

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO REOLÓGICO DE PASTAS E
CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND:
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ADITIVOS
QUÍMICOS E DO TEOR DE SÍLICA ATIVA**

JÉSSICA RODRIGUES DOS SANTOS

GOIÂNIA
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES
E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Jéssica Rodrigues dos Santos

3. Título do trabalho

Estudo reológico de pastas e concretos de cimento portland: avaliação da eficiência de aditivos químicos e do teor de sílica ativa

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 12/06/2023, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jéssica Rodrigues Dos Santos, Discente**, em 14/06/2023, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3669875 e o código CRC 5D31B1A2.

JÉSSICA RODRIGUES DOS SANTOS

**ESTUDO REOLÓGICO DE PASTAS E
CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND:
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ADITIVOS
QUÍMICOS E DO TEOR DE SÍLICA ATIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Andrielli Morais de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

GOIÂNIA
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Jéssica Rodrigues dos

Estudo reológico de pastas e concretos de cimento Portland [manuscrito] : avaliação da eficiência de aditivos químicos e do teor de sílica ativa / Jéssica Rodrigues dos Santos. - 2023. xxi, 210 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira; co-orientadora Dra. Oswaldo Casado.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Reologia. 2. Reômetro rotacional. 3. plastificante. 4. superplastificante. 5. pasta de cimento. I. Oliveira, Andrielli Moraes de , orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 279 da sessão de Defesa de Dissertação de **Jéssica Rodrigues dos Santos** que confere o título de Mestra em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, na área de concentração de Construção Civil.

Aos sete dias do mês de março do ano de dois mil e vinte três, a partir das dezesseis horas, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "Estudo reológico de pastas: avaliação da eficiência de aditivos químicos e do teor de sílica ativa". Os trabalhos foram instalados pela Orientadora e co-orientador, Professora Doutora **Andrielli Moraes de Oliveira** (PPGGECON/UFG) e **Oswaldo Cascudo** (PPGGECON/UFG) com a participação das demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Helena Carasek Cascudo** (PPGGECON/UFG), membra titular interna; Professora Doutora **Karyne Ferreira dos Santos** (LNEC e CSlab -Portugal), membra titular externa. Durante a arguição as membras da banca fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido a candidata aprovada pelas suas membras. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Andrielli Moraes de Oliveira**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos sete dias do mês de março do ano de dois mil e vinte três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

ESTUDO REOLÓGICO DE PASTAS E CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS E DO TEOR DE SÍLICA ATIVA



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira**, Professor do Magistério Superior, em 08/03/2023, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Helena Carasek Cascudo**, Professor do Magistério Superior, em 08/03/2023, às 17:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Karyne Ferreira dos Santos**, Usuário Externo, em 08/03/2023, às 19:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jéssica Rodrigues Dos Santos**, Discente, em 17/04/2023, às 16:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Oswaldo Cascudo Matos**, Professor do Magistério Superior, em 16/06/2023, às 12:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_pedido_acesso_externo=0, informando o código verificador 3533781 e o código CRC 237DBFAB.

Referência: Processo nº 23070.064929/2022-52

SEI nº 3533781

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela proteção e pela sabedoria divina para me guiar nessa vida.

Aos meus pais e à minha família pelo suporte e amor incondicional, por acreditarem que eu sempre fui capaz. Obrigada por apoiarem todas as minhas decisões, mas sempre com conselhos para seguir o melhor caminho. Agradeço, principalmente, à minha mãe Patrícia, à minha irmã Kamilla, minha prima Thifany e ao meu namorado Lucas por estarem comigo durante toda essa caminhada e nunca me deixarem desistir.

Aos meus orientadores Andrielli Morais de Oliveira e Oswaldo Cascudo, pela dedicação à pesquisa e a docência e pelo apoio e paciência em compartilhar dos seus conhecimentos para me guiar durante esse período de crescimento e amadurecimento.

Aos colegas e amigos do mestrado: Carol, Uiara, Sarah, Solanda, Sofia, Sandra, Antônio e Caíque, pelo companheirismo, pelo bom humor e pelas palavras de carinho. E um agradecimento especial à minha grande amiga Bruna Ferreira que, sem dúvidas, eu não teria chegado aqui sem todo o seu apoio e incentivo, obrigada por compartilhar essa jornada tão difícil, mas tão gratificante.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram e torceram por mim durante esse processo, em especial à Gleiriane, Gabriela e a Toninha.

Aos professores do PPG-GECON e a toda Universidade Federal de Goiás pelo incentivo e troca de conhecimento.

Aos técnicos Solanda, Aloísio, Renato e toda a equipe de Furnas Centrais Elétricas de Aparecida de Goiânia por todo o apoio e suporte na execução dos ensaios. Ao Alexandre de Castro e Alfredo Liduário pela paciência e pelas orientações sobre os ensaios de reologia e pelos ensaios de dosagem.

À ANEEL - FURNAS Eletrobrás pelo apoio intelectual, físico e financeiro que fizeram possível essa dissertação e pela disponibilização dos laboratórios e materiais para o desenvolvimento da pesquisa. Ao LABITECC e aos seus técnicos, em especial ao Antônio, que me auxiliou na execução de alguns ensaios.

À BASF, MC Bauchemie e SIKA pela doação dos aditivos utilizados na pesquisa.

À FUNAPE e a CAPES pela gestão dos recursos, prestabilidade e apoio concedido em forma de bolsa, em momentos distintos, o qual foi imprescindível para que essa pesquisa ocorresse.

*“A persistência é o caminho do êxito”
Charles Chaplin*

RESUMO

Estudos de reologia e de otimização de misturas de cimento Portland podem assumir um papel importante e de destaque na correlação com o desempenho, o comportamento mecânico, a alta durabilidade e a vida útil no estado endurecido de concretos. O presente trabalho abrange etapas de caracterização reológica de pastas de cimento Portland, com o objetivo de avaliar a interveniência de aditivos químicos e de teores de sílica ativa (8%, 10% e 12%) em duas relações água/ligante (0,40 e 0,55). Adicionalmente, estas variáveis também foram analisadas em concretos, medindo-se os parâmetros reométricos, propriedades de comportamento mecânico básico (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e de absorção de água. Além disso, os aditivos químicos foram caracterizados físico-quimicamente e foi proposta a validação de uma instrução técnica para condução de ensaios de reologia em pastas. Como resultados, os aditivos tipo superplastificantes e com maior teor de sólidos exibiram melhor comportamento nas propriedades de viscosidade e taxa de cisalhamento das pastas. O teor de 8% de sílica ativa mostrou-se mais interessante quanto ao comportamento mecânico e absorção de água. Os resultados de pasta foram coerentes com os resultados obtidos dos concretos.

Palavras-chave: Reologia, reômetro rotacional, plastificante, superplastificante, sílica ativa, pasta de cimento, concreto.

ABSTRACT

Studies of rheology and optimization of Portland cement mixtures can play an important and prominent role in the correlation with performance, mechanical behavior, high durability and service life in the hardened state of concrete. The present work encompasses stages of rheological characterization of Portland cement pastes, with the aim of evaluating the intervention of chemical admixture and silica fume contents (8%, 10% and 12%) in two water/binder ratios (0.40 and 0.55). Additionally, these variables were also analyzed in concrete, measuring the rheometric parameters, basic mechanical behavior properties (compressive strength and modulus of elasticity) and water absorption. In addition, the chemical admixtures were characterized physic-chemically and the validation of a technical instruction for conducting rheology tests on pastes was proposed. As a result, the superplasticizer type admixtures and those with higher solids content exhibited better behavior in the viscosity properties and shear rate of the pastes. The 8% silica fume content was more interesting in terms of mechanical behavior and water absorption. The paste results were coherent with the results obtained from the concretes.

Keywords: *Rheology, rotational rheometer, plasticizer, superplasticizer, silica fume, cement paste, concrete.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Deslocamento de um fluido entre placas infinitas (FOX, MACDONALD, 2001)..	6
Figura 2.2 - Representação esquemática da perturbação causada pela presença de partículas imersas entre as linhas de fluxo do fluido sob cisalhamento (PILEGGI, 2001)..	8
Figura 2.3 - Classificação dos fluidos (Adaptado de SCHRAMM, 2006).	10
Figura 2.4 - Comportamento reológico dos fluidos: (1) newtoniano; (2) Bingham; (3) pseudoplástico; (4) pseudoplástico com tensão de escoamento; (5) dilatante e (6) dilatante com tensão de escoamento (PILEGGI, 2001)	1
Figura 2.5 - Tipos de geometria dos reômetros rotacionais: (a) cilindros coaxiais; (b) cone-placa; (c) placas paralelas (HACKLEY; FERRARIS, 2001).	13
Figura 2.6 – Reologia do concreto (A) concretos com a mesma tensão de escoamento e viscosidades plásticas diferentes e (B) concretos com tensões de escoamento diferentes e com a mesma viscosidade plástica (CASTRO et al.,2011)..	14
Figura 2.7 – Reômetros para uso em concretos: (a) BML, baseado no conceito de cilindros coaxiais; (b) reômetro BTRHEOM, baseado no conceito placa/placa e (c) reômetro baseado no modelo planetário (CASTRO et al., 2011).....	14
Figura 2.8 – Dispersão das partículas de cimento causadas pela ação das moléculas de aditivo adsorvidas na superfície (MONTE, 2003).....	17
Figura 3.1 – Programa Experimental.....	20
Figura 3.2 - Caracterização morfológica da sílica ativa por MEV com ampliação de (a) 500 vezes, (b) 2000 vezes, (c) aspectos morfológico das partículas e (d) elementos químicos (verificados por espectroscopia por energia dispersiva – EDS).....	24
Figura 3.3 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	26
Figura 3.4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	26
Figura 3.5 - Armazenamento de materiais secos para evitar hidratação dos mesmos em câmara fechada: (a) vista frontal e (b) vista lateral	28

Figura 3.6 - Misturador utilizado no preparo das pastas modelo IKA RW 20 : (a) parado e (b) durante o processo de mistura das pastas com rotação aproximada de 2500 rpm.....	28
Figura 3.7 – Reômetro rotacional vinculado ao computador..	29
Figura 3.8 – Execução do ensaio de pasta no reômetro: (a) amostra sendo colocada no reômetro; (b) ajustes do gap e (c) deformação da amostra com 1 mm de gap.....	30
Figura 3.9 – Representação esquemática do “esmagamento” da amostra pelo reômetro utilizado com o raio da placa (R) e a distância entre as placas (h). (Adaptado de TA INSTRUMENTS, 2010).....	31
Figura 3.10 – Esquema de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo (AGOSTINHO, 2017).	32
Figura 3.11 - Execução do ensaio: (a) amostra sendo colocada no reômetro com o anel previamente posicionado; (b) esmagamento da amostra com 1 mm de gap; (c) inserção de água acima da geometria; (d) posicionamento do segundo anel de proteção.....	33
Figura 3.12 - Demonstração do esmagamento da amostra pelo equipamento com os anéis de proteção devidamente posicionados (Adaptado de TA INSTRUMENTS, 2010).....	34
Figura 3.13 - Calorímetro utilizado na pesquisa: (a) modelo TAM AIR, fabricado pela TA Instruments e (b) canais do equipamento de calorimetria isotérmica..	36
Figura 3.14 - Ensaio de calorimetria, onde (a) ampolas utilizadas; (b) pesagem da ampola com a amostra de pasta de cimento	37
Figura 3.15 - Processo de fabricação dos concretos, onde (a) betoneira utilizada nas misturas; (b) descarte da “pré-mistura” antes das dosagens; (c) materiais a serem inseridos na betoneira; (d) dispersão da sílica ativa em água; (e) concreto após a mistura.....	39
Figura 3.16 – Ensaio de espalhamento ou slump flow realizado (ABNT, 2017b).....	40
Figura 3.17 – Ensaio do Funil V realizado, conforme norma brasileira (ABNT, 2017b): (a) antes da colocação do concreto e (b) já com o concreto e antes de abrir o “fecho” inferior..	41
Figura 3.18 – Ensaio da Caixa L realizado, conforme norma brasileira (ABNT, 2017c): (a) antes da abertura da “comporta” e (b) após a abertura da “comporta”.....	41
Figura 3.19 - Reômetro PHESO utilizado na pesquisa..	42
Figura 3.20 - Programas padrão (Instrução técnica de Furnas, 2020).....	42

Figura 3.21 - Execução de ensaio reológico no concreto: (a) antes da colocação do concreto na cuba e (b) após.	43
Figura 3.22 - Gráfico com os ciclos de ensaio.	44
Figura 3.23 – Realização do ensaio no reômetro de concreto	44
Figura 3.24 - Corpos de prova de 10x20 cm utilizados.....	45
Figura 3.25 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	45
Figura 4.1 - Gráfico do desempenho do aditivo A: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55.	49
Figura 4.2 - Gráfico do desempenho do aditivo B: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55	50
Figura 4.3 - Gráfico do desempenho do aditivo C: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55.	51
Figura 4.4 – Gráfico do desempenho do aditivo D: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55.	51
Figura 4.5 – Gráfico do desempenho do aditivo E: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55.....	52
Figura 4.6 – Gráfico do desempenho do aditivo F: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55	53
Figura 4.7 – Gráfico do desempenho do aditivo G: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,40; (c)	

taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/c 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/c 0,55..	53
Figura 4.8 – Resultado visual representativo do comportamento obtido nos ensaios de fluxo nas pastas estudados: (a) condição viscosa, (b) condição trabalhável e (c) condição muito fluida e exsudada.....	56
Figura 4.9 - Teor de aditivo x viscosidade dos aditivos: (a) A; (b) B; (c) C; (d) D; (e) E; (f) F; (g) G.....	57
Figura 4.10 - Análise das viscosidades de acordo com os teores ótimos de cada aditivo para relação: (a) a/c de 0,40 e (b) 0,55	61
Figura 4.11 - Curva de tempo versus módulo elástico que representa a cinética de hidratação de todas as pastas com relação a/lig 0,40 com duração de: (a) seis horas; (b) primeira hora. .	63
Figura 4.12 - Curva de tempo versus módulo elástico que representa a cinética de hidratação das pastas com duração de seis horas e, em destaque, durante a primeira hora, para relação a/c 0,40 e (a) aditivo A; (b) aditivo B; (c) aditivo C; (d) aditivo D; (e) aditivo E; (f) aditivo F; (g) aditivo G	64
Figura 4.13 - Curva de tempo versus módulo elástico que representa a cinética de hidratação de todas as pastas com relação a/lig 0,55 com duração de (a) seis horas e (b) na primeira hora..	67
Figura 4.14 – Curva de tempo versus módulo elástico que representa a cinética de hidratação das pastas com duração de seis horas e, em destaque, durante a primeira hora, para relação a/c 0,55 e (a) referência; (b) aditivo A; (c) aditivo B; (d) aditivo C; (e) aditivo D; (f) aditivo E; (g) aditivo F; (h) aditivo G.....	68
Figura 4.15 – Condição das pastas em caráter representativo após o ensaio (a), (b) com consistência mais fluida devido a maior cinética de hidratação ou maior tempo de pega; (c) com consistência mais “endurecida” devido menor cinética de hidratação ou menor tempo de pega.....	73
Figura 4.16 – Gráfico de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento de referência 0,55 com sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	74
Figura 4.17 – Gráfico de taxa de cisalhamento x viscosidade de referência 0,55 com sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.	75

Figura 4.18 – Gráficos de taxa de cisalhamento x tensão de escoamento do Aditivo A com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	76
Figura 4.19 – Gráficos de taxa de cisalhamento x viscosidade do Aditivo A com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	77
Figura 4.20 – Gráficos de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do Aditivo A com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	78
Figura 4.21 – Gráficos de taxa de cisalhamento x viscosidade do Aditivo A com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	79
Figura 4.22 – Gráficos de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do Aditivo G com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	80
Figura 4.23 – Gráficos de taxa de cisalhamento x viscosidade do Aditivo G com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	81
Figura 4.24 – Gráfico de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do Aditivo G com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	82
Figura 4.25 – Gráfico de taxa de cisalhamento x viscosidade do Aditivo G com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.....	83
Figura 4.26 – Cuvas de fluxo de calor liberado em função do tempo das pastas com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.....	89
Figura 4.27 – Curvas de calor acumulado em função do tempo das pastas com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.....	91
Figura 4.28 – Consistência do concreto REF04.....	93
Figura 4.29 – Consistência do concreto C04SA8.....	93
Figura 4.30 – Consistência do concreto C04SA10.....	93
Figura 4.31 – Consistência do concreto C04SA12.....	94
Figura 4.32 – Consistência do concreto REF055.....	94
Figura 4.33 – Consistência do concreto C055SA8.....	95
Figura 4.34 – Consistência do concreto C055SA10.....	95
Figura 4.35 – Consistência do concreto C055SA12.....	95
Figura 4.36 – Curvas de cisalhamento das dosagens com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.....	96
Figura 4.37 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 3, 7, 24 e 63 dias.....	100

Figura 4.38 – Comparação entre resultados de resistência à compressão x módulo de elasticidade aos 28 dias.....	101
Figura 4.39 – Comparação das resistências à compressão com espalhamento dos concretos com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55	101
Figura 4.40 – Gráficos comparativos entre resistência à compressão e absorção de água dos concretos com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.....	102
Figura 4.41 – Gráfico de absorção de água por capilaridade dos concretos com relação a/lig 0,40	103
Figura 4.42 – Regiões aproximadas em que vários tipos comuns de ligação absorvem (DUTRA et al., 1995).....	104
Figura 4.43 – Espectro FTIR dos aditivos (a) A; (b) B; (c) C; (d) D; (e) E; (f) F; (g) G	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparativo de parâmetros reológicos de diferentes materiais cimentícios (Adaptado de Banfill, 2003).....
Tabela 2.2- Principais modelos reológicos para pastas e concretos de cimento Portland e suas respectivas equações (Adaptado de FERRARIS, 1999).....	11
Tabela 3.1 – Caracterização físico-química e, mecânica do cimento utilizado.....	22
Tabela 3.2 – Caracterização física e química da sílica ativa.	23
Tabela 3.3 – Caracterização dos aditivos químicos (ABNT NBR 11768-3, 2019b).....	25
Tabela 3.4 – Caracterização do agregado graúdo.....	25
Tabela 3.5 - Caracterização do agregado miúdo	6
Tabela 3.6 - Faixa de utilização dos aditivos de acordo com o fabricante..	30
Tabela 3.7 - Proporcionamento das pastas de cimento para ensaios oscilatórios.....	32
Tabela 3.8 – Proporcionamento das pastas de cimento (g).	35
Tabela 3.9 – Proporcionamento das pastas de cimento para ensaio de calorimetria.....	36
Tabela 3.10 – Proporcionamento dos concretos estudados	38
Tabela 4.1 – Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento nas pastas estudadas nas relações a/c 0,40 de acordo com os teores de aditivo utilizados para os aditivos A, B e C, D, E, F e G.....	47
Tabela 4.2 - Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento pastas estudadas nas relações a/c 0,55 de acordo com os teores de aditivo utilizados – para os aditivos A, B e C, D, E, F e G	48
Tabela 4.3 - Valores obtidos de teor ótimo/saturação de aditivos químicos utilizados nas pastas de relação a/c 0,40 e 055.....	59
Tabela 4.4 - Análise da influência dos teores de aditivos na viscosidade das pastas de cimento.	61
Tabela 4.5 – Resultados dos valores de viscosidade com o aditivo A	84
Tabela 4.6 – Resultados dos valores de tensão de escoamento com o aditivo A	85

Tabela 4.7 – Resultados dos valores de viscosidade com o aditivo G	85
Tabela 4.8 – Resultados dos valores de tensão de escoamento com o aditivo G.....	86
Tabela 4.9 - Resumo dos parâmetros do ensaio de calorimetria para todas as amostras..	89
Tabela 4.10 - Classes de espalhamento do CAA (Adaptado da ABNT NBR 15823-2)	98
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecidos dos concretos	98
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecidos dos concretos	99
Tabela 4.13 – Resultados ensaios de absorção por imersão	102
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade.....	103
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de FRX nos aditivos.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – água/cimento

a/lig – água/ligante

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAA – Concreto Autoadensável

CP – Corpo de prova

CPV ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente à Sulfato

G' – módulo elástico

G'' – módulo viscoso

Gap – Distância ou espaçamento entre as placas do reômetro

GEDur – Grupo de Estudos de Durabilidade

JCR – *Journal Citation Reports*

LABITECC – Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma brasileira técnica regulamentadora

PPG-GECON – Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção civil

REF – Referência

rpm – rotações por minuto

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

UFG – Universidade Federal de Goiás

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1.1 CONTEXTO DO TRABALHO	1
CAPÍTULO 2.....	5
REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 REOLOGIA	5
2.2 PROPRIEDADES REOLÓGICAS	7
2.3 MODELOS REOLÓGICOS	9
2.4 EQUIPAMENTOS PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS	12
2.5 EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS E DOS ADITIVOS QUÍMICOS NA REOLOGIA	15
CAPÍTULO 3.....	19
PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO	20
3.1.1 Relação Água/Ligante	20
3.1.2 Adição Mineral	21
3.1.3 Aditivos Químicos	21
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	21
3.2.1 Cimento Portland	22
3.2.2 Sílica Ativa	23
3.2.3 Aditivos Químicos	24
3.2.4 Agregados.....	25
3.3 MÉTODOS	27
3.3.1 Preparo das Pastas de Cimento.....	27
3.3.2 Ensaio Reológico de Fluxo e Oscilatórios.....	28
3.3.2.1 Influência do tipo de aditivo químico.....	29
3.3.2.2 Influência do teor de sílica ativa	34
3.3.3 Calorimetria por Condução Isotérmica	35
3.3.4 Concretos.....	37
CAPÍTULO 4.....	46
RESULTADOS E DISCUSSÕES	46

4.1 RESULTADOS DAS PASTAS DE CIMENTO	46
4.1.1 Pastas de Cimento com Aditivos Químicos: Ensaio de Fluxo.....	46
4.1.2 Pastas de Cimento com Aditivos Químicos: Ensaio Oscilatório.....	62
4.1.3 Pastas de Cimento com Sílica ativa: Ensaio de Fluxo	73
4.1.4 Calorimetria por Condução Isométrica	89
4.2 RESULTADOS DOS CONCRETOS	92
4.2.2 Ensaio no Estado Endurecido.....	99
4.3 CARACTERIZAÇÃO ESPECIAL DOS ADITIVOS QUÍMICOS	103
4.4 PROTOCOLO.....	107
CAPÍTULO 5.....	109
CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
5.1 CONCLUSÕES	109
REFERÊNCIAS	113
APÊNDICE A	130
APÊNDICE B	143
APÊNDICE C	170
APÊNDICE D	183
APÊNDICE E:	200

CAPÍTULO 1

1.1 CONTEXTO DO TRABALHO

Essa dissertação foi realizada por meio de projeto de pesquisa, intitulado “Avaliação da Durabilidade do Concreto por meio de Estudos Avançados de Mecanismos de Transporte, Estudos de Campo e Modelagem Preditiva da Vida Útil de Estruturas de Concreto - Aplicação em Sistemas Eólicos, Hidroelétricos e Outras Obras Especiais de Infraestrutura”, realizado em parceria por FURNAS/ANEEL e EECA - Escola de Engenharia Civil e Ambiental no âmbito do PPG-GECON e GEDur (Grupo de Estudos de Durabilidade) da Universidade Federal de Goiás (UFG) entre os anos de 2020 e 2024. Dentro desse contexto, o tema da presente dissertação se insere para avançar nos conhecimentos sobre reologia, sendo a primeira dissertação do grupo GEDur a abordar esse tema.

1.2 INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA

A ciência da reologia é importante devido às vantagens que proporciona para a caracterização de pastas de cimento, argamassas e concretos frescos e para que seja possível entender como esses materiais atuam em aplicações práticas. Sem propriedades frescas satisfatórias, é improvável que as propriedades desejáveis dos materiais no estado endurecido possam ser alcançadas (BANFIL, 2003; SKARE *et al.*, 2022; XU *et al.*, 2022; LUO *et al.*, 2023; MOHAMMAD and BIERNACKI, 2023). Logo, as propriedades de materiais cimentícios em seu estado fresco podem ser avaliadas quali e quantitativamente utilizando-se parâmetros reológicos, como a fluidez, traduzida em termos de coesão e viscosidade; a consistência, enquanto densidade e empacotamento de partículas e, ainda a homogeneidade, em forma de segregação e exsudação (BANFIL, 2003).

Pode-se dizer que a reologia do concreto é diretamente influenciada pelo comportamento da pasta de cimento e, além disso, é a primeira fase a sofrer interferências quando a demanda é modificar e estudar o comportamento e propriedades reológicas do concreto. Dessa forma, para estudos mais complexos e aprofundados, pode ser importante abordar pesquisas mais simplificadas em pastas, avançando-se para concretos com a interveniência de agregados

(BANFILL, 1991).

As demandas na tecnologia do concreto por construções e estruturas cada vez mais altas, arrojadas e esbeltas têm assumido um papel importante dentro da engenharia civil. Nesse contexto, concretos mais trabalháveis e “estáveis” no estado fresco, de alto e altíssimo desempenho, mais duráveis e ecoeficientes, com menor consumo de cimento e com menores emissões de CO₂ associadas se destacam (MARVILA *et al.*, 2021; ROJO-LÓPEZ *et al.*, 2022).

Uma alternativa mais sustentável para esses concretos é a compactação das misturas e a troca de parte do cimento por materiais cimentícios suplementares. O uso desses materiais vêm sendo estudado com resultados muito interessantes em durabilidade, como em retardar o início da corrosão de armaduras, induzida por cloretos (OLIVEIRA, CASCUDO, 2018; CASCUDO *et al.*, 2021; LOPES, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2023), em tentar inibir a formação de etringita tardia (OLIVEIRA, 2022), em dificultar mecanismos de transporte de água e gases para o interior do concreto (MENDES, 2009), dentre outros.

Ao mesmo tempo, estudos reológicos com pastas e argamassas de cimento Portland com o uso de aditivos químicos, analisando-se a interveniência do tipo, da base química e de seu teor/quantidade vêm sendo desenvolvidos, inclusive com análises tecnológicas de investimento e benefícios técnicos vinculados às misturas. Adicionalmente, aditivos com bases químicas de éter de policarboxilato, melanina, naftaleno, naftaleno sulfonado, lignosulfonato, resina poli acrílica, resina melamínica, poli acrilato e poli acrílico vêm sendo testados (FERRARIS, 2001; BETIOLI, 2007; JANOTKA *et al.*, 2010; NG; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; JUSTNES, 2016; MSINJILI *et al.*, 2017; NAZAR *et al.*, 2020; AGOSTINHO, LI *et al.*, 2023).

Também estudos relacionam os aditivos químicos, as adições minerais e a reologia com comportamento estrutural, moldabilidade e capacidade de imprimir em formato 3D em concretos e microconcretos (NAZAR *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2022; WANGLER *et al.*, 2022; MOHAMMAD and BIERNACKI, 2023). Isso demonstra a importância do comportamento reológico dos materiais, sua aplicação e sua correlação com propriedades no estado endurecido (ROMANO *et al.*, 2011; VALERA *et al.*, 2021; BONILLA-CRUZ *et al.*, 2022; KONDEPUDI *et al.*, 2022).

Especificamente, no Brasil, ressalta-se que ainda são em pouco número os estudos que apliquem parâmetros reológicos adquiridos de forma experimental para delimitar a dosagem e o comportamento das matrizes cimentícias para utilização em campo (CARDOSO, JOHN e PILEGGI, 2009; FUJII et al., 2015. ROMANO, TORRES e PILEGGI, 2015; SATO, 2015; VARHEN et al., 2016; GRANDES et al., 2018; FRANÇA et al., 2019; ROJAS-RAMÍREZ et al., 2019). Nesse âmbito, efeitos do tempo da mistura (CARDOSO *et al.*, 2005; PILEGGI, 2016), do uso da adição de nanosílica estabilizada na microestrutura e nas propriedades reológicas vêm sendo pesquisados (AGOSTINHO, 2017; COSTA, 2017).

Em outro seguimento, Moraes (2010) abordou a otimização do uso de metacaulim para a produção do concreto autoadensável utilizando princípios reológicos. Já Alvarenga (2016) estudou a influencia do resíduo de britagem de granito e cinza da casca de arroz nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto. Em paralelo, Couto (2016) estudou a caracterização reológica das pastas de cimento e Mendes (2016) abordou os parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis com adição de fíler calcário.

Alguns pesquisadores também estudaram sobre o efeito dos aditivos na reologia de pastas de cimento e de concretos (mesmo este não sendo o foco dos trabalhos), como a tese de Castro (2007) que aborda a aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho, Horta (2020) com seu estudo de avaliação das propriedades reológicas de pastas de cimento com óxido de grafeno, Sato *et al.* (2015) com um estudo de pastas de cimento contendo aditivos químicos e Kardec *et al.* (2018) com um artigo que estuda a avaliação dos efeitos da superdosagem de aditivos hiperplastificantes na reologia de concretos.

Em paralelo, em estudos internacionais mais recentes, a reologia de pastas de cimento Portland vêm sendo abordadas (CHALAH *et al.*, 2022; FARES *et al.*, 2022; LAVERGNE *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2017; MOHAMMED *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2017; OUYANG *et al.*, 2018), avaliando-se a a trabalhabilidade, o efeito das adições minerais e aditivos químicos, condições de misturas e propriedades mecânicas desses materiais.

Em geral, sabe-se que a reologia pode auxiliar na fabricação de produtos, na determinação de seu controle de qualidade e vida útil e na escolha da sua textura e fluidez (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Diante disso, este trabalho justifica-se com contribuições no campo da reologia, medindo propriedades reológicas na pasta e no concreto e avaliando propriedades no estado endurecido desses concretos com fim mais tecnológico e de aplicabilidade em campo.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar reologicamente pastas de cimento Portland, avaliando-se a interveniência de diferentes tipos de aditivos (plastificantes e superplastificantes) de mesma base química policarboxilatos e de teores de sílica ativa (8%, 10% e 12% em massa e em substituição ao cimento Portland) em duas relações água/ligante (a/lig) (0,40 e 0,55). As mesmas variáveis foram analisadas para concretos, analisando-se parâmetros reométricos e propriedades de comportamento mecânico básico (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e absorção de água.

São objetivos específicos:

- selecionar os aditivos químicos plastificantes e/ou superplastificantes que apresentam melhores resultados nos ensaios reológicos;
- validar e comparar o comportamento reológico de concretos com dosagens obtidas a partir de resultados dos ensaios de reometria em pastas de cimento com o uso da consistência no estrado fresco;
- avaliar características mecânicas dos concretos com o intuito de verificar suas propriedades em seu estado endurecido;
- validar um protocolo de ensaio com orientações de como prosseguir com ensaios reológicos em pastas de cimento para determinar os teores ideais de aditivos químicos e adições minerais em composições cimentícias e assim obter vantagens de custo-benefício e de eficiência em dosagens futuras de concretos.

Menciona-se que esse trabalho foi organizado em capítulos, quais sejam: capítulo 2 com apresentação da revisão básica e sintética da literatura, capítulo 3 com o programa experimental, capítulo 4 com os resultados e discussões e o capítulo 5 com exibição das considerações finais. Ao final há também as referências utilizadas e os apêndices, contendo as revisões sistemáticas de literatura (RSL) produzidas, um protocolo de ensaio de reologia de pasta e artigos produzidos até o momento.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata-se de uma breve revisão da literatura que abrange o conceito de reologia, o modelo de Newton para fluídos, as propriedades e os principais modelos reológicos, a descrição de alguns equipamentos para medida de propriedades reológicas em pastas e concretos de cimento Portland e a influência de aditivos químicos e de adições minerais nas características reométricas de materiais cimentícios.

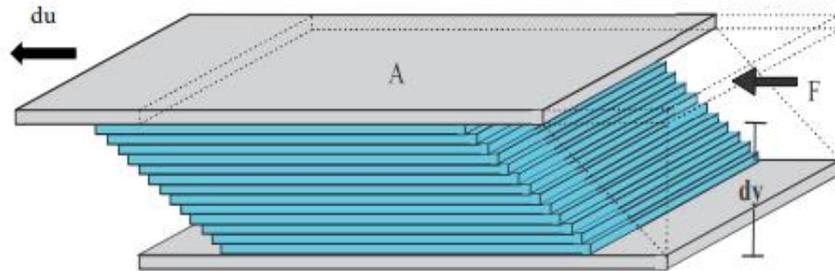
Apresenta-se em dois apêndices, duas revisões sistemáticas da literatura (RSL), complementares ao presente estudo. Uma RSL identificou de forma inicial as principais propriedades reológicas e a relação da reologia com a durabilidade (Apêndice A). A outra RSL apresentou a interveniência dos aditivos químicos e adições minerais nos parâmetros reológicos de materiais cimentícios (Apêndice B).

2.1 REOLOGIA

Reologia é ciência de estudo do fluxo, do escoamento e da deformação de materiais sob influência de tensões, fazendo-se análise das respostas em termos de tensão de cisalhamento, deformação, taxa de deformação, viscosidade e tempo (BANFILL, 2003; SCHRAMM, 2006).

De acordo com o modelo de Newton, surge uma resistência, a partir da falta de escorregamento de um fluido, proporcional à velocidade pelo qual as partes desse material são separadas uma das outras. Dessa forma, um fluido que está confinado entre duas placas paralelas de tamanho infinito, pode-se submeter a um deslocamento em função de uma força F empregada na placa superior (Figura 2.1). Logo a tensão (força aplicada/área) pode ser definida como a tensão de cisalhamento aplicada ao fluido que sofre a uma taxa de cisalhamento (du/dy). Além disso, tem-se que a viscosidade desse fluido pode ser definida como uma relação diretamente proporcional entre a taxa e a tensão de cisalhamento.

Figura 2.1 – Deslocamento de um fluido entre placas infinitas (FOX e MACDONALD, 2001 adaptado do modelo de Newton).



Segundo Coussot (1997) quando um material é submetido a uma tensão externa, seus componentes se deslocam, como consequência dessa ação à que ele está submetido, sendo que essa distribuição de forças tende a se desenvolver para um novo “estado” desses componentes. Em um contexto mais físico e químico, assume-se equações básicas para explicar o comportamento dos mais diversos tipos de materiais e suas interações e dimensões em termos de partículas. Do ponto de vista matemático, o comportamento dos materiais sob determinadas forças externas pode ser descrito com base na relação entre tensão e taxa de deformação (COUSSOT, 1997).

Sistemas “ideais” são descritos por equações lineares simples, como a Lei de Newton para líquidos ideais (Equação 2.1). Considerando que entre as duas placas paralelas, em velocidades diferentes e separadas por uma distância “dy” infinitesimal, existe um fluido. A viscosidade (η) pode ser definida como a relação diretamente proporcional entre a taxa ($\dot{\gamma}$) e a tensão de cisalhamento (τ) aplicada.

$$\tau = \frac{F}{a} = \eta \frac{du}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

No entanto, na prática, os sistemas são mais complexos e a exemplo disso, pode-se citar sistemas empregados nas indústrias alimentícias, de bebidas, de cosméticos, de revestimentos, de plásticos, de aditivos químicos, de tintas, de materiais cimentícios, dentre outros (GLATTHOR *et al.*, 1994). Dessa forma, a reologia é empregada quando as propriedades dos materiais são mais complexas que as de um fluido simples ou de um sólido elástico ideal (SCHRAMM, 2006).

Assim, em resumo, a reologia e a reometria, descrevem o comportamento mecânico da matéria, isto é, a deformação de um sólido ou o escoamento de um líquido sob à ação de esforços impostos ao material (TATTERSALL, 2008). Além disso, propriedades de viscosidade e tensão de escoamento são estudadas para obtenção do comportamento reológico de materiais cimentícios. Elas são obtidas a partir de ensaios realizados em viscosímetros ou reômetros (QUARCIONI, 2008).

De forma mais específica, matrizes cimentícias, a depender da composição (pastas de cimento, argamassas e concretos) no seu estado fresco têm partículas e suspensões de partículas/fases diferentes e isso resulta em propriedades reológicas e de calorimetria que dependem também do tempo (BANFILL, 1991; 2003).

Ao mesmo tempo, sabe-se que a reologia do concreto é diretamente influenciada pelo comportamento reológico da pasta de cimento (CYR, 1999) e/ou da argamassa (FRANÇA *et al.*, 2019) e que falhas no estado fresco destes materiais podem ocasionar defeitos e deficiências em propriedades no estado endurecido, como fissuras, retração, entre outros (ROJAS; RAMIREZ *et al.*, 2019). Também é importante destacar que a pasta de cimento Portland fresca tem suas propriedades reológicas modificadas com o tempo e que materiais com partículas finas tendem a formar aglomerações, quando em contato com a água (WALLEVIK, 2009). Dessa forma, matrizes cimentícias/suspensões podem ser mais estáveis com o acréscimo de aditivos químicos e até de adições minerais, os quais atuam por interações físico-químicas, favorecendo a dispersão de partículas em meio aquoso (BANFILL, 2003; FERRARIS *et al.*, 2001; KONG *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

2.2 PROPRIEDADES REOLÓGICAS

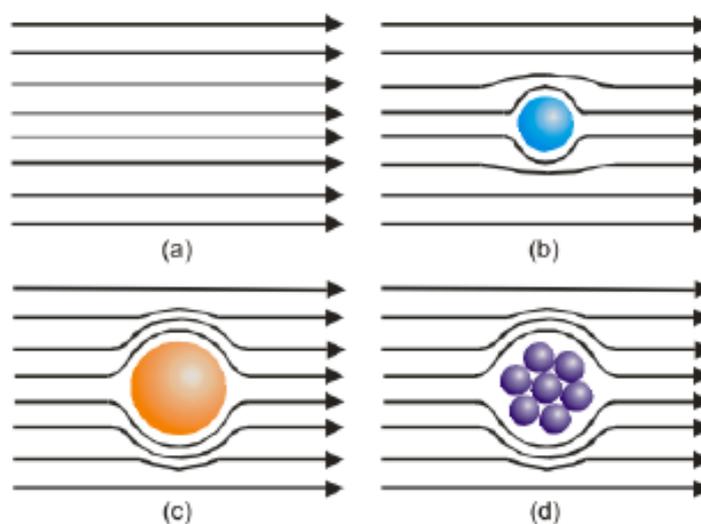
De acordo com Cyr (1999), é coerente dizer que a reologia do concreto é diretamente influenciada pelo desempenho da pasta de cimento, já que este é o material que dá a característica de fluido ao concreto, sendo a primeira se modificar quando é preciso variar o comportamento reológico da mistura. As principais propriedades a serem estudadas nos materiais cimentícios são a viscosidade e a tensão de escoamento.

A viscosidade é uma propriedade física que define a resistência de um fluido ao escoamento (PILEGGI, 2001). Para uma suspensão com grande concentração de sólidos, como por

exemplo, as pastas de cimento, existem alguns fatores que podem influenciar na viscosidade, como: densidade, a concentração volumétrica de sólidos, temperatura, distribuição granulométrica, área superficial específica dos grãos, além do tipo de interação entre as partículas (CASTRO, PANDOLFELLI, 2009; PILEGGI, 2001).

A metodologia mais empregada para estabelecer a viscosidade de um fluido é a de análise do perfil reológico com base nas curvas de fluxo que versam a tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento. Isto expressa a medida da taxa de aumento do esforço de cisalhamento para uma tensão crescente. A presença de unidades sólidas móveis imersas em uma suspensão pode vir a modificar o escoamento das lâminas no fluido, podendo formar linhas de fluxos que tendem a contornar a partícula (Figura 2.2) e assim, a medida em que a dificuldade em contornar esses elementos sólidos aumenta, aumenta também a viscosidade (CASTRO *et al.*, 2011; PILEGGI, 2001).

Figura 2.2 – Representação esquemática da perturbação causada pela presença de partículas imersas entre as linhas de fluxo do fluido sob cisalhamento (PILEGGI, 2001).



Na Figura 2.2 pode-se observar em (a) linhas de fluxo no líquido, em (b) perturbação causada pela presença de uma partícula com pequeno diâmetro, em (c) perturbação causada por uma partícula com maior diâmetro e em (d) perturbação causada por um aglomerado de pequenas partículas (PILEGGI, 2001).

Outra propriedade importante na reologia de materiais cimentícios é a tensão de escoamento, que pode ser interpretada como a tensão necessária para início do escoamento. Uma das razões para se determinar essa propriedade é a necessidade de se estabelecer a pressão mínima

para que haja o deslocamento do concreto bombeável através de tubulações e mangotes, durante seu lançamento e aplicação (DINKGREVE *et al.*, 2016). Ao mesmo tempo, a determinação da tensão de escoamento pode evitar a exsudação da mistura cimentícia e ajudar no adensamento (CLARAMUNT *et al.*, 2018).

Por meio do comportamento de um fluxo pode-se determinar ainda duas classes diferentes de tensão de escoamento, a saber: tensão de escoamento dinâmica e tensão de escoamento estático. Na primeira classe, o valor da tensão mínima para o fluido escoar ainda não é atingido e o material não se deforma mais e, na segunda classe ocorre a tensão crítica, dita o momento em que o fluido começa a escoar desde o repouso (ORVALEZ *et al.*, 2013).

No geral, as propriedades de um fluido são controladas pelas interfaces água-sólido, diluída pela presença de agregados (BANFILL, 2003). Na tabela 2.1 está exemplificada uma comparação das propriedades reológicas de materiais cimentícios (pasta de cimento, argamassa e diferentes concretos).

Tabela 2.1 – Comparativo de parâmetros reológicos de diferentes materiais cimentícios (Adaptado de Banfill, 2003).

	Pasta de Cimento	Argamassa	Concreto fluido	Concreto auto adensável	Concreto convencional
Tensão de Escoamento (Pa)	10-100	80-400	400	50-200	500-2000
Viscosidade (Pa.s)	0,01-1	1-3	20	20-100	50-100

1 Pa.s = 10 Poise; 1 Pa.s = 1000 Centipoise; Água a 20°C = 1 centipoise.

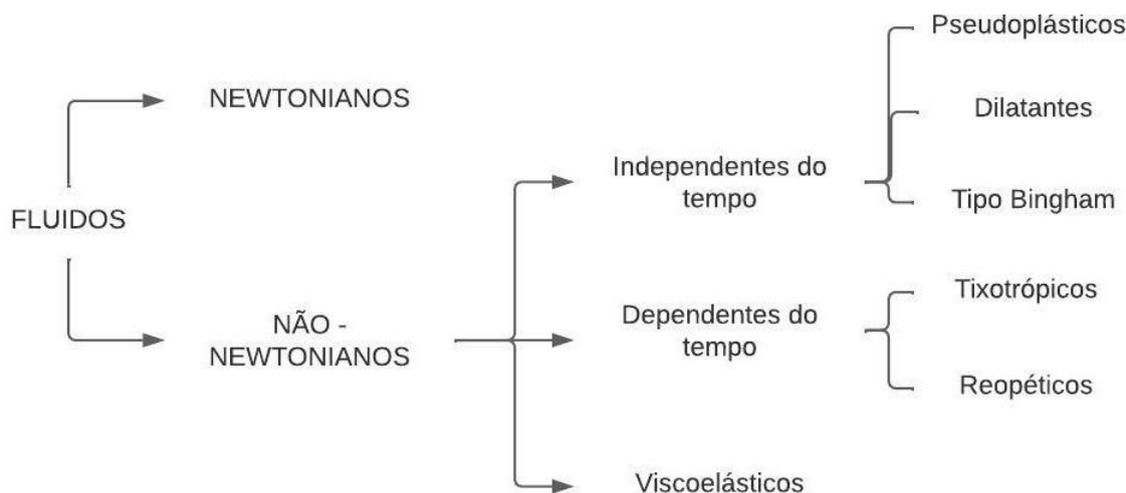
É preciso considerar ainda, além dos componentes das pastas e dos concretos em si, os efeitos de materiais que podem ser adicionados à mistura nas propriedades reológicas, como adições minerais e aditivos químicos. Em um estudo feito por Wallevik e Wallevik (2011), quando foi adicionado um aditivo superplastificante ao concreto, sua viscosidade permaneceu inalterada, enquanto para a pasta de cimento, o superplastificante reduziu a viscosidade de forma similar quando é adicionado água à mistura.

2.3 MODELOS REOLÓGICOS

Para o melhor entendimento das propriedades reológicas de matrizes cimentícias, é interessante compreender os princípios dos modelos reológicos para os materiais em geral. Assim, os fluidos podem ser caracterizados em newtonianos e não-newtonianos (Figura 2.3).

Os fluidos classificados como não-newtonianos têm a característica intrínseca de não apresentarem linearidade entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, tendo o seu comportamento dependente ou não do tempo. Encaixa-se o comportamento típico das matrizes ou materiais cimentícios (SCHRAMM, 2006).

Figura 2.3 – Classificação dos fluidos (Adaptado de SCHRAMM, 2006).



Adicionalmente, os fluidos que têm comportamento independente do tempo, podem ser definidos como: pseudoplásticos, isto é, a viscosidade do fluido irá diminuir a medida em que uma taxa de cisalhamento é aplicada a ele; como dilatante que tem características opostas ao pseudoplástico; e, por último, tipo Bingham que tem a aparência de sólido até que a tensão que está sendo aplicada ao material seja maior que a sua tensão de escoamento e, a partir disso, passa a se comportar como um fluido (SCHRAMM, 2006).

Existem ainda os fluidos que são dependentes do tempo em que para análise do seu comportamento reológico é necessário a execução de ciclos de aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento. Eles são designados de tixotrópicos (no qual a viscosidade tende a diminuir ao longo do tempo) e os reopéticos (em que a viscosidade tende a aumentar ao longo do tempo) (SCHRAMM, 2006).

De forma particular, o cimento quando interage com a água adquire propriedades reológicas que se modificam com o tempo e configura-se a pasta de cimento, como um material viscoelástico, isto é, um material que tem escoamento irreversível e, portanto, não-Newtoniano (CYR, 1999).

O comportamento reológico de cada fluido e suas propriedades de fluxo estão representadas na Figura 2.4, por meio de curvas de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento (PILEGGI, 2001). O Fluido de número 6, sendo uma particularidade, visto na Figura 2.4, se trata de um material dilatante com tensão de escoamento, ou seja, possui o comportamento de um fluido dilatante, mas precisa de uma tensão de cisalhamento maior que zero para que possa iniciar a sua deformação.

Além disso, existem equações de modelos reológicos para descrever o comportamento de materiais com partículas em suspensão, como os concretos e as argamassas. De acordo com Wallevik (2006), os modelos de equação de Bingham e de Hershel Bulkley, que descrevem o comportamento reológico de fluidos não-newtonianos independentes do tempo, são as mais adequadas para descreverem o comportamento reológico de materiais cimentícios. Na tabela 2.2 estão descritos os modelos reológicos citados e as equações que os expressam (FERRARIS, 1999).

Figura 2.4 – Comportamento reológico dos fluidos: (1) newtoniano; (2) Bingham; (3) pseudoplástico; (4) pseudoplástico com tensão de escoamento; (5) dilatante e (6) dilatante com tensão de escoamento. (PILEGGI, 2001).

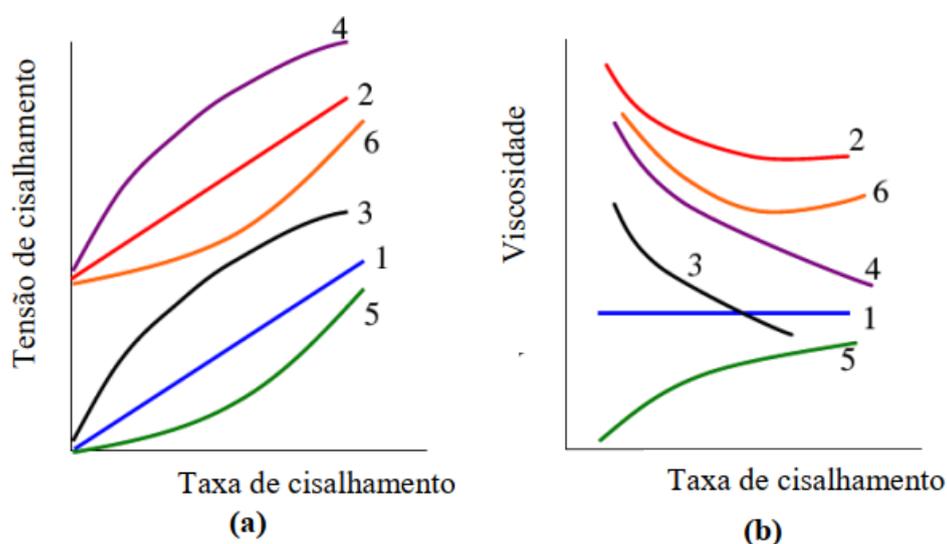


Tabela 2.2 – Principais modelos reológicos para pastas e concretos de cimento Portland e suas respectivas equações (Adaptado de FERRARIS, 1999).

