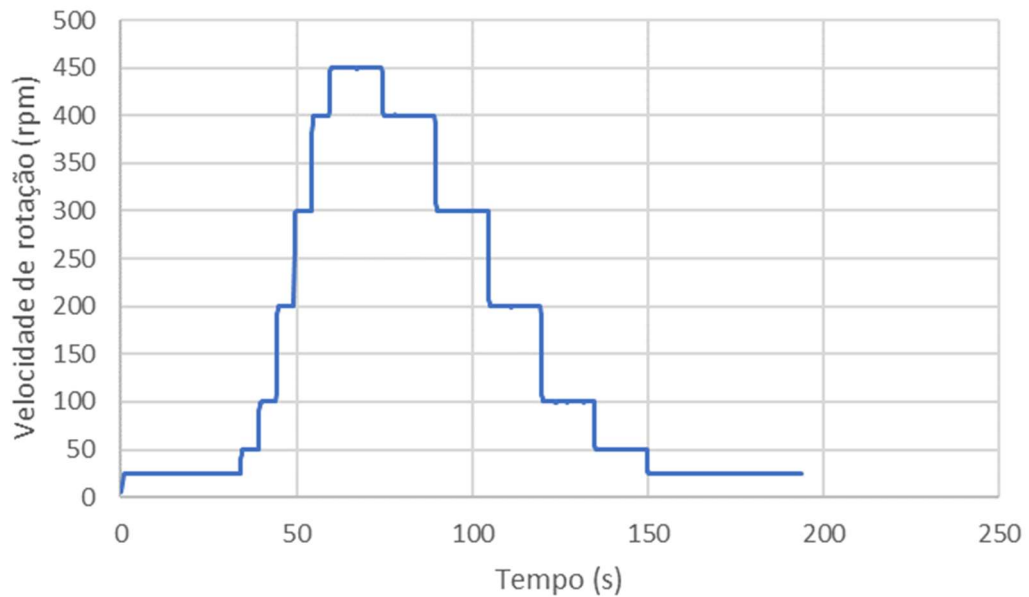
Fonte: Autor (2023).

Figura 8 - Velocidade de rotação versus tempo utilizado na Mistura 2



Fonte: Autor (2023).

Figura 9 - Velocidade de rotação versus tempo utilizado na leitura dos parâmetros reológicos



Fonte: Autor (2023).

Ao final da análise dos parâmetros reológicos era determinada a consistência do concreto, pelo abatimento do tronco de cone, também conhecido como Slump Teste, conforme NBR 16889 (ABNT, 2020). O restante da amostra era utilizada para moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) para determinação da resistência à compressão do concreto, conforme norma NBR 5739 (ABNT, 2018) na máquina universal de ensaio (prensa) de 200 toneladas.

Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e armazenados em tanque para cura imersa (água com cal) até a data do rompimento, 28 dias após a mistura. Os corpos de prova no dia da determinação da resistência à compressão foram retificados antes do ensaio.

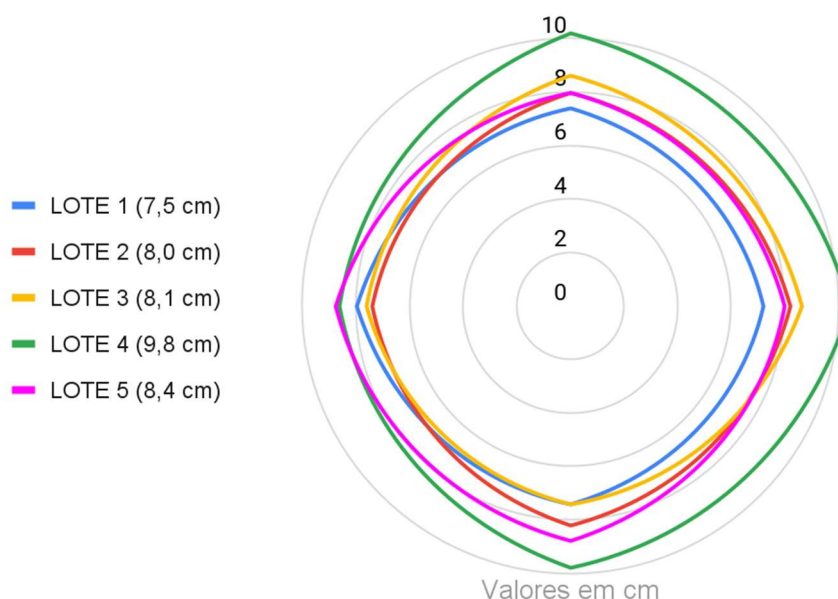
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas pastas cimentícias e em seguida os valores obtidos nos concretos de alto desempenho.

4.1 Pastas Cimentícias

Os resultados obtidos de fluidez pelo espalhamento de abatimento de cone de Kantro para os lotes de cimento Portland CP V-ARI RS com diferentes teores de aditivo superplastificante são apresentados nas Figura 10 (0,00% SP), Figura 11 (0,20% SP) e Figura 12 (0,40% SP). As medidas de fluidez refletem a trabalhabilidade das pastas cimentícias, sendo que valores maiores indicam maior espalhamento e facilidade de moldagem.

Figura 10 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,45 a/c - 0,00% SP)



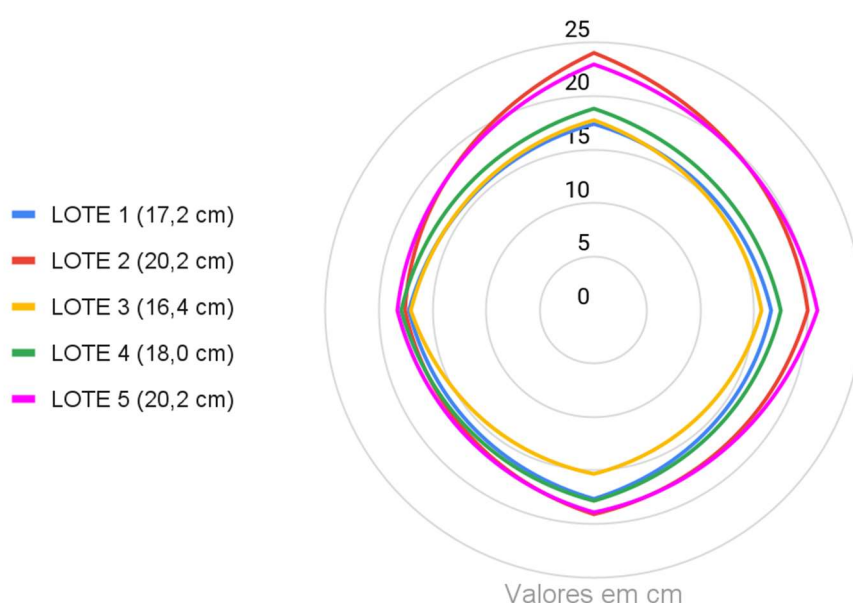
Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados obtidos das pastas sem aditivo superplastificante (0,00% SP) (Figura 10), observou-se uma diferença nos valores de espalhamento entre os lotes analisados. O lote 4 apresentou o maior valor de abatimento de cone, com 9,8 cm de diâmetro médio, enquanto os lotes 1, 2 e 3 apresentaram valores

próximos, em torno de 7,5 cm a 8,1 cm de diâmetro médio. O lote 5 registrou um valor intermediário de 8,4 cm. Estes resultados apontam uma variabilidade nos lotes de cimento em relação à trabalhabilidade das pastas, esta variabilidade pode estar associada a diferentes fatores, como a qualidade do cimento, a composição química, as características das matérias-primas e o processo de produção (NEVILLE, 2015). Observando os valores apresentados na Tabela 4, observa-se a variação principalmente da superfície específica (Blaine) dos cimentos Portland, sendo o cimento mais grosso o do lote 5 que não teve correlação com a fluidez nesse ensaio.

Ao adicionar 0,20% de aditivo superplastificante às pastas (Figura 11), observou-se um aumento significativo nos valores de espalhamento como já era esperado. Os lotes 2 e 5 apresentaram os maiores valores, com 20,2 cm em ambos de diâmetro médio, indicando uma considerável melhoria na fluidez das pastas. Os lotes 1 e 3 registraram valores próximos, em torno de 16,4 cm a 17,2 cm, enquanto o lote 4 apresentou um valor intermediário de 18,0 cm. Estes resultados demonstram o impacto positivo do aditivo superplastificante atuando como dispersante, promovendo a separação das partículas de cimento e reduzindo a viscosidade da pasta, ocasionando desta forma uma melhora na fluidez e na trabalhabilidade das pastas cimentícias (BJÖRNSTRÖM e CHANDRA, 2003).

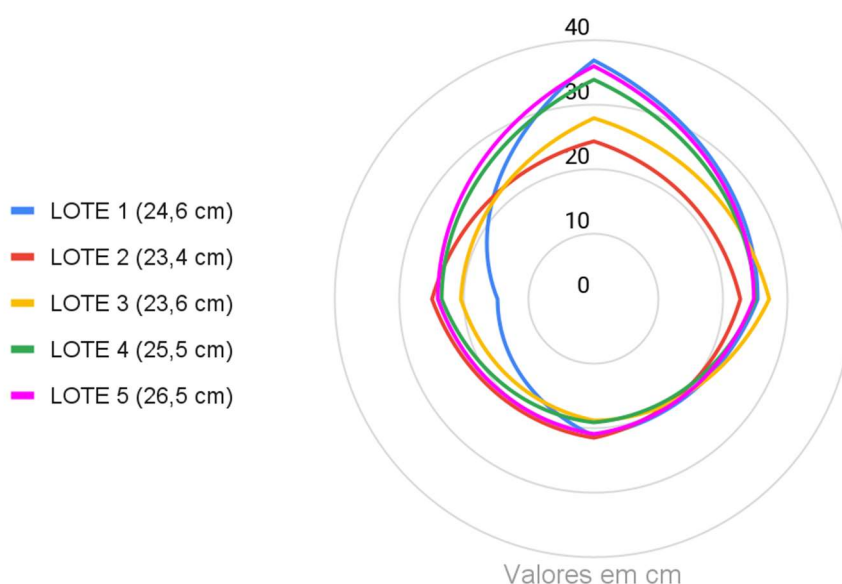
Figura 11 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,45 a/c - 0,20% SP)



Fonte: Autor (2023).

À medida que o teor de aditivo superplastificante aumentou para 0,40% (Figura 12), os valores de espalhamento também aumentaram. O lote 5 obteve o maior valor, com 26,5 cm de diâmetro médio, seguido pelos lotes 1 e 4, com valores próximos de 24,6 cm e 25,5 cm de diâmetro médio, respectivamente. Os lotes 2 e 3 apresentaram valores semelhantes, em torno de 23,4 cm a 23,6 cm de diâmetro médio. Estes resultados reforçam a tendência de maior fluidez e trabalhabilidade das pastas com maiores teores de aditivo.