Modelo	Equação	Características e escopo da aplicação
Bingham	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}$	Mais simples e prático; adequado para medição instantânea sem efeito variável com o tempo. Inadequado para baixa proporção de água para materiais cimentícios
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^\eta$	Relativamente complexo e prático. Tem restrição matemática na região de baixas taxas de cisalhamento.

Variáveis: τ = tensão de cisalhamento; τ_0 = tensão de escoamento; $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento; η = viscosidade; k = constante.

2.4 EQUIPAMENTOS PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS

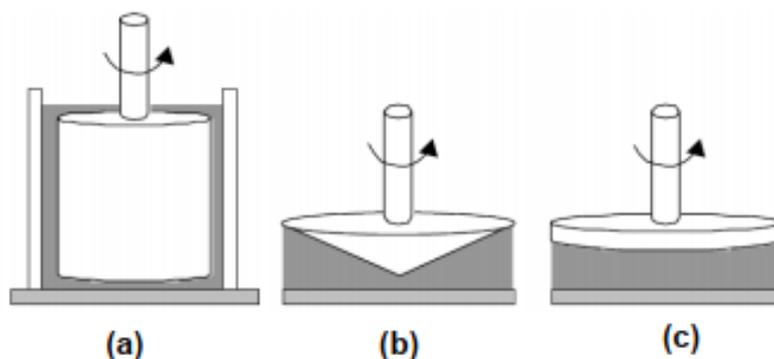
Ensaio de consistência de concretos (ABNT NBR 16889:2020), de argamassas (ABNT NBR 13276:2016) ou de pastas (ABNT NBR 16606:2018) são utilizados para medir a trabalhabilidade ou ainda partes da trabalhabilidade de materiais cimentícios em seu estado fresco e para classificá-los como aptos para transporte e aplicação. Entretanto, são ensaios pontuais, de uma resposta e de caráter simples, uma vez que trazem apenas indicações em escala numérica, podendo trazer valores iguais para concretos que se comportam de maneira diferente em condições fora do ensaio (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Para tanto, são utilizados os reômetros ou viscosímetros com dois princípios básicos de funcionamento: com a aplicação de um torque ao fluido e, com isso, obtêm-se um resultado de tensão cisalhante ou a aplicação de uma taxa de cisalhamento controlada para avaliar o torque necessário para a mistura. Em ambos princípios, tem-se o retorno da resistência imposta pelo material ao seu escoamento (PILEGGI, 2001).

Esses equipamentos possibilitam o uso de quantidades pequenas de amostras e, por isso, fornecem medidas contínuas da relação de taxa e tensão de cisalhamento, permitindo uma análise mais adequada de comportamento de materiais dependentes do tempo (IZIDORO, 2007). Esses equipamentos podem ser classificados de acordo com a variável a ser controlada (como tensão ou deformação) e de acordo com a geometria do sensor – cilindros coaxiais, cone-placa ou placas paralelas (visto na Figura 2.5).

O reômetro com geometria do tipo cilindro coaxial (Figura 2.5a) é composto por um cilindro interno – conhecido como *spindle*, e outro externo – copo. No espaço entre esses cilindros, existe um espaço feito para abrigar o material que será submetido ao cisalhamento por um tempo previamente definido, sendo que este fluido não pode ter agregados ou elementos sólidos maiores que 1/3 da distância entre os dois cilindros (COUSSOT, 1997; MENDES, 2016). Já o reômetro com geometria do tipo cone-placa (Figura 2.5b) é composto por um cone invertido e uma placa horizontal sendo que o vértice do cone está posicionado muito perto da placa. Geralmente, esse tipo de geometria, é indicada para materiais que não possuem agregados, como pastas de cimento e que também tem uma viscosidade consideravelmente alta (SCHRAMM, 2006).

Figura 2.5 – Tipos de geometria dos reômetros rotacionais: (a) cilindros coaxiais; (b) cone-placa; (c) placas paralelas (HACKLEY; FERRARIS, 2001).



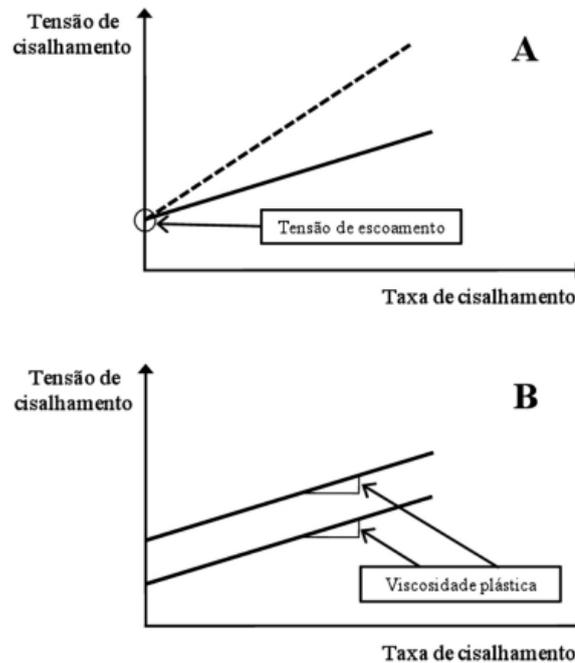
Por último, tem-se o reômetro com geometria do tipo placas paralelas (Figura 2.5c). Este equipamento dispõe de dispositivo com duas placas paralelas com formato de disco e com uma distância considerável entre elas. É utilizado para materiais com partículas maiores e não homogêneos (COUSSOT, 1997; LARRARD *et al.*, 1998).

Salienta-se ainda que é possível determinar a histerese por meio dos reômetros, isto é, a energia necessária para o material experimentar uma quebra estrutural devido à ação de cisalhamento (KHAYAT *et al.*, 2002). Por meio da histerese, é possível fazer avaliações qualitativas do cisalhamento, permitindo concluir sobre a estabilidade da estrutura do material e, com isso, ainda definir sua tixotropia (SUHR, 1991).

Com o uso do reômetros, pode-se obter curvas de correlação de propriedades (Figura 2.5). Isto demonstra que somente um parâmetro não é capaz de caracterizar um material em seu estado fresco (FERRARIS, 1999). Atualmente, reômetros para pastas são bem sofisticados, com muita tecnologia e sensibilidade na leitura e aquisição de dados.

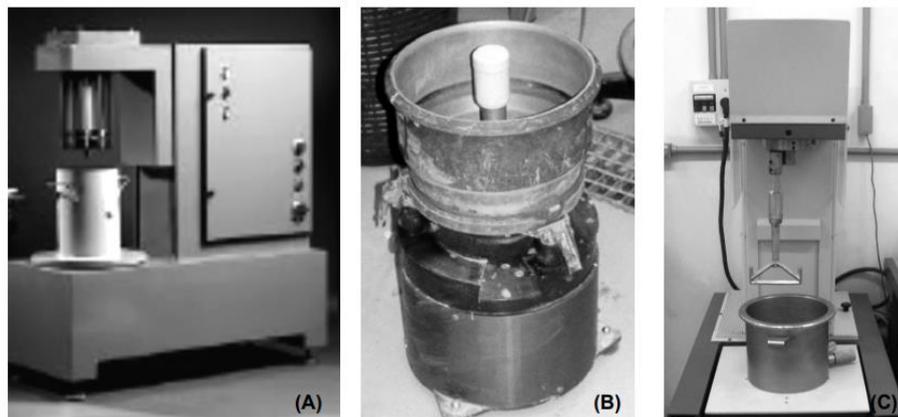
Para os ensaios realizados em concretos, tem-se a utilização de reômetros específicos. A exemplo disso, pode-se ilustrar os reômetros da Figura 2.7). O reômetro de modelo planetário (Figura 2.7) amplia o campo de utilização do equipamento se comparado aos outros tipos de reômetros, uma vez que esse modelo permite que concretos com alta e baixa fluidez possam ser estudados e ainda permitem o estudo da mistura (PILEGGI, 2001). Ademais, o equipamento controla a velocidade de rotação da pá (utilizada para fazer a mistura do concreto) e mede o torque necessário perante certa rotação.

Figura 2.6 – Reologia do concreto, (A) concretos com a mesma tensão de escoamento e viscosidades plásticas diferentes e (B) concretos com tensões de escoamento diferentes e com a mesma viscosidade plástica (CASTRO *et al.*, 2011).



Simplificando, o reômetro consiste, basicamente, em um equipamento que dispõe de força, velocidade e precisão que permite ensaiar diversas dosagens de concretos – possibilitando o estudo de diversas características da preparação desse material, como o procedimento de mistura, influência de adições minerais, o comportamento reológico propriamente dito, entre outros (PILEGGI *et al.*, 2000; CASTRO *et al.*, 2011).

Figura 2.7 – Reômetros para uso em concretos: (a) BML, baseado no conceito de cilindros coaxiais; (b) reômetro BTRHEOM, baseado no conceito placa/placa e (c) reômetro baseado no modelo planetário (CASTRO *et al.*, 2011).



De acordo com Tattersall e Banfill (1983), no momento em que um concreto é submetido à uma taxa de cisalhamento gradual e crescente e que, posteriormente é reduzida à zero de forma gradual e decrescente, formando um gráfico chamado de curva de histerese, quando um material sob a ação de uma tensão de cisalhamento sofre uma quebra estrutural. Segundo Suhr (1991) a partir desse gráfico e do volume de histerese, no qual a área da curva evidencia o trabalho relacionado com o volume cisalhado, é possível fazer uma avaliação qualitativa do cisalhamento e, assim, analisar questões relacionadas à estabilidade da estrutura do concreto.

2.5 EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS E DOS ADITIVOS QUÍMICOS NA REOLOGIA

É evidente o acréscimo e o interesse em utilizar adições minerais no concreto por várias razões, entre as quais, pode-se citar: reduzir o consumo de cimento, diminuir o calor de hidratação, reduzir a retração autógena, proporcionar melhorias na durabilidade e desempenho, entre outras.

Em geral, no que tange a reologia, as adições minerais podem alterar a estabilidade de pastas de cimento, uma vez que possuem a característica de adsorver grande quantidade da água de amassamento e, caso utilizado, parte do aditivo químico (ALONSO *et al.*, 2013; KHAN *et al.*, 2016; KHAYAT *et al.*, 2004). Da mesma forma, a eficiência da aplicação de adições minerais nos materiais cimentícios no estado fresco está alinhada a distribuição granulométrica e ao formato das partículas (TATTERSALL, 1991).

Outro efeito importante é o aumento da fluidez, uma vez que a utilização de materiais muito finos melhora o empacotamento de partículas, trazendo maior trabalhabilidade ao concreto. Isso ocorre, pois, as pequenas partículas têm mecanismos de atuação de preenchimento de vazios, possibilitando a melhor disposição dos grãos e o maior aproveitamento da água de amassamento (CHALAH *et al.*, 2022; KWAN; MORA, 2001; YAHIA *et al.*, 2005; SHANAHAN *et al.*, 2013).

Segundo Nehdi *et al.*, (2004), outro aspecto referente à maior fluidez do concreto está ligado ao aumento da quantidade de finos até um determinado limite. Após isso, pode ocorrer redução do atrito interno entre as partículas e ter efeito reverso. Ademais, a incorporação de mais de um tipo de adição mineral com formatos de partícula e granulometrias distintas em misturas ternárias e até quaternárias, pode melhorar o empacotamento de partículas e a

densidade e, conseqüentemente, a viscosidade da mistura (KRAUS *et al.*, 2009; MOOSBERG-BUSTNES *et al.*, 2004).

Especificamente, a sílica ativa proporciona um relevante aumento na compacidade das misturas cimentícias e, conseqüentemente, produz uma mistura mais densa, com menor velocidade de fluxo interno de líquido da pasta, além de aumentar as ligações dos grãos de cimentos e das partículas com os produtos de reação existentes (SILVA, 2000). Dessa forma, o emprego da sílica tende a promover concretos mais coesos, isto é, sem segregação ou exsudação no estado fresco. Isso é explicado pela forma das partículas de sílica ativa, sua elevada finura e área específica.

Isso é explicado uma vez que as pequenas partículas dessa adição atuam como esferas rolantes e começam a fazer parte da solução de água do poro – e como efeito se tem o aumento da fluidez da mistura, mesmo que o concreto com sílica ativa dê a sensação de ser pegajoso, ele é muito mais fluido se comparado a outros concretos quando lançado (ZAIN; SAFIUDDIN; YUSOF, 1999). Em virtude de toda a ação da adição de sílica ativa nos concretos, se tem um alto desempenho e alta durabilidade desse material, uma vez que se tem o refinamento dos poros, a diminuição da zona de transição entre agregados e a pasta de cimento, além da atenuação da exsudação interna e superficial da mistura (CASTRO, 2007).

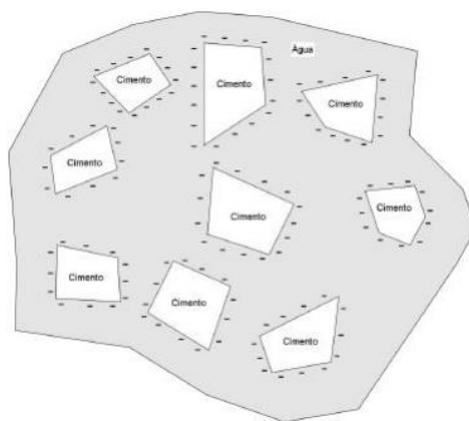
Entretanto, a incorporação da sílica ativa requer um acréscimo no uso de aditivos químicos na mistura – já que essa adição possui uma grande área superficial e, segundo Nehdi, Mindess e Aïtin (1998), existe uma tendência de afinidade de adsorção de moléculas de superplastificante em sua superfície. A flocculação existente sobre a variação granulométrica das partículas de sílica faz com que a mistura aumente a demanda por aditivo químico (ZAIN; SAFIUDDIN; YUSOF, 1999).

Ao mesmo tempo, o uso de sílica ativa e baixas relações água/aglomerante pode demandar o uso de aditivos químicos do tipo plastificantes e superplastificantes (ABNT NBR 11768, ABNT, 2019). A utilização de aditivos químicos tem demonstrado ser essencial com o desenvolvimento da tecnologia dos concretos para a mistura de concretos de alto desempenho, visto que melhoram suas propriedades no estado fresco – reduzindo a quantidade de água de amassamento, sem apresentar efeitos adversos em seu estado endurecido, de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2019).

Segundo Neville (2008), aditivos redutores de água de alta eficiência são polímeros orgânicos hidrossolúveis adquiridos de forma sintética por meio de uma polimerização complexa empregada na produção de longas moléculas e alta massa molecular – se tornando um material de alto custo. Todavia, se produzidos para utilizações específicas (como para a utilização em concretos), suas características são desenvolvidas para um entrelaçamento mínimo necessário, no que se refere ao comprimento das moléculas, para que seja viável a sua aplicação. Dessa forma, a incorporação desse tipo de material leva à produção de uma camada de adsorção com cargas de sinais iguais sobre as partículas de cimento e de produtos hidratados fazendo com que essas partículas sejam espalhadas na mistura por meio do efeito de repulsão eletrostática – promovendo o que chamamos de efeito fluidificante (UCHIKAWA *et al.*, 1992).

Segundo Chiocchio e Paolini (1985), esse efeito está vinculado a diversos aspectos, como a natureza e a concentração do próprio aditivo, da temperatura e dos componentes da mistura em seu estado fresco, além do metodologia de mistura e o tempo de adição desse polímero. Nesse mesmo contexto, ainda se tem a preocupação com o peso molecular desses aditivos químicos, visto que polímeros que possuem baixo peso molecular tem a tendência de manter-se na solução dos poros e polímeros com pesos maiores são facilmente adsorvidos pelas moléculas de cimento (BONEN; SARKAR, 1995). Entende-se assim, que a ação desses materiais dependem da sua compatibilidade com o tipo de cimento das misturas (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Dispersão das partículas de cimento causadas pela ação das moléculas de aditivo adsorvidas na superfície (MONTE, 2003).



A eficiência do aditivo químico reduz de acordo com a formação dos produtos de hidratação na camada, enquanto que em termos de área superficial livre para a adsorção e dispersão são aumentadas. Logo, o seu tempo de ação é restrito pela sua reação com o C_3A , a água e o íon

sulfato na formação da etringita e pelo desenvolvimento da camada de minerais hidratados na sua presença (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

De acordo com Yen *et al.* (1999), lembrando que a utilização do aditivo tem a função de propiciar a repulsão eletrostática dos ânions adsorvidos na superfície da pasta de cimento, esse material irá guiar à diminuição da viscosidade aparente do concreto. Nesse contexto, qualquer tipo de aditivo deve ser capaz de, por meio desse mecanismo, ainda produzir mudanças na tensão de escoamento por meio da defloculação das partículas.

Encontrar a dosagem adequada de superplastificante a ser utilizado nas composições dos materiais cimentícios é indispensável para assegurar uma boa condição de escoamento, dependendo ainda da sua relação água/ligante e da composição dos seus materiais. Ao se encontrar o teor de saturação do aditivo químico, o efeito de material acrescentado extra a essa quantidade é insignificante e pode até mesmo prejudicar o concreto, promovendo segregação e exsudação desse material (CASTRO, 2007). A influência do tipo e do teor de adições minerais pozolânicas e não pozolânicas em propriedades reológicas de matrizes de cimento Portland vêm sendo estudadas (SENF *et al.*, 2009; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; AHARI *et al.*, 2015; VARHEN *et al.*, 2017; KOUTNÝ *et al.*, 2018; ROJAS-RAMÍREZ *et al.*, 2019; AGOSTINHO *et al.*, 2021).

Paralelamente, estudos recentes vêm avaliando a reologia de pastas e argamassas de cimento Portland, analisando-se vários tipos de aditivos químicos, as suas composições e bases química e o seus teores na mistura para uma ótima reologia. Assim, bases químicas de éter de policarboxilato, melanina, naftaleno, naftaleno sulfonado, lignosulfonato, resina poli acrílica, resina melamínica, poli acrilato e poli acrílico vêm sendo pesquisados nas mais diversas dosagens (FERRARIS *et al.*, 2001; VIKAN; JUSTNES, 2007; JANOTKA *et al.*, 2010; ALONSO *et al.*, 2013; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; GÜNEYISI *et al.*, 2015; NG; JUSTNES, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017; MSINJILI *et al.*, 2017; MOHAMMED *et al.*, 2020; AGOSTINHO *et al.*, 2021). Em geral, as adições minerais podem modificar a reologia das pastas de cimento (CLARAMUNT *et al.*, 2018). Por fim, é importante ressaltar que a pasta de cimento Portland fresca tem suas propriedades reológicas modificadas com o tempo (WALLEVIK, 2009) e que materiais com partículas finas tendem a formar aglomerações quando em contato com a água. Dessa forma, matrizes cimentícias/suspensões podem ser mais estáveis com o acréscimo de aditivos químicos (BANFILL, 2003).

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

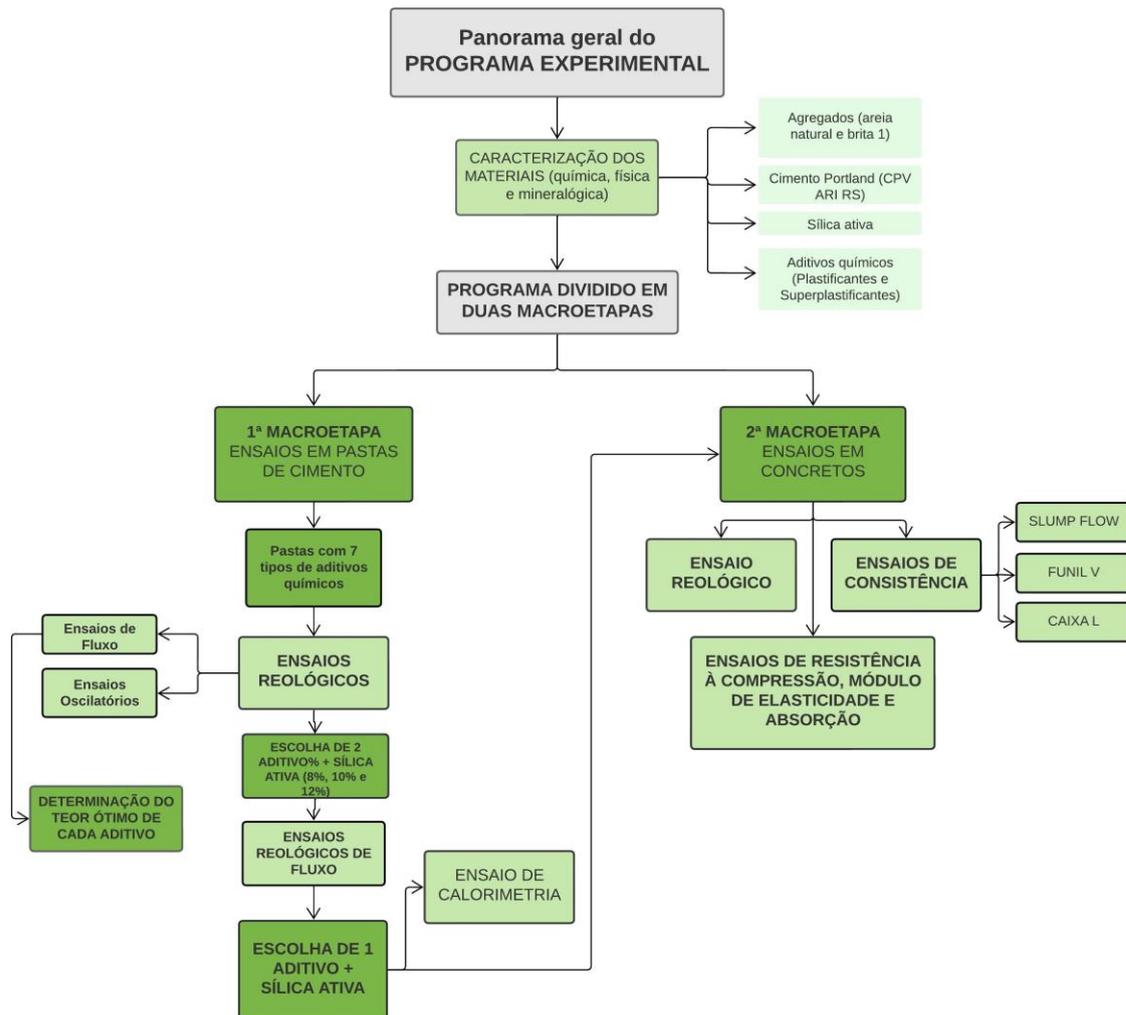
Esse capítulo apresenta uma descrição do programa experimental, desenvolvido nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A e no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil - LABITECC da Universidade Federal de Goiás. O programa foi dividido em duas macroetapas com o intuito de investigar a influência de diferentes tipos e teores de aditivos químicos plastificantes e superplastificantes, da adição de sílica ativa e das relações água/ligantes nas propriedades reológicas dos materiais cimentícios.

A primeira macroetapa correspondeu à avaliação reológica de pastas de cimento Portland com variações nos tipos e teores de aditivos químicos plastificantes e superplastificantes, seguido da análise da interveniência de diferentes teores de sílica ativa (8%, 10% e 12% de substituição de cimento em massa).

A segunda macroetapa consistiu na avaliação reológica e mecânica de concretos, com a composição baseada a partir dos resultados da primeira etapa. Destaca-se que em ambas as macroetapas foram utilizadas duas relações água/ligante (0,40 e 0,55). Estas relações água/ligantes é baseada em estudo do GEDur (Grupos de Estudos em Durabilidade) e em alguns trabalhos desse grupo (OLIVEIRA e CASCUDO, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2023) da UFG. Assim, neste contexto, foram realizados ensaios reológicos de fluxo (para determinar valores de viscosidade e de tensão de escoamento) e de oscilação (cinética de hidratação) para definir as porcentagens ótimas das quantidades de aditivo químico e de sílica ativa para a produção de concretos com melhor qualidade e desempenho, além da validação de um protocolo de procedimentos a serem realizados para futuros estudos nessa linha.

O presente capítulo também apresenta as variáveis adotadas do estudo e a caracterização dos materiais utilizados. Paralelamente, os métodos dos ensaios reológicos e suas especificidades foram descritos, considerando-se as menções da delimitação da pesquisa e as técnicas utilizadas.

Figura 3.1 – Programa experimental



3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO

As variáveis independentes estudadas foram escolhidas com o propósito de atingir os objetivos propostos no trabalho. Dessa forma, as variáveis foram: relação água/ligante, teor de sílica ativa e tipo de aditivo químico.

3.1.1 Relação Água/Ligante

Foram empregadas nas pastas de cimento e nos concretos, duas relações água/ligante (a/lig) de 0,40 e 0,55, especificamente escolhidas baseadas em trabalhos desenvolvidos no *Grupo de Estudos em Durabilidade (GEDur)* do PPG-GECON/UFG e na literatura (OLIVEIRA, 2007; MENDES, 2009; FERREIRA, 2013; MALAGONI, 2016; PIRES, 2016; PIRES, 2016; MACEDO, 2018; SILVA, 2018; HILÁRIO, 2019) entre os anos de 2003 a 2022. Considerou-

se a classe de agressividade ambiental III de agressividade forte, com risco de deterioração grande e máxima relação água/ligante de 0,55 para concretos estruturais com armadura, uma vez que é uma relação bastante utilizada para concretos comerciais (ABNT NBR 6118, 2014).

3.1.2 Adição Mineral

A adição mineral escolhida foi a sílica ativa, baseada em pesquisas prévias do PPG-GECON, citadas anteriormente e, por ser a adição mais utilizada em concretos comerciais na cidade de Goiânia/GO. Os teores de sílica utilizados foram de 8%, 10% e 12% em teores de substituição em massa de cimento. O teor de 10% é mencionado e utilizado na literatura (OLIVEIRA; CASCUDO, 2018), sendo que os outros teores selecionados foram abordados para testar valores logo abaixo e acima do teor dito como ótimo dessa adição mineral.

3.1.3 Aditivos Químicos

Os aditivos químicos foram escolhidos baseando-se em opções comerciais disponíveis e mais utilizados na região, sendo que os seus teores variaram de acordo com a faixa de utilização recomendada pelo fabricante. Foram selecionados sete tipos de aditivos químicos à base de policarboxilatos, a saber: cinco RA1 – redutores de água tipo 1 e dois RA2 – redutores de água tipo 2, designados no presente trabalho de “A” a “G”, adquiridos de três fabricantes diferentes. Todos os aditivos eram compostos de sólidos dispersos em solução aquosa.

Ensaio com diferentes teores dos aditivos nas misturas cimentícias foram realizados na primeira etapa do programa experimental para determinar os respectivos teores de saturação (ou teores ótimos), os quais foram utilizados na segunda etapa do trabalho.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados e caracterizados o Cimento Portland, a sílica ativa em pó e os sete tipos de aditivos químicos à base de policarboxilatos. Para a confecção dos concretos foram utilizados ainda areia natural de leito de rio e pedra britada de rocha tipo granítica, também caracterizados.

Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas – S.A e nos laboratórios da Universidade Federal de Goiás.

3.2.1 Cimento Portland

Foi utilizado cimento Portland CP V-ARI RS¹ (ABNT NBR 16697, 2018). A escolha desse tipo de cimento deu-se por este possuir um menor teor de adições minerais em sua composição. Sua caracterização física, mecânica e química pode ser visualizada na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 – Caracterização físico-química e, mecânica do cimento utilizado.

Propriedade	Unidade	Resultado	Limites NBR 16697 (2018)	Método de ensaio
Massa Específica	(g/cm ³)	2,97	-	*IT.QA.115/ IT.QA.114
Finura por Meio do Peneirador Aerodinâmico	Retido # 75 mm (%)	0,60	≤ 6,0	ABNT NBR 12826
Área Específica - (Blaine)	(cm ² /g)	5.830	-	IT.QA.114
Determinação dos Tempos de Pega	Início (h:min)	1:30	≥ 1:00h	ABNT NBR 16606/16607
	Fim (h:min)	2:50	≤ 10:00h	
	À Quente (mm)	-	≤ 5	
Resistência à Compressão da Argamassa	(MPa) 3 dias	23,3	≥ 24	ABNT NBR 7215
	7 dias	30,1	≥ 34	
Teor de umidade		-	-	Análise química por Fluorescência de raios X
Perda ao fogo		6,33	≤ 6,5	
Sulfato de Cálcio (CaSO ₄)		5,54	-	
Óxido de Cálcio (CaO) Livre	(%)	-	-	
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)		3,3	≤ 4,5	
Óxido de Magnésio (MgO)		4,9	≤ 6,5	
Dióxido de Silício (SiO ₂)		25,1	-	
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)		3,4	-	
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)		7,59	-	
Óxido de Cálcio (CaO)	(%)	47,90	-	
Óxido de Titânio (TiO ₂)		0,42	-	
Sulfeto em cimento (S ²⁻)% por FRX		-	-	
P ₂ O ₅		0,12	-	
SrO		0,20	-	
Cr ₂ O ₃		0,01	-	
Fechamento Σ =	(%)	100	-	
Componentes Químicos	Álc alis Óxido de Sódio	0,38	-	IT.QA.101

¹ Cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) - CP V que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos na ABNT NBR 16698 (2018).

Componentes Químicos	Totais	(Na ₂ O) Óxido de Potássio (K ₂ O) Equivalente Alcalino	(%)	0,98	-	IT.QA.106
	Álc alis Sol úve is em Ág ua	Óxido de Sódio (Na ₂ O) Óxido de Potássio (K ₂ O) Equivalente Alcalino	(%)	0,15 0,45 0,45	- - -	

*IT. QA.: Instrução de Trabalho de Química Analítica; Procedimentos de FURNAS baseado na NBR 16697.

3.2.2 Sílica Ativa

A caracterização física e química da sílica ativa pode ser observada na Tabela 3.2 e foi realizada de acordo com a NBR 13956-1 (ABNT, 2012) e com as instruções técnicas de Furnas.

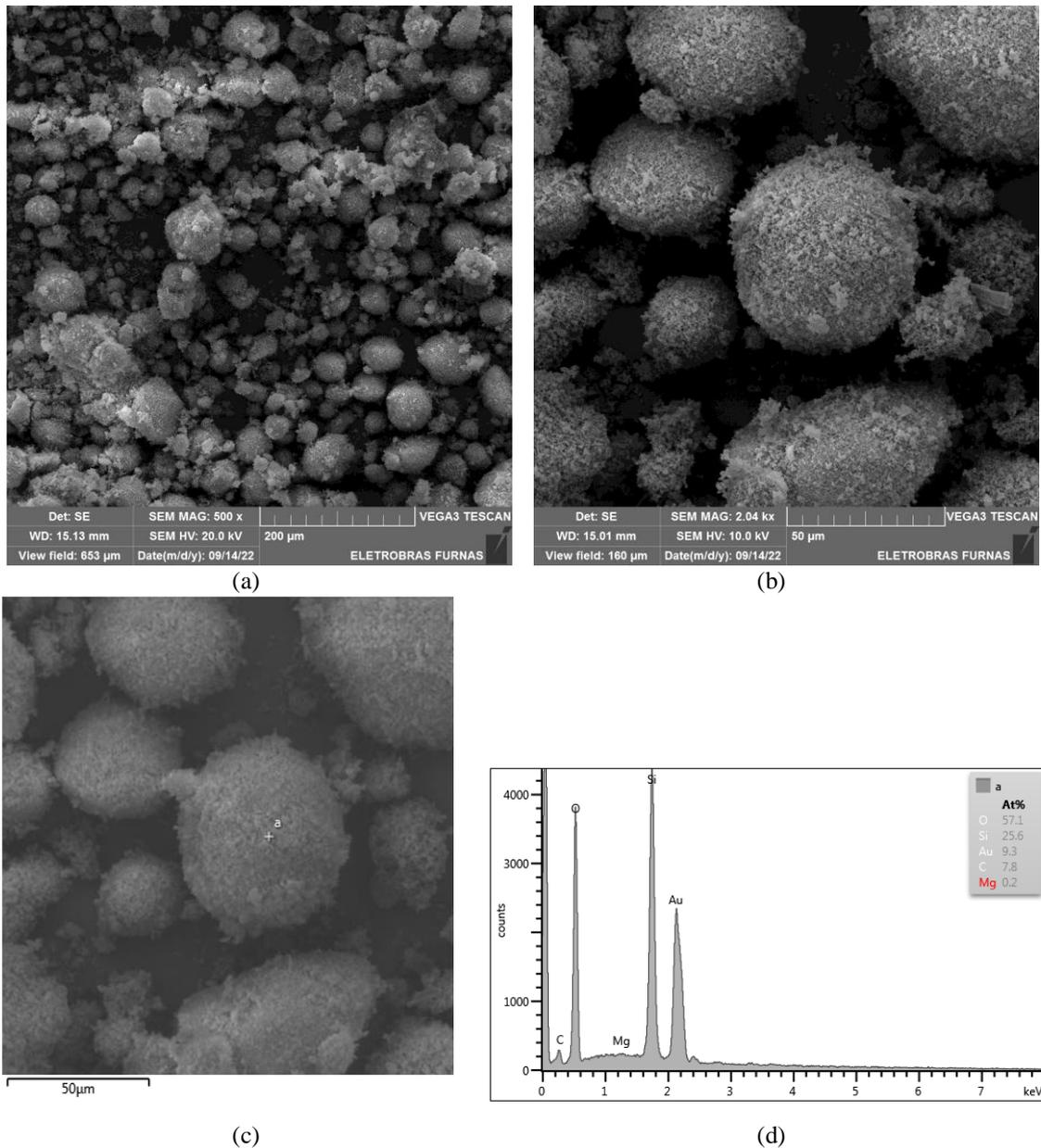
Tabela 3.2 – Caracterização física e química da sílica ativa.

Propriedades	Método de ensaio	Resultado obtido	Requisitos NBR 13956-1 (2012)
Área específica BET (m ² /g)	IT.QA.117	18,43	15 ≤ BET ≤ 30
Perda ao fogo (%)	IT.QA.100	2,67	≤ 6,0
Óxido de Sódio (Na ₂ O) (%)	IT.QA.101	0,94	-
Óxido de Potássio (K ₂ O) (%)	IT.QA.101	1,87	-
Equivalente Alcalino (%)	IT.QA.101	2,17	-

*IT. QA.: Instrução de Trabalho de Química Analítica; Procedimentos de FURNAS baseado na NBR 13956-1.

A caracterização morfológica da sílica ativa foi realizada com uso de MEV-SE, microscópio eletrônico de varredura, de fabricante Tescan, modelo Vega 3 XMU, com emissor hexaboreto de lantânio O aparelho possui sistema duplo de microanálise de energia dispersiva de elétrons – EDS fabricante Oxford. A Figura 3.2 apresenta a morfologia esférica da sílica ativa com partículas aglomeradas, observadas com ampliação de 500 e 2000 vezes.

Figura 3.2 - Caracterização morfológica da sílica ativa por MEV com ampliação de (a) 500 vezes, (b) 2000 vezes, (c) aspectos morfológico das partículas e (d) elementos químicos (verificados por espectroscopia por energia dispersiva – EDS).



3.2.3 Aditivos Químicos

Foram escolhidos sete tipos de aditivos químicos dispersantes à base de policarboxilatos, a saber: dois RA 2 - redutor de água tipo 2² (superplastificante) e cinco plastificante polifuncional RA 1 - redutor de água tipo 1³ (plastificante) (ABNT NBR 11768-1, 2019a),

² Aditivos redutores de água tipo 2 são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes, hiperplastificantes, entre outros (ABNT NBR 11768-1, 2019a).

³ Aditivos redutores de água tipo 1 são conhecidos comercialmente por aditivos plastificantes, polifuncionais, multifuncionais, entre outros (ABNT NBR 11768-1, 2019a).

designados no presente trabalho na sequência de A a G. Esses aditivos são muito utilizados na região de forma comercial em concreteiras. Os aditivos e as faixas de teores utilizados estão especificados na Tabela 3.3. Também foram realizados ensaios de caracterização dos aditivos empregados no presente estudo (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Caracterização dos aditivos químicos (ABNT NBR 11768-3, 2019b).

Características	Aditivo A	Aditivo B	Aditivo C	Aditivo D	Aditivo E	Aditivo F	Aditivo G
Base química	Policarboxilatos						
Aspecto	Líquido viscoso						
Homogeneidade	Homogêneo						
Cor	Marrom claro - uniforme	Marrom escuro - uniforme					
pH	3,94	8,16	8,52	5,16	5,09	9,45	9,62
Massa específica (g/cm ³)	1,07	1,08	1,06	0,84	1,15	1,17	1,39
Resíduos sólidos (%)	32,82	19,67	17,04	22,42	29,13	33,56	46,03

3.2.4 Agregados

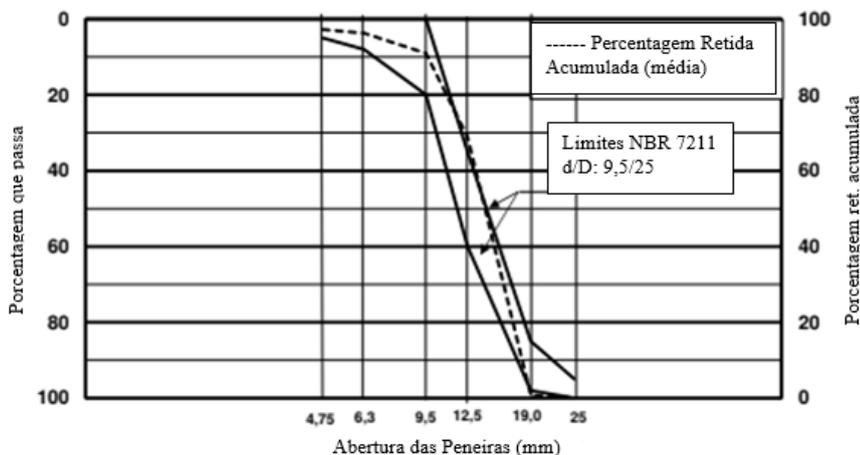
Para a produção dos concretos optou-se por concreto do tipo autoadensável e, foram utilizados dois tipos de agregados, a saber: pedra britada de rocha granítica, como agregado graúdo e areia natural quartzosa de leito de rio, como agregado miúdo.

O agregado graúdo encontra-se inserido na zona granulométrica $d/D = 9,5/25$ que é equivalente à brita 1 (Figura 3.3) (ABNT NBR 7211, ABNT, 2009). Outras características do agregado graúdo estão apresentadas estão exibidas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Caracterização do agregado graúdo.

Propriedade analisada	Unidade	Método/Norma Utilizada	Resultado do ensaio
Massa unitária	kg/m ³	NBR NM 45	1555,80
Dimensão máxima característica	mm	NBR NM 248	19,00
Módulo de finura	-	NBR NM 248	6,89
Absorção de água	%	NBR NM 53	0,50
Material pulverulento	%	NBR NM 46	1,81
Índice de forma	-	ABNT NBR 7809	2,20

Figura 3.3 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

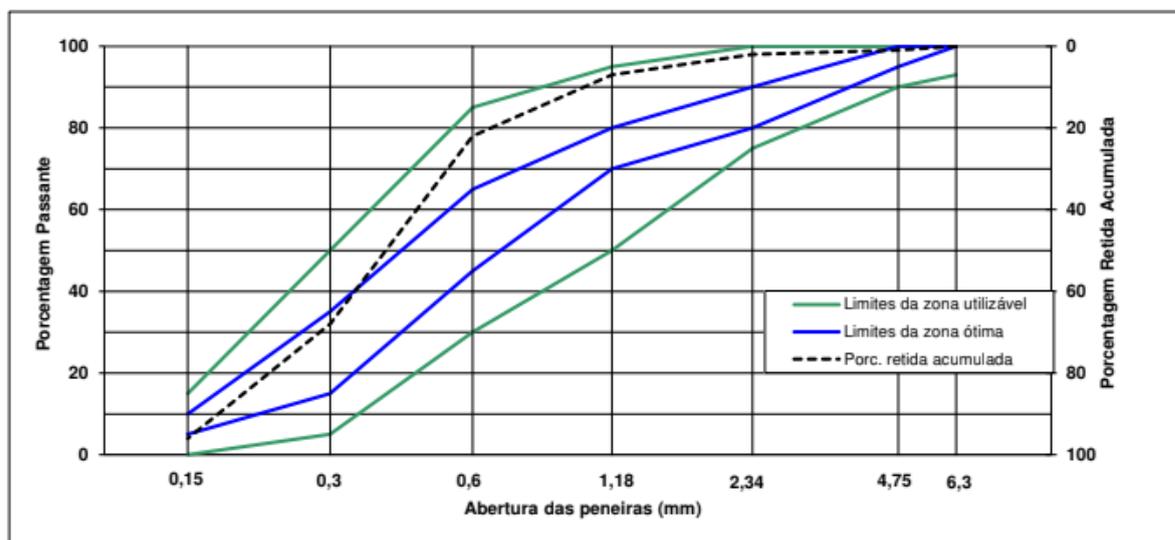


A Figura 3.4 apresenta a distribuição granulométrica da areia, usada na pesquisa e ela está situada nos limites da zona utilizável. Outras características desse agregado foram resumidas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Caracterização do agregado miúdo

Propriedade analisada	Unidade	Método/norma utilizada	Resultado do ensaio
Massa específica	g/m ³	NBR NM 53	2,62
Dimensão máxima característica	mm	NBR NM 248	2,34
Módulo de finura	-	NBR NM 248	1,96
Absorção de água	%	NM 30	0,40
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	%	NBR 7218	0,00

Figura 3.4 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



3.3 MÉTODOS

A seguir são descritos os ensaios que foram realizados tanto nas pastas de cimento, primeiramente para o estudo dos aditivos químicos e, logo em seguida, para o estudo dos teores de sílica ativa, e os ensaios feitos nos concretos, determinados a partir dos resultados obtidos nas pastas.

3.3.1 Preparo das Pastas de Cimento

Antes do preparo das pastas, os materiais utilizados foram armazenados em sala com temperatura controlada de 23°C e inicialmente preparadas dosagens de referência (REF), sem a utilização de aditivos químicos.

Para a primeira parte dos ensaios, realizados com os aditivos, o procedimento de mistura consistiu em colocar água deionizada e aditivo, previamente misturados, ao recipiente com cimento. Para a segunda parte dos ensaios, adicionando-se sílica ativa, o procedimento de mistura diferenciou-se pelo fato de introduzir a sílica ativa com o cimento e fazer uma “pré-mistura” dos materiais secos e, em seguida, misturá-los com a água e aditivo. Previamente à cada ensaio, calibrava-se o reômetro.

Em sequência, o material seco teve sua massa medida, os quais eram armazenados em uma espécie de câmara acrílica, com dimensões aproximadas de 80x60x100cm, para evitar a hidratação do cimento (Figura 3.5). Já os materiais líquidos tiveram suas massas determinadas à medida em que foi realizado os ensaios para evitar a evaporação da água.

O modo de mistura foi repetido para todas as misturas e consistiu primeiramente em uma mistura manual de materiais secos com o auxílio de uma espátula durante um minuto, seguido por uma mistura mecanizada, utilizando-se um misturador modelo IKA RW 20 digital (Figura 3.6a) durante três minutos com rotação aproximada de 2500 rpm (Figura 3.6b). Foi preparada aproximadamente 120 mililitros de pasta para cada tipo de mistura do estudo. Com os ensaios realizados somente com os aditivos, a quantidade de cimento foi sempre de 100g. Entretanto, ao se utilizar a sílica ativa, fez-se o desconto ou a substituição em massa da quantidade de cimento a depender da quantidade de adição mineral (8%, 10% ou 12%).

Figura 3.5 – Armazenamento de materiais secos para evitar hidratação dos mesmos em câmara fechada: (a) vista frontal e (b) vista lateral.

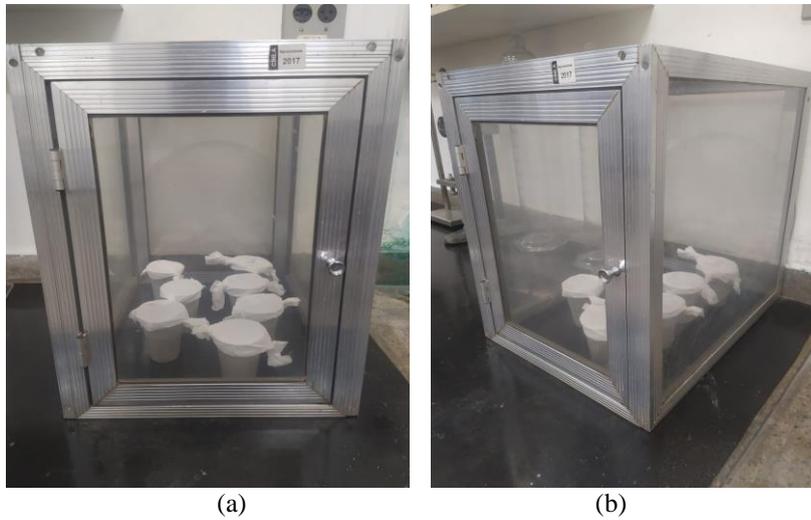
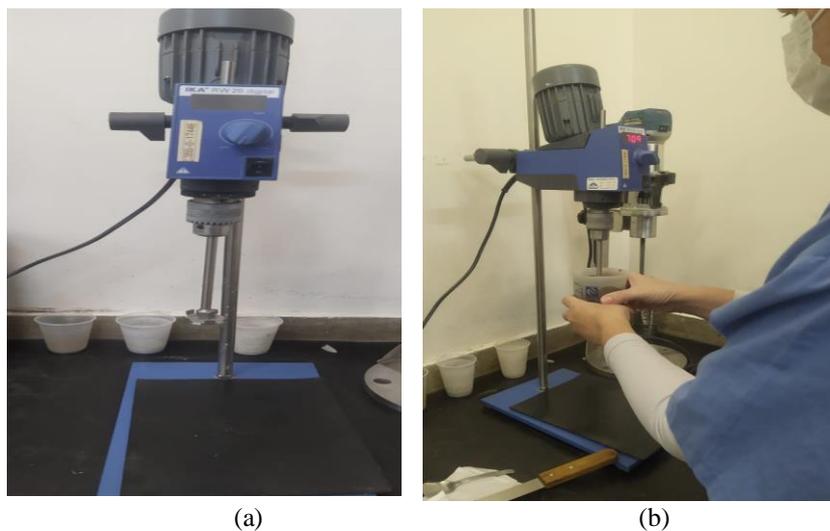


Figura 3.6 – Misturador utilizado no preparo das pastas modelo IKA RW 20 : (a) parado e (b) durante o processo de mistura das pastas com rotação aproximada de 2500 rpm.



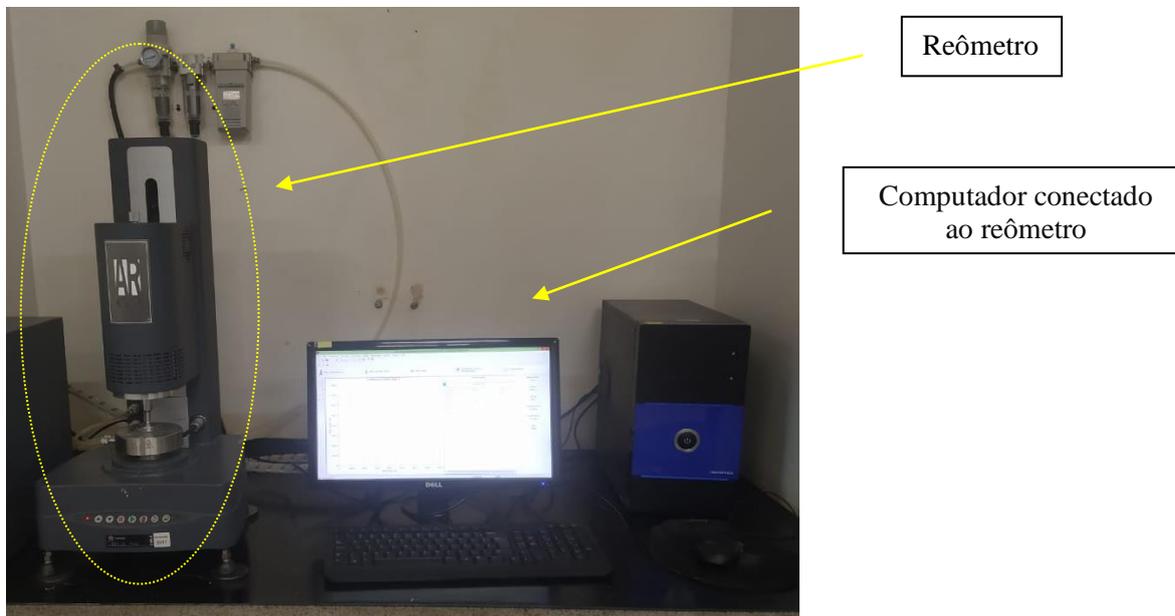
3.3.2 Ensaio Reológicos de Fluxo e Oscilatórios

Para os ensaios reológicos, utilizou-se um reômetro do tipo rotacional, modelo AR G2, do fabricante *TA Instruments* (Figura 3.7).

Para a obtenção de dados e controle dos parâmetros do ensaio, utilizou-se o programa computacional *Rheology Advantage Instrument Control AR* que dispõe de valores medidos de torque, velocidade angular, raio da geometria das placas e o *gap*, permitindo o cálculo das propriedades reológicas de tensão de cisalhamento e viscosidade. Os ensaios reológicos são divididos em ensaios de fluxo e ensaios oscilatórios. Para a interpretação e tratamento de

dados do reômetro, foi utilizado o *software* computacional TRIOS da *TA Instruments*. Dados de viscosidade e de tensão de escoamento puderam ser adquiridos.

Figura 3.7 – Reômetro rotacional vinculado ao computador.



A geometria utilizada para esses ensaios foi do tipo placas paralelas (com um raio de 20 mm), sendo que a placa superior contém ranhuras na superfície e na placa inferior um adesivo texturizado, ambos para garantir o cisalhamento interno do material e, ao mesmo tempo, evitar o escorregamento das placas a amostra. A escolha por essa geometria foi realizada pelas características das pastas de cimento. A altura mínima do *gap*, de acordo com a sugestão do fabricante do equipamento, é de 1% do diâmetro da geometria.

3.3.2.1 Influência do tipo de aditivo químico

Foram produzidas pastas com diferentes teores (%) de aditivos químicos e de diferentes fabricantes em relação a massa de cimento (Tabela 3.6). Os aditivos no presente trabalho foram designados como A, B, C, D, E, F e G. Entre os aditivos, existem 3 fabricantes diferentes, a descrever: o primeiro fabricante, com os aditivos A, B e C; o segundo, aditivos D e E e; o terceiro, aditivos F e G. Os teores de aditivos utilizados foram acima dos teores recomendados pelos fabricantes de forma geral e, conseqüentemente, foi necessário propor uma curva de tendência da utilização desses aditivos. Dessa forma, todos os teores utilizados para cada aditivo estará descrito nos resultados.

Tabela 3.6 – Faixa de utilização dos aditivos de acordo com o fabricante.

Aditivo	Base química	Teores de utilização de aditivo em relação a massa de cimento (recomendados pelos fabricantes em catálogos técnicos)
A	Policarboxilato - Superplastificante	0,3% a 1,5%
B		0,3% a 0,9%
C		0,3% a 0,9%
D	Policarboxilato -	0,2% a 1,2%
E	Plastificante polifuncional	0,2% a 1,0%
F		0,6% a 1,0%
G	Policarboxilato - Superplastificante	0,6% a 1,0%

Assim, após a preparação da pasta de cimento, cerca de 2 ml de amostra foram colocados no reômetro (Figura 3.8a). Nesta ocasião, foram realizados os primeiros ajustes do espaçamento (*gap*) das placas paralelas (Figura 3.8b) até a distância de 1,0 mm da amostra (Figura 3.8c). Uma importante observação é sobre a limpeza do material excedente às placas, o qual foi efetuada uma primeira limpeza ao se obter um espaçamento de 1,5 mm e uma segunda limpeza, de cunho mais fino, ao chegar ao espaçamento de 1,0 mm. Com isso, dá-se início ao ensaio de fluxo da pasta com aproximadamente 10 minutos após o primeiro contato do cimento com os materiais líquidos. Na figura 3.9 é possível, por meio de um desenho esquemático, observar a representação da amostra no equipamento.

Figura 3.8 – Execução do ensaio de pasta no reômetro: (a) amostra sendo colocada no reômetro; (b) ajustes do *gap* e (c) deformação da amostra com 1 mm de *gap*.

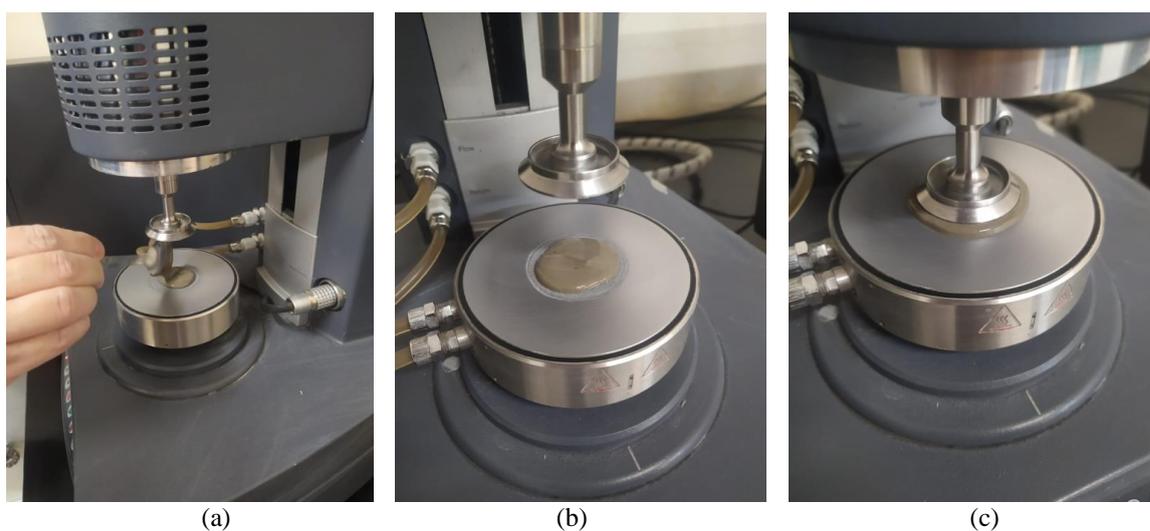
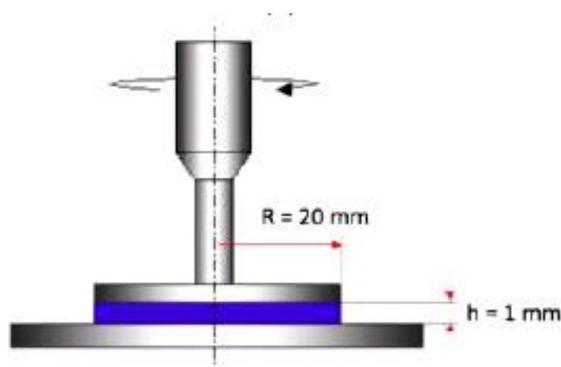


Figura 3.9 – Representação esquemática da amostra de pasta de cimento pelo reômetro, utilizado com o raio da placa (R) e a distância entre as placas (h) (Adaptado de *TA INSTRUMENTS*, 2010).

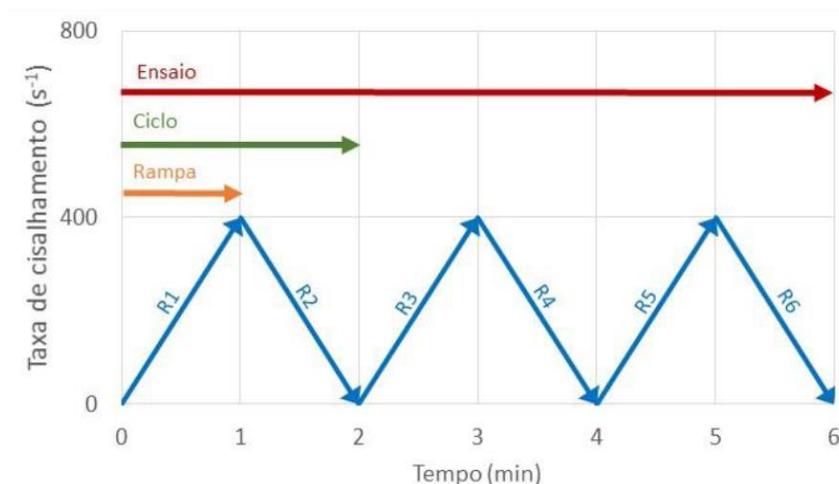


Assim, o ensaio de fluxo consistiu na execução de três ciclos com duas rampas em cada ciclo: a primeira rampa com aceleração da taxa de cisalhamento (indo de zero a 400s^{-1}) e a segunda com desaceleração (caindo de 400 s^{-1} para zero). Em cada rampa foram obtidos 30 pontos.

Os resultados obtidos com as duas primeiras rampas (primeiro ciclo) foram descartados, uma vez que considerou-se que a mistura ainda estava sendo homogeneizada. Dessa forma, a partir do segundo ciclo foi possível utilizar os dados coletados de forma representativa nas propriedades reológicas e, o terceiro ciclo, foi uma validação dos dados obtidos no ciclo anterior. Foi obtido também o teor de saturação dos aditivos e observado se houve ou não segregação da pasta.

Os ensaios tiveram duração aproximada de 35 minutos, contando entre o início da mistura dos materiais até a limpeza dos equipamentos, sendo o tempo do início da mistura até o final do último ciclo de aproximadamente 15 minutos. Na Figura 3.10 tem-se uma representação esquemática de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo, demonstrando os ciclos e as tampas.

Figura 3.10 – Esquema de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo (AGOSTINHO, 2017).



A partir dos ensaios de fluxo previamente realizados e a definição dos teores ótimos para cada aditivo de acordo com a relação água/ligante (a/lig), foi possível dar início à realização dos ensaios oscilatórios. Dessa forma, para cada teor ótimo, obtido dos aditivos, foram realizados 2 ensaios oscilatórios, sendo um para cada relação a/lig e sua proporção está ilustrada na tabela 3.7 abaixo.

Tabela 3.7 – Proporcionamento das pastas de cimento para ensaios oscilatórios

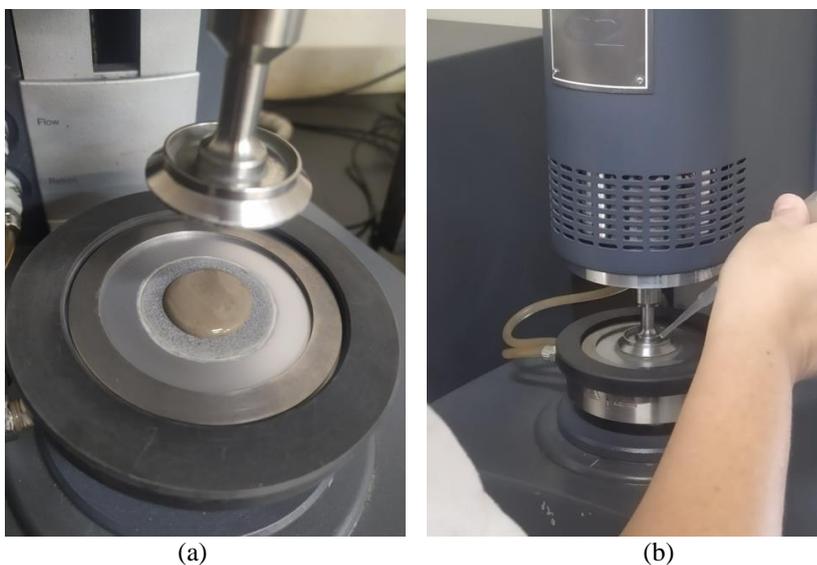
Pasta de Cimento	Cimento (g)	Água (g)	Tipo de Aditivo	Teor de Aditivo (%)
A04	100	40	A	0,9
A055		55		0,7
B04		40	B	4,0
B055		55		0,1
C04		40	C	4,0
C055		55		0,5
D04		40	D	1,5
D055		55		1,0
E04		40	E	1,5
E055		55		1,5
F04		40	F	2,5
F055		55		1,5
G04		40	G	1,5
G055		55		1,0

Como já visto anteriormente, foi preparado aproximadamente 120 ml de pasta de cimento para a realização do ensaio oscilatório, sendo que a diferença para os procedimentos do ensaio de fluxo encontra-se na utilização de anéis de proteção – nos ensaios de fluxo não é necessário a utilização do anel uma vez que o ensaio é de curta duração, diferente do ensaio oscilatório que, por ter longa duração, é preciso evitar a evaporação da água da mistura. Após

a colocação do primeiro anel de proteção, cerca de 2 ml de amostra foi colocado no reômetro (Figura 3.11a). Logo em seguida foram realizados os primeiros ajustes do *gap* das placas paralelas até a distância de 1 mm da amostra (Figura 3.11b). Da mesma forma que nos ensaios de fluxo, no ensaio oscilatório também é importante fazer a limpeza do excesso de material no equipamento.

Após a limpeza é feito o preenchimento da cavidade da geometria com água para evitar a secagem da amostra e gerando uma atmosfera protetora, uma vez que o ensaio é de longa duração (Figura 3.11c). O segundo anel de proteção é colocado por cima da geometria (Figura 3.11d) e assim, dá-se início ao ensaio oscilatório da pasta, aproximadamente 10 minutos após o primeiro contato do cimento com os materiais líquidos. Na figura 3.12 é possível observar, por meio de um desenho esquemático, a representação da amostra no equipamento e o posicionamento dos anéis de proteção.

Figura 3.11 – Execução do ensaio: (a) amostra sendo colocada no reômetro com o anel previamente posicionado; (b) esmagamento da amostra com 1 mm de *gap*; (c) inserção de água acima da geometria; (d) posicionamento do segundo anel de proteção.



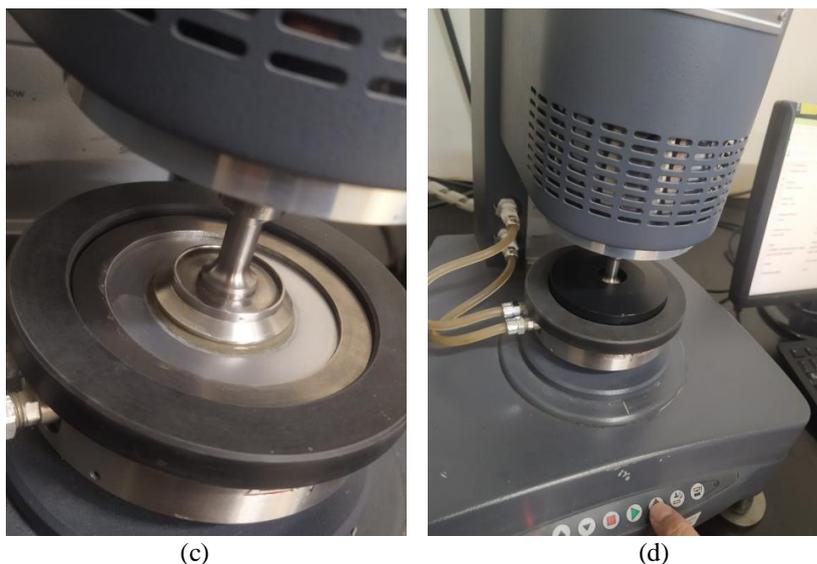
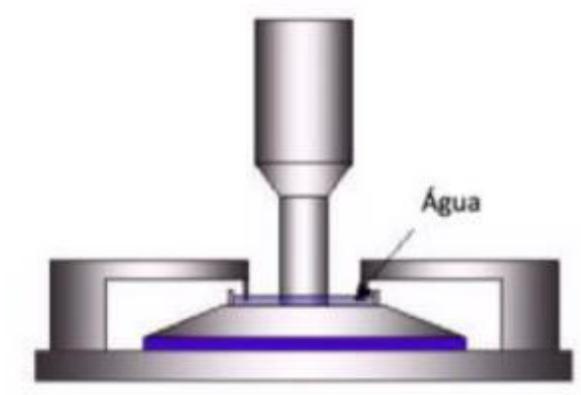


Figura 3.12 – Demonstração da amostra no equipamento com os anéis de proteção devidamente posicionados (Adaptado de TA INSTRUMENTS, 2010).



Dá-se início ao ensaio oscilatório, no qual a amostra sofre deformações durante um período de seis horas para que seja determinado o módulo elástico (G') e assim feita a verificação dos tempos de pega da pasta de cimento, demonstrando o ponto em que essa amostra sofre a mudança do comportamento de sólido elástico para líquido viscoso.

3.3.2.2 Influência do teor de sílica ativa

Após todos os ensaios realizados nas pastas de cimento com os aditivos químicos e determinados os seus teores ótimos, foram escolhidos os que obtiveram melhor desempenho, analisados do ponto de vista das propriedades reológicas e realizados novos ensaios de fluxo para retro-análise das propriedades reológicas das pastas.

Foram utilizados três teores de sílica ativa, de 8%, 10% e 12% em substituição a massa de

cimento Portland. A escolha desses teores foi baseada na literatura, onde o teor ideal de sílica encontra-se, geralmente, em torno de 10% do material e para a análise do seu comportamento nas propriedades reológicas, optou-se por testar também teores próximos ao ideal. Na tabela 3.8 a seguir encontra-se o proporcionamento das pastas de cimento, utilizando sempre as duas relações a/lig.

Com a realização dos ensaios de fluxo nas amostras descritas na tabela acima, foram analisados os seus resultados e determinado o aditivo com melhores propriedades e maior compatibilidade com o cimento utilizado na pesquisa. Com isso, seguiu-se para os próximos ensaios com um aditivo e três teores de sílica ativa.

Tabela 3.8 – Proporcionamento das pastas de cimento (g).

Pasta de Cimento	Cimento (g)	Sílica ativa (g)	Água (g)	Tipo de Aditivo	Teor de Aditivo (% em relação amassa de cimento)	
A4SA8	92	8	40	A	0,9 a 1,7	
A4SA10	90	10				
A4SA12	88	12				
A55SA8	92	8	55		G	0,7 a 1,5
A55SA10	90	10				
A55SA12	88	12				
G4SA8	92	8	40	G		1,5 a 2,5
G4SA10	90	10				
G4SA12	88	12				
G55SA8	92	8	55		G	1,0 a 1,5
G55SA10	90	10				
G55SA12	88	12				

3.3.3 Calorimetria por Condução Isotérmica

Para os ensaios de calorimetria por condução isotérmica foi utilizado um calorímetro *Thermometric*, modelo TAM AIR, fabricado pela *TA Instruments* (Figura 3.13), composto por oito canais com controle de temperatura e gerenciado pelo *software PicoLog* para controle dos parâmetros e aquisição de dados. A mistura das pastas foi executada externamente ao equipamento, uma vez que a mistura interna é insuficiente para a dispersão adequada dos materiais. Neste trabalho, a metodologia de ensaio seguiu instrução técnica de Furnas (FURNAS, 2020).

Figura 3.13 – Calorímetro utilizado na pesquisa: (a) equipamento utilizado modelo TAM AIR, fabricado pela *TA Instruments* e (b) canais do equipamento de calorimetria isotérmica.



Com a definição do aditivo a ser utilizado e a análise dos resultados obtidos dos ensaios feitos previamente, foi feito o ensaio de calorimetria de 8 pastas de cimento para avaliar a liberação de calor advinda das reações químicas do contato do cimento com a água e assim, analisando a influência da sílica ativa nas reações de hidratação das pastas de cimento. A composição das pastas que foram estudadas estão descritas na tabela 3.9. Os teores de aditivo escolhidos foram baseados nos teores determinados durante a composição dos concretos.

Tabela 3.9 – Proporcionamento das pastas de cimento para ensaio de calorimetria.

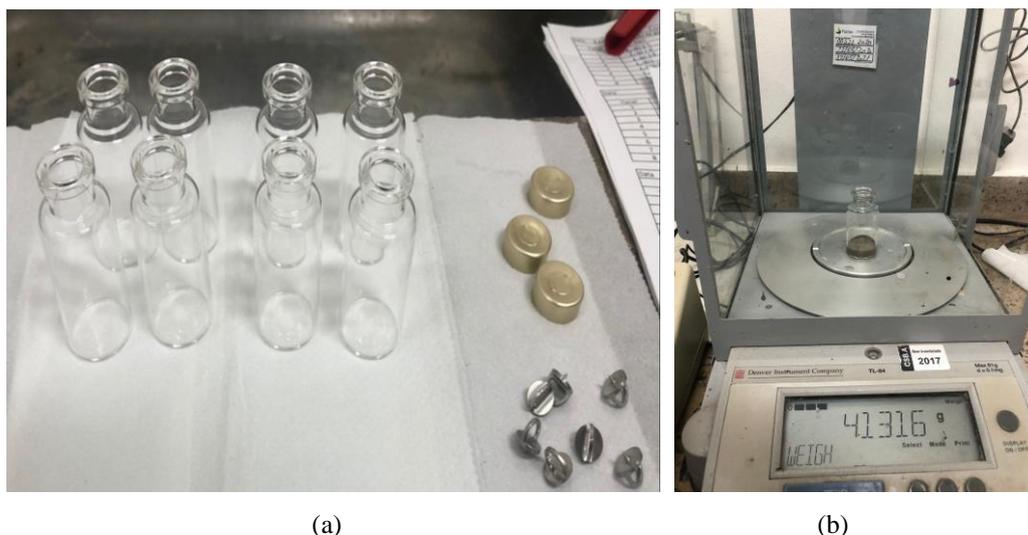
Pasta de Cimento	Cimento (g)	Sílica Ativa (g)	Água (g)	Tipo de Aditivo	Teor de Aditivo
REF04A	100	-			0,9
A4SA8	92	8	40	A	1,2
A4SA10	90	10			1,2
A4SA12	88	12			1,2
REF055A	100	-			0,7
A55SA8	92	8	55		0,7
A55SA10	90	10			0,7
A55SA12	88	12			0,7

Para dar início aos ensaios de calorimetria, primeiramente foi feita a determinação da linha de base do calorímetro ainda com os canais vazios. Após a mistura dos materiais, que foi realizada exatamente da mesma forma descrita no tópico de preparação das amostras para os ensaios de reologica, com um auxílio de uma pipeta foi inserido a amostra na ampola e feita a sua pesagem (Figura 3.14), seguida da execução do lacre das mesmas.

O calorímetro utilizado é composto por oito canais, como mencionado e cada canal tem dois compartimentos: um para introdução da ampola com a pasta de cimento e outro com a ampola vazia. Esse processo não ultrapassou o tempo de 15 minutos – contanto do primeiro contato do material sólido com o líquido até a inserção das ampolas no equipamento.

Após a colocação das amostras no calorímetro, foi dado o início da estabilização de sinal pelo equipamento (duração de 45 minutos), e então, de forma automática, o ensaio dava início à aquisição de dados – que tem a duração de 7 dias, com recolhimento de dados a cada três segundos.

Figura 3.14 – Etapas do ensaio de calorimetria, onde (a) ampolas utilizadas; (b) pesagem da ampola com a amostra de pasta de cimento



3.3.4 Concretos

Foram estudados concretos com a finalidade de obter dosagens e tentar associar propriedades em seu estado fresco a partir dos resultados encontrados nos ensaios reológicos realizados nas pastas de cimento. Assim, após a escolha do aditivo químico com melhor eficácia na etapa anterior, este foi combinado a três teores de sílica ativa (8%, 10% e 12%), mantendo-se as mesmas relações a/lig, estudadas anteriormente (0,40 e 0,55).

Foram efetuados ensaios de medida da abertura pelo ensaio de tronco de cone invertido, Funil V, caixa L e ensaios reológicos no estado fresco. No estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão na idade de 3, 7, 28 e 63 dias (ABNT NBR 5739/2018) e de módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522/2021); absorção de água, índice de vazios, e massa específica (ABNT NBR 9778/2005) e absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779/2012) na idade de 28 dias. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Furnas e no Laboratório de Inovação tecnológica em Construção Civil – LABITECC da UFG.

3.3.4.1 Proporcionalamento dos concretos

O concreto escolhido foi o concreto tipo autoadensável, por demandar propriedades reológicas muito relevantes a sua aplicabilidade. O seu proporcionalamento foi baseado no método de Furnas (módulo de finura da mistura) e na literatura. Dessa forma, foram realizados testes pilotos de proporcionalamento e dosagens dos concretos com ajustes no consumo de cimento por metro cúbico. A proporção definida para os concretos estudados está apresentada na Tabela 3.10.

O cimento, o aditivo químico e a sílica ativa foram os mesmos utilizados em etapa anterior da pesquisa no estudo das pastas. Os agregados miúdos e graúdos também foram descritos anteriormente. Foi utilizado o teor ótimo do aditivo A nas misturas, um superplastificante de base química policarboxilato, também obtido em etapa prévia das pastas de cimento.

Tabela 3.10 – Proporcionalamento dos concretos estudados.

Concreto	Teor de adição de sílica ativa (%)	Relação a/agl	Cimento (kg/m ³)	Sílica ativa (kg/m ³)	Água unitária (kg/m ³)	Areia natural (kg/m ³)	Brita 19 mm (kg/m ³)	Aditivo químico (kg/m ³)	Aditivo em relação a massa de cimento (%/m ³)
REF04	0%	0,40	577	0,0	231	690	833	5,19	0,90
4SA8	8%	0,40	527	45,8	229	685	828	6,89	1,31
4SA10	10%	0,40	516	57,3	229	685	828	6,89	1,34
4SA12	12%	0,40	506	69,0	230	687	831	6,90	1,36
REF055	0%	0,55	454	0,0	250	723	809	3,19	0,70
55SA8	8%	0,55	423	36,8	253	733	820	3,22	0,76
55SA10	10%	0,55	413	45,9	252	731	818	3,21	0,78
55SA12	12%	0,55	402	54,8	251	728	815	3,20	0,80

3.3.4.2 Processo de mistura, ensaios no estado fresco, moldagem, armazenamento, cura, e ensaios no estado endurecido dos concretos

Todo o processo de mistura dos materiais foi realizado em misturador mecanizado (betoneira) com capacidade para 50 litros e de acordo com uma metodologia padronizada no Laboratório de Furnas. Para todas as dosagens, seguiu-se a mesma ordem de colocação de materiais na betoneira e o mesmo tempo de mistura, retirando apenas a etapa da inserção da adição de sílica ativa e totalizando 6 minutos de mistura:

- (a) primeiramente foi realizada a imprimação da betoneira (Figura 3.15a), com uma quantidade de material aleatória, sendo estes os mesmos materiais utilizados na dosagem dos concretos. Após isso, essa mistura foi descartada (Figura 3.15b);
- (b) em seguida, foram adicionadas na betoneira a pedra britada, a areia natural, a sílica ativa e a água para uma mistura inicial dos materiais e 1 minuto. A sílica ativa foi dispersa em 70% da água de amassamento (Figura 3.15d);
- (c) com a betoneira parada, o aditivo foi disperso no restante da água de amassamento (aproximadamente 30%), adicionado o cimento à betoneira e rotacionada por mais 5 minutos, perfazendo um total de 6 minutos de mistura.

Figura 3.15 – Processo de fabricação dos concretos, onde (a) betoneira utilizada nas misturas; (b) descarte da “pré-mistura” antes das dosagens; (c) materiais a serem inseridos na betoneira; (d) dispersão da sílica ativa em água e (e) concreto após a mistura.



Foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone, *slump flow* ou espalhamento (Figura 3.16) de acordo com a NBR 15823-2 - Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams (ABNT, 2017a), ensaio de Funil V (Figura 3.17), de acordo com a NBR 15823-5 - Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - método do funil V (ABNT, 2017b) e o ensaio de Caixa L (Figura 3.18), de acordo com a NBR 15823-4 - Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U (ABNT, 2017c).

A norma NBR 15823-2 - Concreto autoadensável - Parte 2 (ABNT, 2017a) classifica três classes de espalhamento, determinado por meio da média aritmética de duas medidas do diâmetro do espalhamento final do material. A classe SF1 é determinada por um espalhamento na faixa de 550 a 650 mm, a classe SF2 é determinada pelo espalhamento na faixa de 660 a 750 mm e, por último, a classe SF3 determinada pelo espalhamento na faixa de 760 a 850 mm. A norma indica diferentes tipos de uso a depender da classe em que o material se encaixa.

Além disso, foi medido ainda o teor de ar pressométrico das misturas (ABNT, 2002). Como o intuito desses ensaios foi a comparação dos resultados obtidos nas pastas de cimento com os resultados obtidos nos concretos, não foram fixados parâmetros de trabalhabilidade para esses concretos, mas sim um estudo de como eles se comportaram com as dosagens fixadas.

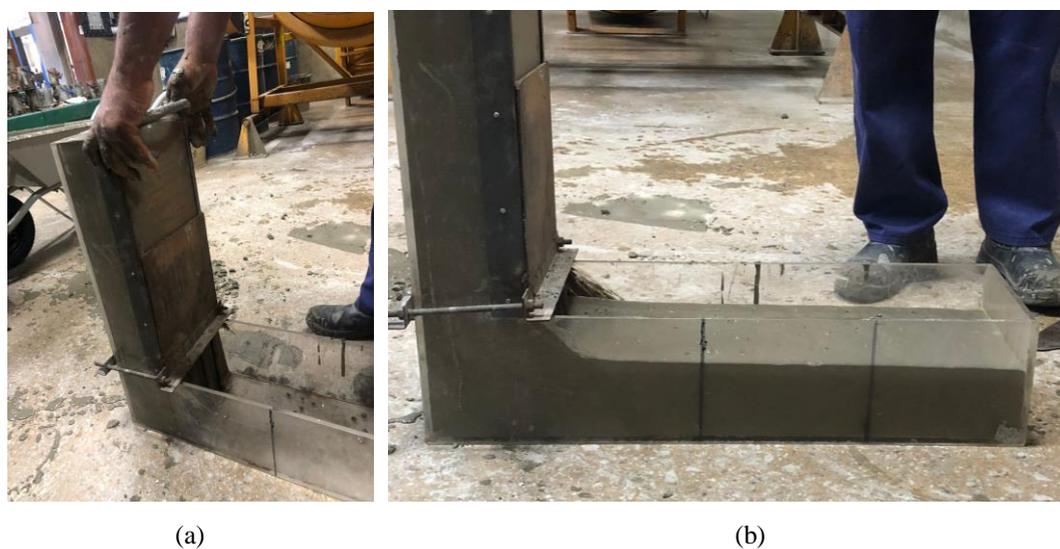
Figura 3.16 – Ensaio de espalhamento ou *slump flow* realizado (ABNT, 2017b).



Figura 3.17 – Ensaio do Funil V realizado, conforme norma brasileira (ABNT, 2017b): (a) antes da colocação do concreto e (b) já com o concreto e antes de abrir o “fecho” inferior.

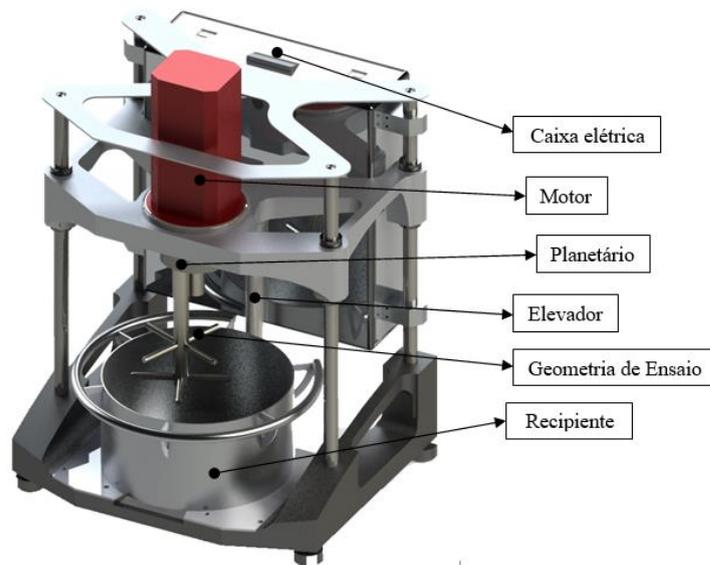


Figura 3.18 – Ensaio da Caixa L realizado, conforme norma brasileira (ABNT, 2017c): (a) antes da abertura da “comporta” e (b) após a abertura da “comporta”.



Para os parâmetros reológicos desses concretos foi utilizado um reômetro, modelo PHESO (Figura 3.19), que permite aplicar taxas de cisalhamento variadas ao material, por meio de um sistema com geometria com aletas. Ele possui recipiente de 20 litros.

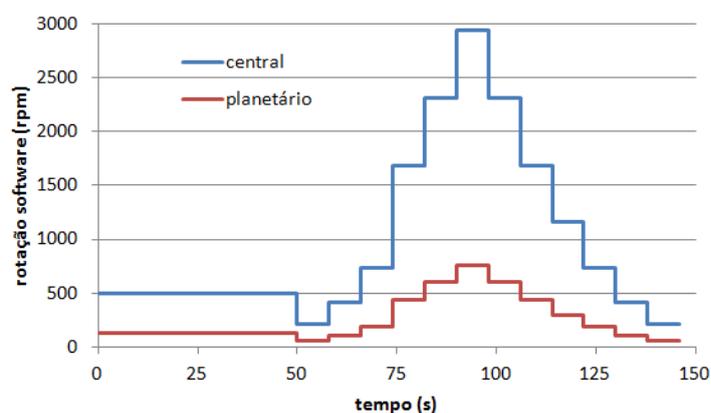
Figura 3.19 – Reômetro PHESO utilizado na pesquisa.



Este reômetro possui um sistema de fixação das pás – realizado por meio de rosca, que torna possível acoplar um dispositivo adaptador para fixar elementos centrais no eixo central do planetário, fazendo com que o equipamento seja equivalente a um reômetro de cilindros concêntricos (PILEGGI, 2001). O equipamento é conectado a um computador que faz a leitura e sintetização dos dados do ensaio.

O sistema computacional para controle e aquisição dos dados do ensaio foi o *software* SCI-R Controller v. 2.0.1. Têm-se, então, dois programas padrões, um para cada eixo (central e planetário), demonstrados na Figura 3.20. O equipamento variou controladamente a rotação, em rotações por minuto (rpm), transferindo-a, por meio da geometria, para a mistura a ser analisada. Para cada rotação foi medido a resistência do material ao fluxo imposto sob diferentes condições, ou seja, a viscosidade aparente.

Figura 3.20 – Programas padrão (Instrução técnica de Furnas, 2020).



Rotação no eixo	Rotação no software, se eixo	
	central	planetário
24	500	131
10	210	55
20	420	109
35	735	191
55	1155	300
80	1680	436
110	2310	600
140	2940	764

Antes de se iniciar o ensaio, foram feitos testes iniciais no equipamento com a cuba vazia (sem material) para a sua calibração. Esta calibração foi lida, na interpretação dos dados, como uma linha de base e foi subtraída do resultado final. Para a realização do ensaio foi coletado parte do material retirado da betoneira e colocado na cuba do equipamento (Figura 3.21).

O ensaio tem duração de cinco minutos, no qual se tem a descida da geometria para início da rotação das pás. Estas giram no modelo planetário anti-horário, realizando dois ciclos de aceleração e desaceleração, sendo que as misturas foram submetidas a ciclos de cisalhamento em escada, visto no gráfico da Figura 3.22, que variaram entre 55 rpm e 750 rpm, finalizado com a subida da geometria. Esse tipo de ensaio proporcionou a elaboração de curvas de cisalhamento que levaram à verificação da eficiência de dispersão das partículas (que está relacionado com a eficiência do misturador) e permitiu ainda identificar a natureza reológica da mistura de cada concreto. A realização do ensaio pode ser visualizada na Figura 3.23.

Figura 3.21 – Execução de ensaio reológico no concreto: (a) antes e (b) após a colocação do concreto na cuba do equipamento.



(a)

(b)

Figura 3.22 – Gráfico com os ciclos de ensaio de reologia no concreto.

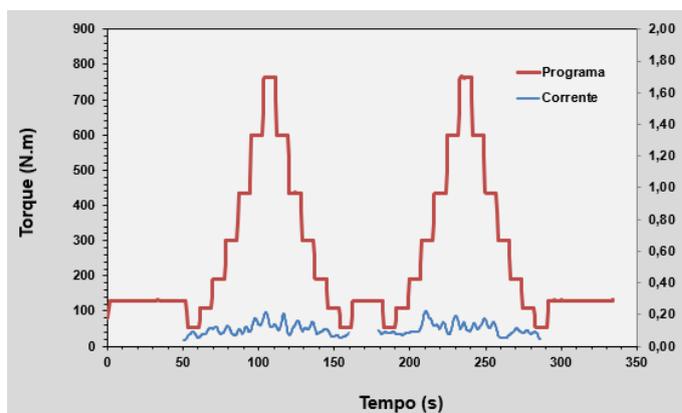


Figura 3.23 – Realização do ensaio no reômetro de concreto.



Após os ensaios no estado fresco, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 mm (Figura 3.24). Teve-se como referência a norma NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015). Os corpos de prova permaneceram no laboratório em sala climatizada até a sua retirada dos moldes em 3 dias. Em seguida, os corpos de prova foram conduzidos para sala climatizada (com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade maior ou igual a 95%) em condição de cura até a idade de ensaios.

Para a caracterização mecânica e ensaios de absorção de água, moldou-se 21 corpos de prova para cada tipo de concreto com relação a/lig 0,40 e 18 corpos de prova para cada tipo de concreto com relação a/lig 0,55, devido à limitações de material no final da pesquisa.

Figura 3.24 – Corpos de prova de 10x20 cm utilizados.



Foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade para a caracterização mecânica dos concretos produzidos. Dessa forma, os corpos de prova produzidos foram rompidos à compressão aos 3, 7, 28 e 63 dias de idade para o ensaio de resistência (ABNT, 2018) e a medida do módulo de elasticidade foi verificada aos 28 dias (ABNT, 2021). Foi obtida a média de 3 corpos de prova para cada ensaio, idade e tipo de concreto. Foi utilizada uma máquina de ensaio DL 1000 da fabricante EMIC com capacidade de 1000 KN, localizada no Laboratório de Furnas. Para os ensaios de absorção de água por capilaridade (Figura 3.25) (ABNT, 2005) e absorção por imersão (ABNT, 2012) foram produzidos, também, 3 réplicas de corpos de prova. Entretanto, para os concretos de relação a/lig 0,55, foram produzidas somente os ensaios de absorção por imersão. Esses ensaios foram realizados no LABITECC/UFG na idade de 28 dias.

Figura 3.25 – Ensaio de absorção por capilaridade.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados do programa experimental proposto na pesquisa. A partir desses resultados, foi possível compor e discutir sobre os teores ótimos e a eficiência dos aditivos químicos e os teor mais otimizado de adição de sílica ativa, relacionando os ensaios reológicos e os ensaios de calorimetria nas pastas de cimento.

Ainda foram discutidos e correlacionados os resultados dos ensaios feitos nos concretos e, ao final, validado um protocolo de procedimentos, nomeado de instrução técnica de ensaio de reologia em pastas de cimento, exibido no apêndice C.

4.1 RESULTADOS DAS PASTAS DE CIMENTO

Nesta seção estão apresentados e discutidos os resultados obtidos com os ensaios reológicos do tipo fluxo e oscilatório, realizados nas pastas de cimento com os aditivos químicos com a intenção de determinar o melhor e mais compatível aditivo químico com o tipo escolhido para a pesquisa .

Além disso, após essa condução para escolha dos aditivos mais eficientes, foram realizados ensaios de fluxo em pastas de cimento contendo sílica ativa nos teores de 8%, 10% e 12% (teores de substituição de cimento em massa) na tentativa de determinar a sua influência (e melhor teor), de acordo com as propriedades das pastas de cimento. Outros resultados de ensaios efetuados, como calorimetria serão discutidos e associados entre si.

4.1.1 Pastas de Cimento com Aditivos Químicos: Ensaio de Fluxo

Os ensaios para avaliação da compatibilidade entre o cimento e os aditivos e para determinação do ponto de saturação do aditivo (teor considerado ótimo) foi realizado somente com cimento, água e aditivos químicos. Assim, as Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados de viscosidade e tensão de cisalhamento (ensaio de fluxo). Nas Figuras 4.1 a 4.7 estão

apresentados graficamente as curvas de taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento *versus* viscosidade para os aditivos estudados.

Não foi possível executar o ensaio com a pasta de referência (sem aditivos) na relação a/lig de 0,40 devido à sua alta viscosidade, ultrapassando o limite de exequibilidade do reômetro.

Tabela 4.1 – Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento nas pastas estudadas nas relações a/lig 0,40 de acordo com os teores de aditivo utilizados para os aditivos “A, B e C, D, E, F e G”.

PASTA	Teor de Aditivo (%)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)
REF	0,0	-	-
	0,3	1,11	435,25
Aditivo “A” tipo RA2 – Superplastificante	0,5	0,82	321,55
	0,7	0,36	142,30
	0,9	0,30	117,50
	1,2	0,26	103,50
	1,5	0,24	92,60
	1,7	0,27	105,35
	Aditivo “B” tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	0,3	0,86
0,5		0,99	335,75
0,7		0,89	347,85
0,9		0,82	321,45
1,2		0,69	271,60
1,5		0,59	230,80
2,0		0,54	211,80
2,5		0,38	147,25
3,0		0,26	100,68
4,0		0,23	88,21
5,0		0,23	91,29
Aditivo “C” tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	6,0	0,23	88,45
	0,3	1,05	409,30
	0,5	0,96	374,80
	0,7	0,82	249,90
	0,9	0,75	294,60
	1,2	0,69	272,00
	1,5	0,67	214,90
	2,0	0,55	244,40
	2,5	0,38	148,20
	3,0	0,28	109,50
	3,5	0,23	89,80
Aditivo “D” tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	4,0	0,25	96,70
	5,0	0,23	88,40
	0,2	0,73	284,40
	0,4	0,77	302,20
	0,6	0,60	234,10
	0,8	0,78	304,40
	1,0	0,61	238,60
1,5	0,48	186,50	
2,0	0,48	187,60	

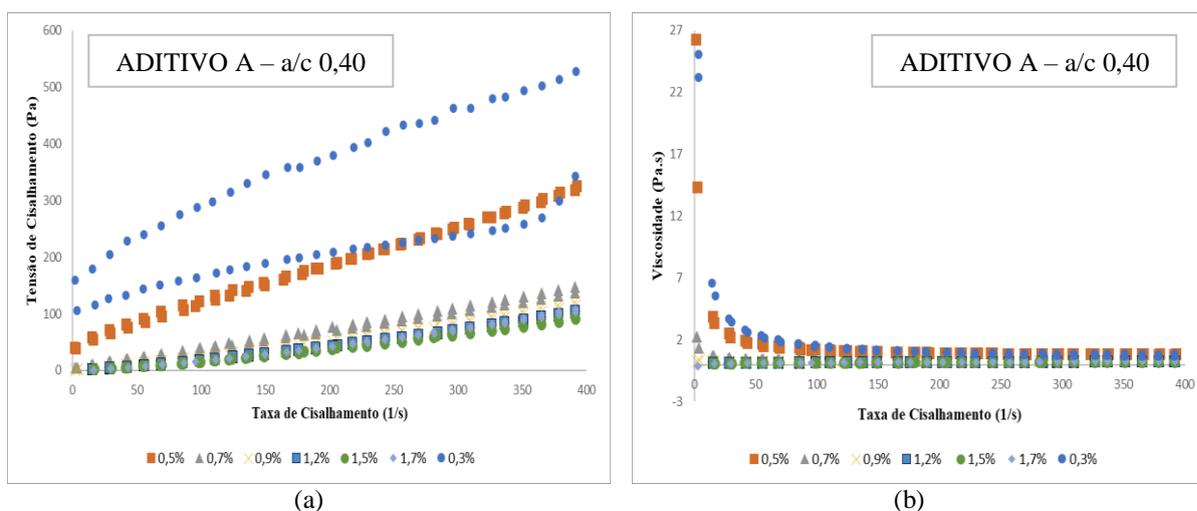
	0,6	1,03	401,50
	0,8	0,95	371,70
Aditivo “E”	1,0	0,75	295,00
	1,5	0,47	177,50
tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	2,0	0,52	224,60
	3,0	0,43	166,70
	4,0	0,53	206,00
	5,0	0,48	187,00
	0,6	0,79	309,80
	0,8	0,86	335,70
Aditivo “F”	1,0	0,65	254,80
	1,5	0,43	166,50
tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	2,0	0,44	171,50
	2,5	0,33	128,80
	3,0	0,32	121,50
	0,6	0,97	378,90
	0,8	0,59	228,90
Aditivo “G”	1,0	0,33	129,40
	1,2	0,30	116,20
tipo RA2 – Superplastificante	1,5	0,21	82,20
	2,0	0,25	97,90
	2,5	0,21	82,90

Tabela 4.2 – Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento pastas estudadas nas relações a/lig 0,55 de acordo com os teores de aditivo utilizados – para os aditivos “A, B e C, D, E, F e G”.

PASTA	Teor de Aditivo (%)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de cisalhamento (Pa)
REF	0,0	0,52	202,40
	0,1	0,21	81,82
	0,3	0,16	64,10
	0,5	0,10	38,22
Aditivo “A”	0,7	0,06	25,33
	0,9	0,08	30,27
tipo RA2 – Superplastificante	1,2	0,06	22,51
	1,5	0,07	28,08
	0,1	0,20	77,51
Aditivo “B”	0,3	0,20	79,50
	0,5	0,16	60,95
tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	0,7	0,16	62,95
	0,9	0,14	55,31
	0,1	0,21	80,90
Aditivo “C”	0,3	0,16	64,20
	0,5	0,18	68,70
tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	0,7	0,17	67,20
	0,9	0,15	58,00
	0,1	0,23	89,70
Aditivo “D”	0,2	0,18	71,80
	0,4	0,21	80,40
tipo RA 01 – Polifuncional plastificante	0,6	0,19	73,70

	0,8	0,12	46,40
	1,0	0,08	30,20
	1,5	0,04	14,10
	2,0	0,03	12,80
	0,2	0,16	63,10
	0,4	0,21	81,90
	0,6	0,16	61,70
	0,8	0,07	27,80
	1,0	0,05	18,70
	1,2	0,04	16,50
	1,5	0,04	16,50
	0,3	0,21	80,80
	0,6	0,15	58,10
	0,7	0,11	42,80
	0,9	0,09	36,40
	1,5	0,05	20,70
	2,0	0,07	25,80
	0,1	0,19	74,70
	0,3	0,19	75,20
	0,5	0,11	44,20
	0,7	0,06	23,20
	1,0	0,03	11,70
	1,2	0,02	8,70
	1,5	0,02	8,40

Figura 4.1 – Gráfico do desempenho do aditivo A: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,55.



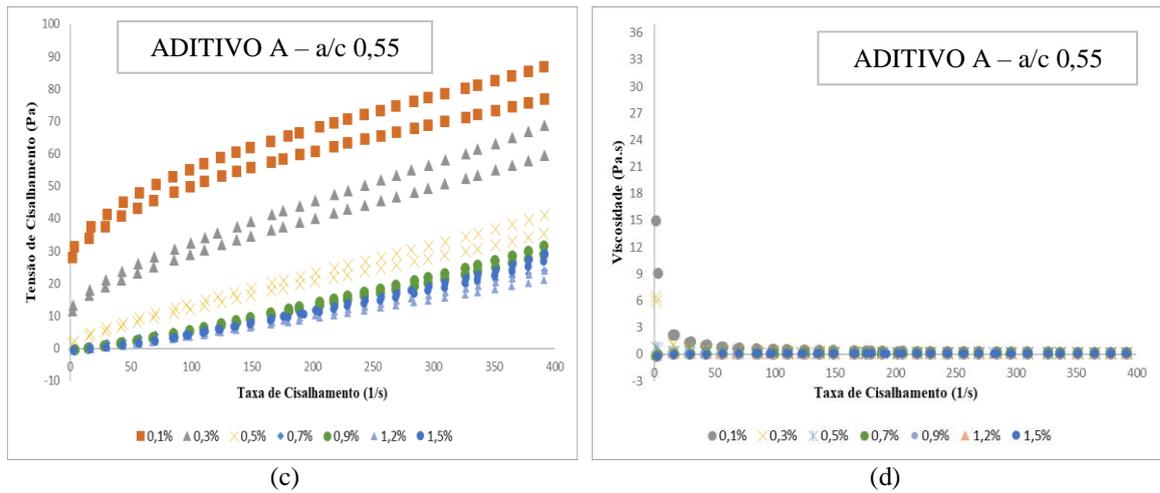


Figura 4.2 – Gráfico do desempenho do aditivo B: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,55.