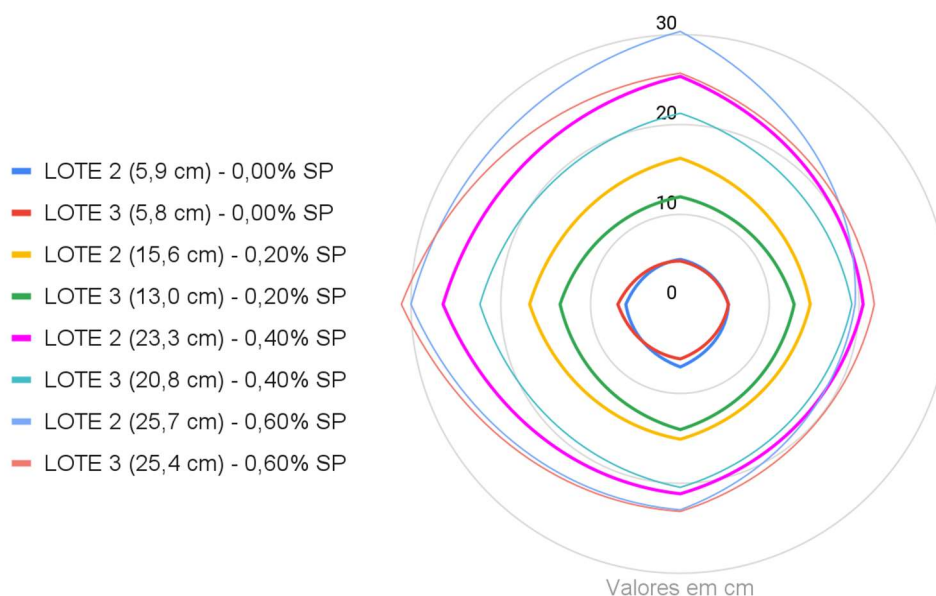
Figura 12 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,45 a/c - 0,40% SP)



Fonte: Autor (2023).

Os resultados obtidos de fluidez pelo espalhamento de abatimento de cone de Kantro para os lotes de cimento Portland CP V-ARI RS com relação água/cimento de 0,40 e diferentes teores de aditivo superplastificante são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP V-ARI RS (0,40 a/c)



Fonte: Autor (2023).

As pastas de referência com teor de 0,00% de aditivo superplastificante apresentaram fluidez bastante semelhante entre si, e valores um pouco menores do que as amostras com relação de 0,45 a/c devido a menor quantidade de água, que confere mais consistência a pasta cimentícia com 0,40 a/c.

As pastas com teor de 0,20% de aditivo superplastificante apresentaram variação entre si e valores de fluidez um pouco menores se comparadas com as pastas cimentícias de 0,45 a/c, ainda sim apresentando comportamento semelhante, com o valor de fluidez do lote 2 sendo superior ao do lote 3 em ambas e variando aproximadamente 20% para a relação de 0,40 a/c e aproximadamente 23% para a relação de 0,45 a/c.

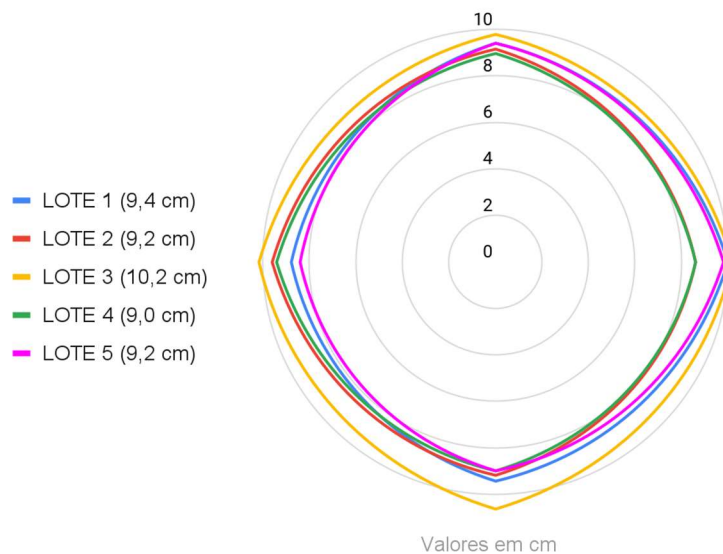
As pastas com teor de 0,40% de aditivo superplastificante apresentaram variação nos valores de fluidez de aproximadamente 12%, enquanto que as amostras com relação de 0,45 a/c apresentaram valores de fluidez bastante semelhantes. O lote 2, apesar de ter uma relação água/cimento de 0,40, apresentou valores de fluidez bem próximos aos valores das amostras com relação de 0,45 a/c.

Ao aumentar o teor de aditivo superplastificante para 0,60% observou-se pouco aumento nos valores de fluidez, com os lotes apresentando valores bastante semelhantes entre si e valores próximos aos lotes com relação água/cimento de 0,45 e teor de aditivo superplastificante de 0,40%.

Os resultados obtidos de fluidez pelo espalhamento de abatimento de cone de Kantro para os lotes de cimento Portland CP II-Z 40 com diferentes teores de aditivo superplastificante são apresentados nas Figura 124(0,00% SP), Figura 15 (0,20% SP) e Figura 16 (0,40% SP).

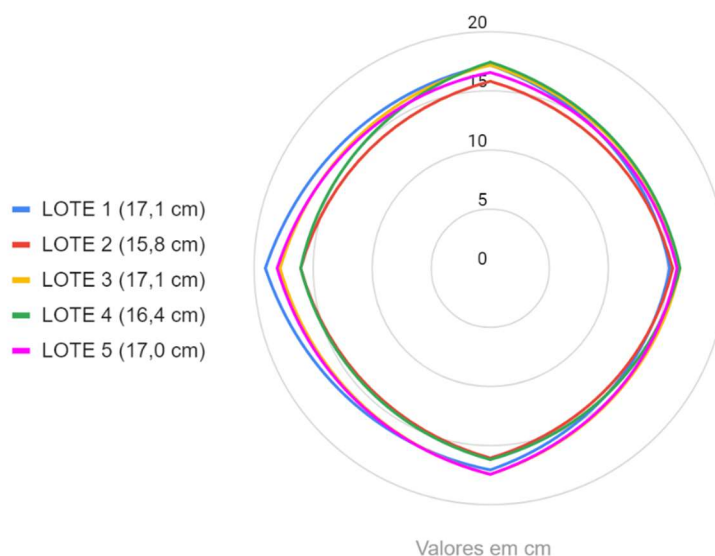
A partir dos resultados de espalhamento obtidos através do teste de abatimento de cone Kantro (Figura 14), observou-se pequena variação nos valores de espalhamento entre os diferentes lotes de cimento CP II-Z 40 (0,00% SP) analisados. O lote 3 apresentou o maior valor de abatimento de cone, com um diâmetro médio de 10,2 cm, indicando uma maior fluidez. Os lotes 1, 2, 4 e 5 exibiram valores intermediários de abatimento de cone variando entre 9,0 cm e 9,4 cm de diâmetro médio, esses valores indicam uma consistência semelhante entre esses lotes, com uma pequena variação nos diâmetros de espalhamento.

Figura 14 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,00% SP)



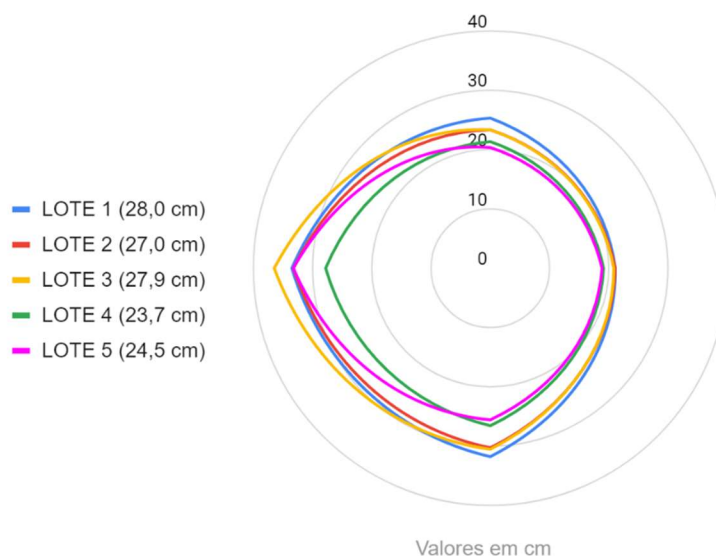
Fonte: Autor (2023).

Figura 15 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,20% SP)



Fonte: Autor (2023).

Os resultados obtidos após adição de 0,20% de aditivo superplastificante são apresentados na Figura 15. Os lotes 1, 3 e 5 apresentaram os maiores valores de abatimento de cone, com um diâmetro médio entre 17,0 cm e 17,1 cm, não apresentando grande variação entre estes lotes. Esses valores indicam uma maior fluidez da pasta em virtude do teor de aditivo adicionado. O lote 4 registrou um valor intermediário de abatimento de cone, com um diâmetro médio de 16,4 cm. O lote 2 registrou um diâmetro médio de 15,8 cm, sendo o lote que mais variou com a utilização deste teor de aditivo e apresentando uma maior consistência se comparado aos outros lotes analisados.

Figura 16 - Espalhamento das amostras de cimento Portland CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,20% SP)

Fonte: Autor (2023).

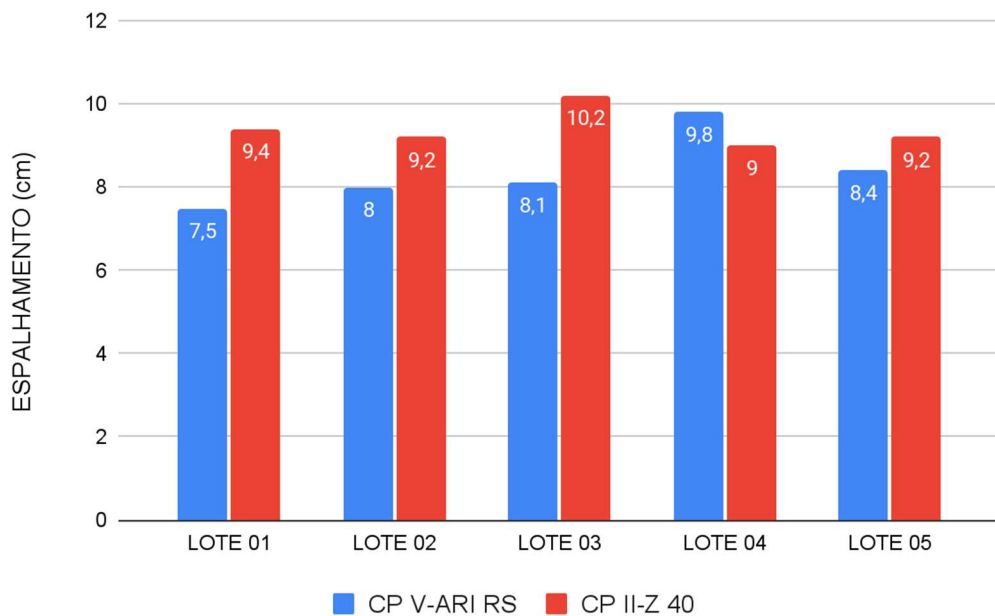
A Figura 16 apresenta os resultados obtidos com a adição de teor de 0,40% de aditivo superplastificante. Pode-se perceber uma variação maior do que a apresentada nas pastas cimentícias com teor de 0,20% de aditivo superplastificante, tendo os lotes 1 e 3 os maiores valores de espalhamento com 28,0 cm e 27,9 cm de diâmetro médio respectivamente, sendo as pastas cimentícias com maior fluidez, o lote 2 com um valor intermediário de 27,0 cm e os menores valores sendo os lotes 5 e 4, com o lote 4 apresentando o menor valor de abatimento com aproximadamente 23,7 cm, uma variação de aproximadamente 18% se comparado ao lote 1.

Com os resultados obtidos de fluidez observa-se que a adição de aditivo superplastificante exerceu um efeito significativo na trabalhabilidade das pastas cimentícias, proporcionando um aumento considerável nos valores de espalhamento. Além disso, observa-se uma certa variabilidade nos valores de espalhamento entre os diferentes lotes de cimento analisados, independentemente da adição de aditivo superplastificante. Essa variabilidade pode estar relacionada a diferenças nas características físicas e químicas dos lotes de cimento, bem como à presença de possíveis impurezas ou variações no processo de produção.