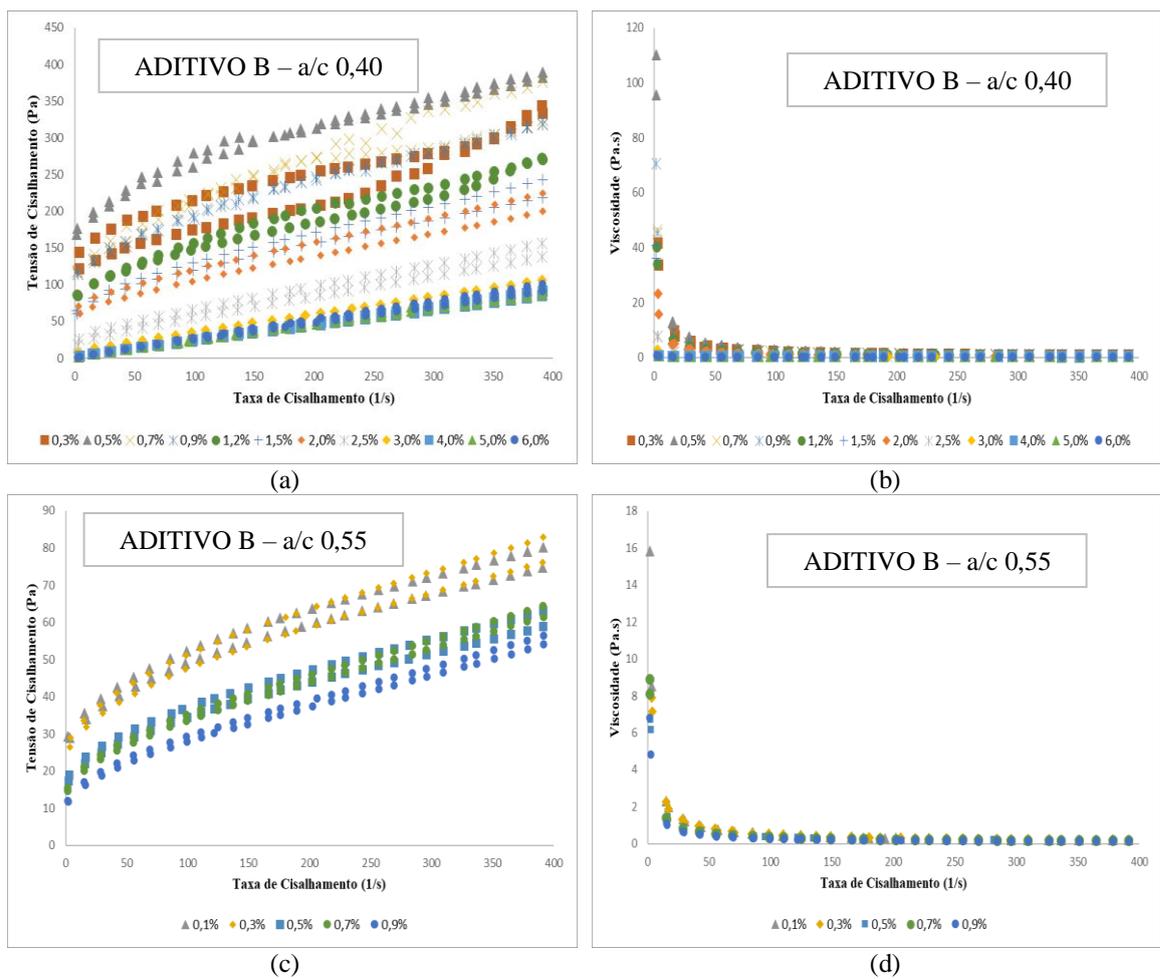


Figura 4.3 – Gráfico do desempenho do aditivo C: (a) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,55.

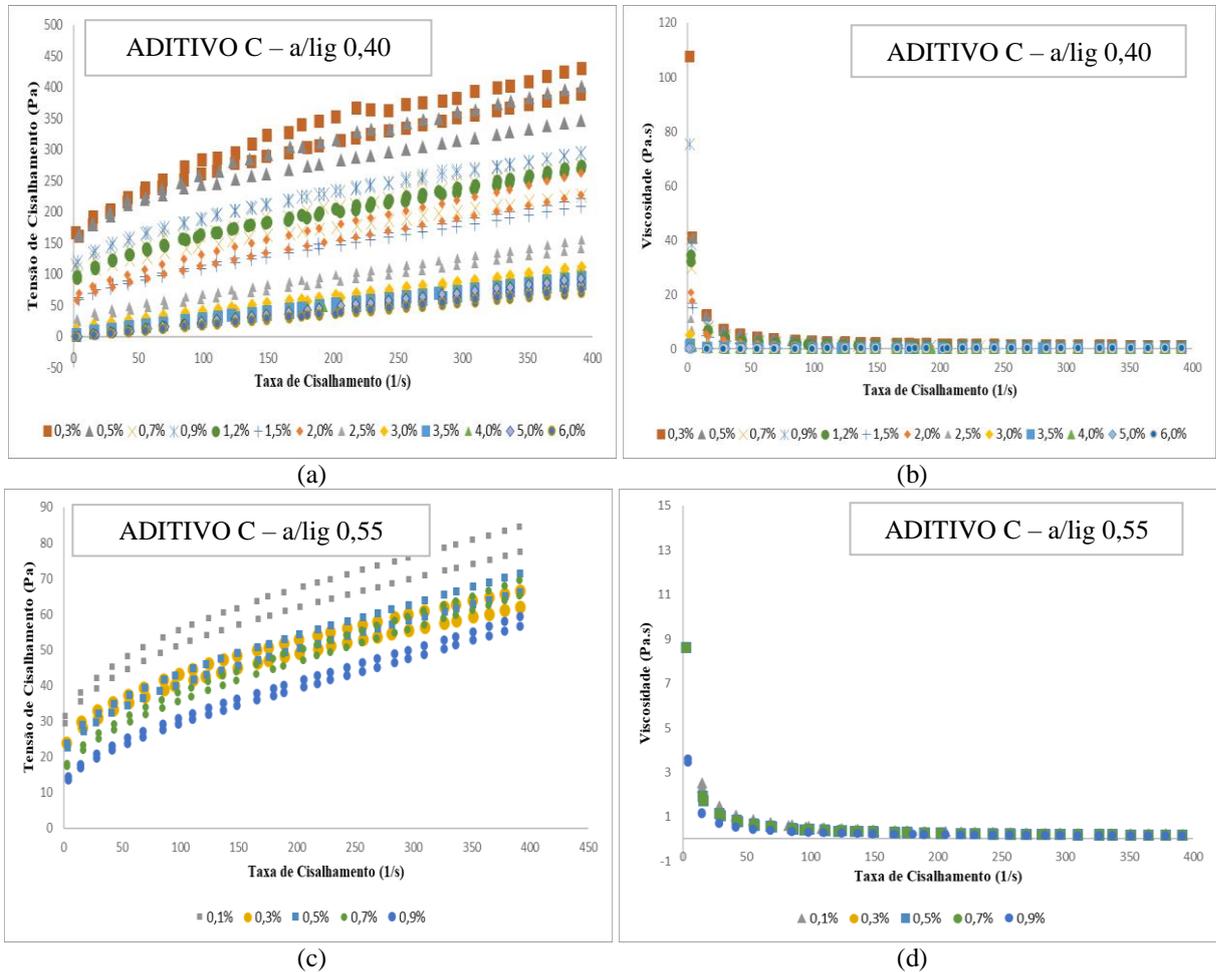
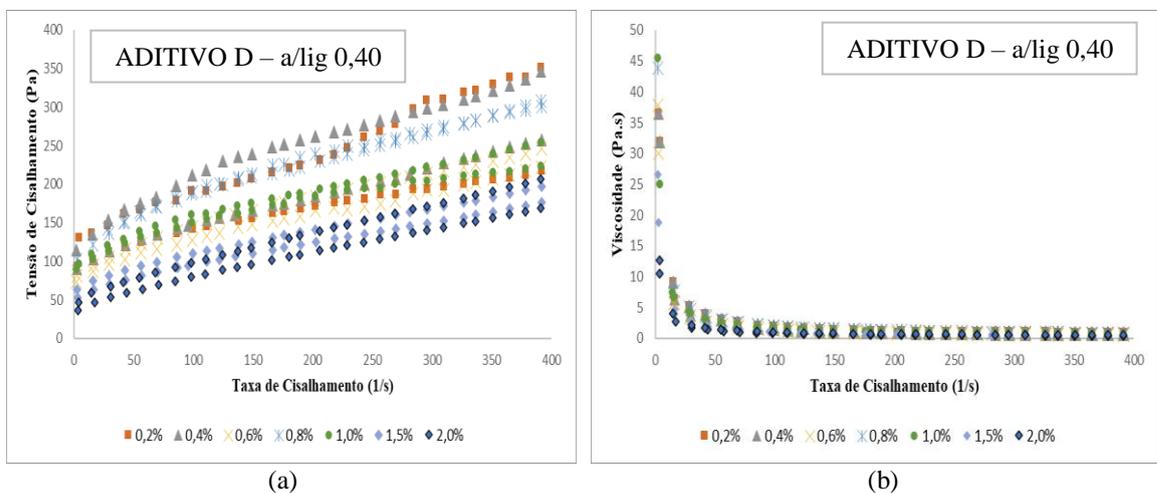


Figura 4.4 – Gráfico do desempenho do aditivo D: (a) taxa de cisalhamento *versus* ensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,55.



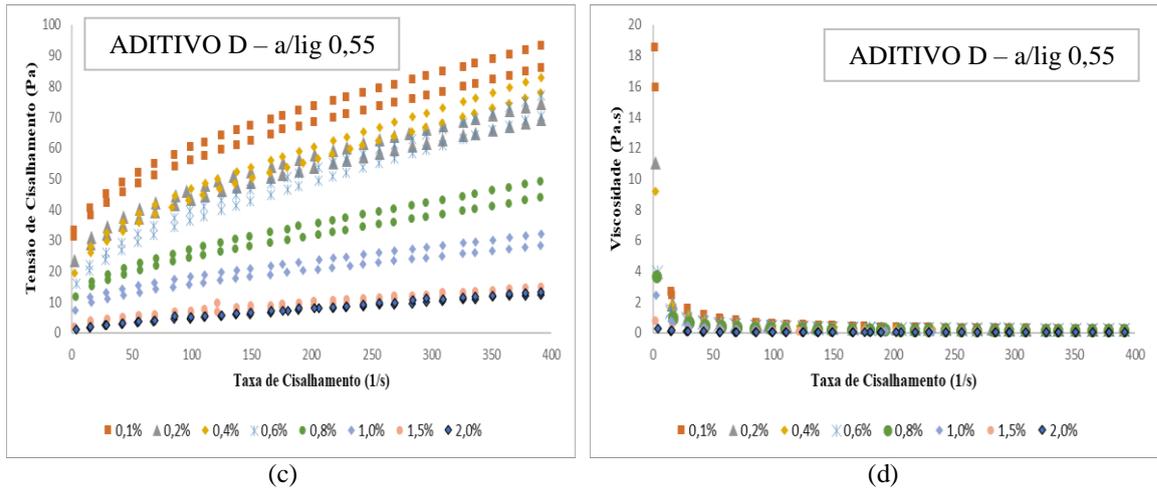


Figura 4.5 – Gráfico do desempenho do aditivo E: (a) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento x viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,55.

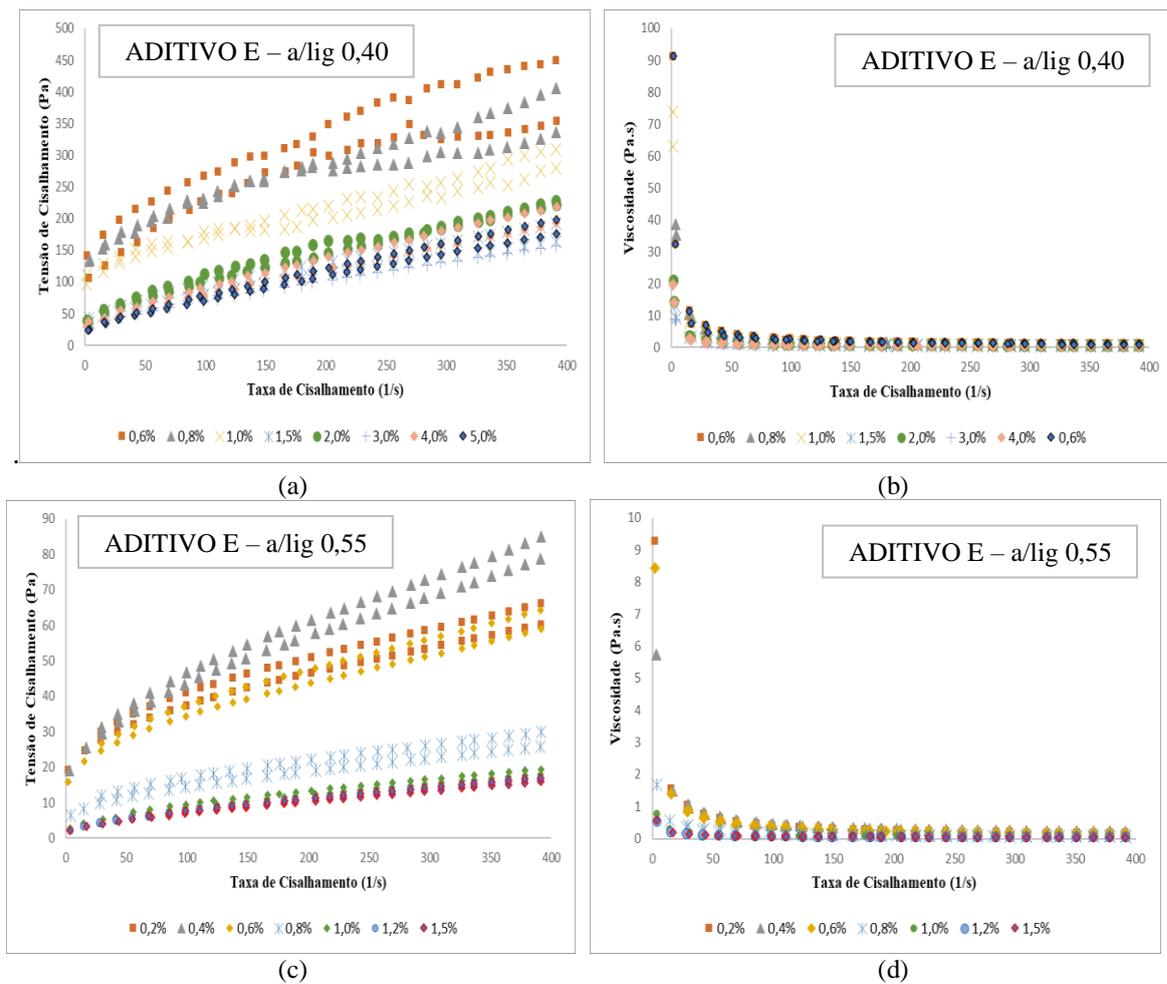


Figura 4.6 – Gráfico do desempenho do aditivo F: (a) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,55.

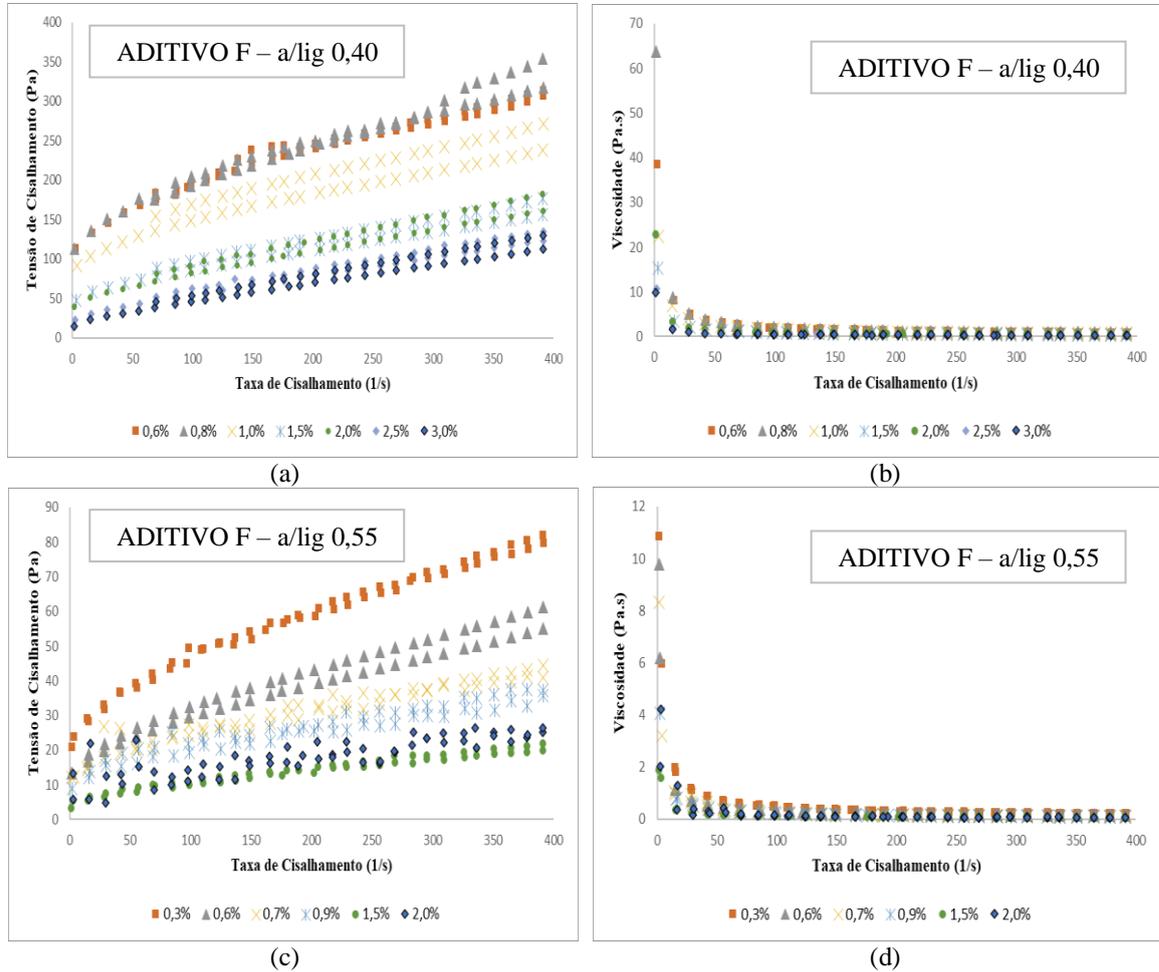
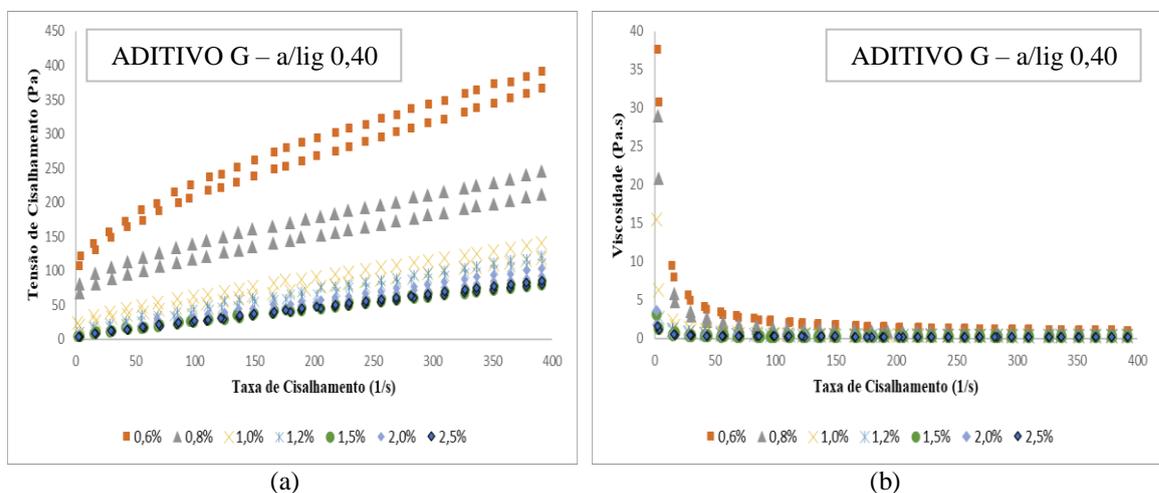
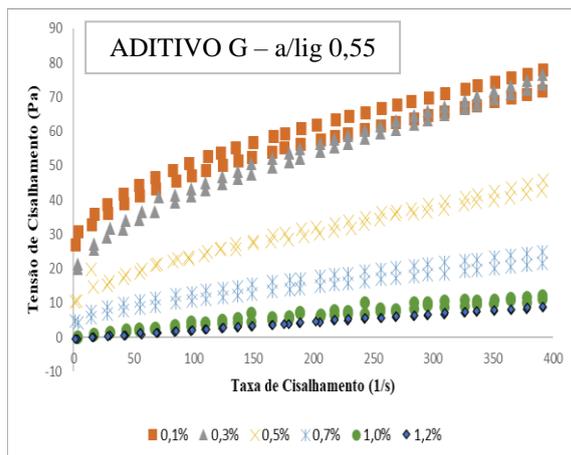
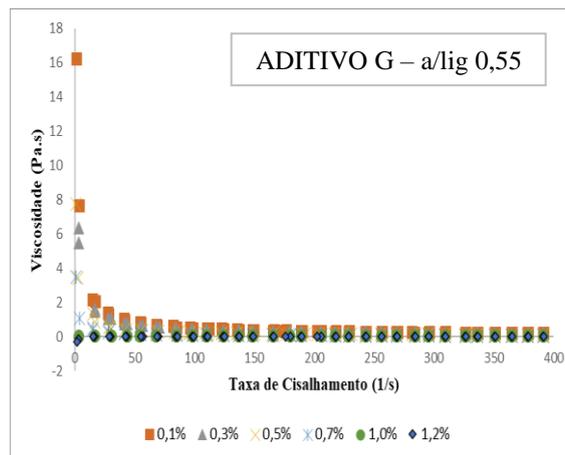


Figura 4.7 – Gráfico do desempenho do aditivo G: (a) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,40; (b) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,40; (c) taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do relação a/lig 0,55; (d) taxa de cisalhamento *versus* viscosidade relação a/lig 0,55.





(c)



(d)

Observando-se as tabelas e as figuras, entende-se, como comportamento geral e esperado que à medida que se aumentou o teor de aditivo utilizado, se reduziu a viscosidade da pasta. Esse percentual de redução deu-se em escalas diferentes, mas ocorreu para as duas relações a/lig estudadas e para os sete tipos de aditivos químicos avaliados.

Notou-se também que os parâmetros reológicos convergiram para um resultado esperado: de comportamento pseudoplástico, típico de pastas de cimento no qual com o acréscimo do teor de aditivo químico, a viscosidade e a tensão de cisalhamento diminuiram, isto é, a pasta ficou mais fluída e a aumentou a sua trabalhabilidade.

A literatura relata valores de tensão de escoamento para pastas de cimento variando de 10 Pa a 100 Pa, viscosidade de 0,01 Pa.s a 1,0 Pa.s (BANFILL, 2003). Alguns estudos também trazem valores similares aos encontrados na pesquisa, como no artigo de Agostinho *et al.* (2021) que faz o uso de superplastificantes e obtém resultados de viscosidade em uma faixa de 0,5 a 1,2 Pa.s e tensões de escoamento entre 50 e 250 Pa. No artigo de Zhang *et al.* (2022) que também trata do efeito de superplastificantes em suas misturas traz valores de viscosidade na faixa de 0,8 a 2,0 Pa e de tensão de escoamento entre 15,0 e 50,0 Pa, a depender da quantidade de aditivo e relação a/lig utilizados. Em geral, os valores oscilaram em torno do intervalo proposto por Banfill (2003).

Em uma análise mais detalhada, um maior efeito na redução da viscosidade foi observado com o uso dos aditivos “A” e “G” para as pastas de ambas as relações a/lig. Isto provavelmente pode ser explicado pelo alto teor de sólido desses aditivos, uma vez que esse teor representa a eficiência do aditivo, já que possui maior quantidade de polímeros, sendo de 32,82% para o aditivo “A” e de 46,03% para o aditivo G, se comparados aos baixos teores dos

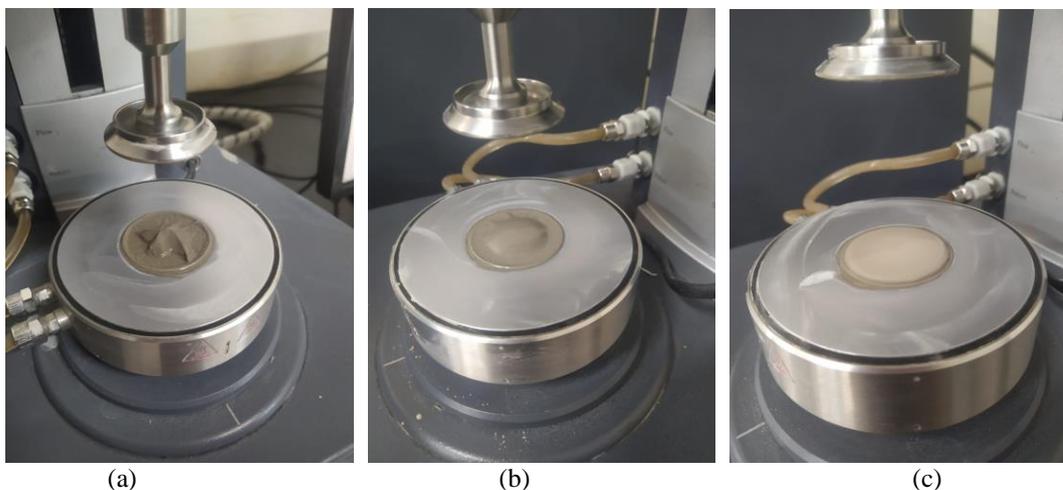
outros aditivos. Esse comportamento somente confirmou o que se espera diante do uso de superplastificantes, os quais tem influência maior na dispersão da composição dos materiais cimentícios se comparados a aditivos polifuncionais/plastificantes.

Ademais, especificamente para as pastas de relação a/lig 0,40, menores teores dos aditivos “A” e “G” foram necessários para se obter menores valores de viscosidade. Já para a pasta de relação a/lig 0,55, o uso de pequenas porcentagens para todos os aditivos fez com que os valores de viscosidade reduzissem em mais de 50% em relação à pasta de referência, sem aditivo. Isto está relacionado a maior quantidade de água das pastas de relação a/lig 0,55, sendo possível ver pelas tabelas que, para todos os aditivos com essa relação a/lig o comportamento de declínio da viscosidade é similar. O simples acréscimo de água, alterando a relação a/lig de 0,40 para 0,55 nas pastas, já reduziu significativamente a tensão de cisalhamento.

Com exceção do aditivo “A”, à medida que os ensaios foram sendo realizados com os outros aditivos, percebeu-se que estes não atingiam a estabilidade no valor da viscosidade, para a relação a/c 0,40. Logo, os teores utilizados desses aditivos foram excedidos em relação ao valor recomendado pelo fabricante até que este atingisse a estabilidade (que será vista mais adiante nos gráficos de teor de aditivo *versus* viscosidade). É importante enfatizar que foram realizadas correções nas quantidades de água acrescentadas à mistura para manter a relação a/lig pré-estabelecida, conforme o acréscimo do teor de aditivo, considerando seus teores de sólidos.

Na Figura 4.8, em caráter representativo dos resultados de ensaios obtidos, é possível observar diferentes resultados obtidos dos ensaios de acordo com a quantidade de aditivo escolhido. Na Figura 4.8a, a pasta ainda estava muito viscosa e com quantidade insuficiente de aditivo. Na Figura 4.8c, a pasta teve uma quantidade de aditivo excedente, uma vez que apresentou exsudação. Assim, analisando-se visualmente, o ideal é a consistência da pasta, observada na figura 4.8b (que foi obtida a partir de valores intermediários de aditivos para a maioria dos aditivos testados).

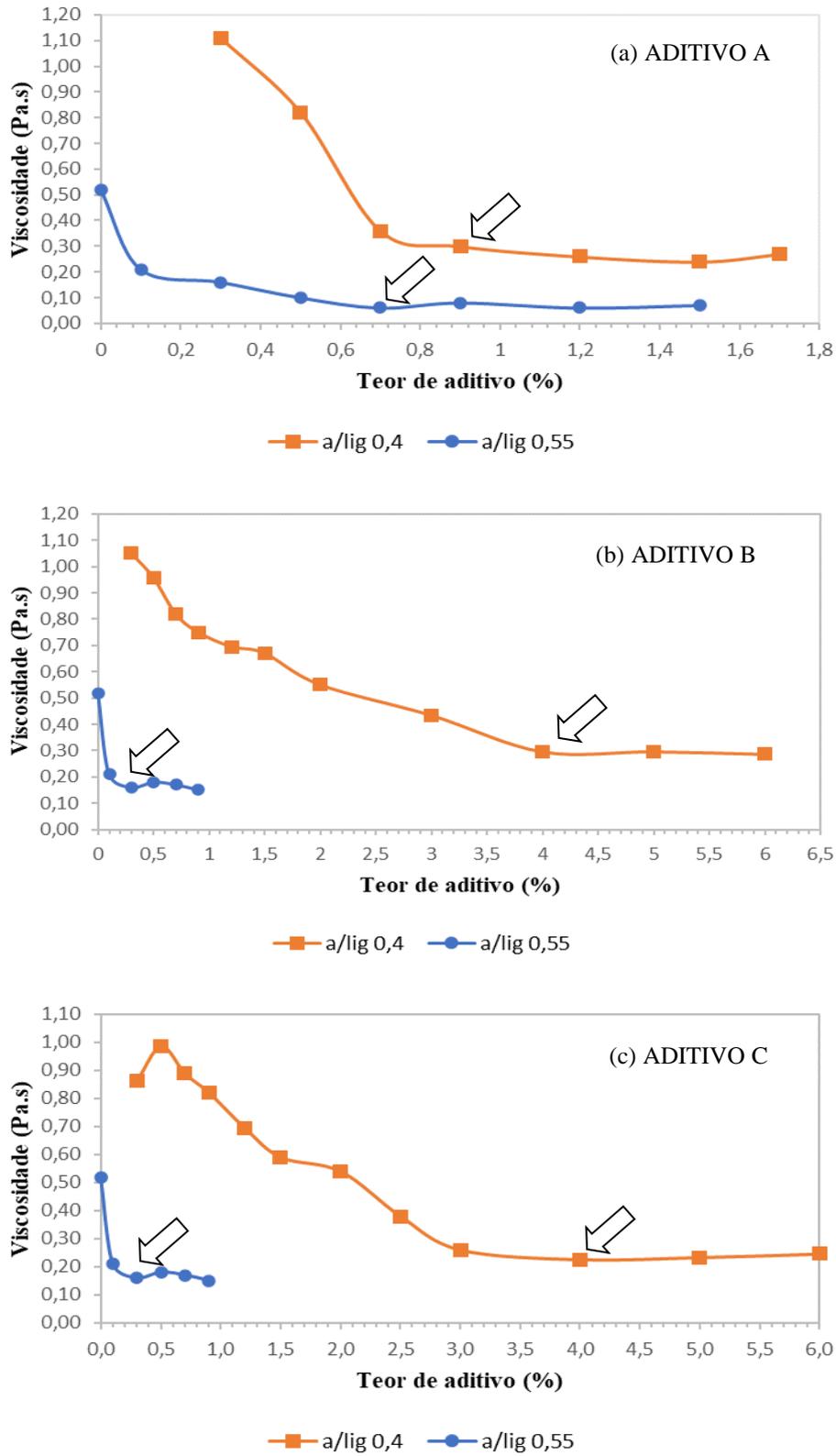
Figura 4.8 – Resultado visual representativo do comportamento obtido nos ensaios de fluxo nas pastas estudadas: (a) condição viscosa, (b) condição trabalhável e (c) condição muito fluida e exsudada.

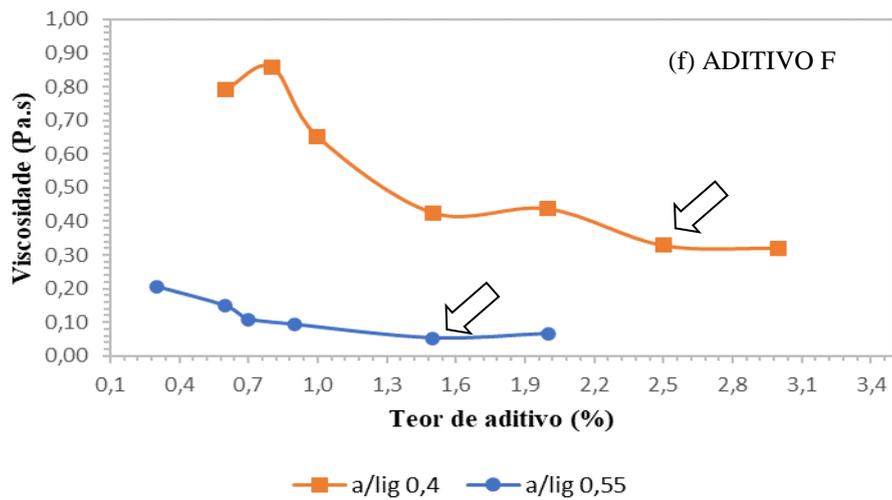
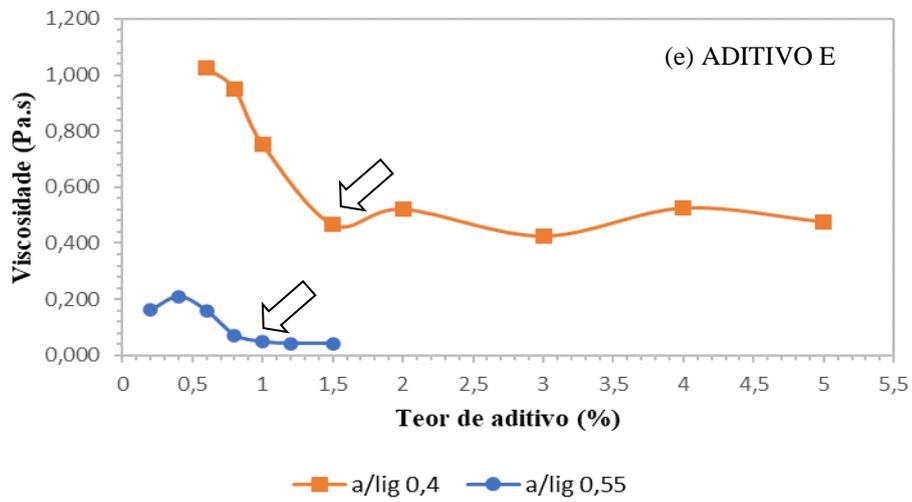
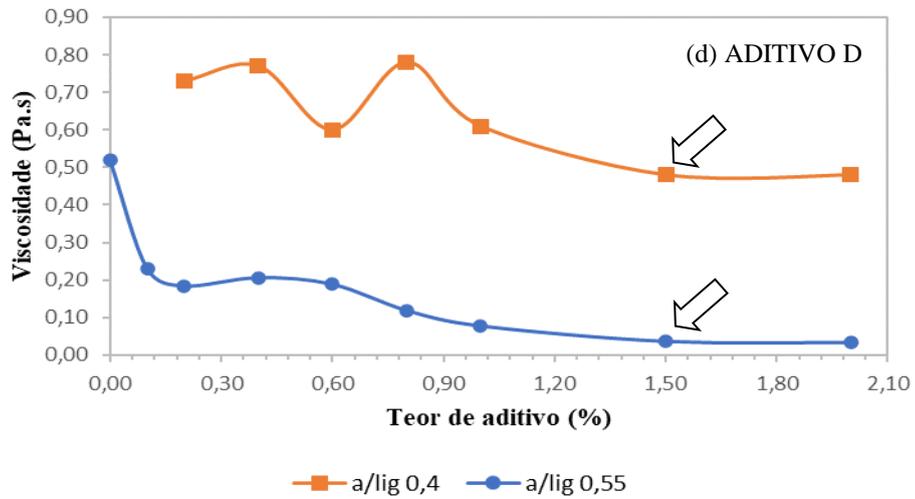


Uma importante observação a ser feita é que as pastas de cimento contendo uma relação a/lig de 0,55 foram mais estáveis e mais trabalháveis, inclusive até mesmo na análise tátil-visual. Já as pastas de cimento com relação a/lig 0,40 tiveram uma tendência de se tornarem menos viscosas e mais trabalháveis com teores de aditivos mais altos, mesmo com o superplastificante tipo A e G.

De forma gráfica, na Figura 4.9 estão apresentadas informações sobre os teores de aditivos químicos utilizados nas pastas *versus* viscosidade medida pelo reômetro. Os teores ótimos dos aditivos (teor de saturação e eficiência dos aditivos) foram determinados graficamente pela grande inflexão das curvas de viscosidade exibidas, ou seja, o ponto foi determinado quando se encontrava o ponto em que a curva se estabilizava. A Tabela 4.3 resume o valor considerado para o ponto de saturação/teor ótimo de cada aditivo avaliado para cada relação a/lig considerada.

Figura 4.9 – Teor de aditivo x viscosidade dos aditivos: (a) A; (b) B; (c) C; (d) D; (e) E; (f) F; (g) G.





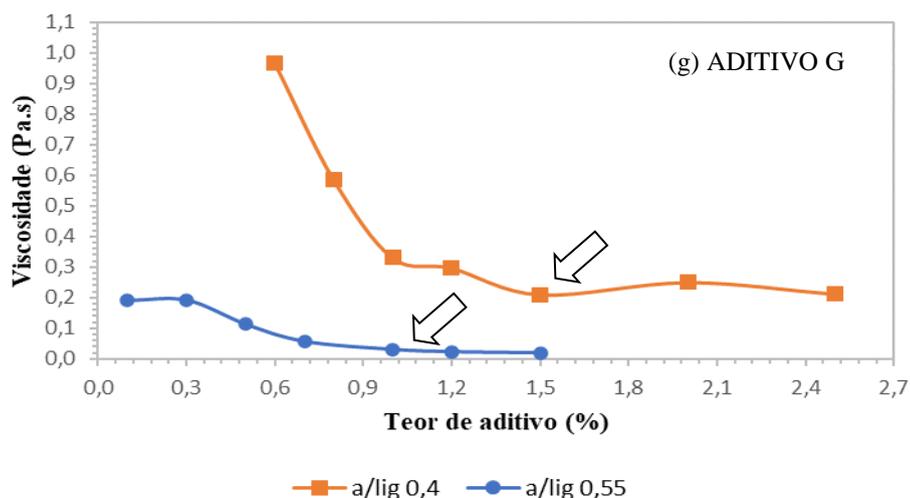


Tabela 4.3 – Valores obtidos de teor ótimo/saturação de aditivos químicos utilizados nas pastas de relação a/lig 0,40 e 055.

Pastas / Relação a/lig	TEOR ÓTIMO/SATURAÇÃO DOS ADITIVOS						
	A	B	C	D	E	F	G
0,40	0,9%	4,0%	4,0%	1,5%	1,5%	2,5%	1,5%
0,55	0,7%	0,5%	0,3%	1,5%	1,0%	1,5%	1,0%
Faixa recomendada pelo fabricante	0,3% a 1,5%	0,3% a 0,9%	0,3% a 0,9%	0,2 a 1,2%	0,2% a 1,0%	0,6% a 1,0%	0,6% a 1,0%

Da Figura 4.9, observamos que o teor (%) ótimo (de saturação) do aditivo A para as pastas de relação a/lig 0,40 e 0,55 são respectivamente 0,90% e 0,70% (Tabela 4.3). Estes teores estão dentro da faixa recomendada pelo fabricante 0,30% a 1,5%.

O outro aditivo superplastificante “G” t encontrou-se dentro da faixa indicada pelo fabricante apenas para a para a relação a/lig de 0,55. Para a relação a/lig de 0,40, o aditivo atingiu o teor ótimo em 1,5%, isto é, acima do recomendado pelo fabricante (Tabela 4.3).

Para as pastas com os outros aditivos (polifuncionais/plastificantes) (B, C, D, E e F) e relação a/lig de 0,40, o teor ótimo de aditivo extrapolou o máximo recomendado pelo fabricante (visto na Tabela 4.4). Estes altos teores não foram esperados, demonstrando que este tipo de cimento é mais fino e precisa de mais água para trabalhabilidade ou a mistura precisa de aditivos químicos superplastificantes de alta eficiência (como o caso do aditivo A)

Já para as pastas de relação a/lig 0,55, os aditivos B e C alcançaram um teor ótimo de 0,5% e 0,3%, respectivamente, obtendo uma eficiência muito alta para esse tipo de aditivo (Figura

4.5 e 4.6 e Tabela 4.4). Entretanto, para os aditivos D, F e G, mesmo para a relação a/lig mais alta de 0,55, os aditivos não foram capazes de aumentar a fluidez das pastas dentro do esperado na faixa indicada pelo fabricante, demonstrando menor compatibilidade com o cimento utilizado na pesquisa.

Os resultados da Tabela 4.3 indicam que para pastas com menor relação a/lig (0,40), os aditivos A e G, tipo superplastificante e com maior teor de sólidos, apesar de serem mais onerosos financeiramente, fazem a compensação e a melhoria do desempenho reológico pela menor quantidade de aditivo utilizada e menor custo por m³ de concreto (se considerado além do uso somente em pastas). O mesmo não ocorreu para a relação a/lig maior (0,55) a qual parece indicar o uso do aditivo tipo B ou C, plastificante de forma mais eficiente. Isto também evidencia que um mesmo aditivo pode ter desempenhos diferentes a depender da relação a/lig utilizada.

É importante ressaltar que, na prática, esses aditivos geralmente são combinados entre si para uma melhor performance, ou seja, para o desempenho ideal do comportamento de pastas de cimento e concretos, é necessário um estudo mais aprofundado com a mistura de plastificantes/polifuncionais e superplastificantes para encontrar um equilíbrio de custo-benefício.

Para uma análise da propriedade reológica de viscosidade e teor de aditivo mais minuciosa, foram feitos gráficos com seus teores ótimos versus viscosidade para que fosse possível analisar quais os aditivos tiveram os melhores desempenhos, considerando as relações a/lig e o cimento utilizado, visto detalhadamente na Tabela 4.4. Os gráficos estão demonstrados na Figura 4.10.

Considerou-se uma baixa eficiência dos aditivos B e C para a relação a/lig 0,40. Portanto, os aditivos B e C não foram considerados para a continuação na pesquisa, mesmo que seus teores tenham sido baixos para a relação a/lig 0,55, ainda assim, considerou-se que eles não promoveram ganhos significativos nos valores de viscosidade, quando comparados com a redução da viscosidade dos outros aditivos testados.

Considerando os resultados obtidos com as pastas de relação a/lig 0,40 e 0,55, confirma-se que os aditivos A e G demonstraram os melhores desempenhos, uma vez que, mesmo com a utilização de menores teores, levaram as pastas a terem baixas viscosidades. Portanto, esses aditivos demonstraram uma tendência de proporcionar maior trabalhabilidade para as pastas

estudadas.

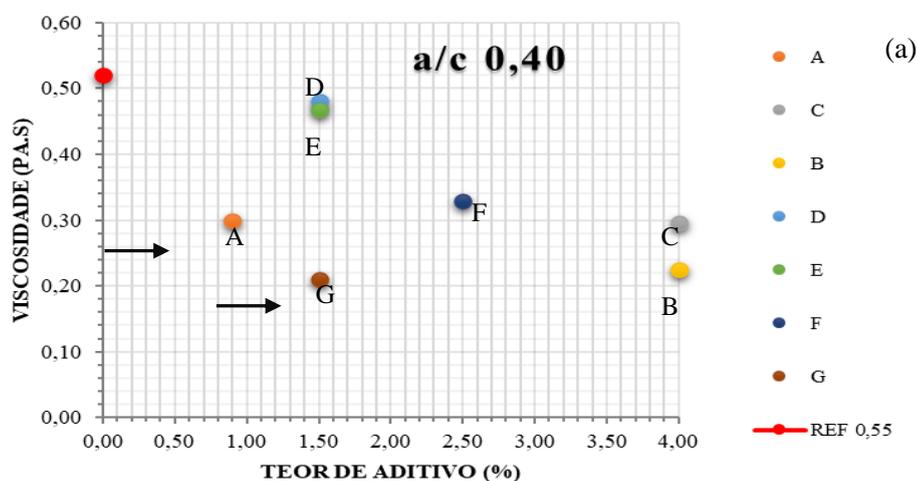
Tabela 4.4 – Análise da influência dos teores de aditivos na viscosidade das pastas de cimento

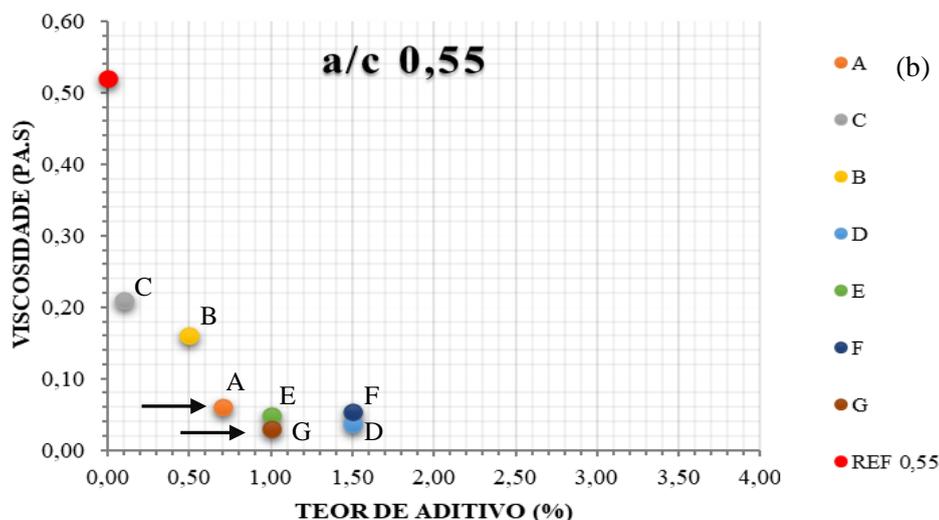
Relação a/lig e aditivo	Teor de aditivo (%)	Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade/Teor	Redução da Viscosidade	Eficiência (RedVisc/Teor)	
0,40*	0,00	-	-	-	-	
0,55	A	0,06	0,09	0,46	0,66	
	B	0,16	0,32	0,36	x	
	C	0,21	2,10	0,31	x	
	D	1,50	0,04	0,02	0,48	0,32
	E	1,00	0,05	0,05	0,47	0,47
	F	1,50	0,05	0,04	0,47	0,31
	G	1,00	0,03	0,03	0,49	0,49
0,55	0,00	0,52	-	-	-	
0,40	A	0,90	0,33	0,22	0,24	
	B	4,00	0,06	0,29	0,07	
	C	4,00	0,07	0,22	0,06	
	D	1,50	0,32	0,04	0,03	
	E	1,50	0,31	0,05	0,03	
	F	2,50	0,13	0,19	0,08	
	G	1,50	0,21	0,14	0,31	0,21

* Menciona-se que não foi possível a realização do ensaio da amostra com a/lig 0,40, então foi utilizada a viscosidade encontrada para a referência com a/lig 0,55, de 0,52 Pa.s.

Dessa forma, considerando as análises mais gerais das duas relações a/lig, por meio da figura 4.10, os aditivos A e G desempenharam um melhor papel na melhoria das propriedades reológicas das pastas de cimento, destacando que os dois aditivos são do tipo RA2.