Na Figura 17 são apresentados os valores de espalhamento obtidos através do ensaio de abatimento de cone de Kantro para as amostras de referência

de cimento Portland CP V-ARI RS e CP II-Z 40 com relação de 0,45 a/c e teor de aditivo plastificante de 0,00%. Na Figura 17 é possível perceber uma pequena variação nos valores de espalhamento entre os dois tipos de cimento Portland mesmo sem utilização de nenhum aditivo, esta variação pode ser ocasionada por diferentes fatores, como as características das matérias-primas utilizadas, a composição química, e o processo de produção do cimento Portland (NEVILLE, 2015).

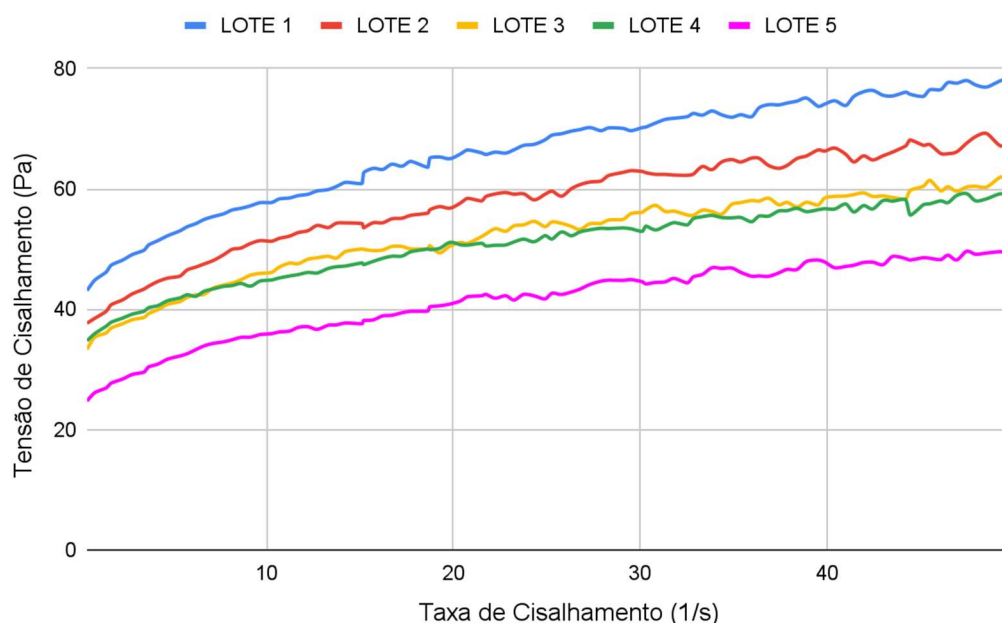
Figura 17 - Espalhamento das pastas de cimento Portland CP V-ARI RS e CP II-Z 40 (0,45 a/c - 0,00% SP)



Fonte: Autor (2023).

A análise reológica de materiais cimentícios desempenha um papel crucial na compreensão do comportamento mecânico destes materiais. Os resultados obtidos de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento para as pastas cimentícias de cimento Portland CP V-ARI RS são apresentados na Figura 18 (0,00% SP), na Figura 19 (0,20% SP) e na Figura 20 (0,40% SP).

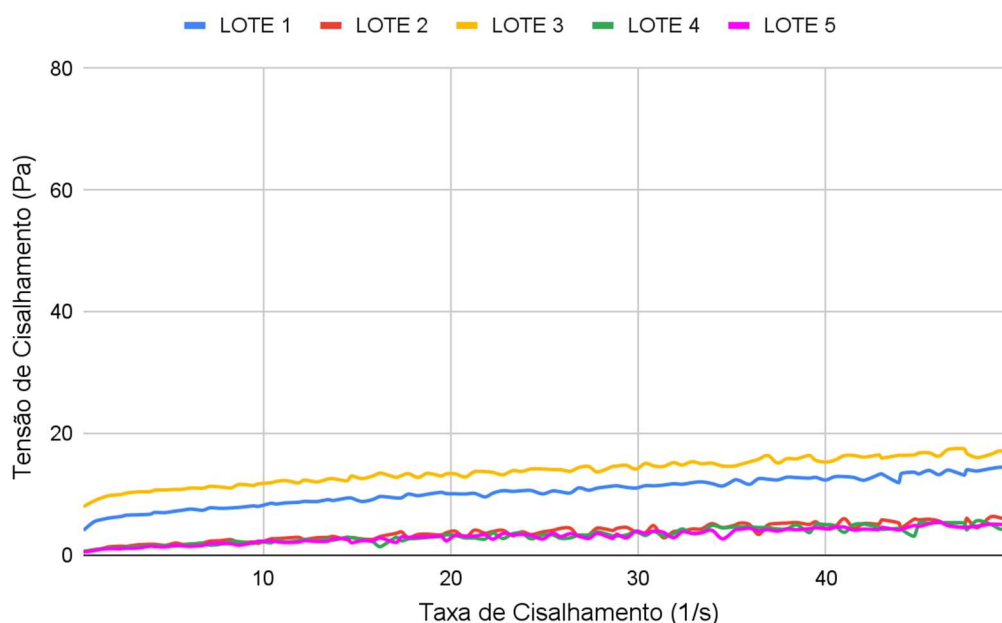
Figura 18 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,00% SP)



Fonte: Autor (2023).

Nota-se na Figura 18 uma diferença entre o comportamento reológico obtido para as pastas sem aditivo superplastificantes (0,00% SP) para os lotes distintos. Os lotes 1 e 5 apresentaram as maiores variações, representando uma variação de aproximadamente 74%, sendo uma das causas possíveis as características distintas entre esses lotes (Tabela 4). O cimento Portland do lote 1 apresentou uma área superficial (Blaine) de 5140 cm²/g e maior quantidade de resíduo insolúvel (13,7%), sendo uma das possíveis causas para as maiores tensões de cisalhamento verificadas. Já o cimento Portland do lote 5 apresentou uma área superficial (Blaine) de 4890 cm²/g, cimento Portland mais grosso entre os analisados, e menor quantidade de resíduo insolúvel (12,1%), apresentando os menores valores de tensões de cisalhamento. Os lotes 2, 3 e 4 das pastas cimentícias analisadas não demonstraram variações significativas, com os lotes 3 e 4 apresentando valores bastante semelhantes.

Figura 19 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP)

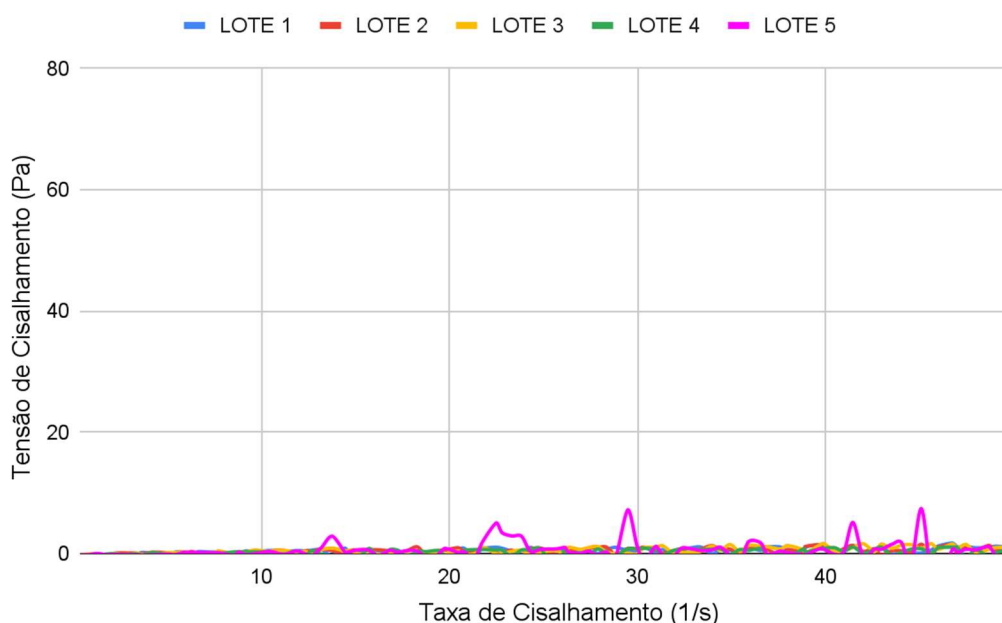


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 19 são apresentados os resultados do comportamento reológico das pastas cimentícias com teor de 0,20% de aditivo superplastificante (0,20% SP). Ao contrário das amostras de referência da Figura 12, observou-se uma maior variação nos lotes 1 e 3, enquanto os lotes 2, 4 e 5 exibiram valores bastante semelhantes. Os valores de tensão de cisalhamento mínimo foram de 4,11 Pa para o lote 1 e 7,99 Pa para o lote 3, apresentando uma variação de aproximadamente 94%. De forma similar, os valores de tensão de cisalhamento máximo foram de 14,11 Pa para o lote 1 e 17,48 Pa para o lote 3, apresentando uma variação de cerca de 24%.

Os resultados obtidos na Figura 19 sugerem que a adição de 0,20% de aditivo superplastificante influenciou significativamente o comportamento reológico das pastas cimentícias, levando a uma maior variação nas propriedades de tensão de cisalhamento, essa variação pode ser atribuída à interação complexa entre o cimento e o superplastificante, que afeta a viscosidade e a capacidade de fluxo do material (MIKANOVIC e JOLICOEUR, 2008).

Figura 20 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,40% SP)



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 20 são apresentados os valores com o maior teor de aditivo superplastificante (0,40% SP), percebe-se pelo gráfico que não foi possível analisar estas pastas, pois durante o ensaio houve processo de exsudação das mesmas, sendo verificadas visivelmente no final do ensaio com a separação das fases (água e partículas sólidas). A exsudação é um fenômeno comum e é caracterizado pela liberação de água proveniente da pasta, que se acumula na superfície, alterando os resultados da análise reológica. É influenciada por diversos fatores, como a relação água/cimento, a dosagem de aditivos, a granulometria dos materiais, a temperatura ambiente, a umidade relativa e o tempo de cura (PUERTAS et al., 2005). Neste caso, houve provavelmente um ponto de saturação do aditivo para essas condições. Cabe ressaltar que apenas os resultados da análise reológica foram influenciados pelo processo de exsudação, sendo que foi possível determinar a fluidez através do ensaio de abatimento de cone Kantro (Figura 12).

A Tabela 9 mostra os valores de tensão de escoamento (τ_0), viscosidade plástica (η_p) e área de histerese das pastas cimentícias analisadas, resultados obtidos a partir das curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento segundo modelo de Bingham.

Tabela 9 - Parâmetros reológicos das pastas analisadas com cimento Portland CP V-ARI RS

TEOR DE ADITIVO	LOTE	TENSÃO DE ESCOAMENTO (τ_0)	VISCOSIDADE (η_e)	ÁREA DE HISTERESE (ΔA)
0,00%	1	51,61	1,269	72,38
	2	43,59	1,369	-30,99
	3	40,87	1,013	25,47
	4	38,45	1,297	-99,67
	5	29,72	1,103	-41,67
0,20%	1	6,58	0,5189	5,741
	2	1,72	0,2145	13,57
	3	10,10	0,7013	6,389
	4	1,45	0,1821	19,24
	5	1,43	0,1755	6,463

Fonte: Autor (2023).