Figura 4.10 – Análise das viscosidades de acordo com os teores ótimos de cada aditivo para relação: (a) a/lig de 0,40 e (b) 0,55.





4.1.2 Pastas de Cimento com Aditivos Químicos: Ensaios Oscilatórios

O ensaio oscilatório, também conhecido como ensaio de varredura de tempo, fornece a relação do comportamento elástico da amostra cimentícia, durante o incremento da frequência de deformação. Isso traduz-se em obtenção do parâmetro módulo elástico (G') que determina a cinética de hidratação da pasta de cimento, demonstrando como se dá o seu processo de hidratação e a formação dos produtos da pasta.

Assim, as Figuras 4.11 e 4.13 exibem o comportamento cinético de todas as pastas de relação a/lig 0,40 e 0,55, o tipo e o teor ótimo de cada aditivo de forma agrupada nas primeiras 6 horas (Figura 4.11 e 4.13a) e para a primeira hora de ensaio (4.11b e 4.13b). A Figura 4.12 e 4.14 exibem todos os gráficos separadamente, de acordo com o aditivo utilizado para pastas da relação a/lig 0,40 e 0,55.

Figura 4.11 – Curva de tempo versus módulo viscoso que representa a cinética de hidratação de todas as pastas com relação a/lig 0,40 com duração de: (a) seis horas; (b) primeira hora.

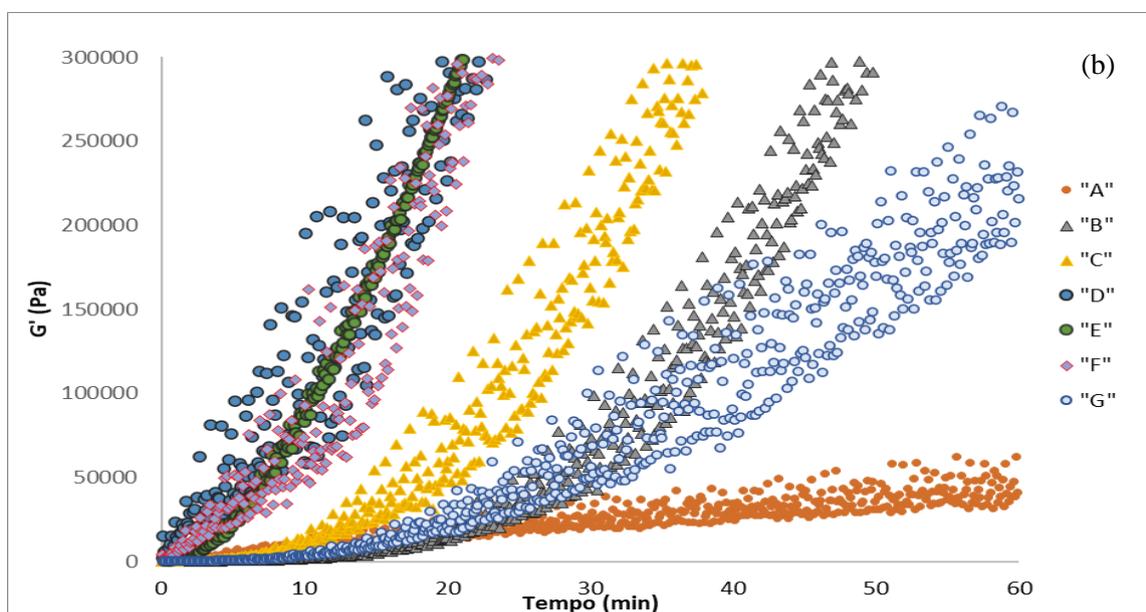
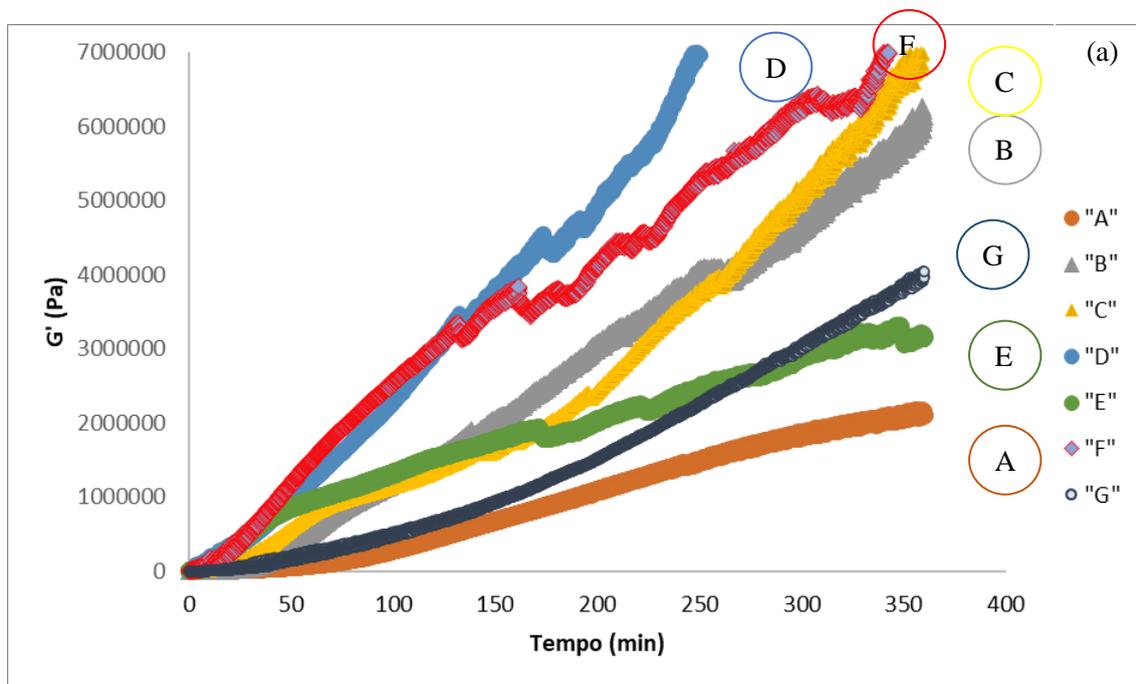
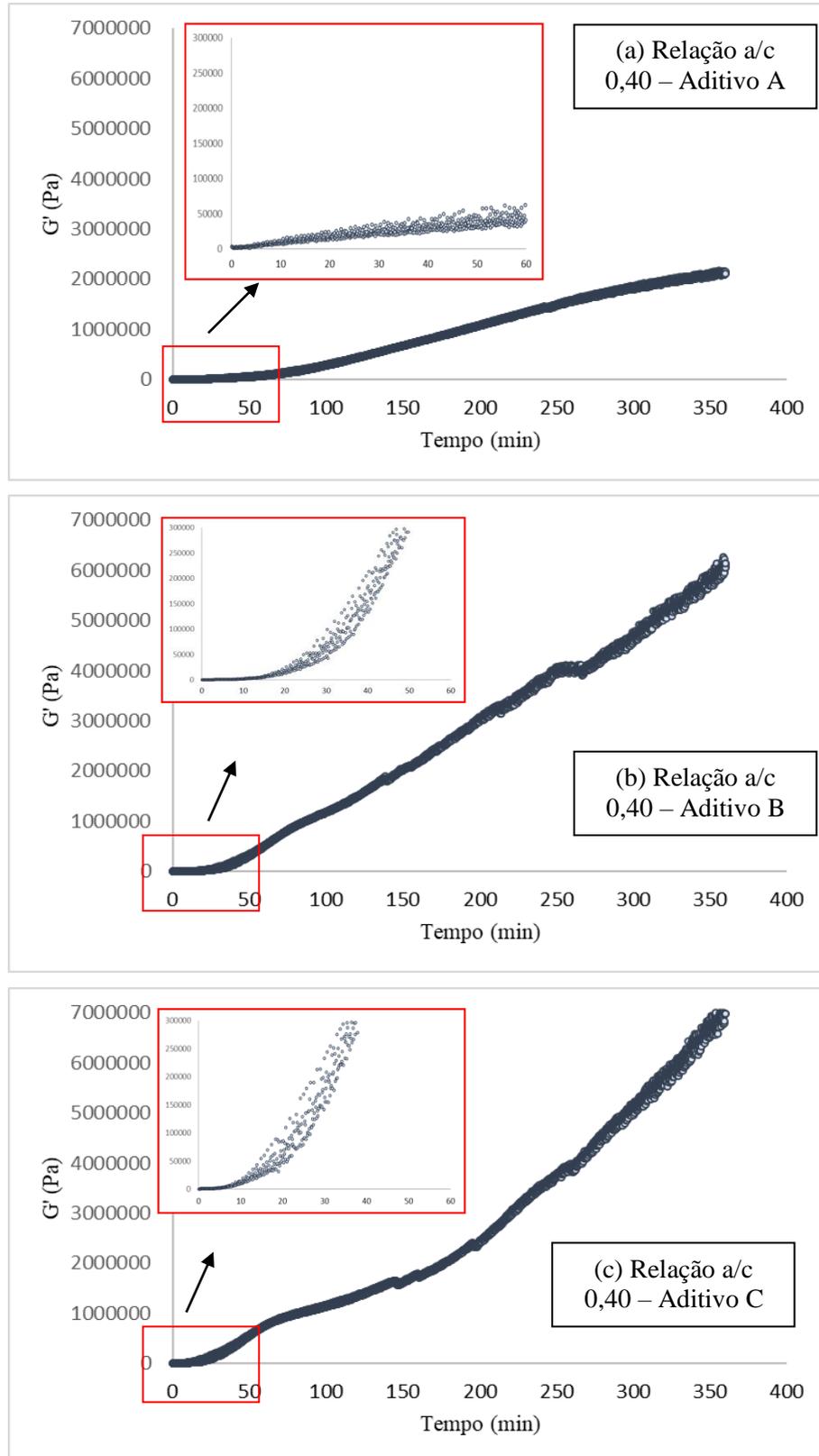
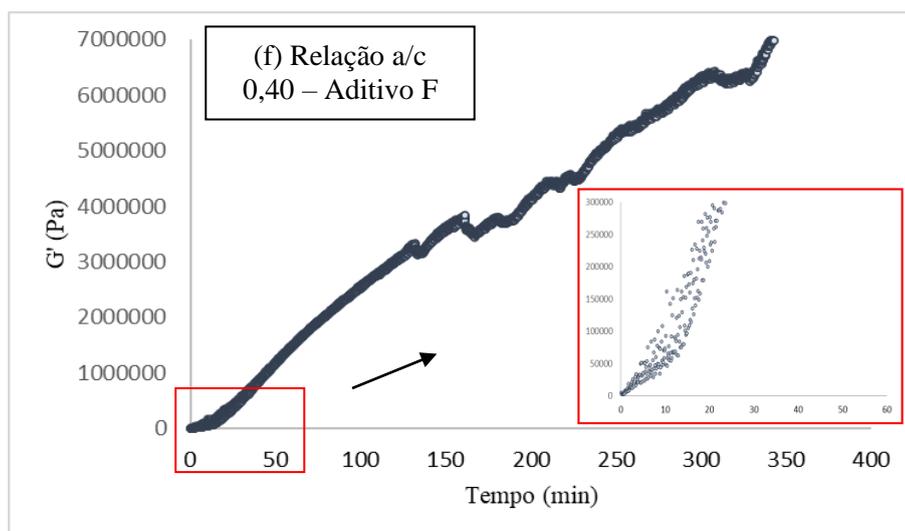
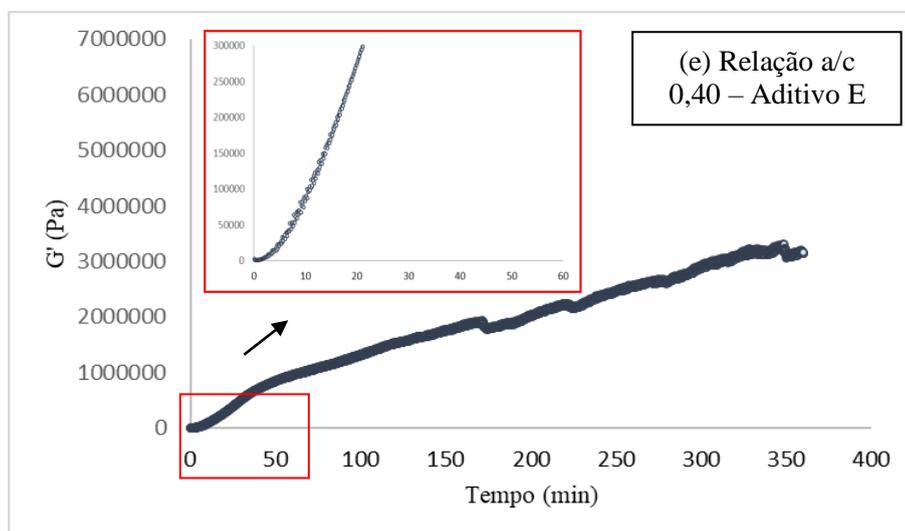
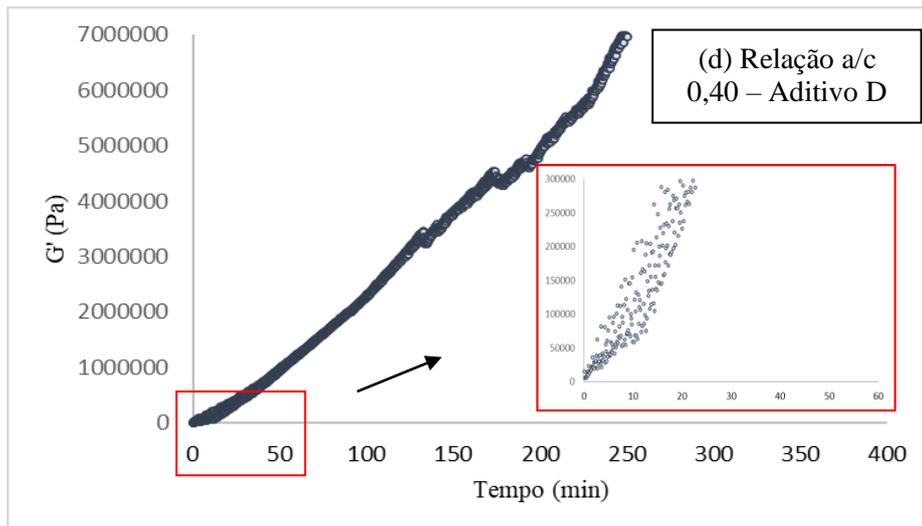
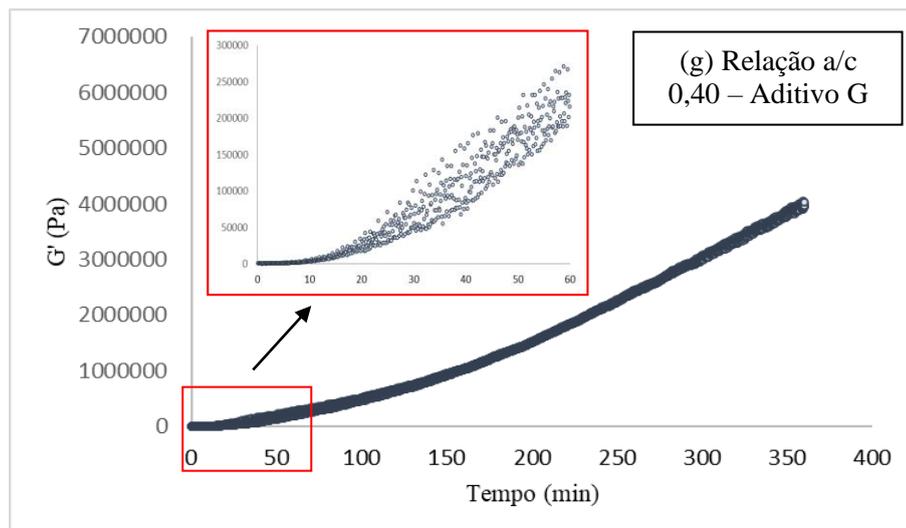


Figura 4.12 – Curva de tempo *versus* módulo viscoso que representa a cinética de hidratação das pastas com duração de seis horas e, em destaque, durante a primeira hora, para relação a/lig 0,40 e (a) aditivo A; (b) aditivo B; (c) aditivo C; (d) aditivo D; (e) aditivo E; (f) aditivo F; (g) aditivo G.







Pelas Figuras 4.11 e 4.12, é possível observar-se que o comportamento de consolidação dos aditivos A e G é muito mais suave e menos disperso se comparado aos outros aditivos (Figura 4.12).

Em uma análise mais completa e com todas as curvas com pastas de a/lig 0,40 (Figura 4.11), é possível observar com mais clareza o quanto o comportamento da pasta com essa relação e com altos teores dos aditivos B, C e F (4,0%; 4,0%, e 2,5%, respectivamente) se diferencia dos outros aditivos A e G (0,9% e 1,0%, respectivamente) comprovando o quão incompatível é essa combinação para o tipo de cimento utilizado nessa pesquisa (com os aditivos B, C e F), uma vez que se ainda comparado à pasta de referência com relação 0,55 (Figura 4.14a) sua consolidação se dá de maneira muito mais abrupta e tão dispersa quanto, mesmo com um teor tão alto dos plastificantes.

O início do processo de consolidação da pasta contendo o superplastificante A (Figura 4.12a) se dá com menos de dez minutos, enquanto que esse mesmo processo ocorre por volta dos dez minutos para o plastificante C e superplastificante G (Figura 4.12c e 4.12g, respectivamente) e quinze minutos com o uso do plastificante B (Figura 4.12b). Os outros aditivos não geraram nenhum retardo no processo de consolidação das pastas, que se iniciou logo nos primeiros instantes do ensaio (Figuras 4.12b, 4.12d, 4.12e e 4.12f).

Uma observação importante a ser feita é sobre os comportamentos dos aditivos D e E que, mesmo sendo utilizados teores razoáveis (ambos de 1,5%), tiveram comportamentos completamente opostos (vistos na Figuras 4.12d e 4.12f), demonstrando baixíssima compatibilidade do aditivo D, pelo rápido e abrupto processo de consolidação da sua pasta

com relação a/lig 0,4. Entretanto o aditivo E (Figura 4.12f), apesar de sua consolidação praticamente instantânea no início do ensaio, teve um comportamento mais fluido durante o ensaio, sendo um pouco mais compatível que os outros superplastificantes nessa relação a/lig utilizada.

Figura 4.13 – Curva de tempo *versus* módulo viscoso que representa a cinética de hidratação de todas as pastas com relação a/lig 0,55 com duração de (a) seis horas e (b) na primeira hora.

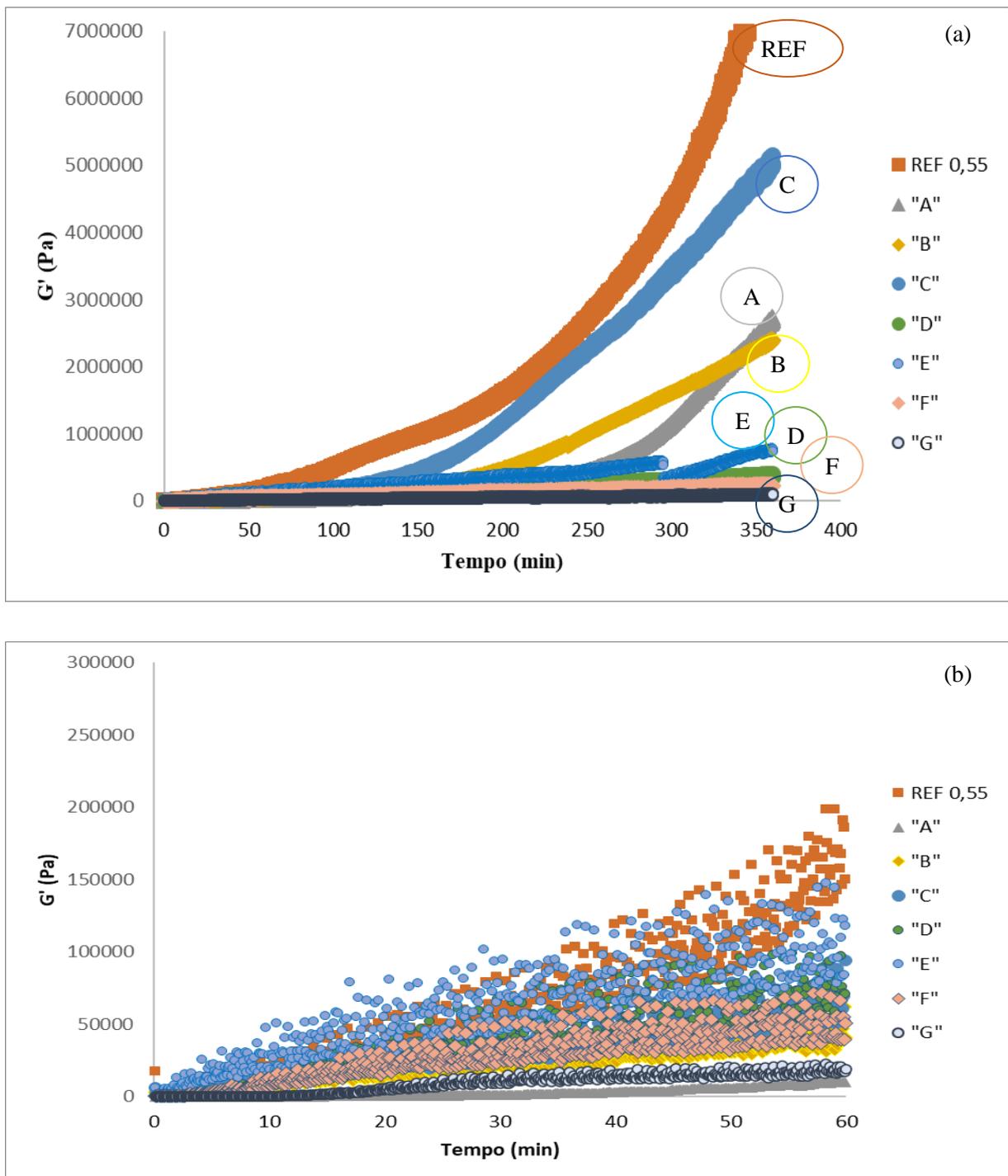
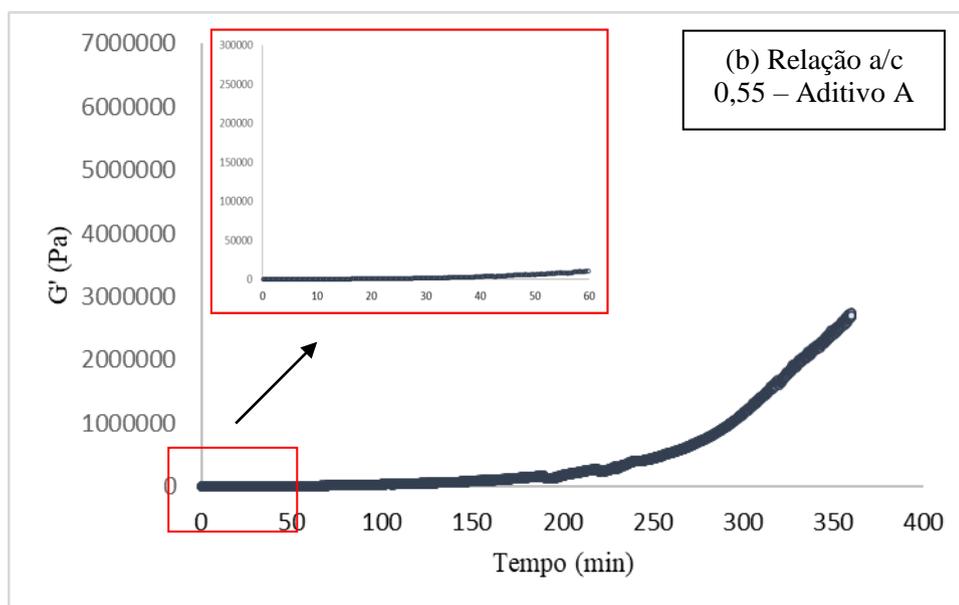
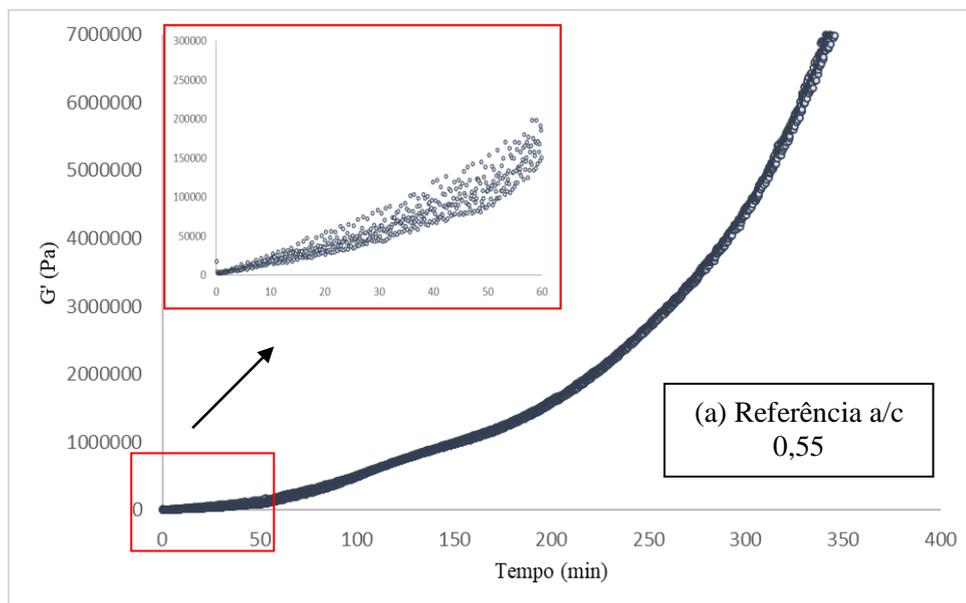
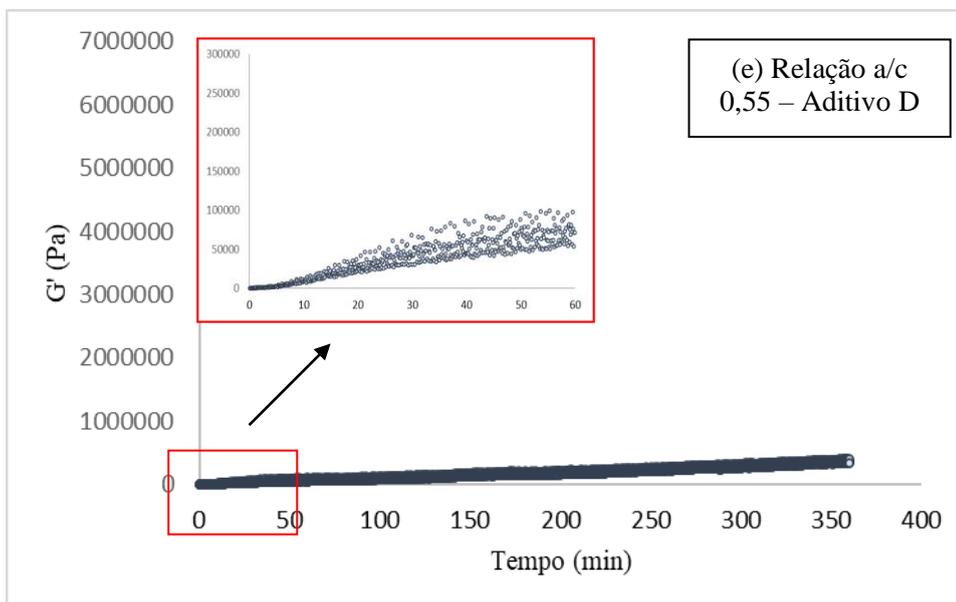
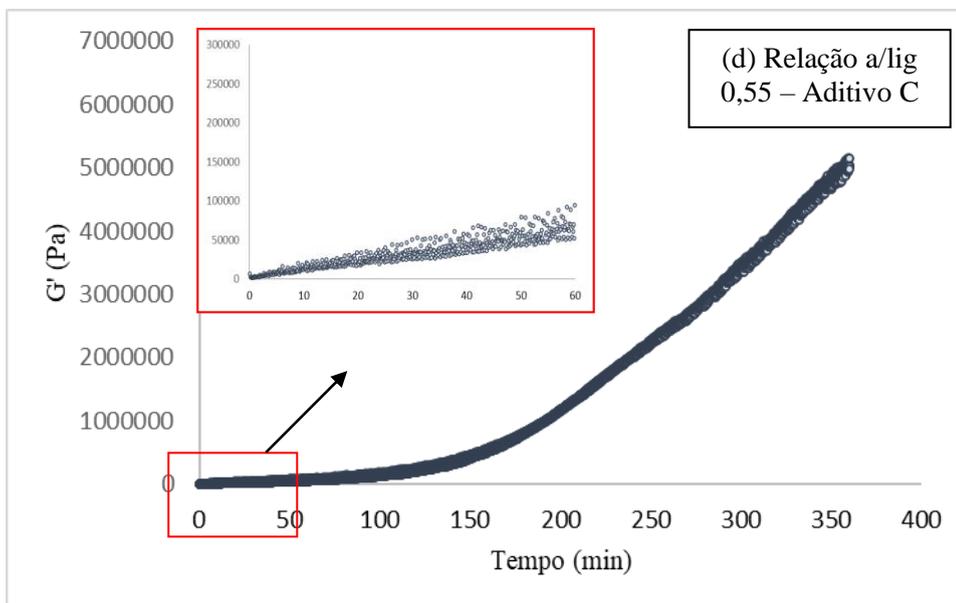
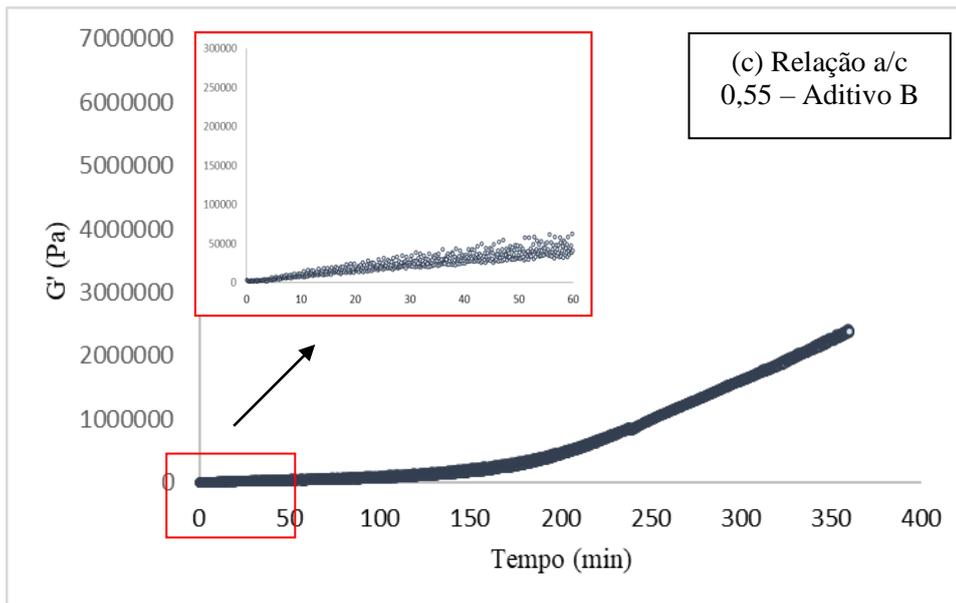
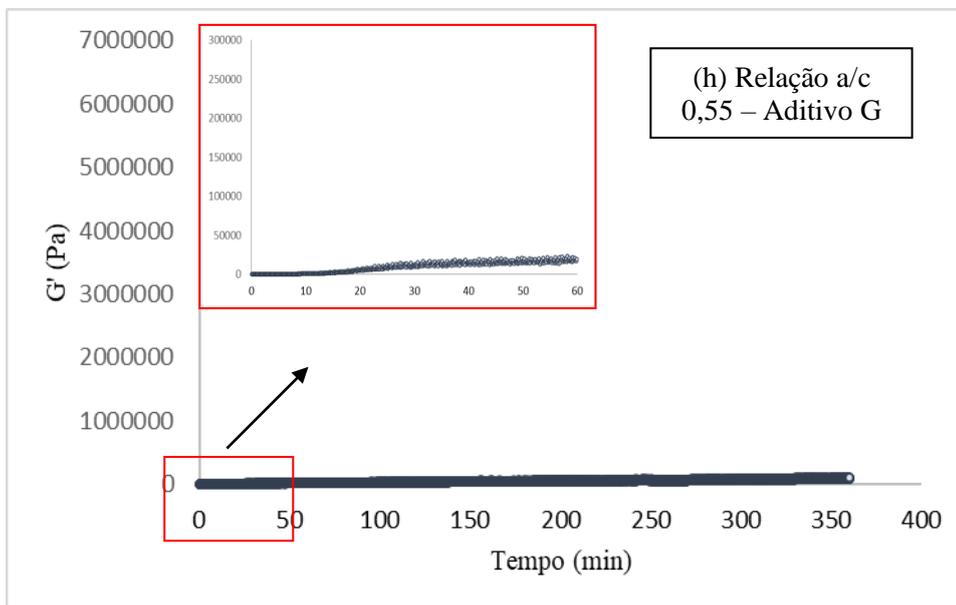
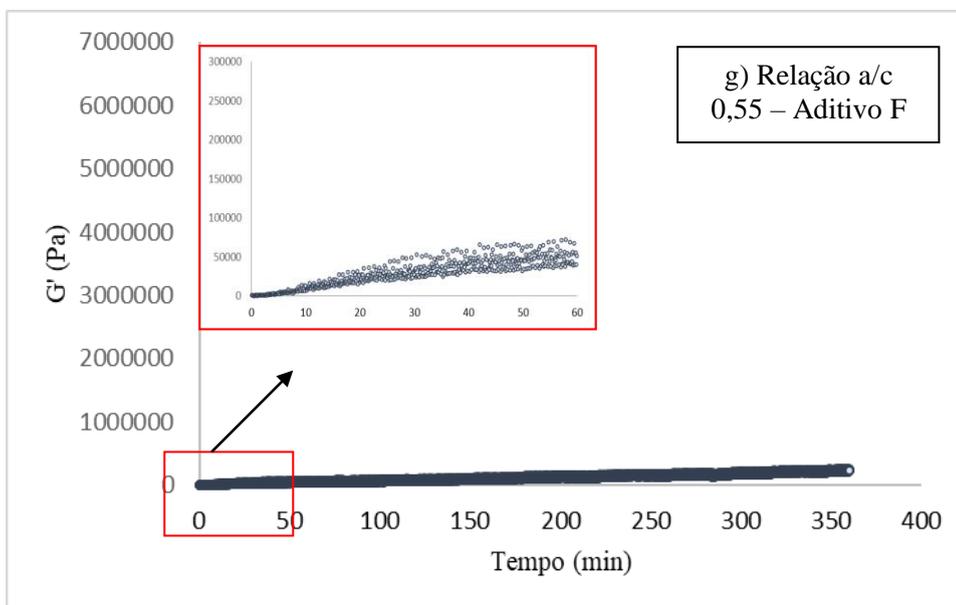
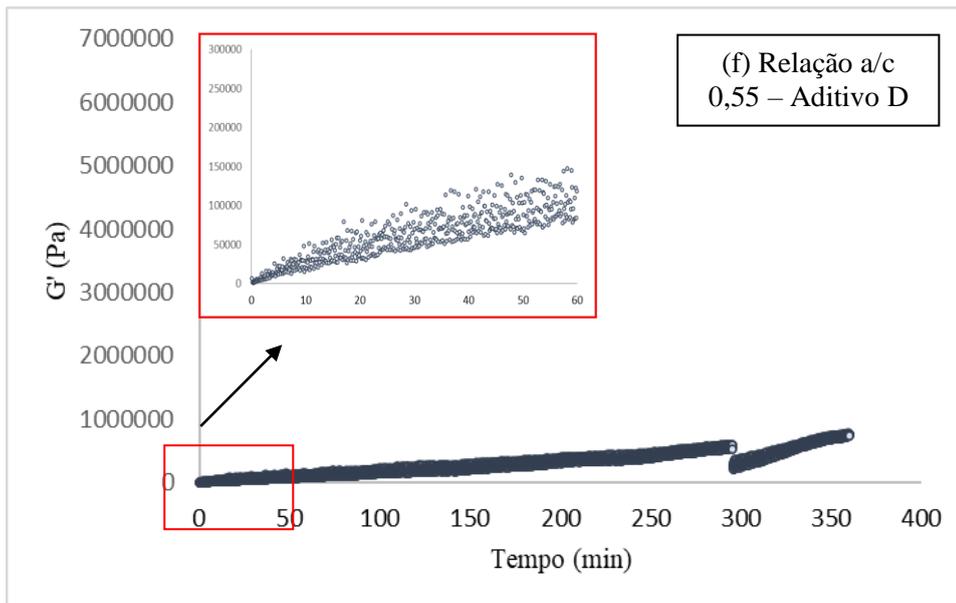


Figura 4.14 – Curva de tempo *versus* módulo viscoso que representa a cinética de hidratação das pastas com duração de seis horas e, em destaque, durante a primeira hora, para relação a/lig 0,55 e (a) referência; (b) aditivo A; (c) aditivo B; (d) aditivo C; (e) aditivo D; (f) aditivo E; (g) aditivo F; (h) aditivo G.







Fazendo uma primeira análise com os resultados do ensaio na pasta de referência com relação a/lig de 0,55 (Figura 4.14a), é possível observar que o processo de consolidação da pasta se inicia antes mesmo dos primeiros dez minutos de ensaio, com a dispersão dos pontos (detalhe em vermelho), demonstrando que a pasta logo perde fluidez. Entretanto, é uma consolidação mais dispersa, onde os processos de solidificação da pasta vão ocorrendo aos poucos. Além disso, todo o seu processo de hidratação ocorre de forma suave, visto que a sua curva tende a ser exponencial.

Analisando as figuras 4.14b, 4.14c, 4.14e e 4.14g, por exemplo, que demonstram, o comportamento das pastas com o uso de um superplastificante, aditivo A e, o uso de três plastificantes, aditivos B, D e F, respectivamente, para pastas com relação a/lig 0,55, é possível notar o quanto o comportamento do superplastificante se diferencia do comportamento dos outros aditivos, uma vez que ele retarda o início do processo de consolidação da pasta para perto de cinquenta minutos, enquanto que os aditivos polifuncionais/plastificantes tem pouco efeito sobre a pasta (se comparado ainda à pasta de referência), onde o início do seu processo de consolidação está perto de dez minutos de ensaio.

Observa-se, ainda, por meio dos gráficos das figuras 4.14d e 4.14f que representam os aditivos C e E que estes fizeram pouco ou nenhum efeito sobre a consolidação da pasta de cimento durante as primeiras horas, quando comparado ao gráfico da figura 4.14a que representa a pasta de referência, no qual não houve retardo em relação ao início do processo de hidratação da mistura. Entretanto, o aditivo E trouxe um comportamento mais linear, enquanto que o aditivo C levou à uma pega rápida da mistura, provavelmente explicado pelos teores de aditivos utilizados, sendo 0,1% do aditivo C e 1,5% do aditivo E, que pode ter levado à pasta com o último aditivo citado a se manter fluida por mais tempo.

O aditivo G, um superplastificante, trouxe melhorias no comportamento cinético da pasta, ao se analisar o gráfico da figura 4.14h, porém só conseguiu trazer um “atraso” na pega da pasta por aproximadamente 20 minutos, onde se iniciou o seu processo de consolidação. Entretanto, o comportamento da sua curva é semelhante ao do aditivo A (Figura 4.14b), determinando que os dois superplastificantes possuem a tendência de maior fluidificação da pasta e por um tempo maior.

Com isso é possível inferir que, mesmo com o uso de um plastificante, os produtos de

hidratação da pasta vão sendo formados logo na primeira hora após a mistura de seus componentes. Além disso, sua curva tende a ser mais linear, ao contrário das curvas da pasta de referência e da pasta com o aditivo A, que indica que esse processo de consolidação é mais abrupto, demonstrando pouca compatibilidade do aditivo B e C com esse tipo de cimento, mesmo sendo uma relação a/lig de 0,55 que proporcionou bons resultados de trabalhabilidade para as pastas, como visto nos ensaios de fluxo.

Ainda em uma análise geral, por meio das curvas nos gráficos da Figura 4.13 em uma tentativa de comparação entre as pastas com todos os aditivos em uma mesma relação a/lig de 0,55 e comparando com a pasta de referência (curva em laranja), entende-se que o aditivo C teve um pior desempenho e o aditivo G, o melhor, se comparados durante todo o processo de 360 minutos (Figura 4.13a). Entretanto, olhando o gráfico da Figura 4.13b, uma análise mais minuciosa e durante a primeira hora de ensaio, o aditivo A é o que se mais se destaca, seguido do aditivo G.

Com o gráfico da figura 4.13b, entende-se ainda que o melhor comportamento se deu com o uso dos aditivos A e G, o qual retardaram o tempo de pega da mistura e a manteve mais fluida (por estar mais retilíneo e organizado e menos disperso) por muito mais tempo, ou seja, das sete composições utilizadas, essa foi a composição que se manteve mais trabalhável por mais tempo, sendo o tipo ideal e mais procurado em estudos de dosagem.

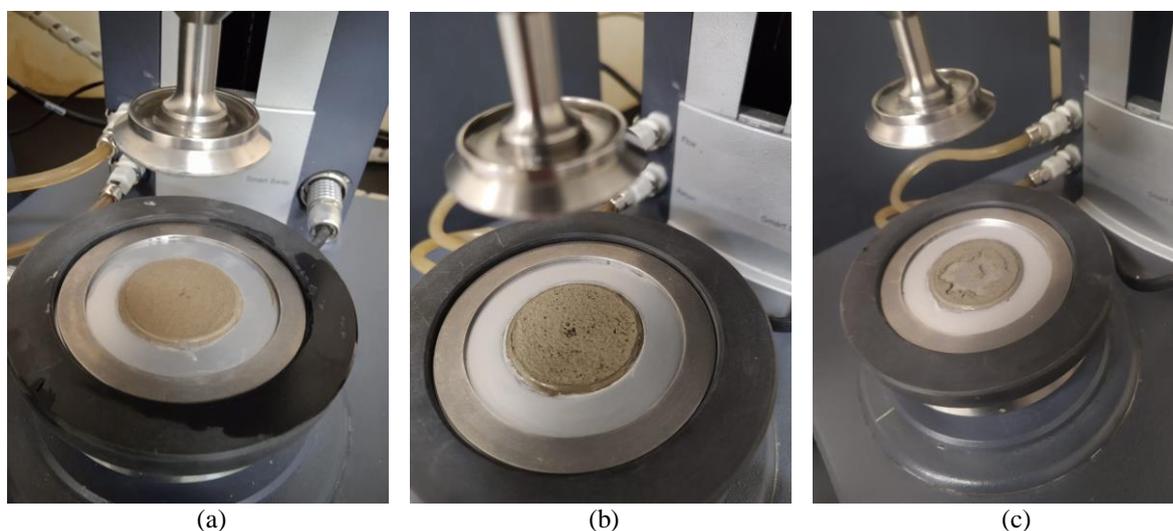
De maneira geral e analisando as figuras 4.11a e 4.13a, observa-se que os valores do módulo elástico (G') para a pasta de referência (REF) com relação 0,55 e para as pastas com os plastificantes com a relação a/lig 0,4 são disparadamente maiores do que para as outras pastas, confirmando que a sua consolidação se deu de forma mais rápida, entretanto as suas curvas são diferentes, a qual a curva da pasta de referência é exponencial, indicando que a pasta já se encontrava mais endurecida, enquanto que os aditivos A e G (em ambas as relações a/lig) tem uma curva mais linear e menos dispersa, que apesar de se consolidar mais rapidamente, ainda se encontrava mais fluida sem chegar ao final da pega da mistura.

Além de todas as observações feitas, analisando os dados obtidos por meio dos ensaios feitos no reômetro, foi possível verificar visualmente o comportamento das pastas, após o ensaio (Figura 4.15).

Em caráter representativo dos ensaios, é possível observar diferentes resultados obtidos dos ensaios de acordo com a quantidade de aditivo escolhido. Na Figura 4.15c (pasta com 0,9%

do aditivo A com relação a/lig de 0,4) nota-se que uma parte da amostra se mantém aderida à parte de cima da geometria do reômetro, demonstrando que essa pasta não chegou no final da sua hidratação, sendo um pouco mais fluida e que as outras vistas nas Figuras 4.15a (pasta com 0,5% do aditivo B com relação a/lig de 0,55) e 4.15b (pasta de referência com relação a/lig de 0,55), encontrando-se mais “endurecidas” após as 6 horas de ensaio, dentre as quais a amostra da figura 4.15b é a amostra que mais se solidificou ao longo do tempo. Esse tipo de análise permite a visualização do que foi discutido pelos gráficos.

Figura 4.15 – Condição das pastas em caráter representativo após o ensaio (a), (b) com consistência mais fluida devido a maior cinética de hidratação ou maior tempo de pega; (c) com consistência mais “endurecida” devido menor cinética de hidratação ou menor tempo de pega.



Considerando todas as análises realizadas por meio dos ensaios de fluxo e os resultados obtidos pelos ensaios oscilatórios, optou-se por seguir os ensaios utilizando somente os aditivos “A” e “G” para um afunilamento da pesquisa, em busca dos melhores resultados.

4.1.3 Pastas de Cimento com Sílica ativa: Ensaio de Fluxo

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de fluxo e oscilatórios, realizados nas pastas de cimento com as diferentes composições dos aditivos e determinado que se seguiria no estudo apenas com dois aditivos, foram feitos novos ensaios de fluxo utilizando diferentes teores de sílica ativa. Ressalta-se que os teores de aditivos utilizados foram selecionados a partir dos teores ótimos encontrados na etapa anterior.

Além disso, também foram realizados ensaios de calorimetria para complementação da pesquisa, determinando-se curvas que demonstram o fluxo de calor liberado em função do

tempo para as dosagens selecionadas, após os resultados dos ensaios de fluxo dessa etapa.

Com a escolha dos aditivos e os teores de sílica a serem utilizados, deu-se início aos ensaios de fluxo, com os mesmos procedimentos descritos para os ensaios com os aditivos nos tópicos anteriores.

Primeiramente foram realizados ensaios com as pastas referências, ou seja, contendo somente cimento, água e sílica ativa (Figuras 4.16 e 4.17). Relembrando que, só foi possível obter esses dados da relação a/lig 0,55, uma vez que as pastas produzidas com relação a/lig 0,40 são muito viscosas e não puderam ser ensaiadas no reômetro. Por meio das Figuras 4.16 e 4.17 fica visível o quanto as propriedades são intensificadas à medida em que se acrescenta a adição mineral a mistura, ao se observar os valores do eixo das ordenadas.

Figura 4.16 – Gráfico de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento pastas de com sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12% e relação a/lig 0,55.