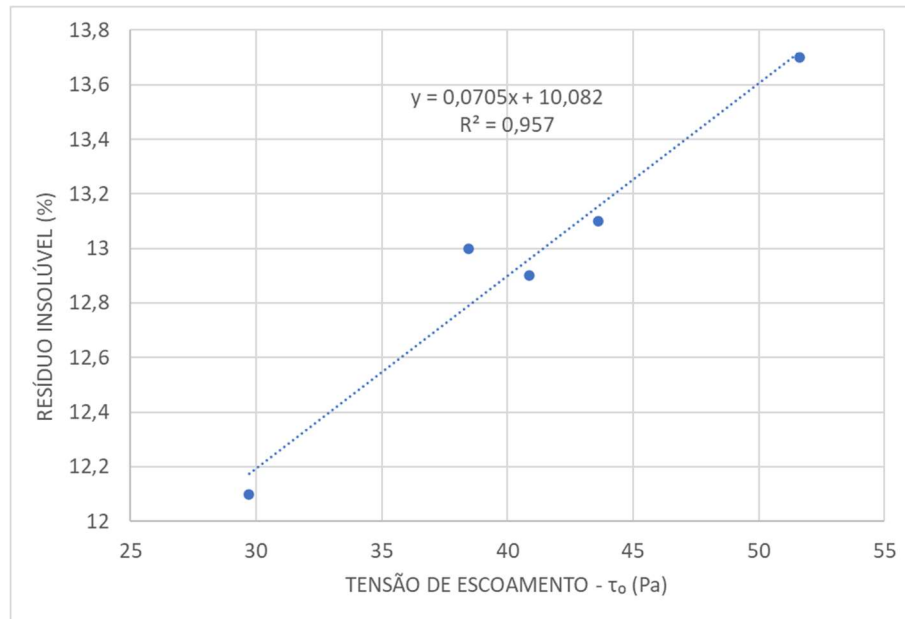
Como já verificado na Figura 18, as pastas cimentícias de referência com teor de 0,00% de aditivo superplastificante (0,00% SP) tiveram as maiores variações na tensão de escoamento nos lotes 1 e 5, apresentando tensões de 51,61 Pa e 29,72 Pa respectivamente, os lotes 2, 3 e 4 não apresentaram grande variação de valores. Esse comportamento pode ter ocorrido em função da composição do cimento Portland, conforme mencionado anteriormente. Devido a isso foi verificada possíveis relações dos valores obtidos de tensão de escoamento com as características obtidas do cimento Portland do fabricante na Tabela 4. A maior correlação obtida foi entre a tensão de escoamento das pastas sem aditivo superplastificante e o resíduo insolúvel, provavelmente cinza volante, conforme apresentado na Figura 21. Neste caso, demonstrando que o teor de resíduo teve uma grande influência na tensão de escoamento para este cimento Portland analisado. Uma das possíveis explicações é que esse resíduo insolúvel, normalmente na região sul, é adição de cinza volante e assim por serem partículas esféricas auxiliam no rolamento das partículas, diminuindo assim a tensão de escoamento das pastas analisadas. Cabe ressaltar que não foi possível obter uma correlação entre a área superficial (Blaine) e a tensão de escoamento (Figura 22).

Nota-se na Tabela 9 que apesar de apresentarem variações significativas nas tensões de escoamento das pastas sem aditivo superplastificante, a viscosidade plástica das pastas permaneceram semelhantes com valores variando entre 1,369 Pa/s e 1,013 Pa/s. As pastas cimentícias com teor de 0,20% de aditivo superplastificante (0,20% SP) por sua vez também demonstraram resultados semelhantes aos analisados na Figura 19 com os lotes 1 e 3 apresentando maior variação, com valores de 6,58 Pa e 10,10 Pa respectivamente e os lotes 2, 4 e 5 com valores semelhantes. Diferente das pastas cimentícias de referência, as pastas com 0,20% SP apresentaram variações significativas em sua viscosidade, tendo os lotes 1 e 3 as maiores variações. Para estas pastas não foi possível obter uma correlação entre a tensão de escoamento e o resíduo insolúvel, possivelmente, pelo aditivo superplastificante influenciar mais na dispersão das partículas do que a quantidade do resíduo.

Observa-se também na Tabela 9 que a área de histerese (tixotropia), foram inferiores para as pastas com aditivo superplastificante (0,20% SP) como já era esperado, pois o aditivo atuou como dispersante, promovendo a separação das partículas de cimento e reduzindo a viscosidade da pasta, ocasionando desta forma uma melhora na fluidez e na trabalhabilidade das pastas cimentícias (BJÖRNSTRÖM e CHANDRA, 2003), conforme já mencionado.

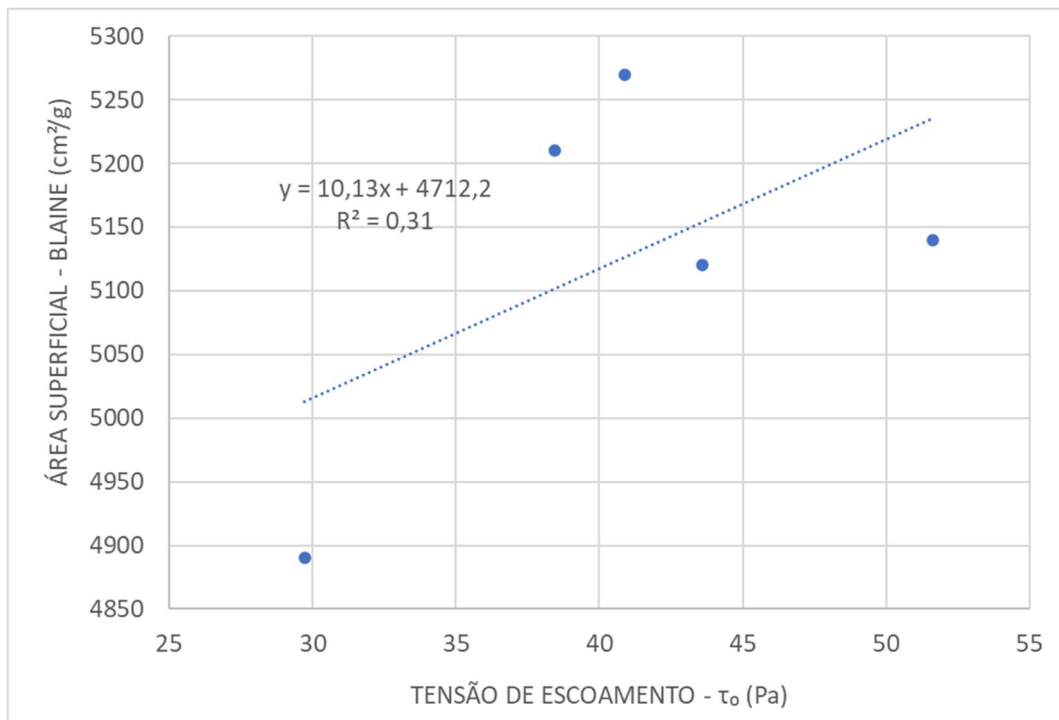
As pastas cimentícias com teor de 0,40% de aditivo superplastificante (0,40% SP) não foram incluídas na Tabela 9 devido ao processo de exsudação, conforme demonstrado na Figura 20, influenciando na obtenção dos parâmetros reológicos.

Figura 21 - Correlação entre o resíduo insolúvel (%) e a tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas sem aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2023).

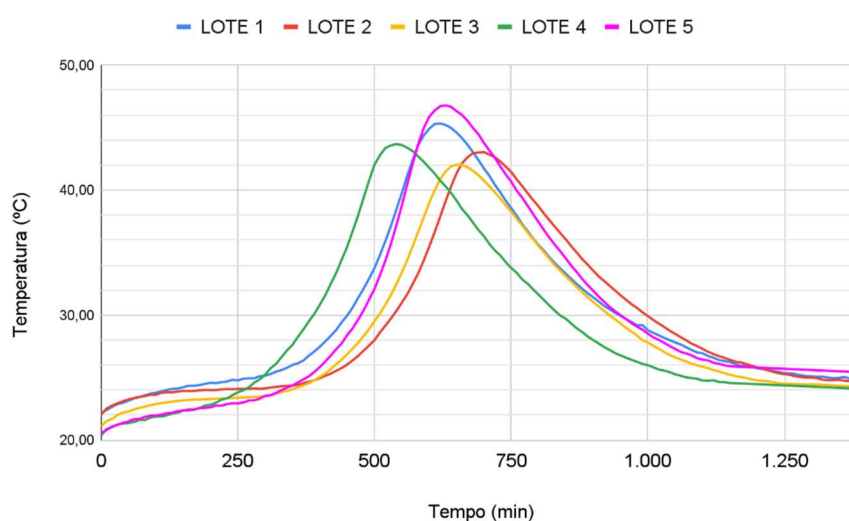
Figura 22 - Correlação área superficial Blaine (cm^2/g) e tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas sem aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2023).

As pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS com teor de aditivo de 0,20% SP foram analisadas no calorímetro semi-adiabático para determinação da evolução da temperatura ao longo do tempo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Resultados de calorimetria das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP)

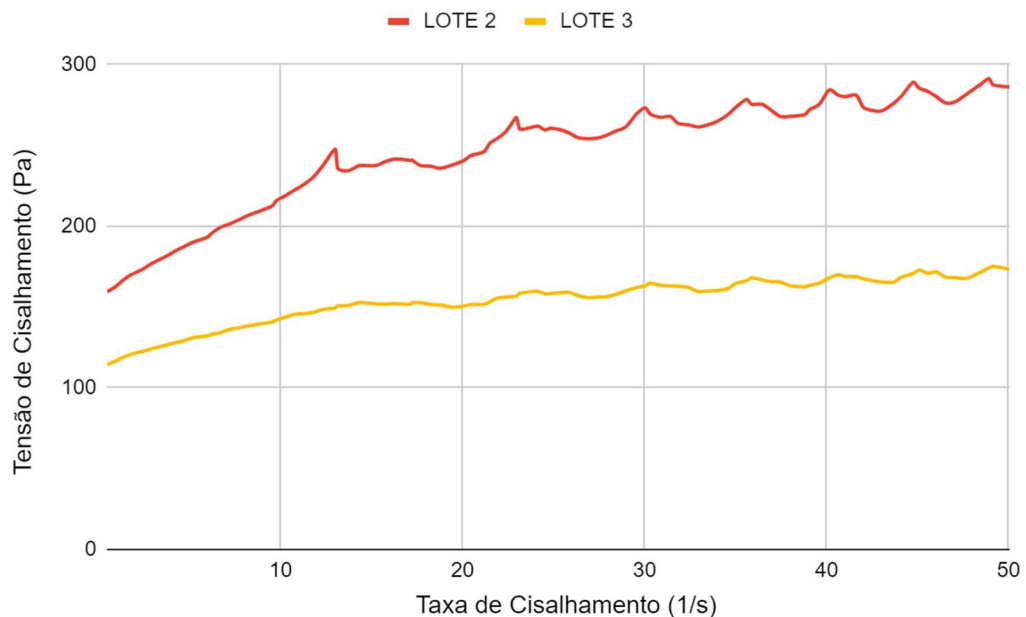


Fonte: Autor (2023).

Observa-se na Figura 23 que as maiores variações foram nos lotes 3 e 5, atingindo temperaturas máximas de 42°C e 47°C respectivamente, indicando uma possível influência do lote também nas temperaturas das pastas cimentícias resultando em diferenças no tempo de início de pega entre os lotes analisados.

Dentre as amostras de cimento Portland CP V-ARI RS foram selecionados os dois lotes (Lote 2 e Lote 3) com maior variação nos parâmetros reológicos após adição de aditivo superplastificante para outra análise através do reômetro, desta vez diminuindo a relação água cimento de 0,45 a/c para 0,40 a/c de modo a aumentar a sensibilidade dos ensaios. As curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento através destes ensaios são apresentadas nas Figura 24 (0,00% SP), Figura 25 (0,20% SP) e Figura 26 (0,40% SP).