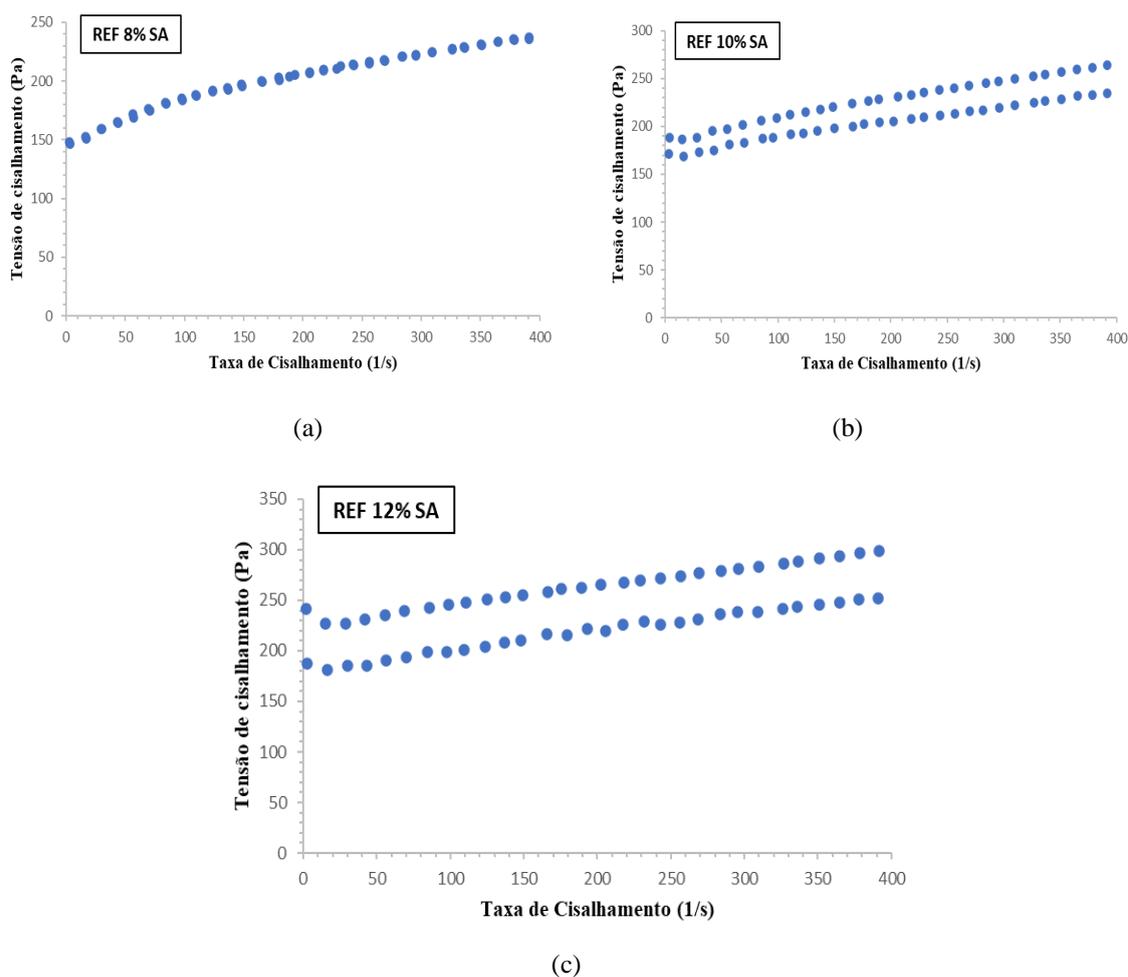
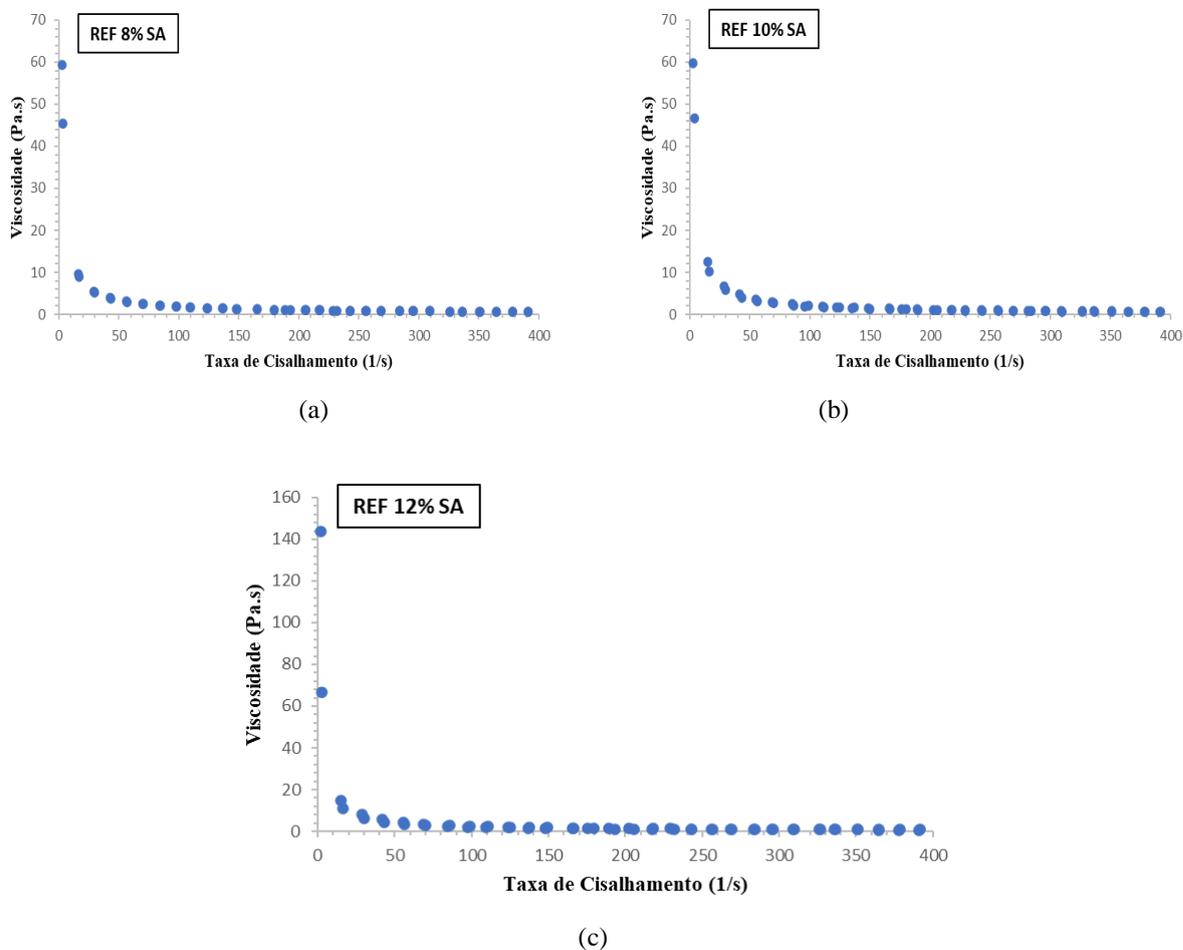
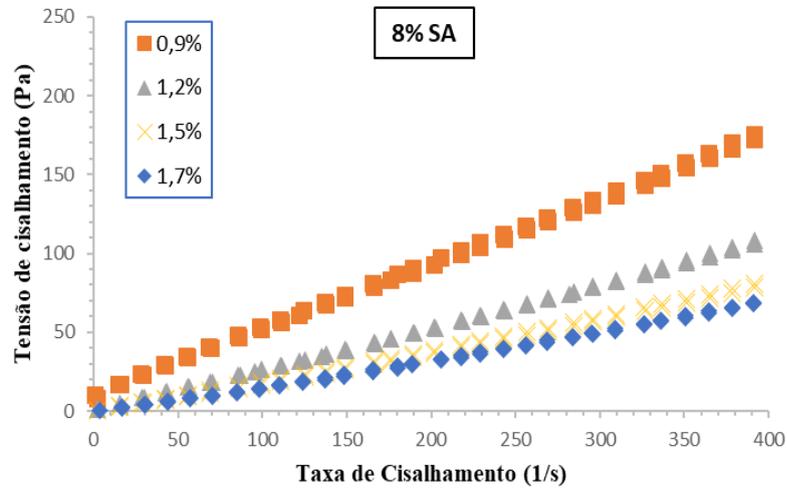


Figura 4.17 – Gráfico de taxa de cisalhamento x viscosidade de pastas de com sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12% e relação a/lig 0,55.

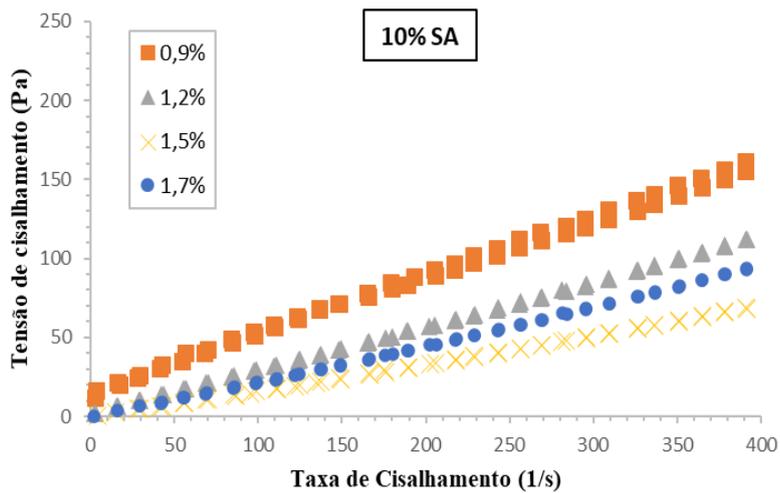


Após isso, foram realizados ensaios acrescentando-se o aditivo A (Figuras 4.18 a 4.21). Por meio dos gráficos nota-se um comportamento similar entre as misturas, independentemente da quantidade de adição utilizada, demonstrando a grande influência do aditivo A nas propriedades reológicas da pasta de cimento, o que é visto numericamente nas tabelas mais a frente (Tabelas 4.5 e 4.6).

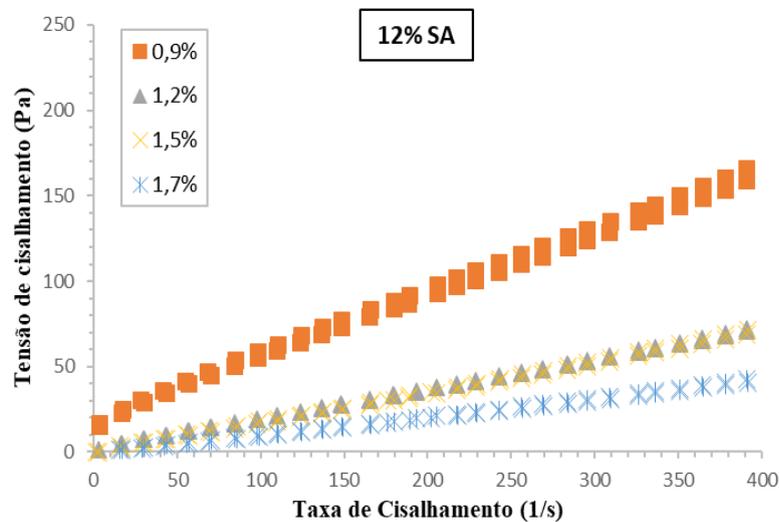
Figura 4.18 – Gráficos de taxa de cisalhamento *versus* tensão de escoamento do aditivo A da pasta de cimento com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)

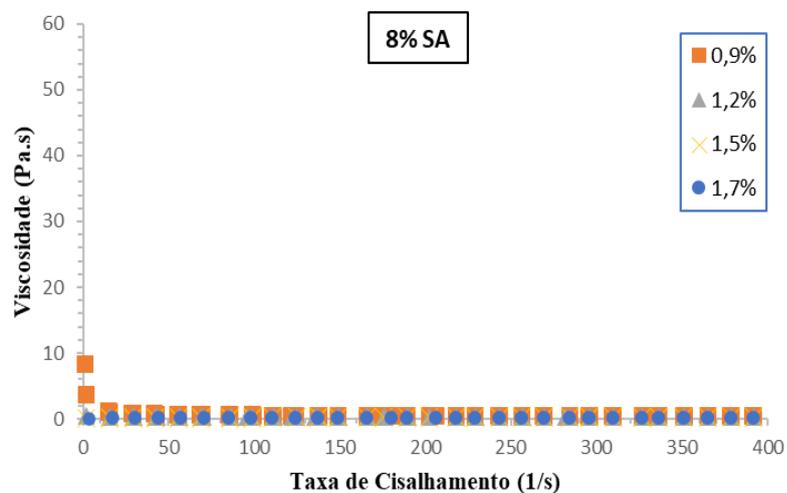


(b)

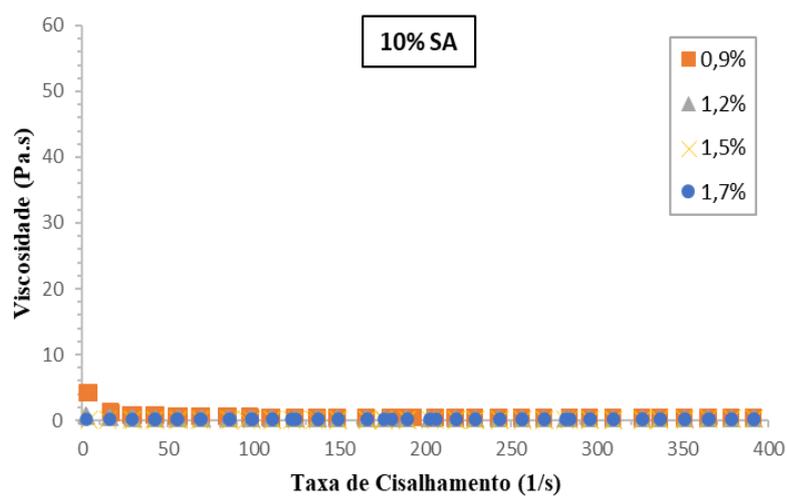


(c)

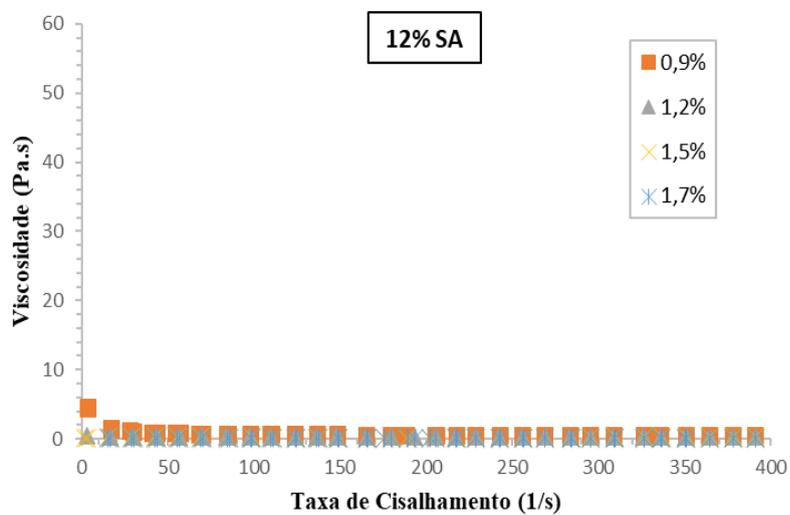
Figura 4.19 – Gráficos de taxa de cisalhamento *versus* viscosidade do aditivo A em pasta com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)

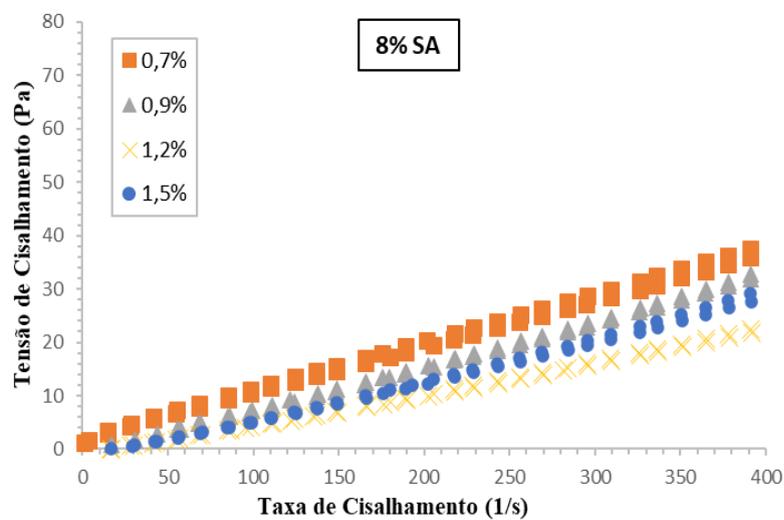


(b)

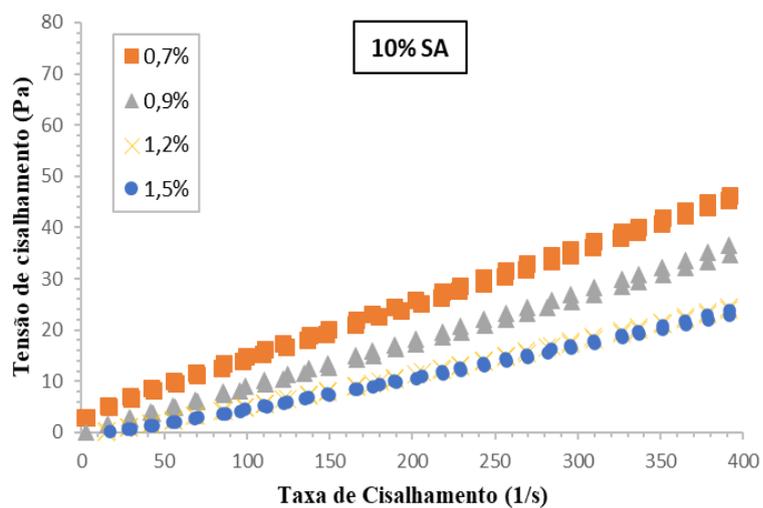


(c)

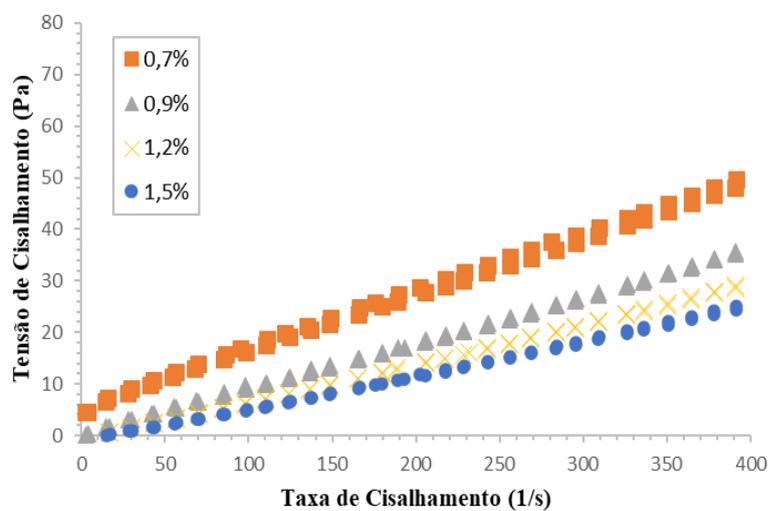
Figura 4.20 – Gráficos de taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento do aditivo A com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)

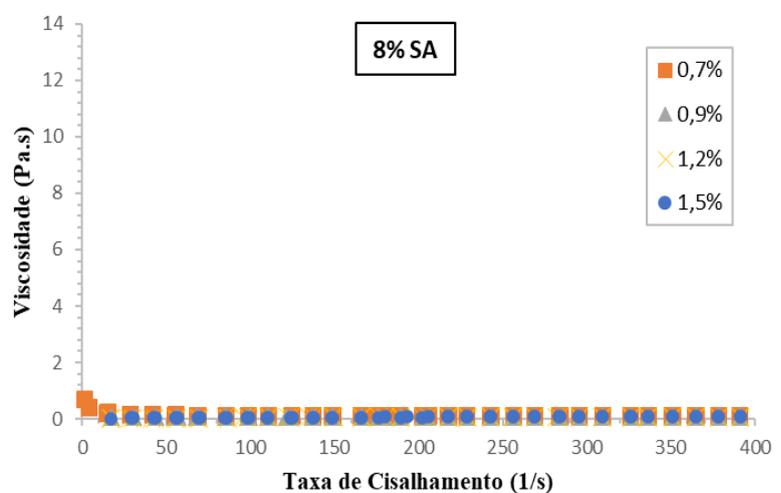


(b)

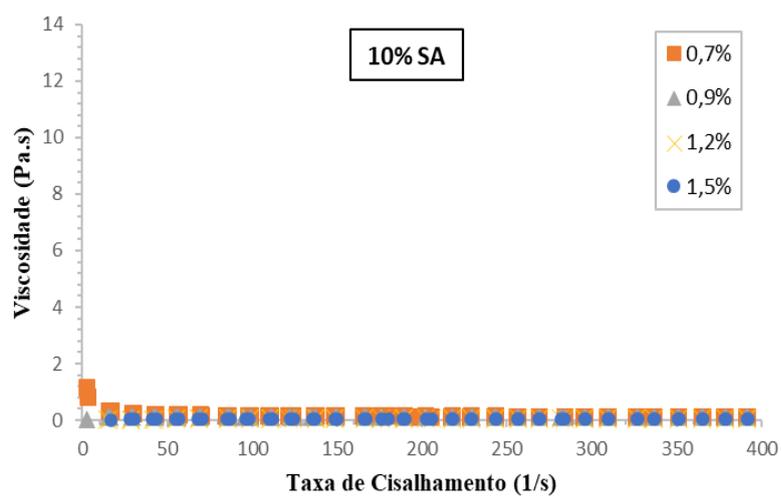


(c)

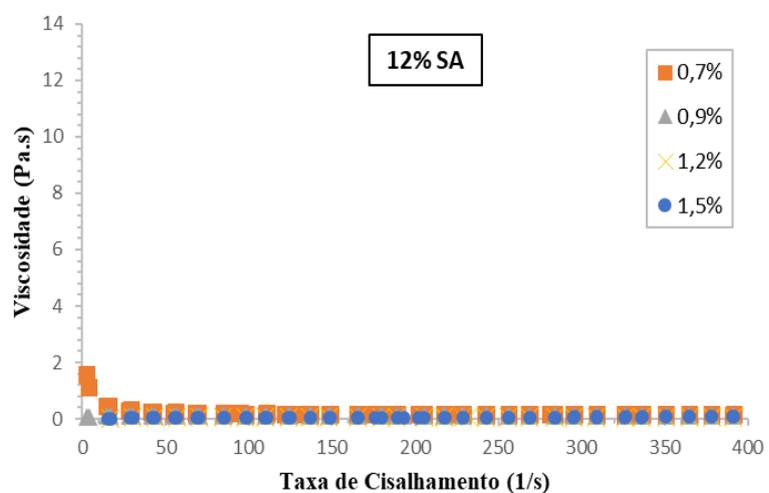
Figura 4.21 – Gráficos de taxa de cisalhamento *versus* viscosidade do aditivo A em pasta com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)



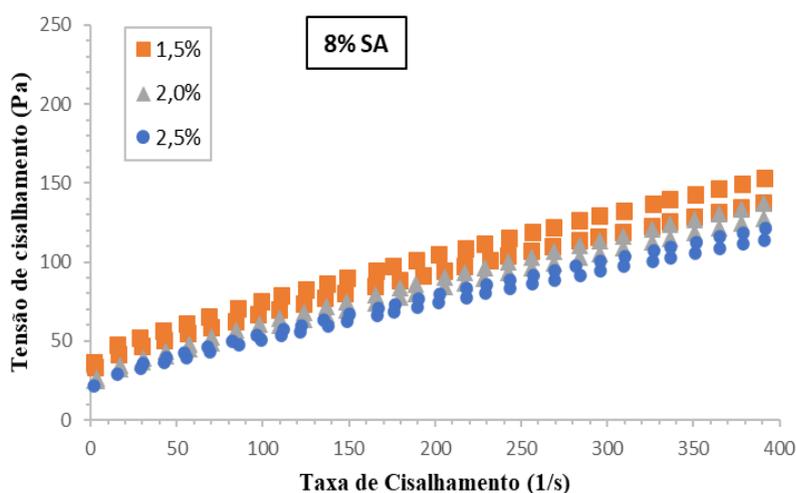
(b)



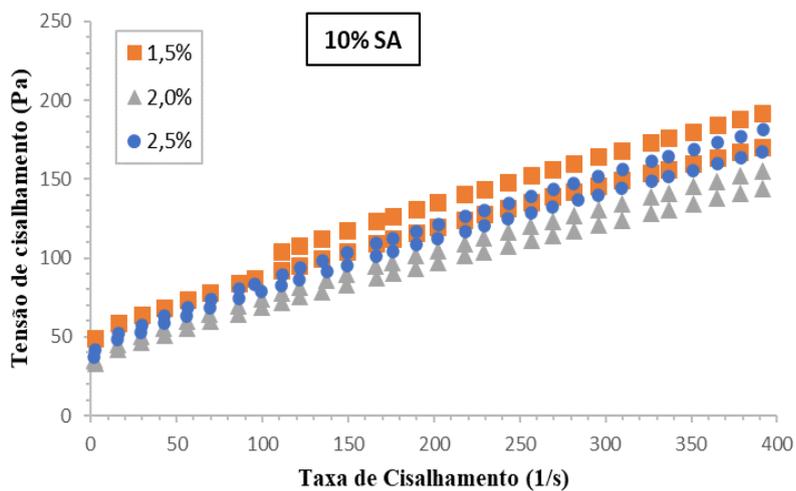
(c)

Foram realizados, também, ensaios de fluxo com as pastas contendo o aditivo G (4.22 e 4.25). Diferente das pastas com o aditivo A, a sílica ativa teve maior influência nas propriedades das pastas contendo o aditivo G. Nas Figuras 4.18 a 4. as propriedades tendem a aumentar de acordo com o acréscimo da adição à mistura, demonstrando um menor potencial desse aditivo, também visualizado quantitativamente pelas tabelas mais adiante (Tabelas 4.7 e 4.8).

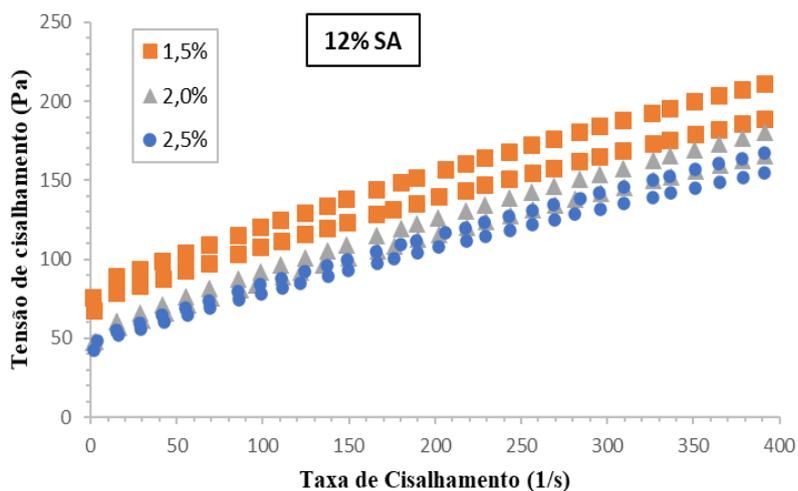
Figura 4.22 – Gráficos de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do Aditivo G com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)

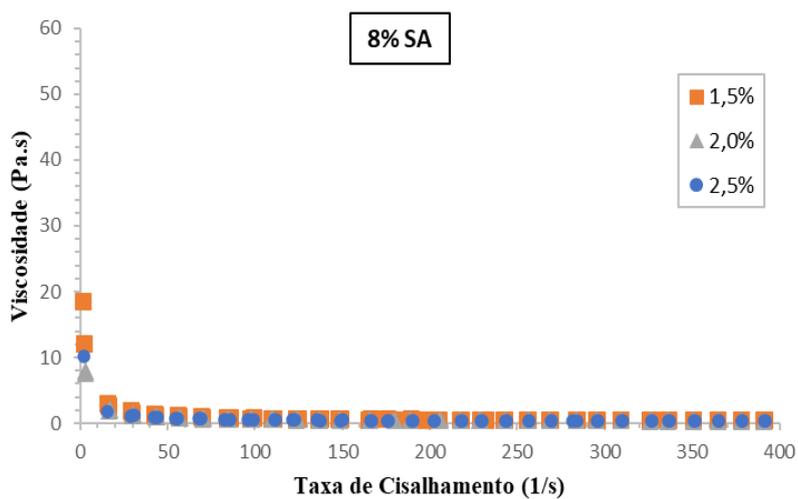


(b)

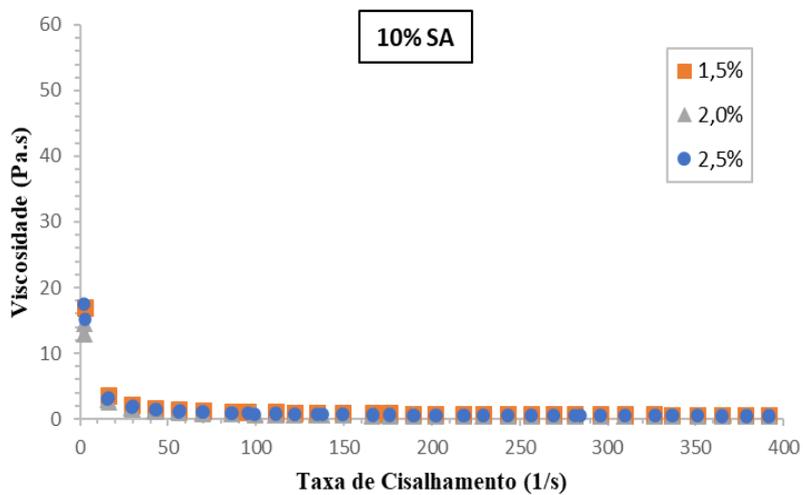


(c)

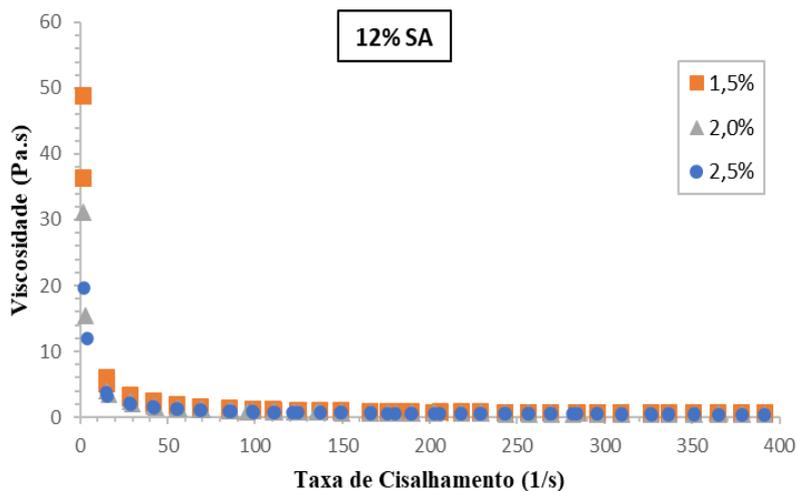
Figura 4.23 – Gráficos de taxa de cisalhamento x viscosidade do Aditivo G com relação a/lig 0,40 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)

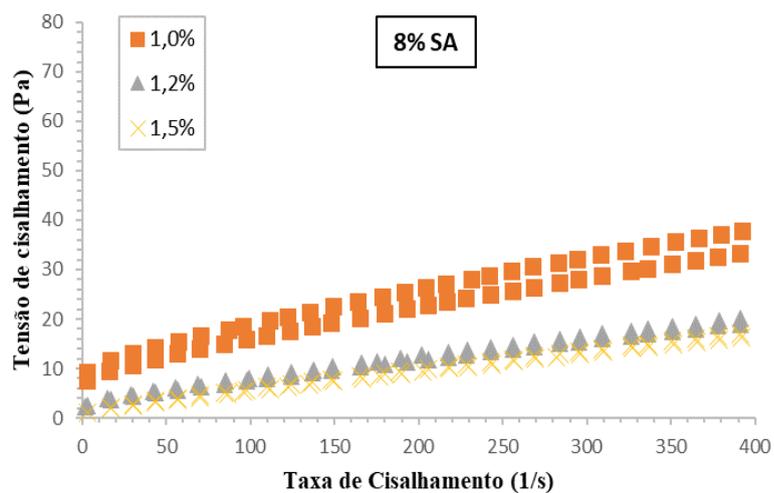


(b)

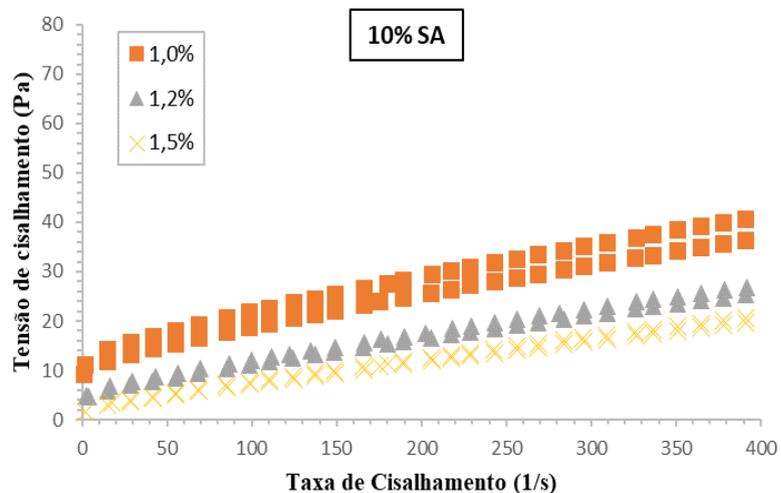


(c)

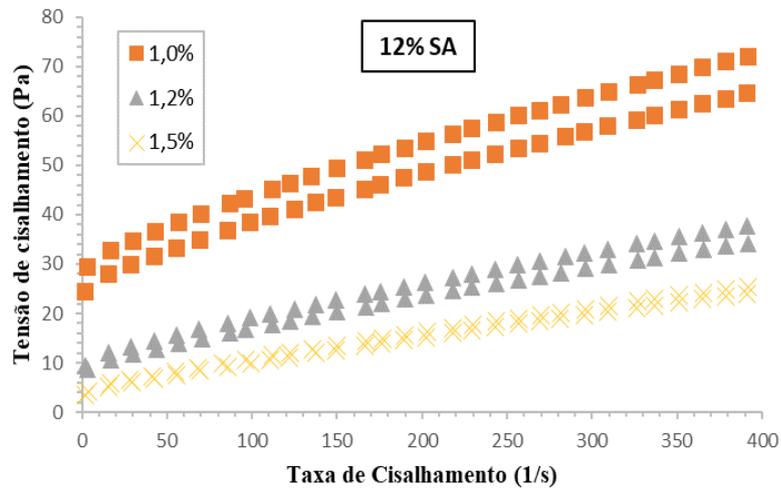
Figura 4.24 – Gráfico de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento do Aditivo G com relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)

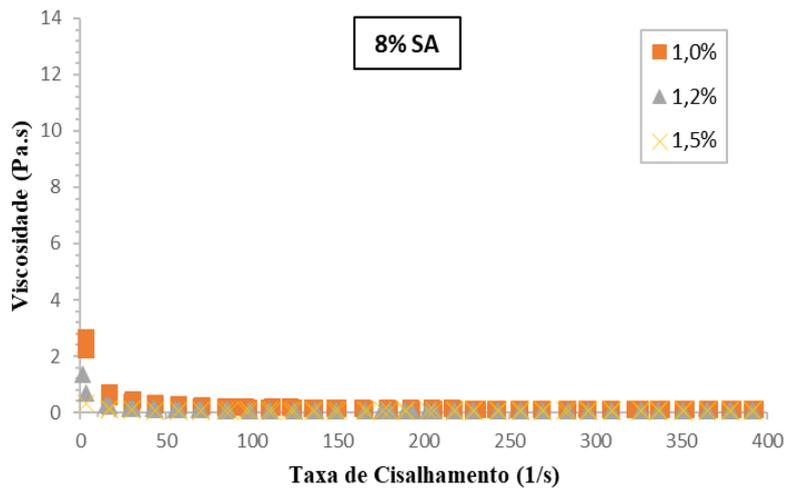


(b)

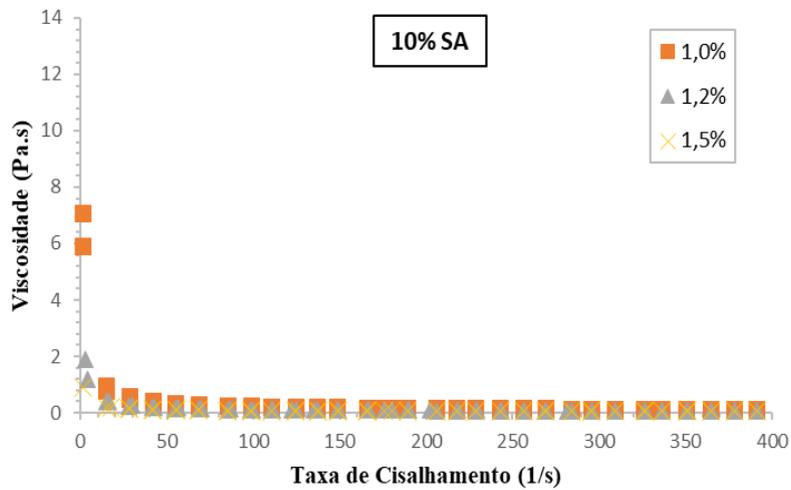


(c)

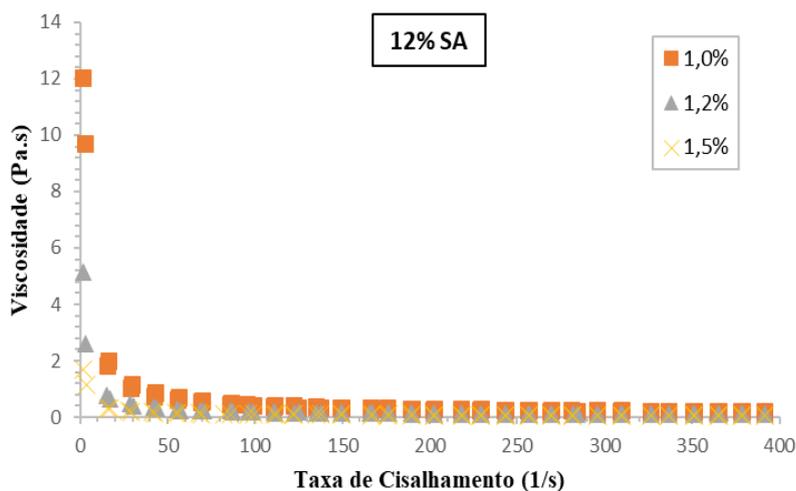
Figura 4.25 – Gráfico de taxa de cisalhamento x viscosidade do Aditivo G com relação relação a/lig 0,55 e sílica ativa no teor de (a) 8%, (b) 10% e (c) 12%.



(a)



(b)



(c)

Além dos valores de viscosidade e tensão obtidos com os ensaios feitos nas pastas contendo a sílica ativa, foram colocados nas tabelas valores das viscosidades/tensões de referência (somente com o uso da sílica ativa, sem aditivo químico) e também, na última coluna, os valores de viscosidade/tensão obtidos utilizando somente aditivo nas pastas e sem o uso de adição mineral.

Ademais, as propriedades das pastas com relação a/lig 0,40 serão comparadas com a referência da pasta de relação a/lig 0,55, devido as particularidades já mencionadas. As Tabelas 4.5 a 4.8 apresentam os resultados de viscosidade aparente e tensão de escoamento das pastas de cimento estudadas com ambos os aditivos, de acordo com o teor de adição e a relação a/lig.

Tabela 4.5 – Resultados dos valores de viscosidade com o aditivo A.

Pasta de Cimento	Teor de Aditivo (%)	Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade REF (a/lig 0,55)	Viscosidade (Pa.s) sem adição
A04SA8	0,9	0,44	0,61	0,30
	1,2	0,27		0,26
	1,5	0,20		0,24
	1,7	0,17		0,27
A04SA10	0,9	0,40	0,64	0,30
	1,2	0,29		0,26
	1,5	0,18		0,24
	1,7	0,24		0,27
A04SA12	0,9	0,41	0,70	0,30
	1,2	0,18		0,26
	1,5	0,18		0,24
	1,7	0,11		0,27
A055SA8	0,7	0,09	0,61	0,06
	0,9	0,08		0,08

	1,2	0,06		0,06
	1,5	0,07		0,07
A055SA10	0,7	0,12	0,64	0,06
	0,9	0,09		0,08
	1,2	0,06		0,06
	1,5	0,06		0,07
	0,7	0,13		0,06
A055SA12	0,9	0,09	0,70	0,08
	1,2	0,07		0,06
	1,5	0,06		0,07

Tabela 4.6 – Resultados dos valores de tensão de escoamento com o aditivo A.

Pasta de Cimento	Teor de Aditivo (%)	Tensão de Escoamento (Pa)	Tensão de Escoamento REF (a/lig 0,55)	Tensão de Escoamento (Pa) sem adição
A04SA8	0,9	173,90	236,80	117,50
	1,2	107,20		103,50
	1,5	79,40		82,60
	1,7	68,30		105,40
A04SA10	0,9	158,10	249,70	117,50
	1,2	112,10		103,50
	1,5	68,50		82,60
	1,7	93,40		105,40
A04SA12	0,9	162,00	275,40	117,50
	1,2	71,40		103,50
	1,5	70,10		82,60
	1,7	41,60		105,40
A055SA8	0,7	36,60	236,80	25,30
	0,9	32,30		30,30
	1,2	22,10		22,50
	1,5	28,40		28,10
A055SA10	0,7	45,80	249,70	25,30
	0,9	35,60		30,30
	1,2	24,20		22,50
	1,5	23,40		28,10
A055SA12	0,7	48,80	275,40	25,30
	0,9	35,40		30,30
	1,2	28,90		22,50
	1,5	24,80		28,10

Tabela 4.7 – Resultados dos valores de viscosidade com o aditivo G.

Pasta de Cimento	Teor de Aditivo (%)	Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade REF (a/lig 0,55)	Viscosidade (Pa.s) sem adição
G04SA8	1,5	0,37	0,61	0,21
	2,0	0,34		0,25
	2,5	0,30		0,21
G04SA10	1,5	0,46	0,64	0,21
	2,0	0,38		0,25
	2,5	0,45		0,21
G04SA12	1,5	0,51	0,70	0,21
	2,0	0,44		0,25
	2,5	0,41		0,21

G055SA8	1,0	0,09	0,61	0,03
	1,2	0,05		0,02
	1,5	0,04		0,02
G055SA10	1,0	0,10	0,64	0,03
	1,2	0,07		0,02
	1,5	0,05		0,02
G055SA12	1,0	0,17	0,70	0,03
	1,2	0,09		0,02
	1,5	0,06		0,02

Tabela 4.8 – Resultados dos valores de tensão de escoamento com o aditivo G.

Pasta de Cimento	Teor de Aditivo (%)	Tensão de Escoamento (Pa)	Tensão de Escoamento REF (a/lig 0,55)	Tensão de Escoamento (Pa) sem adição
G04SA8	1,5	143,70	236,80	82,20
	2,0	130,80		97,90
	2,5	116,30		82,90
G04SA10	1,5	179,30	249,70	82,20
	2,0	148,10		97,90
	2,5	172,40		82,90
G04SA12	1,5	199,70	275,40	82,20
	2,0	171,50		97,90
	2,5	159,50		82,90
G055SA8	1,0	35,50	236,80	11,70
	1,2	19,50		8,70
	1,5	16,60		8,40
G055SA10	1,0	38,40	249,70	11,70
	1,2	26,10		8,70
	1,5	20,10		8,40
G055SA12	1,0	68,30	275,40	11,70
	1,2	36,00		8,70
	1,5	24,70		8,40

De maneira geral, analisando-se as tabelas e as figuras das pastas com ambos os aditivos, houve uma tendência de redução da viscosidade e da tensão à medida em que se aumentou o teor de aditivo, confirmando o seu comportamento pseudoplástico, mesmo com o uso da sílica ativa. Ao se comparar com os valores das propriedades das pastas sem o uso da adição, percebeu-se um acréscimo, previamente esperado, uma vez que a adição mineral tende a deixar as misturas mais viscosas e com maior tensão de escoamento.

Entretanto, para o aditivo A, percebe-se que, para a propriedade reológica de viscosidade teve-se uma tendência de se equiparar com as viscosidades sem o uso da adição em pastas contendo somente aditivos, indicando que esse aditivo possui grande potencial de redução da viscosidade, independentemente dos materiais adicionados na mistura e com teores relativamente baixos, como visualizado graficamente.

Para uma primeira análise, observando a Tabela 4.5 com os valores de viscosidade para a relação a/lig 0,40 e 8% de sílica, considerando o teor ótimo de aditivo de 0,9%, observa-se que houve uma redução de 28% da viscosidade em relação à viscosidade de referência (de 0,61 Pa.s para 0,44 Pa.s) e acréscimo de 32% (de 0,30 Pa.s para 0,44 Pa.s) em relação à viscosidade sem adição. Quando se utilizou 1,2% desse aditivo, houve uma queda significativa nesses valores, sendo de uma redução de 56% em relação à viscosidade de referência (de 0,61 Pa.s para 0,27 Pa.s) e um acréscimo de somente 3,7% em relação à viscosidade da pasta sem adição (de 0,26 Pa.s para 0,27 Pa.s).

Para o teor de 10% de sílica, ainda considerando o teor ótimo, encontrou-se uma redução de 38% da viscosidade em relação à viscosidade de referência (de 0,64 Pa.s para 0,40 Pa.s) e um acréscimo de 25% em relação à viscosidade sem adição (de 0,30 Pa.s para 0,40 Pa.s). Da mesma forma, quando foi utilizado 1,2% desse aditivo se obteve uma redução relevante dos valores das propriedades, sendo uma queda de 55% em relação à referência (de 0,64 Pa.s para 0,29 Pa.s) e apenas um acréscimo de 10% em relação à pasta sem adição (de 0,26 Pa.s para 0,29 Pa.s).

Isso ainda se repetiu para o terceiro teor escolhido, de 12%, no qual ao se utilizar a quantidade de 1,2% se obteve melhor desempenho das pastas de cimento, com uma redução de 74% da viscosidade em relação à viscosidade de referência (de 0,70 Pa.s para 0,18 Pa.s) e, diferentemente dos outros teores, também se teve uma redução da viscosidade de 31% em relação à viscosidade da pasta sem adição (de 0,26 Pa.s para 0,18 Pa.s).

Todo esse comportamento foi semelhante para a propriedade de tensão de escoamento, reduzindo em uma proporção significativa em relação à tensão de escoamento das pastas de referência e com um leve acréscimo em relação à tensão de escoamento das pastas sem a sílica ativa, visto na Tabela 4.6.

Enquanto que para a relação a/lig de 0,55, considerando o teor ótimo de 0,7% do aditivo, houve redução de 85% em relação à referência (de 0,61 Pa.s para 0,09 Pa.s) e aumento de 33% em relação à viscosidade sem adição (de 0,06 Pa.s para 0,09 Pa.s). Quando comparado com os outros teores de aditivos utilizados, a diferença entre as propriedades não foi tão significativa, demonstrando que, definitivamente, esse é o teor ótimo a ser utilizado para este aditivo quando a relação a/lig é de 0,55.

Da mesma forma, para os teores de 10% e 12% de sílica ativa, respectivamente, obteve-se

uma redução de 81% (de 0,64 Pa.s para 0,12 Pa.s) e também 81% (de 0,70 Pa.s para 0,13 Pa.s) em relação às viscosidades de referência e um acréscimo de 50% (de 0,06 Pa.s para 0,12 Pa.s) e de 54% (de 0,06 Pa.s para 0,13 Pa.s) em relação às viscosidades das pastas sem adição.

Assim como para o aditivo A, os resultados das propriedades reológicas com o uso do aditivo G, de maneira geral ao se analisar as tabelas, teve uma tendência de redução da viscosidade e da tensão de escoamento ao se aumentar a quantidade de aditivo, também sustentando o seu comportamento pseudoplástico. Via de regra, para ambas as relações a/lig, esse aditivo se comportou exatamente como o esperado ao se acrescentar uma adição mineral nas misturas, independentemente do teor utilizado.

Para uma primeira análise, analisando a Tabela 4.7, com a relação a/lig 0,40 e teor de 8% de sílica e o teor ótimo de aditivo de 1,5%, obteve-se uma redução de 39% em relação à viscosidade de referência (de 0,61 Pa.s para 0,37 Pa.s) e um acréscimo de 43% em relação às viscosidades das pastas sem adição (de 0,21 Pa.s para 0,37 Pa.s). Para o mesmo teor de aditivo e um teor de 10% de adição, verificou-se uma redução de 28% em relação à viscosidade de referência (de 0,64 Pa.s para 0,46 Pa.s) e um aumento de 54% (0,21 Pa.s para 0,46 Pa.s). Por último, para o teor de 12% de sílica, a redução foi de 27% (de 0,70 Pa.s para 0,51 Pa.s) em relação à viscosidade de referência e acréscimo de 59% (0,21 Pa.s para 0,51 Pa.s) em relação às pastas sem sílica.