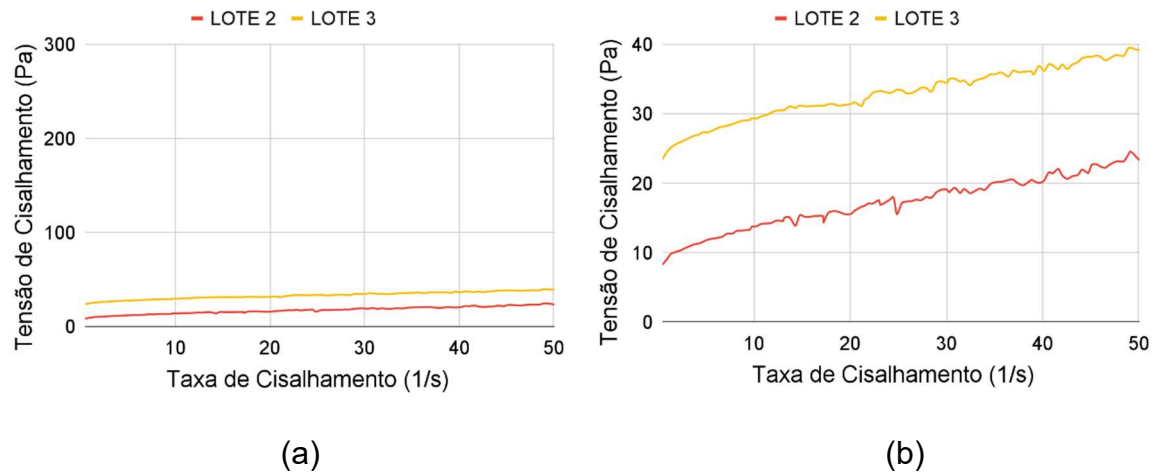
Figura 24 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,40 a/c - 0,00% SP)



Fonte: Autor (2023).

É possível perceber através da Figura 24 que os valores de tensão de cisalhamento foram bem mais elevados se comparados aos valores obtidos nas amostras com 0,45 a/c, isto deve-se ao fato de que com uma relação água/cimento maior as partículas de cimento possuem maior facilidade em se locomover no meio, reduzindo assim a tensão de cisalhamento necessária para locomover estas partículas. Os lotes apresentaram grande variação mesmo sem adição de aditivo superplastificante, com o lote 2 apresentando tensões de cisalhamento máximas próximo aos 290 Pa e o lote 3 apresentando tensões de cisalhamento máximas próximo aos 170 Pa, uma variação de aproximadamente 70%.

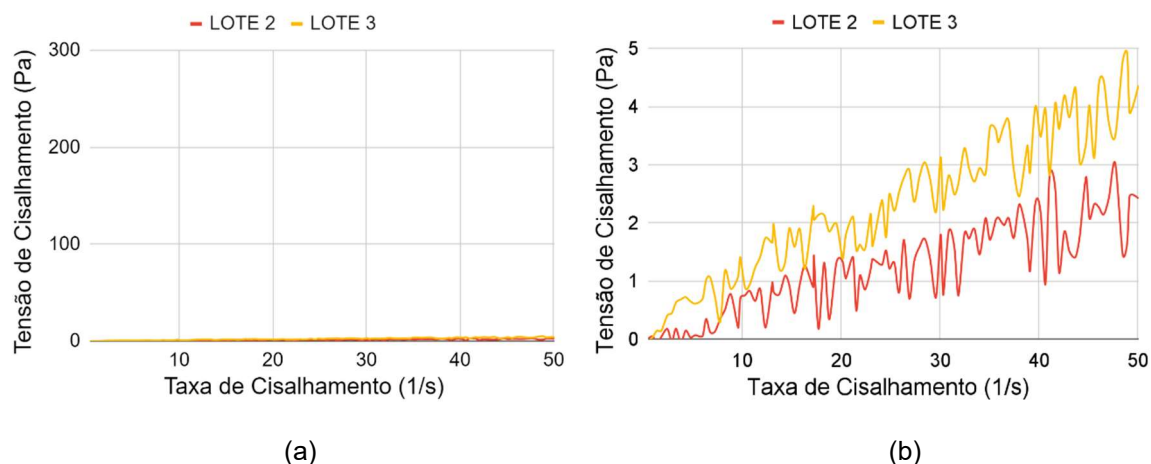
Figura 25 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,40 a/c - 0,20% SP): (a) escala da tensão de escoamento máxima 300 Pa e (b) escala da tensão de escoamento máxima 40 Pa



Fonte: Autor (2023).

Com a adição de 0,20% teor de aditivo superplastificante, as amostras aumentaram a fluidez e apresentaram acentuada redução na tensão de cisalhamento necessária para mover as partículas, como pode ser observado através da Figura 25. Apesar de terem redução acentuada na sua tensão de cisalhamento, é perceptível a variação do comportamento entre os lotes, tendo o lote 3 valores de tensão de cisalhamento máximo próximo aos 40 Pa e o lote 2 valores de tensão de cisalhamento máximo próximo aos 25 Pa, uma variação de aproximadamente 60% sinalizando um comportamento distinto entre as amostras após adição do aditivo superplastificante para essa relação a/c aumentando a sensibilidade do ensaio.

Figura 26 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP V-ARI RS analisadas (0,40 a/c - 0,40% SP): (a) escala da tensão de escoamento máxima 300 Pa e (b) escala da tensão de escoamento máxima 5 Pa



Fonte: Autor (2023).

Ao contrário das amostras com relação de água/cimento 0,45, as amostras com relação água/ cimento de 0,40 e teor de 0,40% de aditivo superplastificante não apresentaram processo de exsudação, permitindo que seus resultados fossem analisados. Pode-se perceber através do gráfico da Figura 26 que a variação entre os lotes continua conforme se aumenta o teor de aditivo. Com o lote 3 apresentando valores de tensão de cisalhamento máximas próximas dos 5 Pa, enquanto que o lote 2 apresenta valores de tensão de cisalhamento máximas próximas dos 3 Pa, uma variação de aproximadamente 67%.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de tensão de escoamento (τ_0), viscosidade plástica (η_e) e área de histerese das pastas cimentícias analisadas, resultados obtidos a partir das curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento segundo modelo de Bingham.

Tabela 10 - Parâmetros reológicos das pastas analisadas com cimento Portland CP V-ARI RS e relação água cimento de 0,40 a/c

TEOR DE ADITIVO	LOTE	TENSÃO DE ESCOAMENTO (τ_0)	VISCOSIDADE (η_e)	ÁREA DE HISTERESE (ΔA)
0,00%	2	175,2	0,9304	-576,00
	3	122,4	3,509	-115,00
0,20%	2	10,33	0,8375	13,54
	3	25,47	1,449	5,36
0,40%	2	0,19	0,06482	11,68
	3	0,46	0,118	26,24

Fonte: Autor (2023).

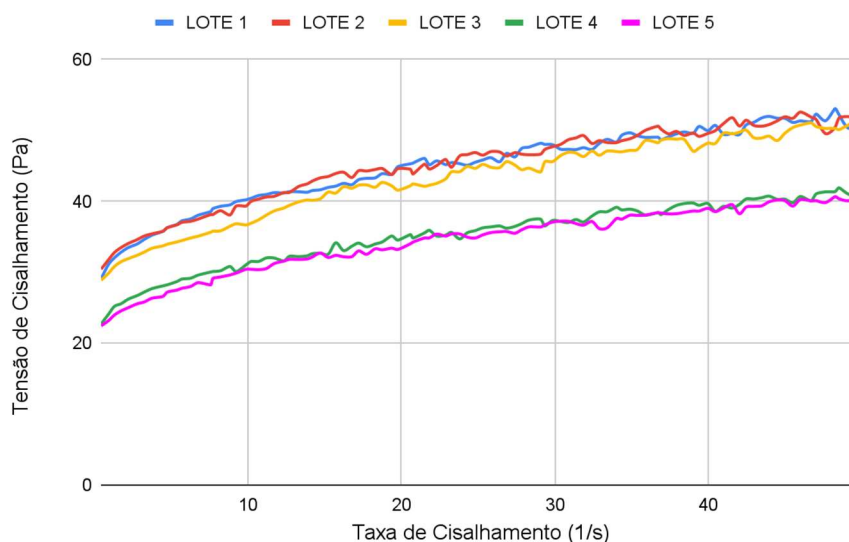
Através da Tabela 10, pode-se verificar uma variação de aproximadamente 43% nos valores de tensão de escoamento entre os lotes de referência com teor de 0,00% de aditivo superplastificante, as mesmas amostras apresentaram ainda grande variação nos valores de viscosidade e também de tixotropia. À medida que se aumenta o teor de aditivo superplastificante, é possível perceber que as variações nos valores continuam demonstrando que os lotes apesar de serem classificados como um mesmo tipo de cimento apresentam comportamento distinto.

Observou-se que com a diminuição da relação água/cimento houve um aumento da sensibilidade dos parâmetros reológicos. No entanto para a seleção do cimento Portland que seria utilizado no concreto de alto desempenho foi avaliado os valores obtidos para a relação água/cimento 0,45.

Os resultados obtidos de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento para as pastas cimentícias de cimento Portland CP II-Z 40 são apresentados na Figura 27 (0,00% SP), na Figura 28 (0,20% SP) e na Figura 29 (0,40% SP).

Na Figura 27 percebe-se variações dos lotes de forma agrupada, com os lotes 1, 2 e 3 apresentando comportamento bem semelhante, e os lotes 4 e 5 também apresentando comportamento semelhante entre si, porém diferentes do primeiro grupo.

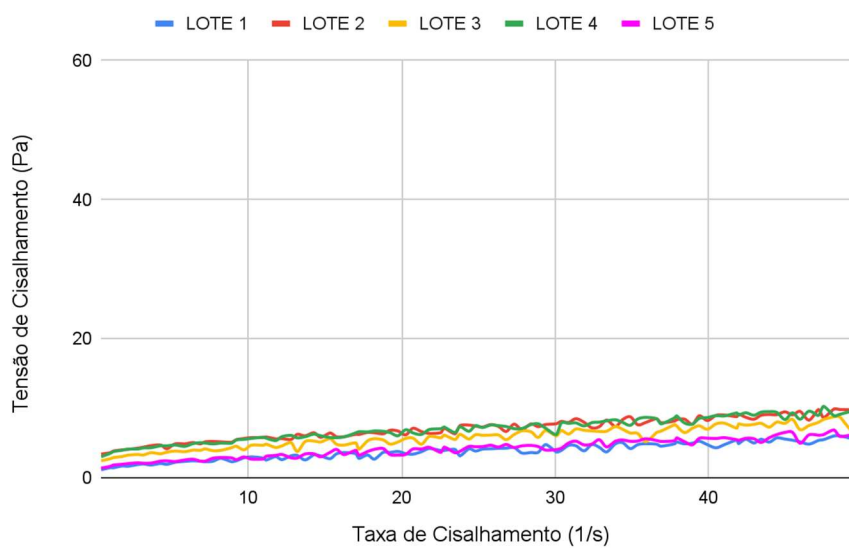
Figura 27 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP II-Z 40 analisadas (0,45 a/c - 0,00% SP)



Fonte: Autor (2023).

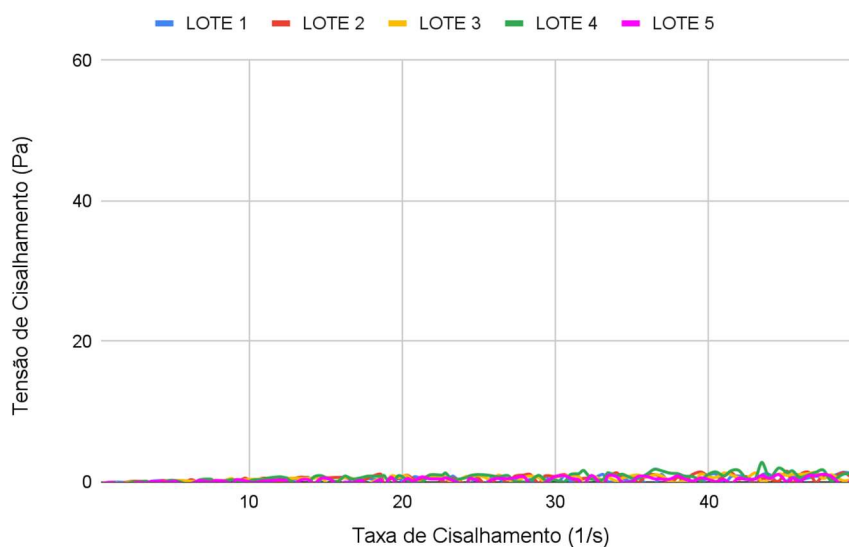
Ao adicionar 0,20% de teor de aditivo superplastificante (0,20% SP) os lotes apresentaram uma menor tensão de cisalhamento, com variações ainda de forma agrupada, onde os lotes 2, 3 e 4 apresentaram comportamento semelhante entre si, e os lotes 1 e 5 também apresentando comportamento semelhante entre si, porém diferentes do primeiro grupo de amostras.

Figura 28 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP II-Z 40 analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP)



Fonte: Autor (2023).

Figura 29 - Comportamento reológico das pastas cimentícias com cimento Portland CP II-Z 40 analisadas (0,45 a/c - 0,20% SP)



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 29 são apresentados os resultados para as amostras com adição de 0,40% teor de aditivo superplastificante, estas amostras também apresentaram exsudação, semelhante ao ocorrido nas amostras de cimento CP V-ARI RS com mesmo teor de aditivo superplastificante.

A Tabela 11 mostra os valores de tensão de escoamento (τ_0), viscosidade plástica (η_e) e área de histerese das pastas cimentícias analisadas, resultados obtidos a partir das curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento segundo modelo de Bingham.

Tabela 11 - Parâmetros reológicos das pastas analisadas com cimento Portland CP II-Z 40.

TEOR DE ADITIVO	LOTE	TENSÃO DE ESCOAMENTO (τ_0)	VISCOSIDADE (η_e)	ÁREA DE HISTERESE (ΔA)
0,00%	1	34,16	1,116	-79,45
	2	35,28	0,6503	-30,44
	3	33,04	0,9237	-17,01
	4	29,26	0,331	-25,72
	5	28,88	0,3077	-34,19
0,20%	1	2,13	0,06858	13,21
	2	4,41	0,3642	21,16
	3	3,42	0,3236	13,77
	4	4,33	0,09611	17,56
	5	2,35	0,07407	10,55

Fonte: Autor (2023).

Como verificado na Figura 27, as pastas cimentícias de referência com teor de 0,00% de aditivo superplastificante (0,00% SP) tiveram dois grupos com comportamento semelhante, o primeiro grupo com os lotes 1, 2 e 3 tendo a tensão de escoamento variando entre 33,04 Pa e 35,28 Pa, aproximadamente 6% de variação. O segundo grupo com comportamento semelhante composto pelos lotes 4 e 5 teve tensões de escoamento de 29,26 Pa e 28,88 Pa respectivamente, variando aproximadamente 1%. A maior variação na tensão de escoamento aconteceu entre os lotes 2 e 4, apresentando uma variação de aproximadamente 18%. Os lotes analisados tiveram o primeiro grupo apresentando as maiores variações de viscosidade, aproximadamente 42% de variação entre o lote 1 e o lote 2, enquanto

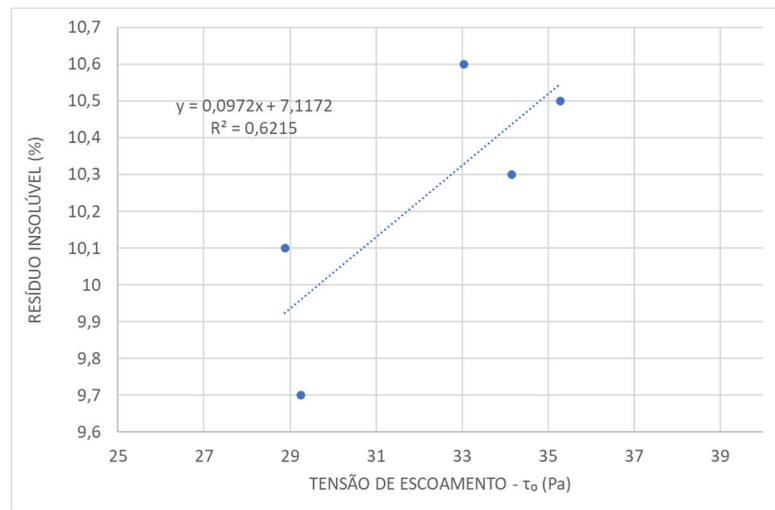
que o lote 4 e o lote 5 do segundo grupo tiveram valores de viscosidade bastante semelhantes.

As pastas cimentícias com teor de 0,20% de aditivo superplastificante também tiveram dois grupos com comportamentos semelhantes, mas com lotes diferentes compondo os grupos quando comparados às amostras de referência (0,00% SP). O primeiro grupo composto pelos lotes 2, 3 e 4 teve tensão de escoamento variando entre 3,42 Pa e 4,41 Pa, uma variação de aproximadamente 22%, bastante superior se comparado aos 6% obtidos pelo primeiro grupo das amostras de referência. As amostras do segundo grupo compostas pelo lote 1 e lote 5 tiveram valores de tensão de escoamento de 2,13 Pa e 2,35 Pa respectivamente, valores bastante semelhantes, apresentando variação de aproximadamente 10%. Os valores de viscosidade tiveram variações bastante significativas, com os lotes do primeiro grupo apresentando valores semelhantes, com exceção do lote 4 que teve um valor de viscosidade mais aproximado ao dos lotes 1 e 5 do segundo grupo, apresentando uma variação total de aproximadamente 431% entre o menor valor do lote 1 e o maior valor do lote 2.

As pastas cimentícias com teor de 0,40% de aditivo superplastificante (0,40% SP) não foram incluídas na Tabela 11 devido ao processo de exsudação, que influenciou na obtenção dos parâmetros reológicos.

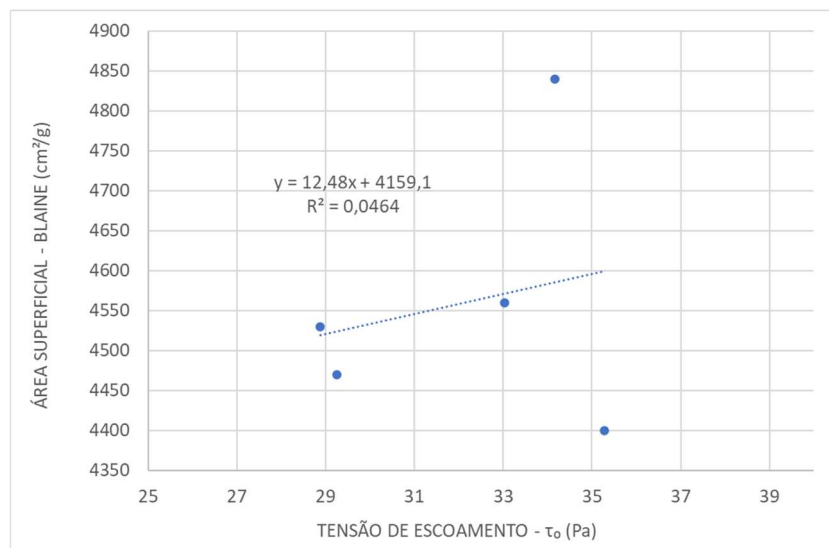
Para o cimento Portland CP II Z - 40 foi possível observar uma baixa correlação entre a tensão de escoamento com o resíduo insolúvel (Figura 30), diferentemente do obtido para o cimento Portland CP V ARI RS (Figura 21), e nem com a área superficial - Blaine (Figura 31).

Figura 30 - Correlação resíduo insolúvel (%) e tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP II Z - 40 analisadas sem aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2023).

Figura 31 - Correlação área superficial Blaine (cm^2/g) e tensão de escoamento (Pa) para as pastas cimentícias com cimento Portland CP II Z - 40 analisadas sem aditivo superplastificante



Fonte: Autor (2023).

Após análise dos parâmetros reológicos das pastas cimentícias foram selecionados dois lotes do cimento Portland CP V-ARI RS que apresentaram a maior variação em seu comportamento (Lote 01 e Lote 05) para que fosse verificada se esta variação ainda seria encontrada no concreto de alto desempenho (item 4.2). Além das duas amostras com maior variação foi escolhido também um dos lotes do cimento Portland CP II-Z 40, lote 4, como forma de comparação do comportamento entre os

diferentes tipos de cimento Portland, cujo o comportamento sem o aditivo superplastificante era semelhante ao lote 5 do cimento Portland CP V-ARI RS, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros reológicos das pastas selecionadas

TEOR DE ADITIVO	CIMENTO PORTLAND	LOTE	TENSÃO DE ESCOAMENTO (τ_0)	VISCOSIDADE (η_e)
0,00%	CP V ARI RS	1	51,61	1,269
		5	29,72	1,103
	CP II Z 40	4	29,26	0,331

Fonte: Autor (2023).

4.2 Concretos de Alto Desempenho

A Tabela 13 apresenta os valores de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump Teste).

Tabela 13 - Resultados de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone

Cimento Portland / Lote		Consistência (cm)
CP V-ARI RS	LOTE 01	6,5
	LOTE 05	15,5
CP II-Z 40	LOTE 04	6,0

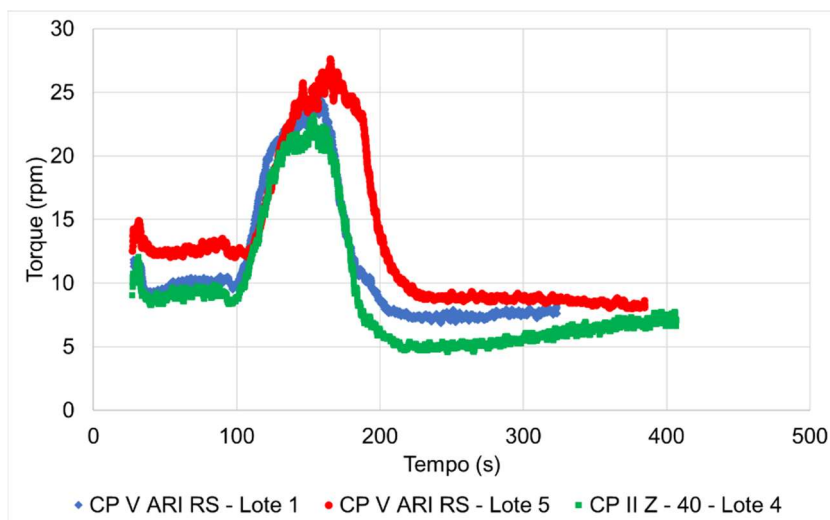
Fonte: Autor (2023).

É possível observar na Tabela 13 que existe uma grande variação de consistência entre as amostras do lote do cimento Portland CP V-ARI RS, aproximadamente 138%. Esta variação também foi observada nos parâmetros reológicos (Tabela 9) e pode ser explicada pela diferença nas características do cimento Portland onde lote 1 o cimento Portland era mais fino (área superficial (Blaine) de 5140 cm²/g) e o lote 5 mais grosso (área superficial (Blaine) de 4890 cm²/g). A amostra de cimento Portland CP II - Z 40 por sua vez, apresentou uma consistência bastante semelhante com o lote 01 de cimento Portland CP V-ARI RS.

Na Figura 32 observa-se a curva obtida entre o torque e o tempo de mistura 1 (materiais secos e depois adição da água) dos concretos analisados e a Figura 33

para a mistura 2 (concreto após a primeira mistura e colocação do teor de superplastificante).