Para as pastas com relação a/lig 0,55, os comportamentos foram mais ideais, considerando o teor ótimo de 1,0% e a propriedade de viscosidade. Para o teor de 8% de sílica ativa, houve uma redução de 85% em relação à referência (de 0,61 Pa.s para 0,09 Pa.s) e um acréscimo de 67% em relação às pastas sem adição (de 0,03 Pa.s para 0,09 Pa.s). Já para o teor de 10% de adição, percebeu-se uma redução de 84% em relação à referência (0,64 Pa.s para 0,10 Pa.s) e um acréscimo de 70% em relação às pastas sem adição (de 0,03 Pa.s para 0,10 Pa.s). Por último, analisando-se o teor de 12% de sílica, obteve-se uma diminuição de 75% em relação à referência (de 0,70 Pa.s para 0,17 Pa.s) e um aumento de 82% em relação às pastas sem adição (de 0,03 Pa.s para 0,17 Pa.s).

Ao se elevar os teores de aditivos nas pastas, a diferença nos valores das propriedades não foi tão significativa, lembrando que o teor ótimo de 1,5% já ultrapassa os valores da faixa indicada pelo fabricante, que vai somente até 1,0% de aditivo. E, também como nas pastas

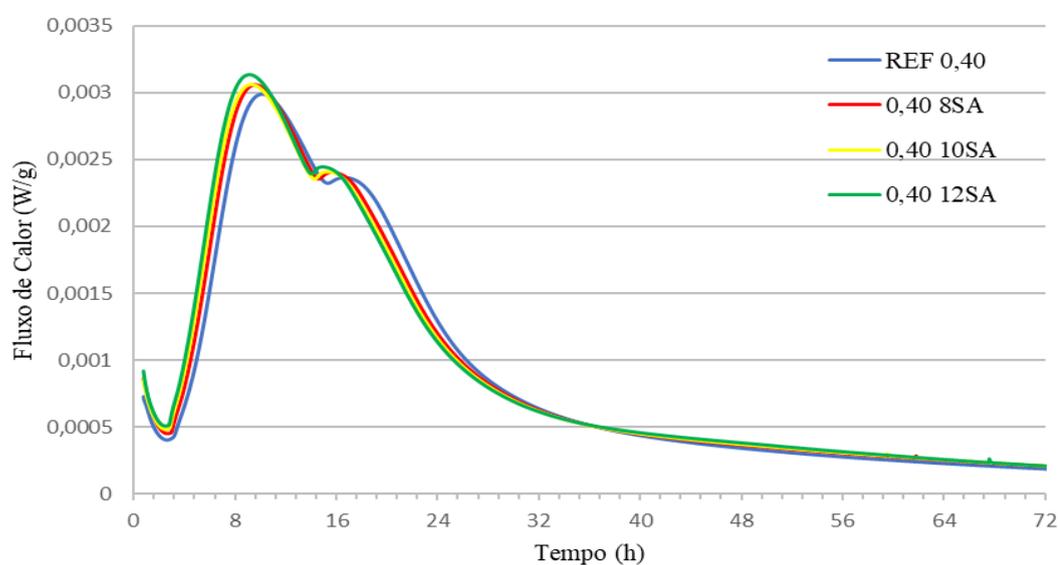
com o aditivo A, as pastas com o aditivo G repetiu o comportamento dos valores de tensão de escoamento (Tabela 4.8).

Considerando todas as análises feitas, com ambos os aditivos, percebe-se que o aditivo A tem mais influência e maior compatibilidade com as pastas contendo sílica ativa, independentemente dos teores de aditivo utilizados. Dessa forma, para se prosseguir com os ensaios de forma afunilada e mais precisa nas análises, foi determinado o seguimento da pesquisa com o uso somente do aditivo A.

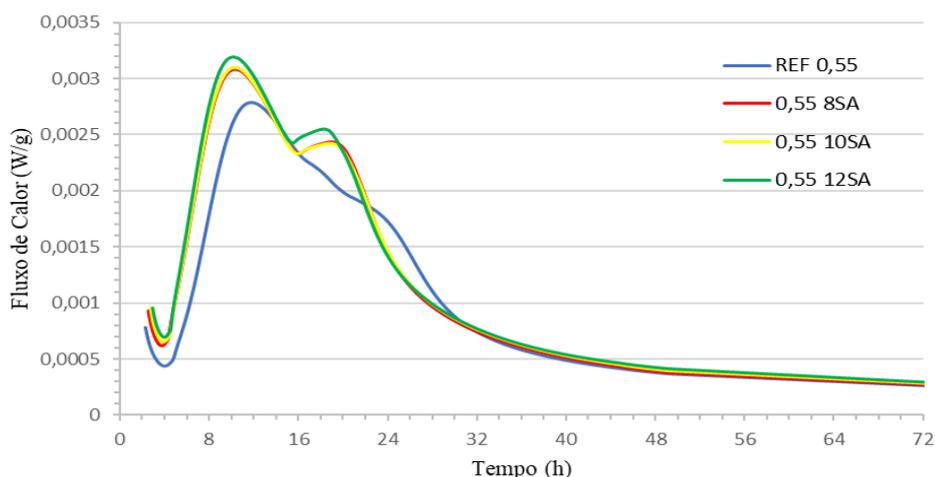
4.1.4 Calorimetria por Condução Isométrica

Para a realização do ensaio de calorimetria por condução isométrica foram determinadas oito dosagens, sendo compostas pelos três teores de sílica ativa (8%, 10% e 12%), duas relações a/lig (0,40 e 0,55) e o aditivo A, com a finalidade de complementar os resultados do trabalho. Na Figura 4.26 estão apresentadas as curvas de fluxo de calor liberado em função do tempo para as pastas com relação a/lig 0,40 e 0,55.

Figura 4.26 – Curvas de fluxo de calor liberado em função do tempo das pastas com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.



(a)



(b)

Observa-se que as curvas foram bem similares para a relação a/lig 0,40, ou seja, a sílica ativa não teve influência significativa no comportamento das curvas, assim como nas propriedades reológicas, apenas antecipando de forma bem sutil as reações de hidratação. Além disso, nota-se também a estabilização da liberação de fluxo de calor por volta das 48 horas, para todas as pastas.

As pastas com relação a/lig 0,55 com sílica ativa tiveram comportamento semelhantes, sendo a única diferença nítida para a pasta de referência com relação a/lig 0,55, representada pela curva azul no gráfico da Figura 4.30b, que demonstra a sílica em uma relação a/lig maior tem um efeito com maior potencialidade na hidratação de pastas de cimento.

A Tabela 4.9 exibe um resumo dos parâmetros calculados do ensaio das oito dosagens estudadas, obtidos pela análise gráfica por meio do método das tangentes.

Tabela 4.9 – Resumo dos parâmetros do ensaio de calorimetria para todas as amostras

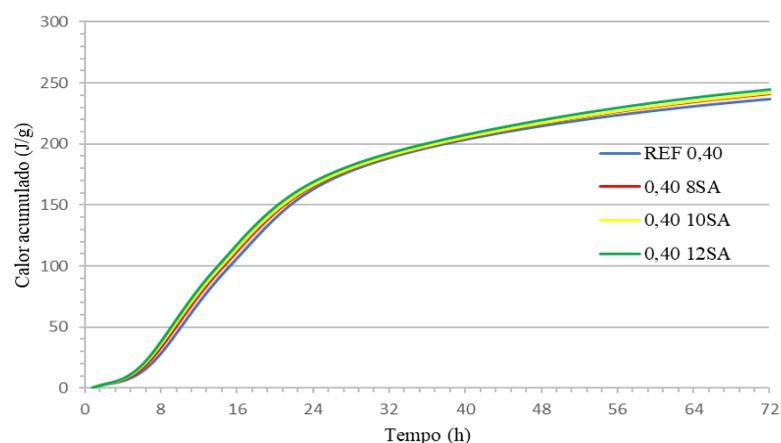
Propriedade medida	0,40 REF	0,40; 8SA	0,40; 10SA	0,40; 12SA	REF 0,55	0,55; 8SA	0,55; 10SA	0,55; 12SA
Calor acumulado total (J/g)	263,03	272,06	273,24	275,83	258,05	277,68	281,14	286,95
Pico de calor C-S-H (mW/g)	2,99	3,06	3,16	3,23	2,79	3,08	3,10	3,19
Tempo do pico do C-S-H (horas)	10,13	9,58	9,28	9,15	11,78	10,33	10,30	10,15
Taxa de aceleração (%o)	0,120	0,132	0,140	0,113	0,098	0,125	0,135	0,115

Ao se analisar os picos de calor e o calor acumulado nas reações de hidratação, confirma-se que, para ambas as relações a/lig, tem-se uma diferença muito mínima ao se adicionar a sílica ativa nas pastas, com tendência de aumento, com o aumento da sílica ativa. Além disso, ainda

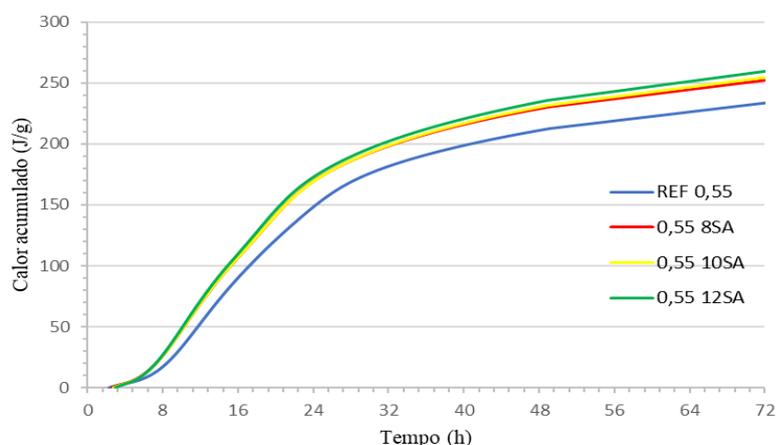
é possível observar que o acréscimo de sílica ativa ocasiona uma leve redução no tempo do pico de formação de C-S-H.

O período de aceleração descreve o período das principais reações de formação de C-S-H e CH, podendo ser associada com os tempos de pega das misturas. Dessa forma, por meio da taxa de aceleração, percebe-se que a presença da adição mineral altera a cinética de reação do cimento, mas também não é de forma tão significativa, assim como visto nas figuras anteriores relativas aos ensaios oscilatórios. O que é possível determinar é que, a partir do teor de 12% de sílica ativa, essa taxa de aceleração parece começar a reduzir, isso pode expressar que um teor mais alto dessa adição pode vir a prejudicar a mistura ao invés de melhorar suas propriedades. Por meio desse ensaio ainda foi analisado o calor acumulado durante as 72 horas de ensaio que estão representados na Figuras 4.27, com relações a/lig 0,40 e 0,55.

Figura 4.27 – Curvas de calor acumulado em função do tempo das pastas com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.



(a)



(b)

O aumento do calor acumulado durante esse período do ensaio está relacionado com a utilização da adição mineral e sua atuação nas reações de hidratação das misturas cimentícias, uma vez que a sílica ativa tem ação pozolânica. As pastas com relação a/lig 0,40, mostram-se mais homogêneas em seu comportamento, assim como pelas pastas de relação a/lig 0,55, exceto pela pasta de referência que teve pequeno calor acumulado inferior as demais durante sua cinética de hidratação.

4.2 RESULTADOS DOS CONCRETOS

Foram determinadas oito dosagens de concretos autodensáveis a partir dos resultados obtidos nas pastas, com as mesmas composições utilizadas nos ensaios de calorimetria, acrescentando-se os agregados, com o intuito de compreender e comparar o comportamento das composições escolhidas e como forma de validar o estudo realizado nas pastas de cimento e comprovar sua eficácia. Além disso, a intenção foi analisar a transposição do comportamento das pastas para os concretos.

4.2.1 Ensaios no Estado Fresco

As dosagens dos concretos utilizados na pesquisa foram ajustados para aquisição dos parâmetros das suas propriedades no estado fresco. Para a análise da sua trabalhabilidade e comparação com os ensaios de reometria, foram realizados ensaios de espalhamento, funil V e caixa L. Os teores de aditivos utilizados foram determinados de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de fluxo nas pastas contendo adições, levando em consideração as melhorias nas propriedades reológicas.

A caracterização reológica das misturas de concreto autoadensáveis foi realizada por meio de ensaios de cisalhamento executados com um reômetro de concreto. Esse tipo de ensaio proporciona a elaboração de curvas de “torque *versus* velocidade de rotação” que trazem dois dados fundamentais, sendo primeiro a área de histerese (que quanto menor for, maior a eficiência da dispersão da mistura) e segundo o perfil de curva de cisalhamento que determina a natureza reológica do concreto (PILEGGI, 2001).

Utilizando apenas o recurso visual foi possível observar aspectos de concretos coesos e que a argamassa envolvia os agregados de forma homogênea. Nas Figuras 4.28 a 4.35, é possível observar os aspectos visuais desses concretos.

Figura 4.28 – Consistência do concreto REF04.

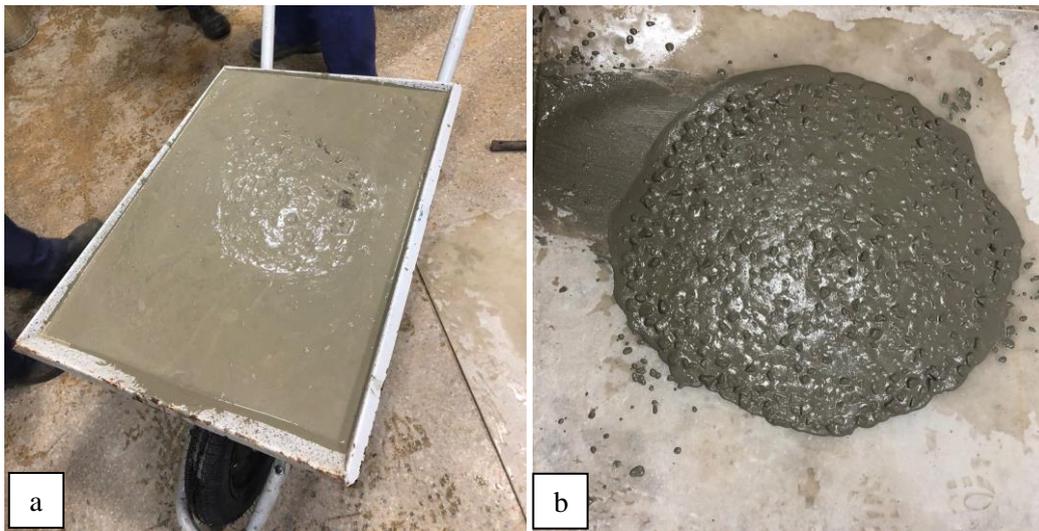


Figura 4.29 – Consistência do concreto C04SA8.

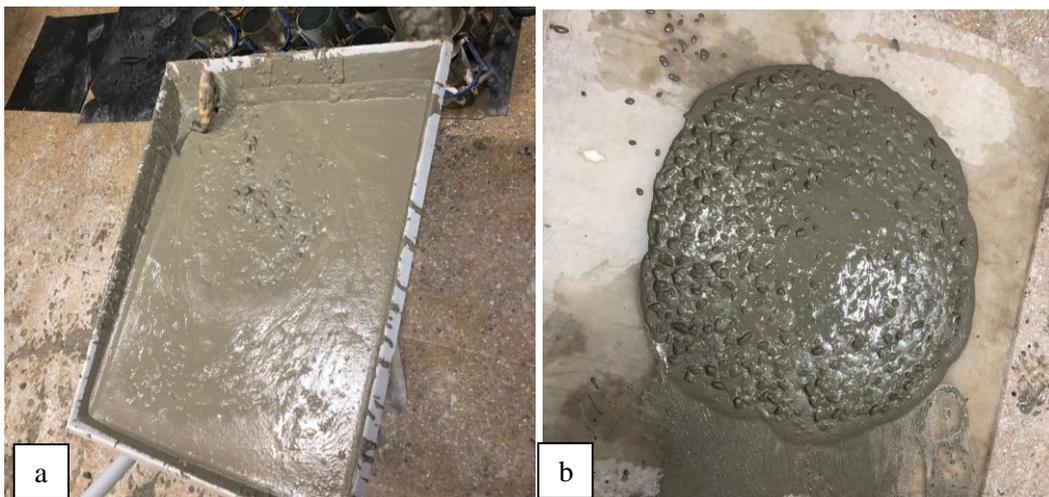


Figura 4.30 – Consistência do concreto C04SA10.

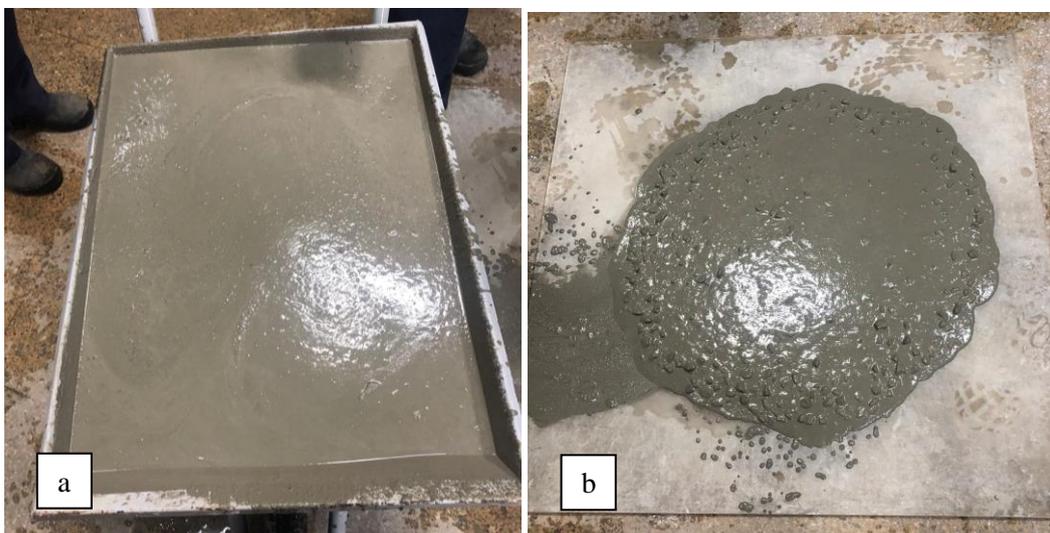
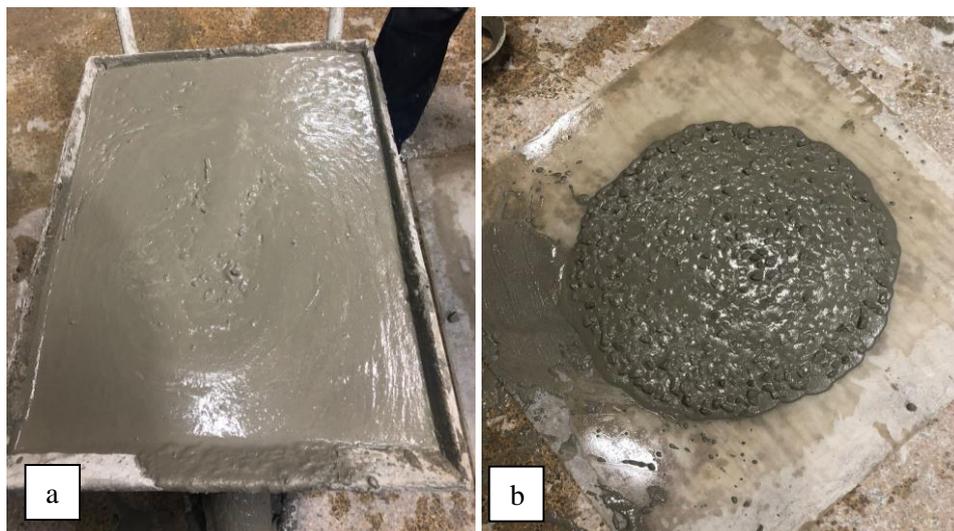


Figura 4.31 – Consistência do concreto C04SA12.



A partir das análises visuais, percebe-se uma excelente coesão das misturas com relação a/lig 0,40, onde não houve segregação ou exsudação dos concretos, sendo altamente argamassados. Percebe-se, entretanto, pela figura 4.0, que a mistura contendo 10% de sílica ativa e 0,9/1,2% do aditivo A se mostrou mais fluida e levemente menos coesa.

Figura 4.32 – Consistência do concreto REF055.

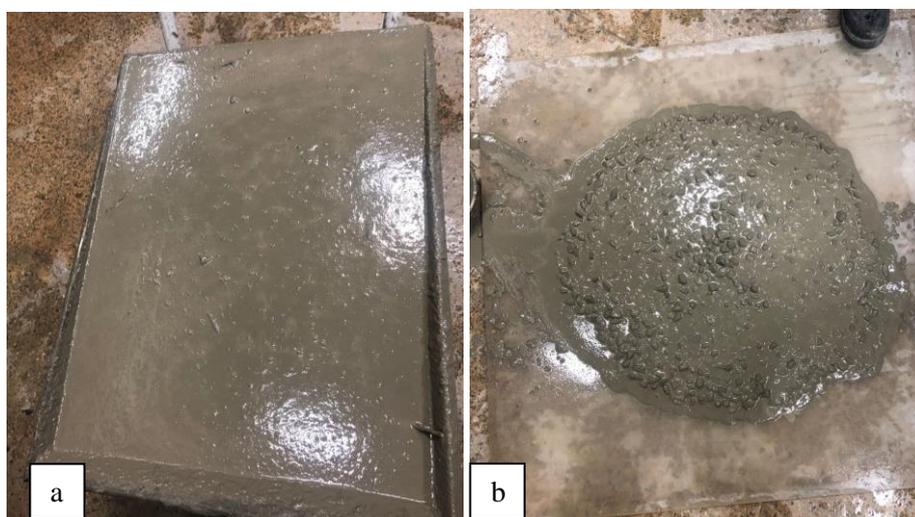


Figura 4.33 – Consistência do concreto C055SA8.

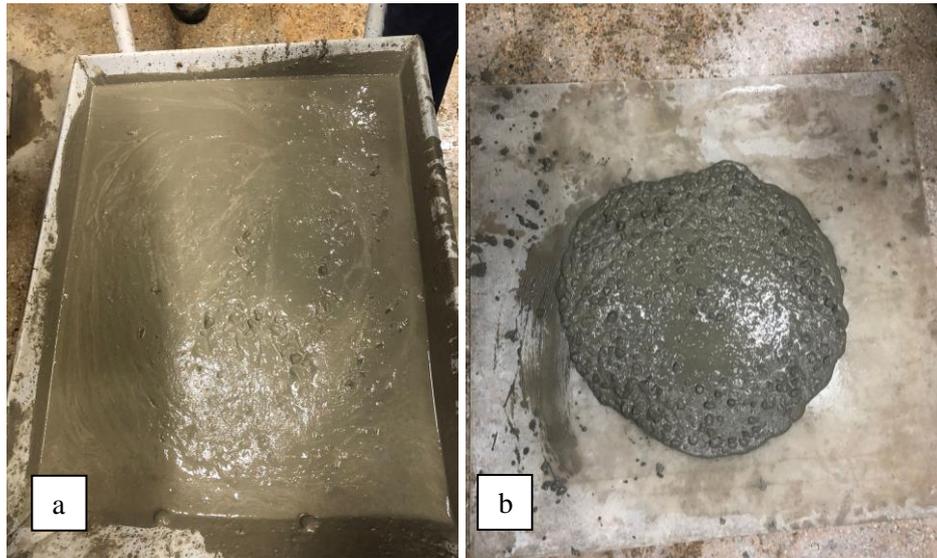


Figura 4.34 – Consistência do concreto C055SA10.

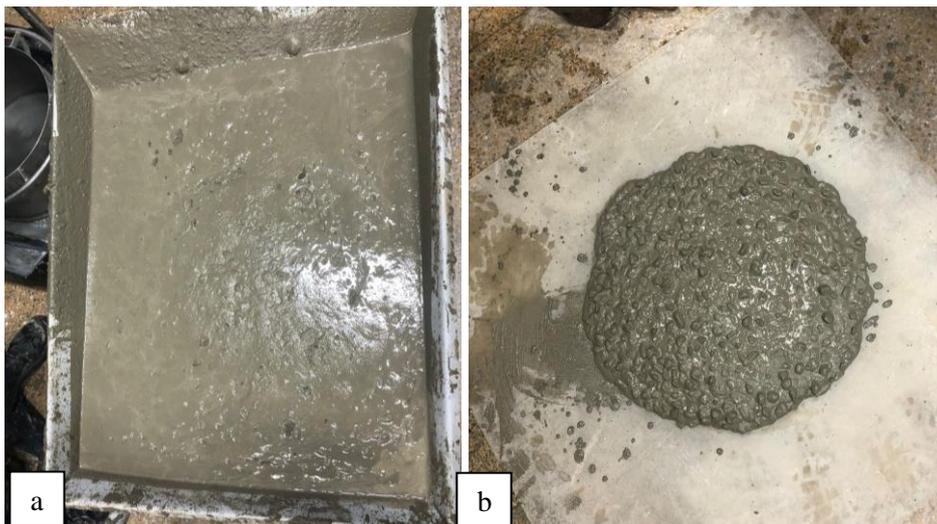
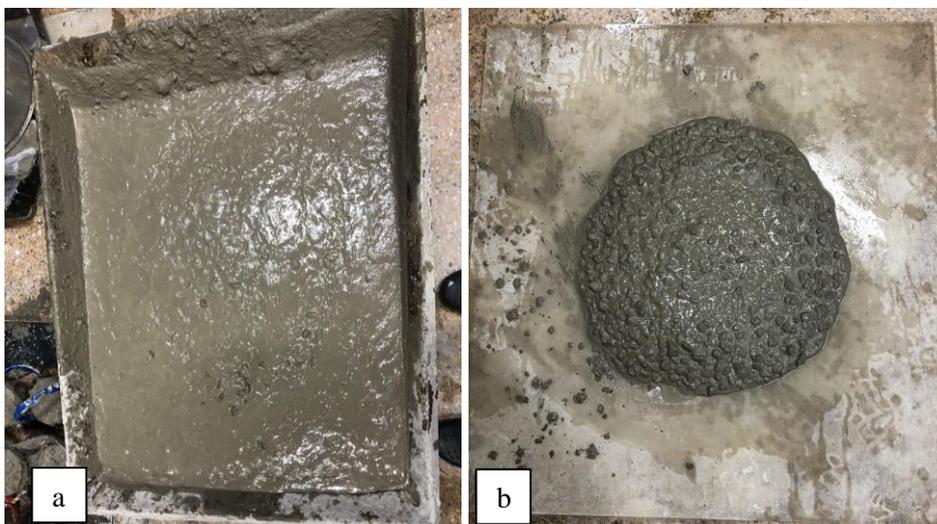


Figura 4.35 – Consistência do concreto C055SA12.

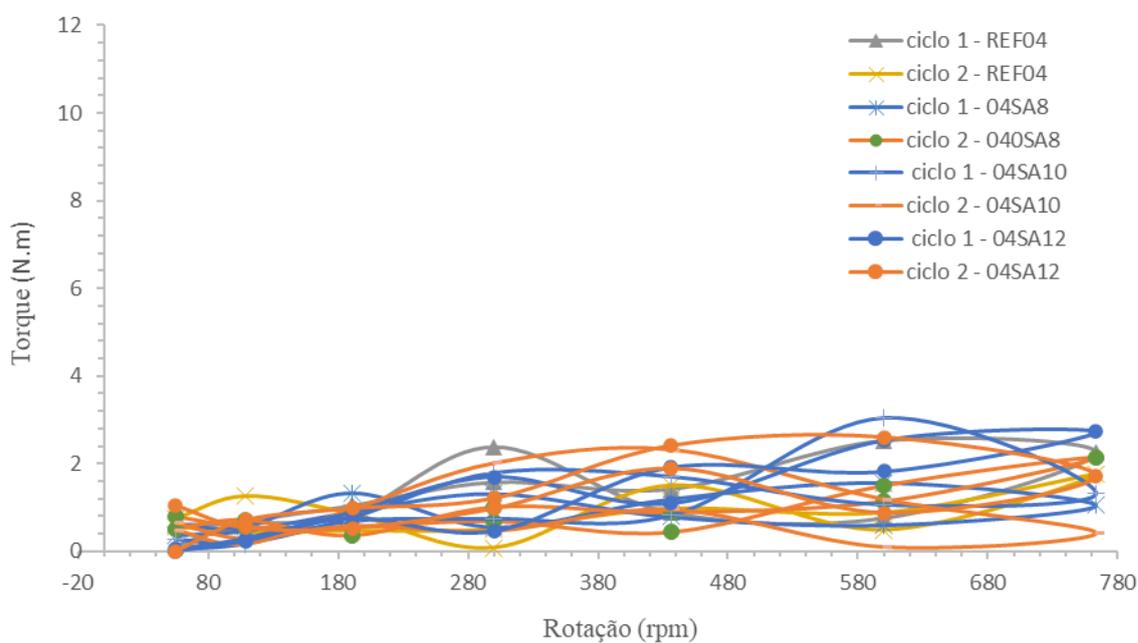


Para as misturas de a/lig 0,55, foi utilizado o mesmo teor de aditivo (0,7%) e percebeu-se que apenas a referência teve uma tendência à exsudação, não atingindo-a de fato. Isso demonstra que, à medida em que se acrescentou maiores teores de sílica, as misturas se tornaram mais consistentes, mas ainda sim coesas e trabalháveis.

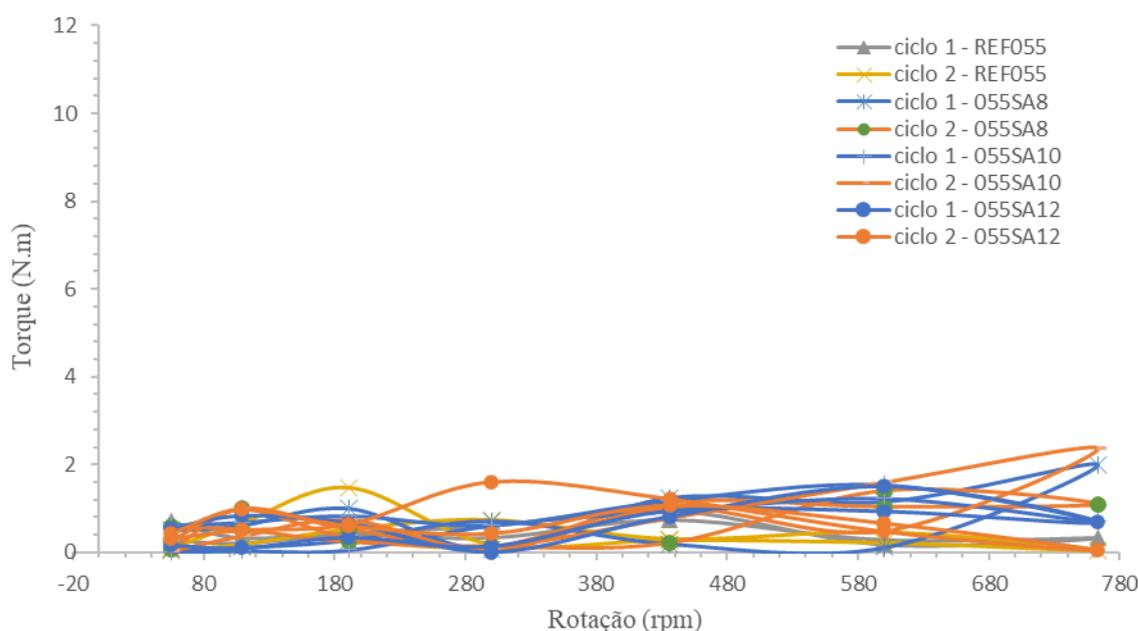
Na Figura 4.36 estão expostos os gráficos obtidos pelo reômetro, observando-se nas coordenadas x e y os valores de rotação, em rpm, e torque, em N.m, respectivamente. Essas grandezas exprimem o estado de fluidez e coesão do concreto que podem determinar as diferenças e semelhanças reológicas entre as dosagens.

Dessa forma, o torque é equivalente ao que chamamos de tensão de cisalhamento, enquanto que a rotação equivale à taxa de cisalhamento. Pelos gráficos percebe-se que, para ambas as relações a/lig, o comportamento são determinados como usuais e esperados, demonstrando boa consistência e coesão, como já esperado baseando-se nos resultados obtidos nas pastas.

Figura 4.36 – Curvas de cisalhamento das dosagens com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.



(a)



(b)

Por meio dos gráficos, onde foram posicionadas todas as curvas, resultados dos ensaios reológicos dos concretos com relação a/lig 0,40 e 0,55, percebe-se um comportamento bastante similar entre as dosagens, exatamente como visto nas pastas, independentemente do teor de sílica ativa utilizado. Dessa forma, além de apresentar boa trabalhabilidade (tanto visualmente, quanto graficamente), o comportamento reológico dos concretos foram uma extensão do comportamento das pastas de cimento. Além disso, percebe-se baixas áreas de histerese em todas as dosagens, confirmando mais uma vez uma boa coesão e dispersão das misturas.

A derivada do torque pela rotação representa a viscosidade aparente – que é assim chamada por não se obter o valor de viscosidade diretamente e sim feita uma relação entre torque e rotação, como a inclinação da curva no ponto analisado. Assim, constata-se que a viscosidade aparentou valores similares, devido à inclinação das curvas e sua proximidade. As curvas apresentam um modelo de variação da viscosidade aparente com a variação da rotação pequena, modelo semelhante ao de Bingham.

A trabalhabilidade dos concretos foi medida, como método comparativo e de aceitação, pelo ensaio de *slump flow* ou espalhamento (visto nas Figuras 4.33 a 4.40). Foi pré-determinado que os concretos deveriam se encaixar pelo menos na primeira classe SF1 determinada por norma, as classificações de acordo com a NBR 15823-2 está na Tabela 4.10, sendo

satisfatório para determiná-los como concreto autoadensáveis.

Tabela 4.10 – Classes de espalhamento do CAA (Adaptado da ABNT NBR 15823-2).

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

Na tabela 4.11 estão contidos os resultados dos ensaios no estado fresco de todas as dosagens dos concretos.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecidos dos concretos.

Concreto	Relação a/lig	Slump Flow Abertura (mm)	Funil V (s)	Caixa L	Ar Incorporado (%)
REF04	0,40	630	3,0	0,8	1,0
C04SA8		698	3,0	0,7	1,3
C04SA10		760	2,5	0,9	0,7
C04SA12		675	4,0	0,7	0,9
REF055	0,55	730	1,5	1,0	0,8
C055SA8		601	2,0	0,7	1,0
C055SA10		565	2,0	0,6	1,0
C055SA12		560	1,5	0,6	1,3

De acordo com os resultados obtidos, todos os concretos se encaixaram dentro da classificação de concreto autoadensáveis, ou seja, na classe SF1. Devido à fixação dos valores dos teores de aditivo, as suas classificações foram diferentes, uma vez que não foi intuito dessa pesquisa pré-determinar nenhum intervalo de espalhamento, somente avaliar a trabalhabilidade e comparar suas propriedades.

Além disso, os valores encontrados nos ensaios de funil V foram completamente satisfatórios, demonstrando grande fluidez dos concretos, os quais fazem analogia à propriedade de viscosidade, uma vez que comprova a boa trabalhabilidade de todas as dosagens. Alguns valores de determinação da habilidade passante por meio do ensaio da Caixa L não chegaram aos valores determinados por norma, entretanto foram totalmente satisfatórios nos outros ensaios realizados.

Outra determinação importante é o teor de ar incorporado nesses concretos, que em todas as dosagens se manteve em baixa proporção, demonstrando que o teor de vazios de ar no concreto foram mínimos, com uma observação de que a utilização de uma maior relação a/lig levou a valores mais baixos de teor de ar incorporado, condizendo com o esperado, já que a

água tende a ocupar mais os espaços vazios.

4.2.2 Ensaios no Estado Endurecido

Para a verificação das suas propriedades no estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção à água e MEV. Na tabela 4.12 estão contidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade de todas as dosagens dos concretos.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios no estado fresco e endurecidos dos concretos.

Concreto	Relação a/lig	Valores Médios de Resistência à Compressão (MPa) [entre parênteses desvio padrão e colchetes coeficiente de variação]				Módulo de Elasticidade (GPa)
		Idades				28
		3	7	28	63	
REF04	0,40	30,2 (1,07) [3,54%]	36,7 (3,10) [8,45%]	45,3 (2,11) [4,65%]	50,9 (2,93) [5,76%]	27,5
C04SA8		33,3 (0,70) [2,10%]	43,9 (2,34) [5,34%]	59,0 (1,26) [2,13%]	66,1 (2,21) [3,34%]	31,9
C04SA10		27,4 (3,02) [11,02%]	40,4 (2,10) [5,21%]	57,6 (2,76) [4,80%]	61,9 (2,13) [3,44%]	30,8
C04SA12		31,8 (0,58) [1,82%]	45,7 (3,15) [6,89%]	51,0 (1,83) [3,59%]	63,4 (3,29) [5,19%]	32,9
REF055	0,55	14,1 (0,47) [3,35%]	21,9 (1,19) [5,45%]	27,0 (1,07) [3,97%]	28,8 (2,42) [8,41%]	23,2
C055SA8		19,3 (1,04) [5,38%]	27,3 (0,35) [1,29%]	38,6 (1,74) [4,50%]	40,2 (1,84) [4,57%]	26,7
C055SA10		19,7 (1,01) [5,15%]	28,6 (2,51) [8,78%]	42,3 (1,36) [3,20%]	41,8 (2,13) [5,10%]	27,2
C055SA12		21,3 (0,72) [3,39%]	26,4 (0,89) [3,37%]	42,1 (2,40) [5,71%]	43,9 (2,11) [4,81%]	27,2

Para os resultados de resistência a compressão foi elaborado a Figura 4.37 para a melhor visualização dos ganhos de resistência e as diferenças entre esses ganhos, de acordo com o teor de sílica ativa utilizado e a relação a/lig de cada um dos concretos. Ainda foi inserido os valores dos módulos de elasticidade também para a comparação dos mesmos parâmetros.

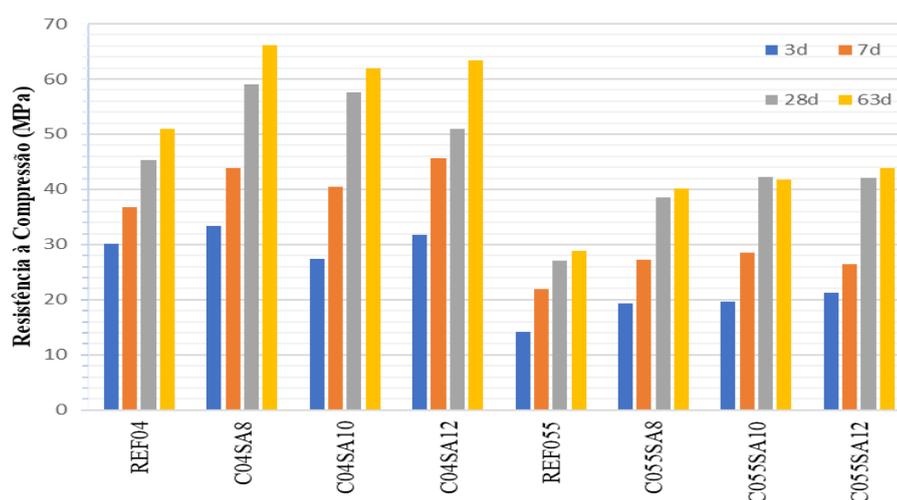
Pelo gráfico verifica-se que as resistências à compressão dos concretos de relação a/lig 0,40 apresentaram valores bem maiores que os concretos de relação a/lig 0,55, fato já esperado

uma vez que a resistência tende a diminuir ao se inserir mais água na mistura.

Para os concretos de relação a/lig 0,40, 8% de sílica ativa apresentaram maiores valores de resistência à compressão e para os concretos de relação a/lig 0,55, os valores entre 8% e 12% foram muito aproximadas.

De modo geral, os concretos apresentaram resistências à compressão entre 25 MPa e 60 MPa aos 28 dias de idade. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os valores de resistência à compressão são definidos a depender da classe de agressividade, sua relação a/lig e a sua utilização. A determinação de valores ideais de resistência irá depender da forma da utilização do concreto

Figura 4.37 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 3, 7, 24 e 63 dias.



Em relação aos valores de módulo de elasticidade, foi elaborado um gráfico relacionando-o com os resultados de resistência à compressão de 28 dias. A tendência dos valores, no geral, foi de serem equivalentes, ou seja, a medida em que a resistência aumentava/diminuía, o módulo acompanhava na mesma proporção. O único valor que chegou a se diferenciar do comportamento restante foi o módulo de elasticidade do C04SA12, que teve um ganho relativamente alto em relação ao seu valor de resistência à compressão (Figura 4.38).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os valores de módulo de elasticidade são determinados em função da resistência à compressão do concreto, considerando o tipo de agregado graúdo utilizado, sendo para resistências de classe C20 a C90, os valores de módulo podem variar de 25 GPa a 47 GPa, isto é, os valores encontrados nesse estudo se encaixam dentro dessa faixa.

Ainda foram comparados graficamente os valores de resistência à compressão aos 28 dias com os valores de espalhamento, vistos nos gráficos da Figura 4.39. Para o concreto com relação a/lig 0,40, o teor de sílica ativa mais interessante foi 8% e para o concreto relação a/lig 0,55, os três teores proporcionaram um comportamento semelhante. De forma que o menor valor (8%) é mais interessante economicamente.

Outro parâmetro analisado foi a absorção por imersão dos concretos estudados e os valores obtidos pelos ensaios para determinação da absorção, do índice de vazios e da massa específica conforme a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2015) apresentados na Tabela 4.13, sendo que foram utilizados dois corpos de prova para cada dosagem e realizada a média dos resultados.

Figura 4.38 – Comparação entre resultados de resistência à compressão x módulo de elasticidade aos 28 dias.

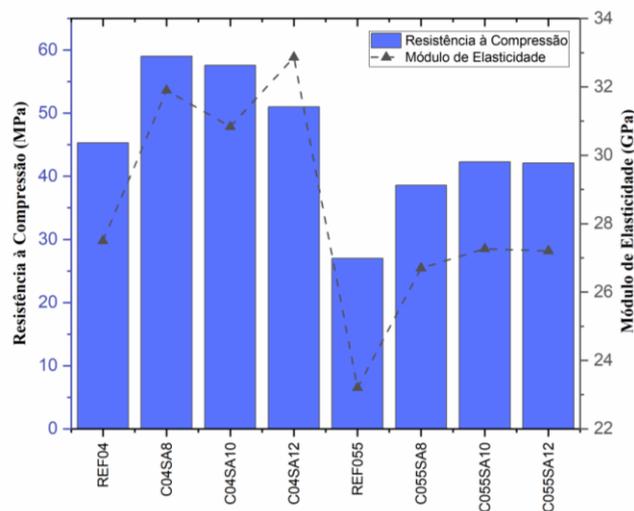


Figura 4.39 – Comparação das resistências à compressão com espalhamento dos concretos com relação a/lig (a) 0,40 e (b) 0,55.

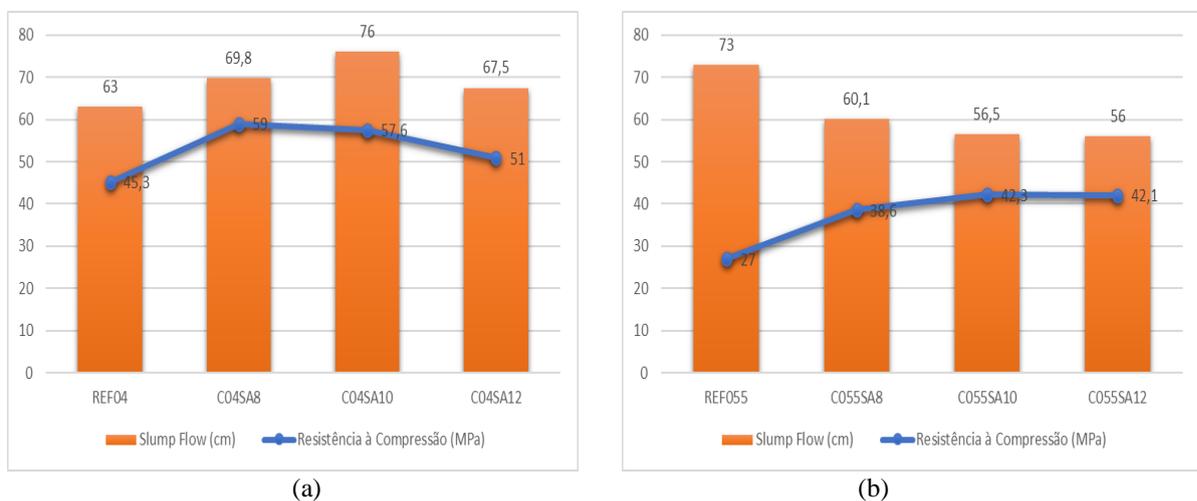


Tabela 4.13 – Resultados da média de ensaios de absorção por imersão.

	REF 0,40	0,40; 8SA	0,40; 10SA	0,40; 12SA	REF 0,55	0,55; 8SA	0,55; 10SA	0,55; 12SA
Absorção (%)	5,02	3,66	3,51	3,71	7,05	5,51	5,29	5,21
Índice de vazios (%)	11,39	8,40	8,12	8,49	15,64	12,14	11,68	11,53
Massa específica (g/cm ³)	2,56	2,51	2,52	2,50	2,63	2,51	2,50	2,50

A inclusão da sílica ativa reduziu a absorção de água e o índice de vazios dos concretos nas duas relações água/ligante, comparativamente aos concretos sem sílica ativa. .

A Figura 4.40 apresenta um comparativo entre a resistência à compressão e os resultados de absorção de água em ambas as relações a/lig. É possível verificar uma tendência para quase todos os concretos que a diminuição da resistência à compressão reflete em valores altos de absorção, demonstrando que o bom desempenho e qualidade dos concretos decaem em ambos os aspectos. A Figura 4.45 apresenta um comparativo entre a resistência à compressão e os resultados de absorção de água em ambas as relações a/lig. É possível verificar uma tendência para quase todos os concretos que a diminuição da resistência à compressão reflete na redução da absorção de água.

Outro ensaio de absorção realizado foi o de absorção por capilaridade, conforme ABNT NBR 9779 (ABNT, 2012), com resultados apresentados na Tabela 4.14 e no gráfico da Figura 4.41, no qual foram utilizados três corpos de prova para cada dosagem e o resultado é a média entre eles. Ressaltando que os ensaios foram feitos somente com amostras com relação a/lig 0,40, devido a indisponibilidade de amostras dos concretos com relação a/lig 0,55.

Figura 4.40 – Gráficos comparativos entre resistência à compressão e absorção de água dos concretos com relação a/lig (a) 0,40; (b) 0,55.