Figura 32 - Torque versus tempo para a mistura 1 dos concretos analisados

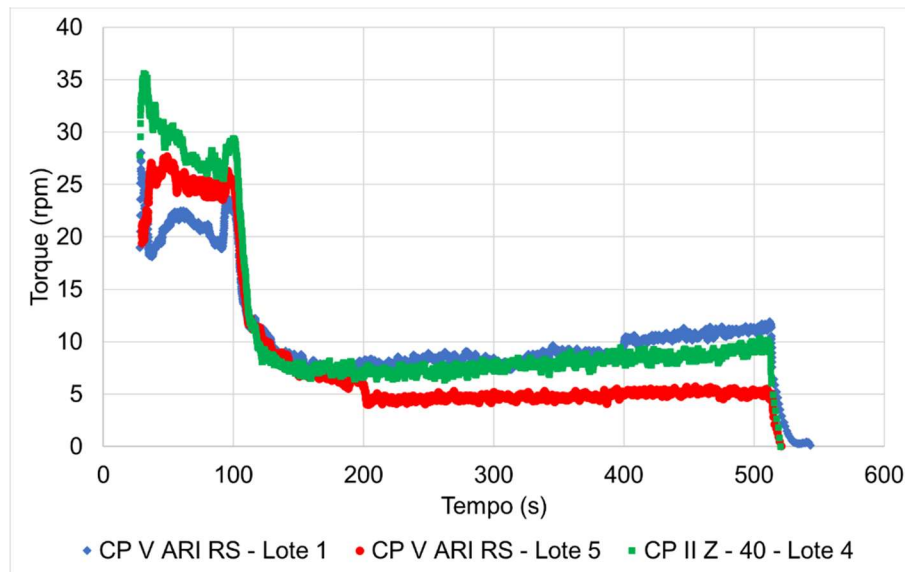


Fonte: Autor (2023).

Observa-se que após o início da adição de água, aproximadamente aos 100s do início da análise, houve um aumento considerável no torque, independentemente do lote e do tipo de cimento utilizado. Este comportamento é explicado por Pileggi, Studart e Pandolfelli (2000) pois à medida que mais água é adicionada e/ou que esta esteja melhor distribuída no sistema, aumenta a quantidade de partículas recobertas pela camada de ligação, causando aumento no torque necessário para o cisalhamento. Após a adição de toda a quantidade de água o torque diminui até a sua estabilização, pois houve um afastamento das partículas não ocorrendo a resistência da mistura.

Já no processo de mistura 2, apresentado na Figura 33, observou-se que após a adição do teor de aditivo superplastificante no concreto, aproximadamente no tempo de 100 segundos após o início da análise, houve uma diminuição no torque dos sistemas demonstrando a influência desse material no rolamento e dispersão das partículas. Observa-se que o menor torque foi observado para o concreto produzido com cimento Portland CP V-ARI RS lote 5 que apresentou a maior fluidez. E os demais concretos que apresentaram torque semelhante, também apresentaram consistência semelhantes.

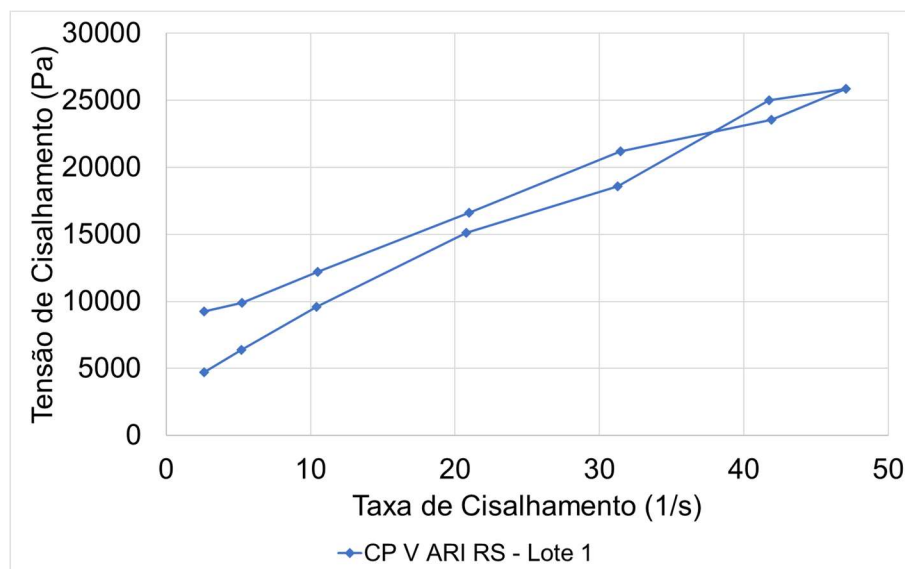
Figura 33 - Torque versus tempo para a mistura 2 dos concretos analisados



Fonte: Autor (2023).

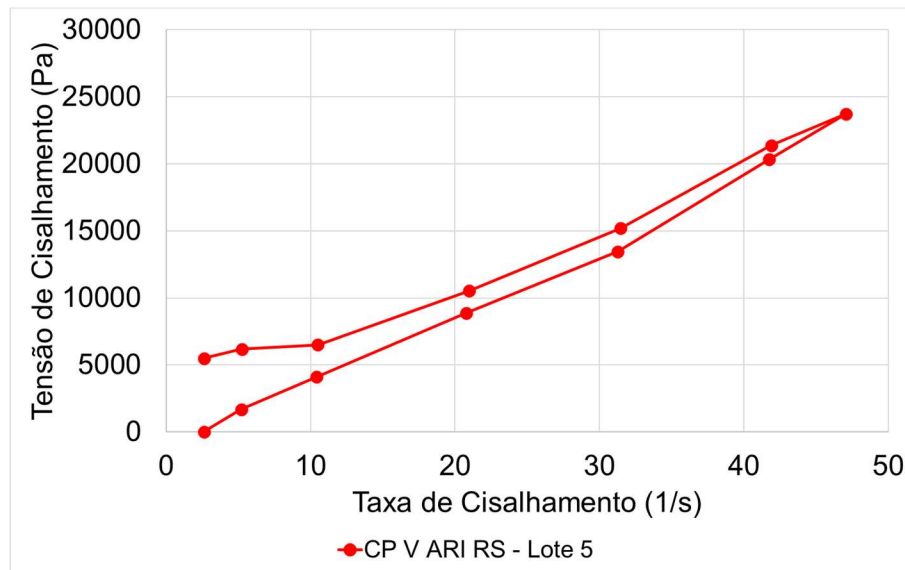
Os resultados obtidos através da análise reológica dos concretos de alto desempenho são apresentados nas Figura 34, Figura 35 e Figura 33.

Figura 34 - Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento do cimento Portland CP V ARI RS - Lote 1



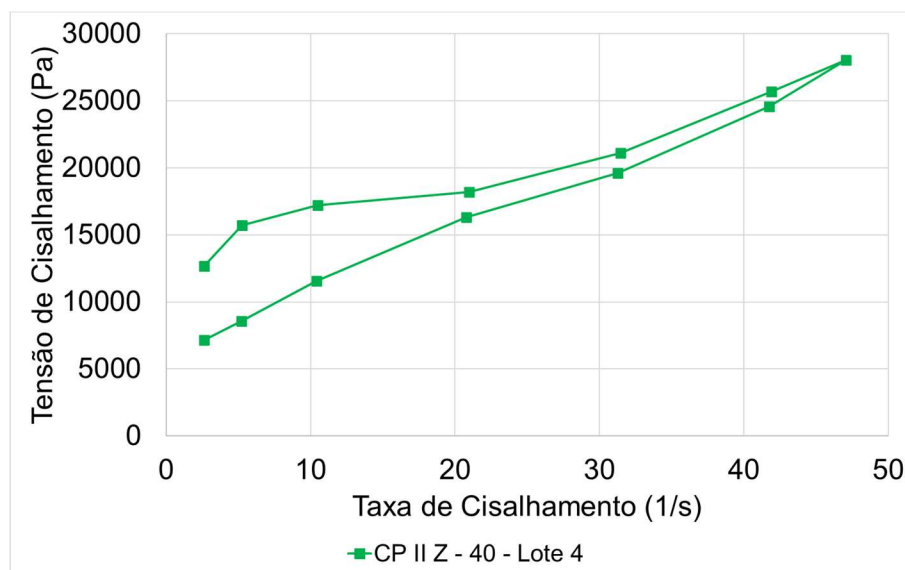
Fonte: Autor (2023).

Figura 35 - Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento do cimento Portland CP V ARI RS - Lote 5



Fonte: Autor (2023).

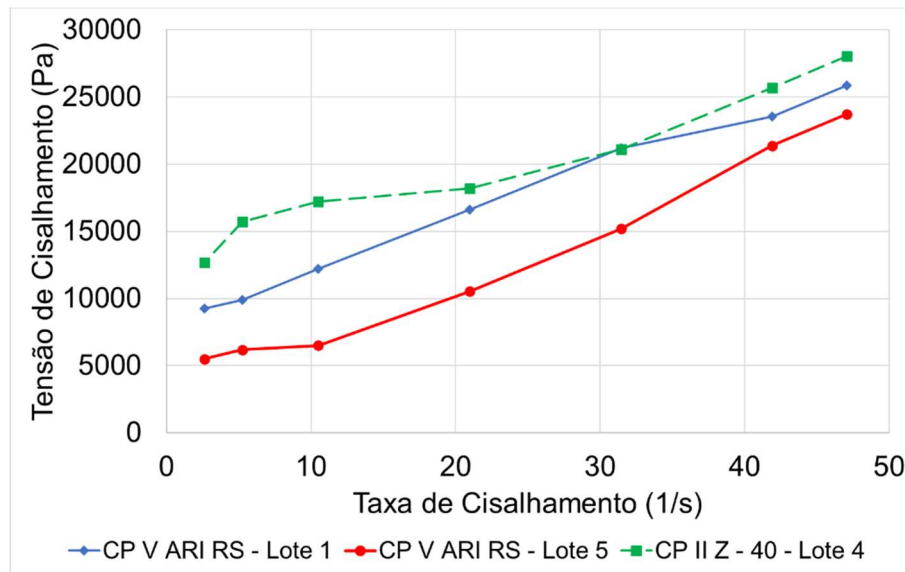
Figura 36 - Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento do cimento Portland CP II Z - 40 - Lote 4



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 37 é apresentada a curva tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento dos concretos analisados na desaceleração.

Figura 37 - Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento dos concretos analisados



Fonte: Autor (2023).

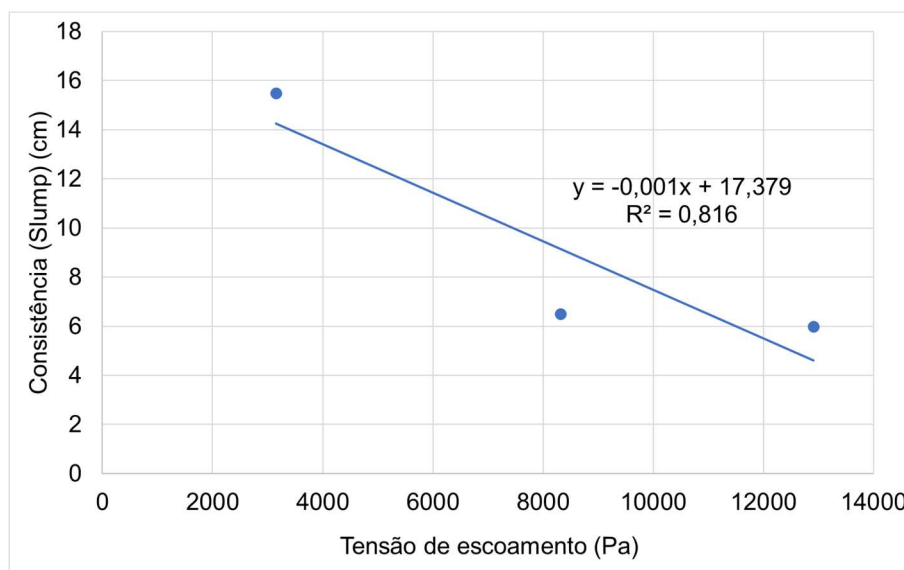
A Tabela 14 apresenta os valores obtidos de tensão de escoamento obtido pela equação do modelo de Bingham para os concretos avaliados a partir da curva de desaceleração da Figura 37.

Tabela 14 - Resultados de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone

Cimento Portland / Lote		Tensão de escoamento (Pa)
CP V-ARI RS	LOTE 01	8313,7
	LOTE 05	3155,7
CP II-Z 40	LOTE 04	12905,0

Fonte: Autor (2023).

Observa-se uma boa correlação entre a tensão de escoamento e a consistência (slump teste) conforme apresenta a Figura 38.

Figura 38 - Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento dos concretos analisados

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 15 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos concretos analisados.

Tabela 15 - Resultados de consistência obtidos através do ensaio de abatimento de tronco de cone

Amostra		Resistência à Compressão (MPa)				
		CP-01	CP-02	CP-03	CP-04	Média
CP V-ARI RS	LOTE 01	48,4*	52,7	56,5	59,4	56,2
	LOTE 05	45,9	48,2	47,1	50,2	47,8
CP II-Z 40	LOTE 04	55,1	55,8	52,6	58,4	55,5

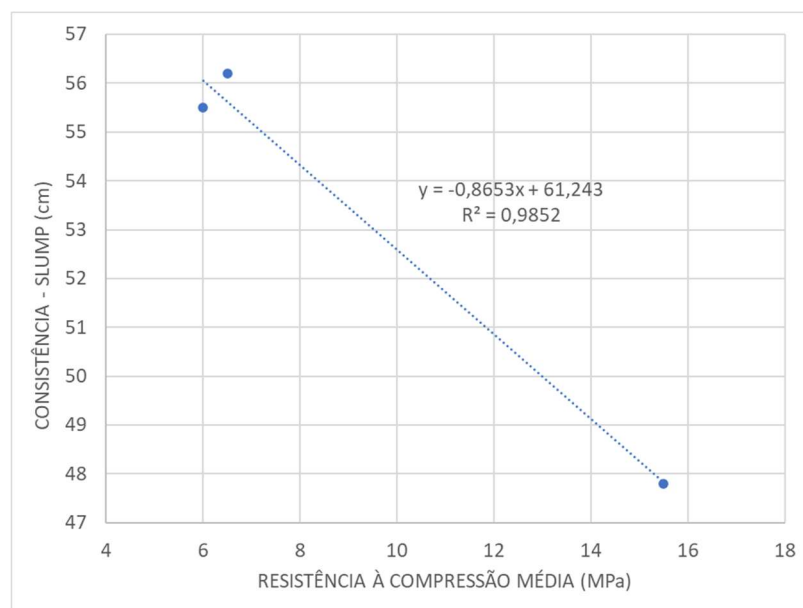
*Ruptura por tração, excluído do cálculo da média.

Fonte: Autor (2023).

Observa-se na Tabela 15 que foi possível obter concretos de alto desempenho com resistências à compressão acima de 50 MPa, considerando as resistências à compressão potencial, isto é, a maior resistência para cada concreto. Também é possível verificar a influência da área superficial (Blaine), isto é, da finura do cimento Portland nos valores de resistência à compressão do concreto. O lote 1 apresentou maior finura e assim maior valor médio de resistência à compressão e o maior valor também.

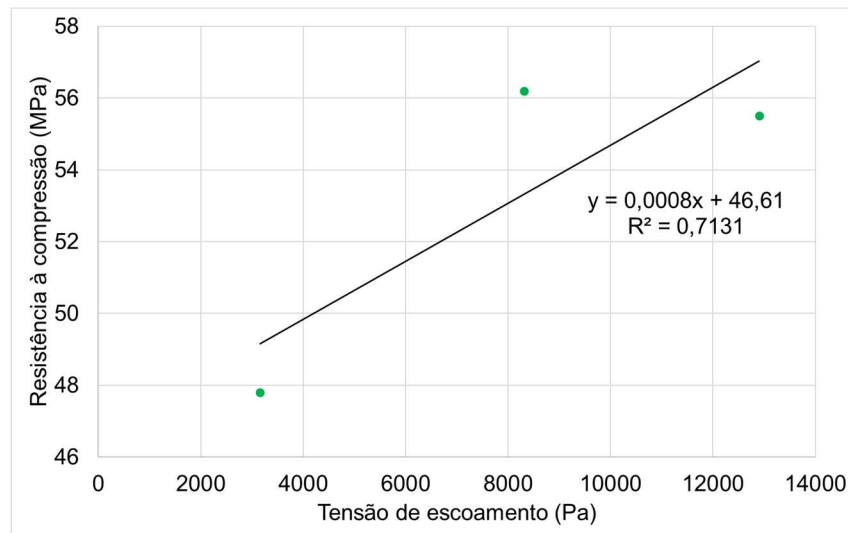
Também foi possível observar que existiu uma correlação (Figura 39) entre os valores de consistência e a resistência à compressão média obtida do concreto, onde o valor de consistência é inversamente proporcional à resistência à compressão. Os lotes com menor fluidez apresentaram uma maior resistência à compressão, enquanto que o lote 5, que apresentou o maior valor de fluidez teve a menor resistência obtida, indicando novamente a influência das variações dos lotes de cimento Portland no comportamento das pastas cimentícias e consequentemente no comportamento das misturas de concreto de alto desempenho, que também se refletiu na tensão de escoamento, sendo possível obter uma correlação com a resistência à compressão média obtida do concreto (Figura 40). Cabe salientar que para esse cimento Portland era aquele que apresentava a menor área superficial (Blaine), isto é, o mais grosso daqueles analisados.

Figura 39 - Correlação consistência slump (cm) e resistência à compressão média (MPa) para os concretos de alto desempenho analisados



Fonte: Autor (2023).

Figura 40 - Correlação tensão de escoamento e resistência à compressão média (MPa) para os concretos de alto desempenho analisados



Fonte: Autor (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos de fluidez e os parâmetros reológicos, pode-se concluir que a adição de aditivo superplastificante exerceu um impacto significativo na trabalhabilidade e no comportamento reológico das pastas cimentícias. Inicialmente, os resultados mostraram que os cimentos Portland sem aditivo superplastificante apresentaram uma certa variabilidade nos parâmetros reológicos, indicando variações nas tensões de cisalhamento entre os lotes analisados, que podem ser ocasionados pela variação da sua composição. Isso pode ser comprovado pela correlação obtida entre a tensão de escoamento e o resíduo insolúvel do cimento Portland, indicando a influência provavelmente da cinza volante nesse parâmetro.

Com a adição do teor de superplastificante de 0,20% SP observou-se um aumento significativo nos valores de espalhamento e na variação dos parâmetros reológicos, demonstrando influência do aditivo nas propriedades de tensão de cisalhamento e viscosidade, com variações significativas em lotes diferentes dos constatados nas pastas cimentícias de referência. Este resultado também pode ser

devido a variação na composição das amostras de cimento Portland, tendo em vista que materiais com composições químicas diferentes terão reações diferentes. No entanto para este caso não foi possível obter correlação entre a tensão de escoamento e o resíduo insolúvel, demonstrando que a influência do aditivo superplastificante foi maior que esse parâmetro.

Ao aumentar o teor de aditivo superplastificante para 0,40% as amostras apresentaram processo de exsudação impossibilitando que seus parâmetros reológicos pudessem ser analisados com precisão, somente a fluidez foi possível avaliar.

Com base nos resultados obtidos através dos estudos realizados em concreto verificou-se uma variação significativa na consistência das amostras, que tiveram boa correlação com a resistência à compressão. O comportamento reológico encontrado nas pastas cimentícias refletiu-se também nos concretos, onde o cimento Portland com partículas mais finas (Lote 01 CP V-ARI RS) apresentou valores de tensão de escoamento superiores ao cimento Portland com partículas mais grossas (Lote 05 CP V-ARI RS), foi possível ainda obter boa correlação entre a tensão de escoamento e a resistência à compressão média dos concretos avaliados.

Desta forma, através dos resultados obtidos foi possível constatar que a diferença na composição dos lotes de cimento Portland apesar de classificados como mesmo tipo, influenciaram de modo significativo as pastas cimentícias analisadas alterando a fluidez e os parâmetros reológicos e também os concretos de alto desempenho, afetando seus parâmetros reológicos, consistência e consequentemente a resistência à compressão dos mesmos.

Por fim, estudos futuros devem ser realizados para investigar as causas destas variações encontradas entre diferentes lotes de cimento Portland, levando em consideração uma gama mais ampla de parâmetros e condições. Isto ajudará a aprimorar ainda mais a compreensão das propriedades dos cimentos Portland e fornecer informações para a indústria da construção, visando a seleção adequada do tipo de cimento Portland para cada situação e o correto dimensionamento dos traços utilizados na produção de concretos. Além de ser um parâmetro para avaliar a compatibilidade entre cimento Portland e os aditivos superplastificantes.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

BACCIN, Antonio Guilherme Canhassi. **Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares**. 1998. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BJÖRNSTRÖM, J.; CHANDRA, S. **Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements**. Materials and Structures, v. 36, p. 685-692, 2003.

BUCHER, H. R. E. **Desempenho de aditivos redutores de água de alta resistência em pastas, argamassas e concretos**. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro, agosto 1988. Anais...São Paulo: IBRACON, 1988, 10 p.

CAMPITELI, C. V. **Porosidade do concreto. Boletim técnico do departamento de engenharia de construção civil**. Escola Politécnica de São Paulo, BT PCC 09/87, 1987. 15 p

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com o auxílio de um reômetro**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 2, p. 282-305, 2009.

DAFICO, Dario Araújo. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz.** 2001. 208 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

FENNELL, Paul S.; DAVIS, Steven J.; MOHAMMED, Aseel. **Decarbonizing cement production.** *Joule*, [S.L.], v. 5, n. 6, p. 1305-1311, jun. 2021. Elsevier BV.

GJORV, O. E. **High-strength concrete.** In: *ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY*, Athens, 1992. Proceedings...Montreal: CANMET, 1994, p. 21-27.

HIGGINSON, E. C. **The effect of cement fineness on concrete.** ASTM International, 1970.

ISAIA, G. C. **Revista Tecnológica**, Santa Maria, UFSM, v. 14, p. 5-39, 1991.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M. **Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts.** *Cement and concrete composites*, v. 20, n. 2-3, p. 87-101, 1998.

MARTINS, Israel Rodrigo de Freitas. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu.** 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** Ibracon, 3 ed., São Paulo: 2008.

MIKANOVIC, N.; JOLICOEUR, C. **Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes.** *Cement and concrete research*, v. 38, n. 7, p. 907-919, 2008.

MORAES, M. F. **Algumas propriedades mecânicas do concreto com microssílica.** 1990. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

NAWY, P. E. E. G. **Fundamentals of high strength high performance concrete.** England: Longman Group Limited, 1996.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

PAZ, Mário Arlindo da Silva. **CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS E SUA UTILIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA.** 1998. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK, T. H. **Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures.** *Cement and concrete research*, v. 35, n. 5, p. 842-849, 2005.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. **Correlação entre a mistura e o comportamento reológico de concretos refratários**. trabalho submetido aos anais do, v. 44, 2000.

PUERTAS, F. et al. **Polycarboxylate superplasticizer admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behavior in cement pastes**. Advances in Cement Research, v. 17, n. 2, p. 77-89, 2005.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes**. Cement and Concrete Research, v. 25, n.7, p. 1501-1511, 1995.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida et al. **Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo filers de britagem**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, 2017.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. **Advances in understanding hydration of Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 78, p. 38-56, 2015.

TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011.

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

XINCHENG, Pu. **Super-High-Strength High Performance Concrete**. Florida: CRC Press, 2017.