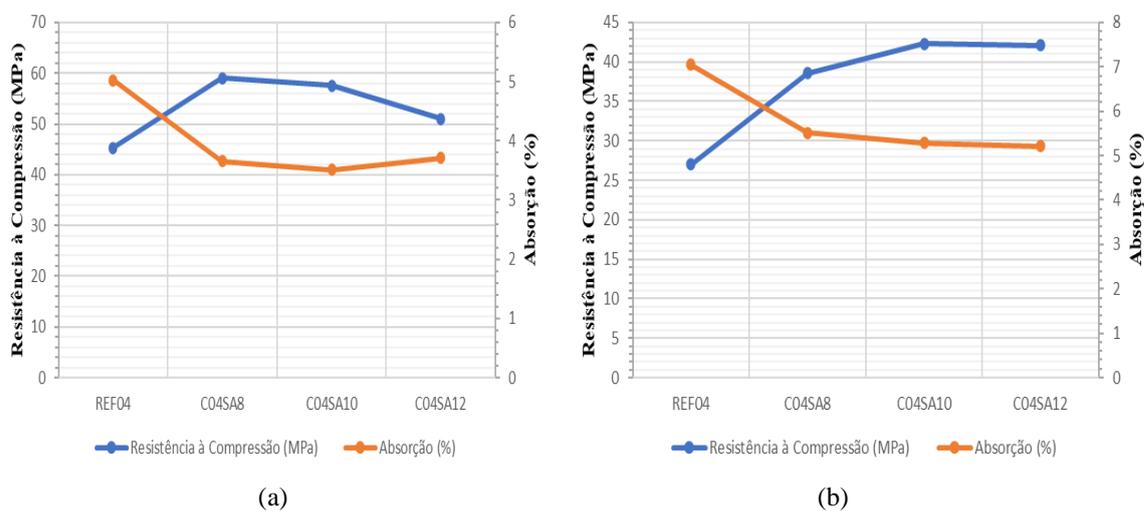
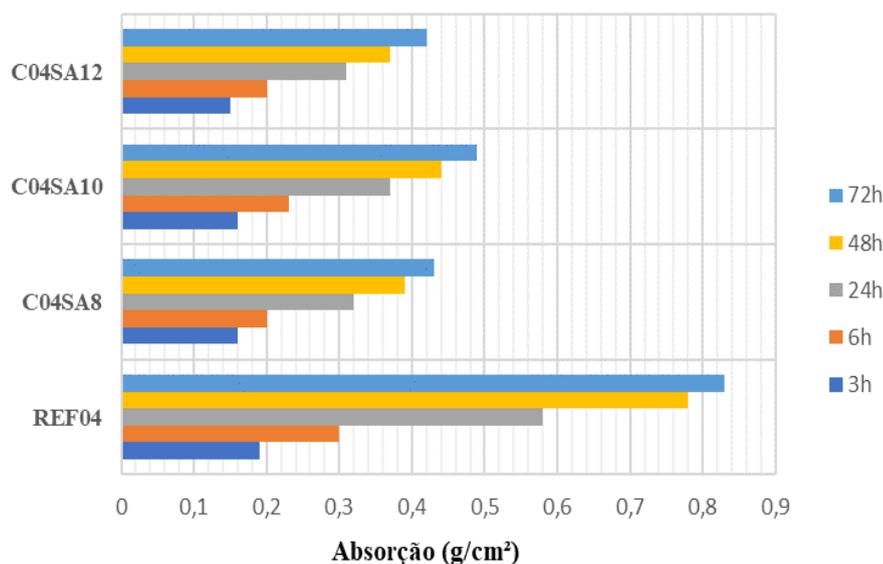


Tabela 4.14 – Resultados médios de ensaios de absorção por capilaridade.

	REF 0,40	0,40 - 8SA	0,40 - 10SA	0,40- 12SA
Absorção com 3 h (g/cm ²)	0,19	0,16	0,16	0,15
Absorção com 6 h (g/cm ²)	0,30	0,20	0,23	0,20
Absorção com 24h (g/cm ²)	0,58	0,32	0,37	0,31
Absorção com 48 h (g/cm ²)	0,78	0,39	0,44	0,37
Absorção com 72 h (g/cm ²)	0,83	0,43	0,49	0,42

Figura 4.41 – Gráfico de absorção de água por capilaridade dos concretos com relação a/lig 0,40.



A inclusão da sílica ativa reduziu a absorção de água. O concreto contendo 8% de sílica ativa, considerando a absorção com 72 horas, tem 52% de redução da absorção se comparado ao concreto de referência. Entretanto, os valores não diminuem significativamente à medida em que se aumenta os teores da adição, demonstrando que a maior influência é a inserção propriamente dita desse material na mistura.

4.3 CARACTERIZAÇÃO ESPECIAL DOS ADITIVOS QUÍMICOS

O FTIR fornece informações estruturais de uma molécula. As absorções de cada tipo de ligação são, em geral, encontradas apenas em certas regiões do infravermelho vibracional – tendo uma pequena faixa de absorção definida para cada tipo de ligação. Como por exemplo, qualquer absorção na faixa de $3000 \pm 150 \text{ cm}^{-1}$ indica a presença da ligação C-H na molécula. Outro exemplo de absorção na faixa de $1715 \pm 100 \text{ cm}^{-1}$ se deve ao grupo C = O na molécula (DUTRA *et al.*, 1995). Um esquema de como as ligações são distribuídas no

infravermelho vibracional pode ser vista na Figura 4.42.

A análise foi feita por meio de tabelas de correlação simplificada e do esquema da figura acima que determina o tipo de vibração e as respectivas ligações a partir da frequência obtida no ensaio. Os gráficos dos ensaios em cada aditivo são visualizados na Figura 4.43.

Figura 4.42 – Regiões aproximadas e ligações comuns (DUTRA *et al.*, 1995).

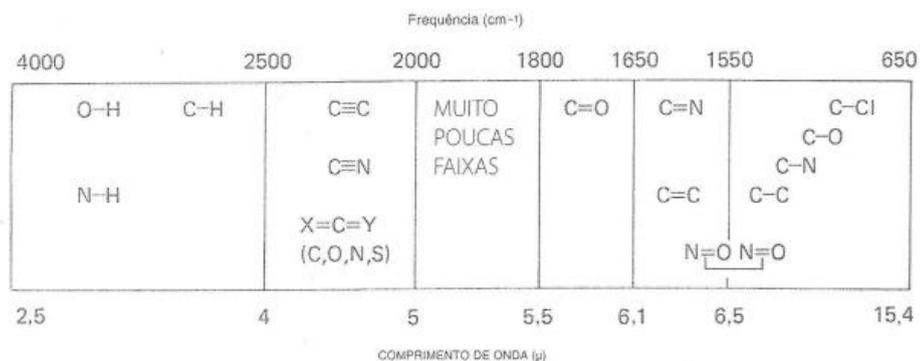
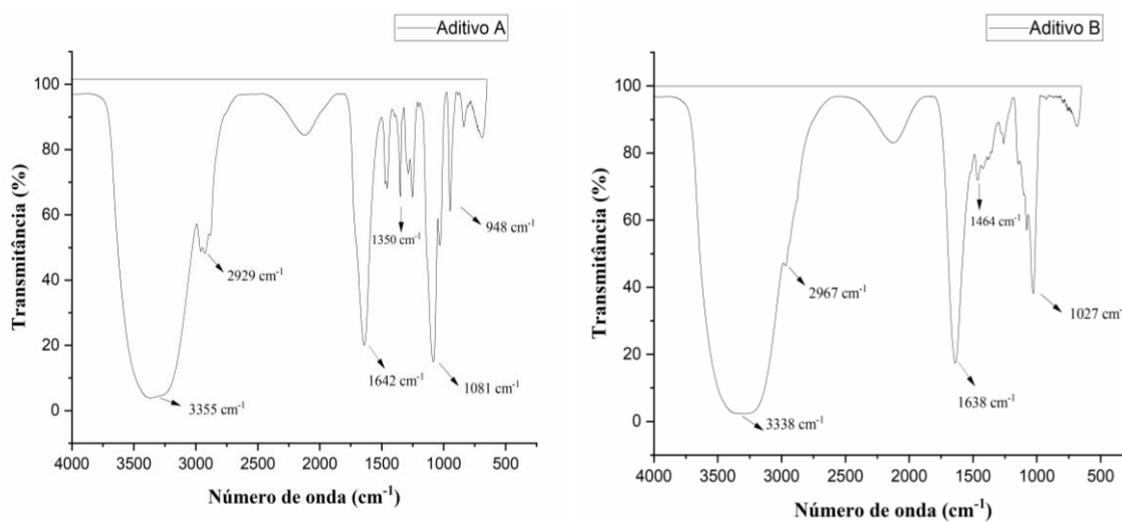
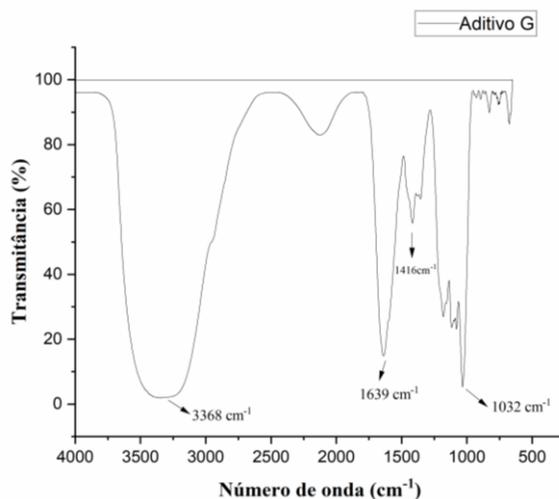
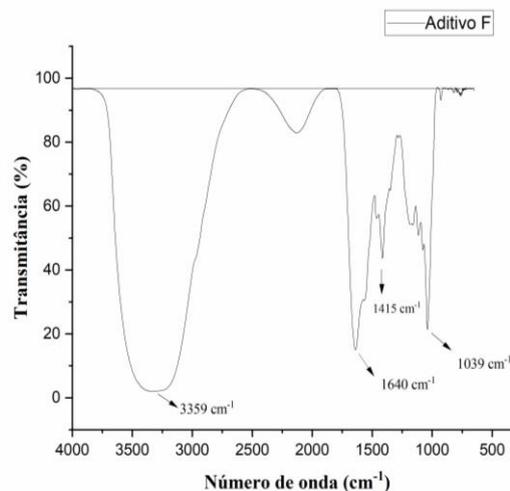
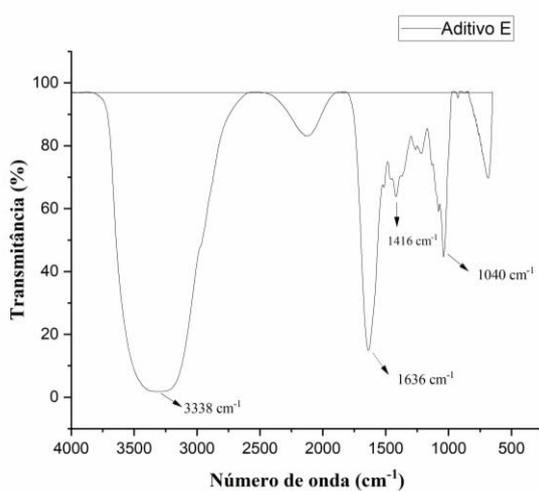
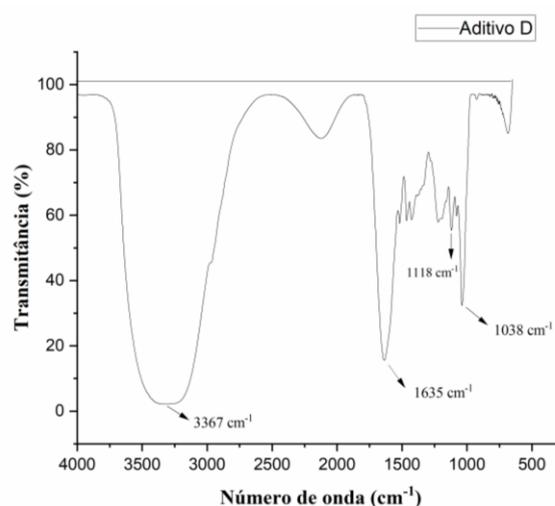
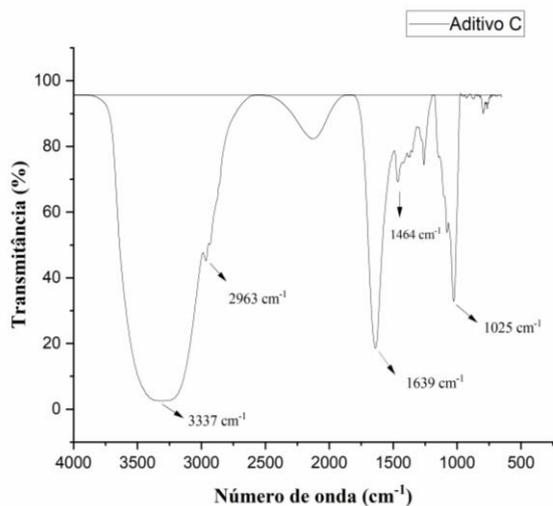


Figura 4.43 – Espectro FTIR dos aditivos (a) A; (b) B; (c) C; (d) D; (e) E; (f) F; (g) G.





A análise do aditivo A, por FTIR, revela a presença de compostos orgânicos nas faixas com picos de 3355 cm^{-1} (-OH, vibração de estiramento, com característica de ácido carboxílico); 2929 cm^{-1} (C-H, vibração de estiramento – com característica de alcano); 1642 cm^{-1} (C=O,

vibração de estiramento, com característica de amida); 1416 cm^{-1} (N=O, vibração de estiramento, com característica de nitro); 1350 e 1081 cm^{-1} (C-N, vibração de estiramento, com característica de amina). Esse espectro confirma os grupos funcionais característicos de um superplastificante. Além das regiões e ligações do aditivo A, o aditivo G contém também um menor grupo de aminas.

Já na análise do aditivo B, plastificante/polifuncional, por FTIR revela a presença de compostos orgânicos nas faixas com picos de 3338 cm^{-1} (-OH, vibração de estiramento, com característica de ácido carboxílico); 2967 cm^{-1} (C-H, vibração de estiramento, com característica de alcano); 1638 cm^{-1} (C=O, vibração de estiramento, com característica de amida); 1464 (N=O, vibração de estiramento, com característica de nitro) e 1027 cm^{-1} (C-N, vibração de estiramento, com característica de amina), sendo os mesmos compostos de um superplastificante, mas também característicos em sua maioria de um aditivo plastificante. As mesmas cadeias se repetem para o aditivo C, sendo semelhantes (lembrando que são do mesmo fabricante).

Os aditivos plastificantes D e E (que tem um espectro praticamente similar, e que também são de um mesmo fabricante) e F se diferenciam dos aditivos B e C por não possuírem o grupo C-H, vibração de estiramento, com característica de alcano, mas que também se encaixam em grupos funcionais característicos de um aditivo plastificante.

A análise orgânica dos aditivos não foi possível de ser realizada. No entanto, uma caracterização inorgânica química dos aditivos por meio da técnica de Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX) foi realizada (Tabela 4.15). Uma observação a ser realizada é que a perda ao fogo em todas as amostras foi alta devido ao estado líquido das amostras.

Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios de FRX nos aditivos.

Elemento ou propriedade	Resultados aditivos (mg/L)						
	A	B	C	D	E	F	G
Perda ao Fogo (%)	99,58	99,05	99,49	96,62	96,53	92,39	88,91
Silício (Si)	20	70	430	20	60	190	140
Enxofre (S)	100	2680	490	10360	9100	20980	46380
Cálcio (Ca)	170	60	10	9870	170	410	200
Zinco (Zn)	20	70	50	60	150	60	160
Cloro (Cl)	30	280	80	330	400	700	790
Sódio (Na)	280	3310	480	8010	18510	44650	51100
Potássio (K)	30	40	0	230	60	650	270
Fósforo (P)	320	100	50	0	60	180	620
Ferro (Fe)	0	40	10	60	60	200	70
Magnésio (Mg)	0	40	0	400	60	205	480

Alumínio (Al)	0	150	20	0	3630	90	20
Bromo (Br)	0	80	40	200	190	0	
Níquel (Ni)	0	0	0	0	30	0	30

Percebe-se que o aditivo A é o que contém uma menor quantidade desses elementos residuais que não contribuem em sua principal característica que é a redução de água do concreto, explicando, em partes, o fato desse superplastificante ter demonstrado um desempenho tão superior se comparado a qualquer um dos outros aditivos testados, mesmo com o aditivo G, outro superplastificante.

O próprio aditivo G contém várias substâncias residuais e em grande quantidade, que podem vir a interferir no seu comportamento dentro de uma mistura cimentícia, confirmando o seu menor potencial em atuar na trabalhabilidade e na reologia das pastas e dos concretos, visto nos ensaios reológicos e, até mesmo quando foi acrescentado sílica ativa, no qual o seu comportamento foi inferior ao comportamento do aditivo A, que obteve ótimos resultados nas propriedades reológicas mesmo com o uso da adição mineral.

Os aditivos químicos apresentam-se com uma composição química elementar inorgânica muito variável, sem uma clara justificativa de seu comportamento quando adicionado às pastas de cimento e concreto.

4.4 PROTOCOLO

Um dos objetivos dessa dissertação foi a validação de um protocolo de ensaio para determinar um passo a passo de como prosseguir com a caracterização reológica de pastas de cimento com o intuito de determinar a dosagem de aditivos químicos e adições minerais e somente depois partir para a dosagem de concretos, tendo uma diminuição no gasto de materiais e com uma precisão melhor das suas características finais.

Esse protocolo é composto por 8 tópicos sendo divididos em objetivo, documentos de referência, definições, equipamentos e materiais utilizados, responsáveis pelo ensaio, preparação e procedimento do ensaio, resultados e relatório final. O modelo do protocolo completo está no Apêndice C.

O seu objetivo principal é estabelecer uma instrução de ensaio (IE) de caracterização reológica prescrevendo o método de determinação dos tipos e teores de aditivo, seguido da determinação dos tipos e teores de adição mineral para estimar uma composição mais adequada para futuros concretos a partir de experimentos realizados em reômetros de pasta.

A preparação e os procedimentos do ensaio são os mesmos descritos na metodologia dessa dissertação, nos tópicos em que são abordados os ensaios de fluxo e ensaios oscilatórios em pastas de cimento. O tópico de resultados envolverá uma descrição de como fazer a leitura e o tratamento dos dados extraídos do reômetro, determinando como reproduzir as curvas de taxa de cisalhamento x tensão de escoamento/viscosidade e como definir as propriedades reológicas das pastas de cimento.

Por fim, estará descrito os tópicos que devem conter no relatório como produto final da instrução técnica.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas após a realização dessa pesquisa. Assim, estão listadas as principais considerações obtidas com o desenvolvimento do programa experimental e a respectiva análise de seus resultados para responder os objetivos propostos.

5.1 CONCLUSÕES

No que tange às respostas da caracterização reológica das pastas de cimento nas duas relações a/lig de 0,40 e 0,55, contendo diferentes tipos e teores de aditivos químicos e, mais a frente, com o uso de sílica ativa, é possível concluir:

- quanto às propriedades reológicas obtidas nos ensaios de fluxo realizadas em pastas com as duas relações a/lig e os sete aditivos (A, B, C, D, E, F e G) notou-se que os parâmetros reológicos convergiram para um resultado esperado: com um comportamento pseudoplástico típico de pastas de cimento no qual com o acréscimo do teor de aditivo químico, a viscosidade e a tensão de cisalhamento diminuíram, isto é, a pasta ficou mais fluída e a trabalhabilidade aumentou;
- especificamente para as pastas de relação a/lig 0,40, menores teores dos aditivos “A” e “G” foram necessários para se obter menores valores de viscosidade. Já para a pasta de relação a/lig 0,55, o uso de pequenas porcentagens para todos os aditivos fez com que os valores de viscosidade reduzissem em mais de 50% em relação à pasta de referência, sem aditivo;
- o teor de saturação encontrado para cada aditivo de A a G foi de, respectivamente, para relação a/lig de 0,40: 0,9%, 4,0%, 4,0%, 1,5%, 1,5%, 2,5% e 1,5% e para a relação a/lig de 0,55: 0,7%, 0,5%, 0,3%, 1,5%, 1,0%, 1,5% e 1,0%. O aditivo A foi o único que se encaixou em faixa de utilização recomendada pelo fabricante, em ambas

as relações a/lig estudadas.

- pelos ensaios oscilatórios, observa-se o bom desempenho do aditivo A que retardou o início do processo de consolidação da pasta para perto de cinquenta minutos (com a relação a/lig de 0,55), enquanto os aditivos polifuncionais/plastificantes tem pouco efeito sobre a pasta. O aditivo G também trouxe melhorias no comportamento cinético da pasta, porém só conseguiu trazer um “atraso” na pega da pasta por aproximadamente 20 minutos;
- de maneira geral em relação aos ensaios oscilatórios, observou-se que os valores do módulo elástico (G') para a pasta de referência (REF) com relação a/lig 0,55 e para as pastas com os plastificantes com a relação de 0,40 são disparadamente maiores do que para as outras pastas, confirmando que a sua consolidação se deu de forma mais rápida. Entretanto, as suas curvas são diferentes, a qual a curva da pasta de referência é exponencial, indicando que a pasta já se encontrava mais endurecida, enquanto os aditivos A e G (em ambas as relações a/lig) tem uma curva mais linear e menos dispersa, que apesar de se consolidar mais rapidamente, ainda se encontrava mais fluida sem chegar ao final da pega da mistura;
- para os ensaios de fluxo realizados nas pastas contendo os aditivos escolhidos A e G, mais a adição mineral, observou-se que a sílica ativa teve maior influência nas propriedades das pastas contendo o aditivo G, uma vez que as propriedades tendem a aumentar de acordo com o acréscimo da adição na mistura, demonstrando um menor potencial desse aditivo, o que é um resultado previamente esperado. Entretanto, nas pastas com o aditivo A observou-se que pouca influência tinha o teor de sílica acrescentado na mistura, fosse 8%, 10% ou 12%, as propriedades reológicas se mantiveram baixas e bem próximas às de referência (sem sílica), comprovando a alta eficácia e compatibilidade do aditivo A com o cimento e a sílica escolhidos;
- a caracterização das misturas de concreto autoadensáveis proporcionou a visualização e validação das escolhas das dosagens feitas a partir dos ensaios reológicos nas pastas de cimento: percebeu-se um comportamento bastante similar entre as dosagens, exatamente como visto nas pastas, independentemente do teor de sílica ativa utilizado. Dessa forma, além de apresentar boa trabalhabilidade, o comportamento reológico dos

concretos foi uma extensão do comportamento das pastas de cimento;

- de acordo com os resultados obtidos, todos os concretos se encaixaram dentro da classificação de concreto autoadensáveis. Devido à fixação dos valores dos teores de aditivo, as suas classificações foram diferentes, uma vez que não era intuito dessa pesquisa pré-determinar nenhum intervalo de espalhamento, somente avaliar a trabalhabilidade e comparar suas propriedades, que se demonstraram completamente satisfatórias.
- verificou-se que as resistências dos concretos de relação a/lig 0,40 tiveram valores bem maiores que os concretos de relação a/lig 0,55, fato já esperado uma vez que a resistência tende a diminuir ao se adicionar mais água na mistura; outra observação a ser feita é de que quanto maior o teor de sílica utilizado, maior a resistência adquirida, o que também já se esperava uma vez que a adição pozolânica tende a produzir fases químicas com maior estabilidade e poder ligante;
- de maneira geral e considerando todos os resultados obtidos, tanto nas pastas de cimento quanto nos concretos, entendeu-se que utilizar o teor ótimo do aditivo A, em ambas as relações a/lig de 0,40 e 0,55, e com 10% de sílica ativa, obteve-se os melhores resultados ao se analisar as características dos materiais cimentícios em seu estado fresco e endurecido;

Por fim, essa pesquisa conseguiu determinar a grande vantagem de custo-benefício e de eficiência em dosagens de concretos ao iniciar o estudo das composições pelo estudo da reologia de pastas de cimento com a quantificação dos seus respectivos materiais.

Sugestão para trabalhos futuros:

- utilizar valores intermediários de relação água/ligante das pastas de cimento para entender o quanto ela pode vir a intervir nas propriedades reológicas;
- utilizar outras metodologias de mistura das amostras para entender melhor a sua interveniência no resultado dos ensaios reológicos;
- fazer o uso de outras técnicas de ensaio em reômetros ou viscosímetros para o teste de misturas mais viscosas e com relações a/lig mais baixas;

- utilizar outros tipos de cimento para entender a influência da sua composição nas propriedades reológicas;
- fazer uma combinação entre os teores de aditivos químicos plastificantes e superplastificantes para encontrar uma maior vantagem de desempenho.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

_____. **NBR 11768-3**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 2: Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT: 2 p. 2016.

_____. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT: 6 p. 2012.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

_____. **NBR 16887**: Concreto - Determinação de ar em concreto fresco - método pressométrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2020b.

_____. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020a.

ACKER, P. Comportement mécanique du béton. In: **Rapport de Recherche LCPC**, apports de l'approche physico-chimique, n° 152, 1988.

AGOSTINHO, L. B. **Estudo reológico de pastas de cimento Portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. 2017. 148p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

AGOSTINHO, L. B. PEREIRA, A. C. SILVA, E. F. TOLEDO FILHO, R. D. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosílica. **Journal of Building Engineering**. v. 34, fev. 2021.

AHARI, R. S. ERDEM, T. K. RAMYAR, K. Thixotropy and structural breakdown properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, 2015.

AHMAD, S. ALGHAMDI, S. A. A. Statistical Approach to Optimizing concrete mixture design. **The Scientific World Journal**, 2014, 7p.

AIQIN, W., CHENGZHI, Z., NINGSHENG, Z. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 5, p. 685-695, 1997.

AİTCIN, P. C. JOLICOEUR, C. MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, p. 45-52, 1994.

AL-MARTINI, S., NEHDI, M. Genetic algorithm rheological equations for cement paste, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. v. 163, n. 2, p. 77-85, 2010.

ALRIFAI, A.; AGGOUN, S.; KADRI, A.; KENAI, S.; KADRI, E.H. **Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 969- 976, 2013.

ALVARENGA, L. M. S. C. **Influência do emprego de resíduo da britagem de granito e de cinza da casca de arroz nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto**. 2016. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2016.

ALONSO, M. M. PALACIOS, M. PUERTAS, F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. **Cement and Concrete composites**. v. 35, p. 151-162, 2013.

ANDRADE, D. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. 2017. 322p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ANDRADE, C. D'ANDRÉA, R. **La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad**. *Revista ALCONPAT*, v.1, n. 2, p. 93-101, 2011.

ANDRADE, D. S.; SILVA, D. A. GEYER, A. L. B. O comportamento do concreto de alto desempenho com sílica ativa e metacaulim como adições químicas minerais quanto à sua resistência à compressão utilizando agregados provenientes da região metropolitana de Goiânia – GO. **53º Congresso Brasileiro do Concreto**, Florianópolis-SC, 2011.

ARORA, A. AGUAYO, M. HANSEN, H. CASTRO, C. FEDERSPIEL, E. MOBASHER, B. NEITHALATH, N. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**. v. 103, p. 179-190, jan. 2018.

ASGHARI, A. A. FEYS, D. SCHUTTER, G. Mix design factors of self-consolidating cement paste affecting the magnitude of variations in rheological properties induced by the addition time of PCE-superplasticizer. **Construction and Building Materials**. v. 159, p. 269-276, jan. 2018.

BANFILL, P.F.G. A coaxial cylinders viscosimeter for mortar: design and experimental validation. In: Banfill, P.F.G. (ed), **Rheology of Fresh Cement and Concrete**, London, E & FN Spon, 1991.

BANFILL, P. F. G. The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review. **11th International Cement Chemistry Congress**, n. May, p. 61–130, 2003.

BANFILL, P.F.G. Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology Reviews*. Pp 61-130. **The British Society of Rheology**. 2006.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 211p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BIANCHI, G. Q. **Application of nano-silica in concrete**. PhD Thesis - Eindhoven - the Netherlands: technische Universiteit Eindhoven, 2014.

BONILLA-CRUZ, J. ÁVILA-LOPEZ, A. RODRIGUEZ, F. E. L. AGUILAR-ELGUEZABAL, A. LARA-CINECEROS, T. E. 3D printable ceramic pastes design: correlating rheology & printability. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 42. 2022.

BURGOS-MONTES, O. ALONSO, M. M. PUERTAS, F. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers. **Construction and Building Materials**. v. 48, p. 417-423. ago. 2013.

CALADO, C. F. A. CAMÕES, A. JALALI, S. JUNIOR, B. B. **Concreto auto adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC)**. 1. Ed. Recife: EDITORA DA Universidade de Pernambuco, 2015. 225p.

CARDOSO, F. A. JOHN, V. M. PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**. V. 39, n, 9, p. 748-753. Set, 2009.

CASCUDO, O. TEODORO, R. OLIVEIRA, A. M. CARASEK, H. *Effect of Different Metakaolins on Chloride-Related Durability of Concrete*. **ACI Materials Journal**, v. 118, p. 3-14, 2021.

CASTRO, A. L. **A importância da avaliação reológica de pastas com e sem sílica ativa para produção de concretos estruturais com cimento Portland para obras marítimas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos/SP, 2012.

CASTRO, A., FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 31, n. 2, p. 104, 2016.

CASTRO, A. L. DE; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão. **Cerâmica**, v. 57, p. 63–75, 2011.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CAUDURO, F. PELISSER, F. **Estudo da retração autógena em pasta de cimento**

Portland com adição de resíduo do polimento do porcelanato. 2012.

CHALAH, K. MAHDAD, M. BENMOUNAH, A. KHERIBET, R. AKOUCHE, A. Effect of silica fume on cement rheology properties in presence of superplasticisers. **Materials Today: Proceedings.** v. 58, p. 1246-1250, fev. 2022.

CHOI, P. YAN, K. K. YEON, J. H. Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates. **Construction and Building Materials.** v. 142, p. 376-384, jul. 2017.

CHOI, B. I. KIM, J.H. SHIN, T. Y. Rheological model selection and a general model for evaluating the viscosity and microstructure of a highly-concentrated cement suspension. **Cement and Concrete Research.** v. 123, set. 2019.

CHUNRAN, W. SHICONG, K. Effects of high-calcium sepiolite on the rheological behaviour and mechanical strength of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials.** v. 196, p. 105-114, jan. 2019.

CLARAMUNT, J. VENTURA, H. ARDANUY, M. Rheology of CAC-based cement pastes and the relationship to penetrability through nonwoven fabric reinforcements. **Cement and Concrete Composites.** v. 100, p. 85-93, nov. 2018.

COLOMBO, A. GEIKER, M. R. JUSTNES, H. LAUTEN, R. A. DE WEERDT, K. On the effect of calcium lignosulfonate on the rheology and setting time of cement paste. **Cement and Concrete Research.** v. 100, p. 435-444, out. 2017.

COSTA, M.P. **Estudo do comportamento de fluxo em microcavidades na microinjeção.** Braga, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Polímeros) – Universidade do Minho, Braga (Portugal), 2013.

COSTA, S. M. M. **Estudo da reologia e da microestrutura de pastas de cimento Portland com adição de nanosílica estabilizada.** 2017. 203p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

COUTO, P. B. **Caracterização reológica de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional.** 2016. 212p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

COUSSOT, P. Structural similarity and transition from Newtonian to non-newtonian behavior for clay-water suspensions. **Physical Review Letters.** v. 74, n. 20, p. 3971-3974, 1995.

CYR, M. **Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires.** Tese de Doutorado - Toulouse: INSA de Toulouse e Université de Sherbrooke, 1999.

DADA, H. BELAIDI, A. S. E. SOUALHI, H. KADRI, E. H. BENABED, B. Influence of temperature on the rheological behavior of eco-mortar with binary and ternary cementitious blends of natural pozzolana and marble powder. **Powder Technology.** v. 384, p. 223-235, mai. 2021.

DAI, X. AYDIN, S. YARDIMCI, M. Y. LESAGE, K. SCHUTTER, G. Influence of water to binder ratio on the rheology and structural Build-up of Alkali-Activated Slag/Fly ash mixtures. **Construction and Building Materials**. v. 264, dez. 2020.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 265p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DANTAS, M. H. O. **Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013.

DINKGREVE, M. et al. On different ways of measuring “the” yield stress. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 238, p. 233–241, 2016.

DURGUN, M. Y. ATAHAN, H. N. Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO₂. **Construction and Building Materials**. v. 142, p. 431-443, jul. 2017.

DUTRA, R. C. L. TAKAHASHI, R. C. L. DINIZ, M. F. Importância da Preparação de Amostras em Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) na Investigação de Constituintes em Materiais Compostos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Jan/Mar, 1995.

FARAJ, R. H. SHERWANI, A. F. H. JAFER, L. H. IBRAHIM, D. F. Rheological behavior and fresh properties of self-compacting high strength concrete containing recycled PP particles with fly ash and silica fume blended. **Journal of Building Engineering**. v. 34, fev. 2021.

FARES, G. AL-NEGHEIMISH, A. ALHOZAIMY, A. M. KHAN, M. I. Polycarboxylate superplasticizer and viscosity modifying agent: Mode of addition and its effect on cement paste rheology using image analysis. **Journal of building Engineering**. v. 48. 2022.

FERRARIS, C.F., OBLA, K.H., HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

FERREIRA, L. R. C. **Dosagem de argamassa polimérica com utilização de regras de misturas por métodos estatísticos**. 2017. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia – Escola politécnica, Salvador, 2017.

FIGUEIRAS, H. NUNES, S. COUTINHO, J. S. ANDRADE, C. Linking fresh and durability properties of paste do SCC mortar. **Cement and Concrete Composites**. v. 45, P. 209-216, 2014.

FOX, W. F. MACDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

FRACALOSSO, R. A. R. Aditivos à base de policarboxilato: Influência nos tempos de pega e na manutenção do abatimento em pastas de cimento Portland. 2011. 70p.

FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, abr./jun. 2012.

FRANÇA, M. S. CAZACLIU, B. CARDOSO, F. A. PILEGGI, R. G. Influence of mixing process on mortars rheological behavior through rotational rheometry. **Construction and Building Materials**. v. 223, p. 81-90. Out, 2019.

FUNK, J.E., DINGER, D. Predictive process control of crowded particulate suspensions: **applied to ceramic manufacturing**. New York, Springer Science & Business Media, 1994.

GALICIA-ALDAMA, E. MAYORGA, M. ARTEAGA-ARCOS, J. C. SALAZAR, L. R. Rheological behaviour of cement paste added with natural fibers. **Construction and Building Materials**. v. 195, p. 148-157, fev. 2019.

GALLIAS, J. L. KARA-ALI, R. BIGAS, J. P. The effect of line mineral admixtures on water requirement of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1543-1549, out. 2000.

GARCÍA-TAENGUA, E.; SONEBI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M.; KHATIB, J. Effects of the addition of nano silica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. **Composites Part B**. p. 120 -129, 2015

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C. Porosidade de Pastas compostas de Misturas Binárias e Ternárias de Adições Mineraias. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1998. p. 35-43.

GHODDOUSI, P., JAVID, A.A.S., SOBHANI, J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 102-109, 2014.

GIROTTI, L.S., BARBOSA, M.P., MACIEL, G.F. Rheological behavior study of plastic shrinkage and cracking of self-compacting concrete mortars. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 7, n. 1, p. 24-52, 2014.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. **Rheological Lab Testing of Building Formulations**. ConChem Conference, Düsseldorf, 1994.

GLEIZE, P. J. P. CYR, M. ESCADEILLAS, G. Efeitos do metacaulim na retração autógena de pastas de cimento. In: Congresso Brasileiro do Concreto – CBC, 45., Rio de Janeiro, 2006. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006.

GRANDEZ, F. A. SAKANO, V. K. REGO, A. C. A. CARDOSO, F. A. PILEGGI, R. G. Squeeze flow coupled with dynamic pressure mapping for the rheological evaluation of cement-based mortars. **Cement and Concrete Composites**. V. 92, P. 18-35. Set, 2018.

GRANDES, F. A. SAKANO, V. K. REGO, A. C. A. REBMANN, M. S. CARDOSO, F. A. PILEGGI, R. G. Rheological behavior and flow induced microstructural changes of cement-based mortars assessed by Pressure Mapped Squeeze Flow. **Powder Technology**. V. 293, p. 519-538. Nov, 2021.

GÜNEYISI, E. GESOGLU, M. AL-GOODY, A. IPEK, S. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 95:29-44, 2015.

GUO, Y. ZHANG, T. WEI, J. YU, Q. OUYANG, S. Evaluating the distance between particles in fresh cement paste based on the yield stress and particle size. **Construction and Building Materials**. v. 142, p. 109-116, jul. 2017.

GWON, S. SHIN, M. Rheological properties of cement pastes with cellulose microfibers. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 10, p. 808-818, jan.-fev. 2018.

HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. **Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particle systems**, NIST special publication 946, 2001.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. **Fundamentos da física**. Eletromagnetismo. 3.ed., v. 3. Rio de Janeiro: LCT, 1994.

HAO, H. LI, J. Sustainable High-Performance Resilient Structures. **Engineering**. v. 5, p. 197-198, 2019.

HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L.; KLEIN, N. S. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 9, n. 1, p. 48-65, fev. 2016.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2008.

HOPPE, J.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Artigo científico: técnicas de caracterização reológica de concretos. **Concreto e Construções**, São Paulo, v. 34, n. 47, p. 108-124, 2007.

HORTA, R. A. S. **Avaliação das propriedades mecânicas e reológicas de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno**. Dissertação de mestrado – Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2020.

HUANG, F. LI, H. YI, Z. WANG, Z. XIE, Y. The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent. **Construction and Building Materials**. v. 166, p. 833-838, mar. 2018.

ISAIA, G. C. **Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho**: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. São Paulo, 1995. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995

ITIM, A.; EZZIANE, H.; KADRI, E.H. **Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions**. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 3603-3609, 2011.

IZIDORO, D. R. **Influência da polpa de banana (*musa cavendishii*) verde no comportamento reológico, sensorial e físico-químico de emulsão**. 2007. 167f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal

do Paraná, Curitiba, 2007.

JANOTKA, I. PUERTAS, F. PALACIOS, M. KULIFFAYOVÁ, M. VARGA, C. Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 791-802. 2010.

JALAL, M.; PAULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI, D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. v. 94, p. 90–104, 2015.

JIANG, D. LI, X. LU, Y. ZHOU, M. HE, C. JIANG, W. LIU, Z. LI, C. Utilization of limestone powder and fly ash in blended cement: Rheology, strength and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**. v. 232, jan, 2020.

KASHANI, A. NICOLAS, R. S. QIAO, G. G. DEVENTER, J. S. J. PROVIS, J. L. Modelling the yield stress of ternary cement–slag–fly ash pastes based on particle size distribution. **Powder Technology**, v. 266, p. 203–209, 2014.

KARDEC, T. I. S. OLIVEIRA, D. SILVA, M. F. VIEIRA, S. P. **Efeitos da superdosagem de aditivos hiperplastificantes na resistência mecânica e reologia de concretos de pós reativos**. Conferência: 60º Congresso Brasileiro do Concreto, set. 2018.

KHAN, M. I. MOURAD, S. M. CHARIF, A. Utilization of Supplementary Cementitious Materials in HPC: From Rheology to Pore Structure. **KSCE Journal of Civil Engineering**. p. 1-11, 2016.

KHAYAT, K., H., CORIC, M., S., LIOTTA, M.S. Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concretes, **ACI Materials Journal**, n. 99, pp. 234-241, 2002.

KHAYAT, K.H. HU, C. MONTY, H. Stability of self-compacting concrete, advantages, and potencial applications. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceeding**. France: RILEM Publications, p. 143-152, 1999.

KIM, D. KIM, C.Y. URGESSA, G. CHOI, J. H. PARK, C. YEON, J. H. Durability and rheological characteristics of high-volume ground-granulated blast-furnace slag concrete containing CaCO₃/anhydrate-based alkali activator. **Construction and Building Materials**. v. 204, p. 10-19, abr. 2019.

KONDEPUDI, K. SUBRAMANIAM, K. V. L. NEMATOLLAHI, B. BONG, S. H. SANJAYAN, J. Study of particle packing and paste rheology in alkali activated mixtures to meet the rheology demands of 3D Concrete Printing. **Cement and Concrete Composites**. 2022.

KRAUS, R. N. NAIK, T. R. RAMME, B. W. KUMAR, R. Use of foundry silica-dust in manufacturing economical self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3439-3442, nov. 2009.

KONG, X., ZHANG, Y., HOU, S. Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers. **Rheologica Acta**, v. 52, n. 7, p. 707-718, 2013.

KONG, D.; CORR, D. J.; HOU, P.; YANG, Y.; SHAK, S. P. Influence of colloidal silica sol on fresh properties of cement paste as compared to nano-silica powder with agglomerates in micron-scale. **Cement and Concrete Composites**. v. 63, p. 30 – 41, 2015.

KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, A. Statistical methods for determining rheological parameters of mortars modified with multi-walled carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**. v. 253, ago. 2020.

KOUTNÝ, O. SNOECK, D. VURST, F. V. D. BELIE, N. Rheological behavior of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. **Cement and Concrete Composites**. v. 88, p. 29-40, abr. 2018.

KWAN, A. K. H. MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregates particles. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 2, p. 91-100, abr. 2001.

LABA, D. Propriedades reológicas de Cosméticos. Novo Yobra: Marcel Dekker, 1993.

LARRARD, F. FERRARIS, C., F. SEDRAN, T. Fresh concrete: A Herschel Bulkley material, **Materials and structures**, vol. 23, p. 494-498, 1998.

LARRARD, F. SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, pp. 1699-1704, 2002.

LAVERGNE, F. BELHADI, R. CARRIAT, J. BEN FRAJ, A. Effect of nano-silica particles on the hydration, the rheology and the strength development of a blended cement paste. **Cement and Concrete Composites**. v. 95, p. 42-55, jan. 2019.

LEITE, G. U. **Uso de planejamento experimental de misturas na otimização da pasta e no empacotamento de agregados para produção de CAA**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

LEY-HERNÁNDEZ, A. M. FEYS, D. KUMAR, A. How do different testing procedures affect the rheological properties of cement paste? **Cement and Concrete Research**. v. 137, nov, 2020.

LI, B. MAO, J. LEI, H. LIU, Z. Investigation of the rheological properties of cement paste with different superplasticizers based on color function and RDS methods, **Advances in Cement Research**, v. 28, n. 6, p. 357-370, 2016.

LI, H. DING, S. ZHANG, L. OUYANG, J. HAN, B. Effects of particle size, crystal phase and surface treatment of nano-TiO₂ on the rheological parameters of cement paste. **Construction and Building Materials**. v. 239, abr. 2020.

LI, B. HOU, S. DUAN, Z. LI, L. GUO, W. Rheological behavior and compressive strength of concrete made with recycled fine aggregate of different size range. **Construction and Building Materials**. v. 268, jan. 2021.

LI, T. NOGUEIRA, R. BRITO, J. LIU, J. Quantitative analysis of the influence of fine aggregate's grading on mortar's rheology. **Journal of Materials Research and Technology**. Maio, 2023.

LING, G. SHUI, Z. SUN, T. GAO, X. WANG, Y. SUN, Y. WANG, G. LI, Z. Rheological

behavior and microstructure characteristics of SCC incorporating metakaolin and silica fume. **Materials**, v. 11, n. 12, 2018.

LIU, J. WANG, K. ZHANG, Q. HAN, F. SHA, J. LIU, J. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio. **Construction and Building Materials**. v. 149, p. 359-366, set. 2017.

LIU, Y. HAN, J. LI, M. YAN, P. Effect of a nanoscale viscosity modifier on rheological properties of cement pastes and mechanical properties of mortars. **Construction and Building Materials**. v. 190, p. 255-264, nov. 2018.

LIU, G. CHENG, W. CHEN, L. PAN, G. LIU, Z. Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. **Construction and Building Materials**. v. 243, mai. 2020a.

LIU, J. KAMAL, KHAYAT, K. H. SHI, C. Effect of superabsorbent polymer characteristics on rheology of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 112, set. 2020b.

LIU, Y. ZHANG, Z. JING, R. YAN, P. The interaction of sodium citrate and polycarboxylate-based superplasticizer on the rheological properties and viscoelasticity of cement-based materials. **Construction and Building Materials**. v. 293, jul. 2021.

LU, Z. KONG, X. ZHANG, C. XING, F. ZHANG, Y. Effect of colloidal polymers with different surface properties on the rheological property of fresh cement pastes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. v. 520, p. 154-165, mai. 2017.

LONG, W. J. KHAYAT, K. H. YAHIA, A. XING, F. Rheological approach in proportioning and evaluating prestressed self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 82, p. 105-116, set. 2017.

LOPES, R. C. **Estudo de ensaios e parâmetros de transporte de cloretos no concreto para aplicação em modelos preditivos de vida útil**. Dissertação (Mestrado em PPG-GECON) – Universidade Federal de Goiás, 2019.

LUO, X. GAO, J. GUO, Z. LI, S. LIU, C. ZHAO, Y. Experimental study on the rheological property of cement paste with fly ash and brick powder. **Powder Technology**. v. 426, ago, 2023.

MACEDO, R. H. **Permeabilidade ao gás em concreto com adições minerais e sua contribuição no campo dos indicadores de durabilidade**. 2018. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

MAILVAGANAM, N. P. Admixture Compatibility in Special Concretes. *Internacional Conference on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*, **Proceedings...** Gramado: ACI, 199. p. 615-630.

MAIA CAMPOS, P. BONTEMPO, E. LEONARDI, G. R. Formulário Dermocosmético. São Paulo: **Tecnopress Editora e Publicidade**. v. 2, p.37-3, 1999.

MAHADEVAN, J. KURIAKOSE, N. M. KANNAN, G. A. SURYAA, N. D. SATHYAN, D. MINI, K. M. Rheological and strength properties of fly ash incorporated rapid hardening

cement mix. **Materials Today: Proceedings**. Jan, 2021.

MALAGONI, M. A. A. **Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais**. 2016. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

MANZANO, M. AL. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como agentes de cura interna**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MARVILA, M. T. AZEVEDO, A. R. G. MATOS, P. R. MONTEIRO, S. N. VIEIRA, C. M. F. Materials for production of high and ultra-highperformance concrete: review and perspective of possible novel materials. **Materials**. v, 14. jul, 2021.

MATOS, P. R. JIAO, D. ROBERTI, F. PELISSER, F. GLEIZE, P. J. P. Rheological and hydration behavior of cement pastes containing porcelain polishing residue and different water-reducing admixtures. **Construction and Building Materials**. v. 262, nov. 2020.

MEBROUKI, A. BELAS, N. BENDANI, K. BOUHAMOU, N. A self-compacting cement paste formulation using mixture design. **Journal of applied science**, v. 9, n. 23, p. 4127-4136, 2009.

MECHTCHERINE, V.; SECRIERU, E.; SCHROFL, C. Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars - Development of yield stress and plastic viscosity over time. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 52–65, 2015

MEHTA, P. K MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014. 751p.

MENDES, M. V. A. S. Avaliação das Propriedades de Transporte de Massa em Concretos Contendo Adições Minerais. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MENDES, M. V. A. S. **Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis**. 2016. 259p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MENG, W. KHAYAT, K. H. Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar. **Composites Part B**. v. 138, dez. 2020.

MENG, W. KHAYAT, K. H. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC. **Cement and Concrete Research**. v. 105, p. 64-71, mar. 2018.

MOHAMMED, A. RAFIQ, S. MAHMOOD, W. NOAMAN, R. GHAFOR, K. WADIR, W. KADHUM, Q. Characterization and modeling the flow behavior and compression strength of the cement paste modified with silica nano-size at different temperature conditions. **Construction and Building Materials**. v. 257, out. 2020.

MOHAMMED, A. RAFIQ, S. MAHMOOD, W. AL-DARKAZALIR, H. NOAMAN, R. QADIR, W. KAWAN, G. Artificial Neural Network and NLR techniques to predict the

rheological properties and compression strength of cement past modified with nanoclay. **Ain Shams Engineering Journal**. v. 12, n. 2, p. 1313-1328, jun. 2021.

MOHAMMED, A. S. BIERNACKI, J. J. 2D stationary computational printing of cement-based pastes with time-dependent rheology. **Materials Today: Proceedings**. 2023.

MONTGOMERY, D. C. RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 832p.

MORAES, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável**. 2010. 2012p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MOOSBERG-BUTNES, H. LAGERBLAD, B. FORSSBERG, E. The function of filler in concrete. **Materials and Structures**, v. 37, n. 266, p. 74-81, mar. 2004.

NAZAR, S. YANG, J. THOMAS, B. S. AZIM, I. REHMAN, S. K. U. Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, 2020.

NEHDI, M. PARDHAN, M. KOSHOWSKI, S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high volume replacement composite cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 2103-2112, nov. 2004.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2.ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2013.

NG, S. JUSTNES, H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. **Cement and Concrete Composites**. 65:41-54, 2016

NUNES, N.L.; FIGUEIREDO, A.D. Retração do Concreto de Cimento Portland. **Boletim Técnico**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006. 59 p.

OLIVEIRA, A. M. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzidas por cloretos**. 2007. 276p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

OLIVEIRA, A. M. OLIVEIRA, A. P. VIEIRA, J. D. NEVES JR, A. CASCUDO, O. *Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques*. **Journal of Building Engineering**, v. 64, p. 1-17, 2023.

OLIVEIRA, A. P. **Estudo de matrizes cimentícias ternárias contendo sílica ativa e nanossílica**. 2019. 144p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil, 2013.

OLIVEIRA, C. O. MACIEL, G. F. CASTRO, A. L. BARBOSA, M. P. CAMPO, R. S.

Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. In: **Matéria**. Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA, A. M. CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**. 192:467-477, 2018.

OLIVEIRA, I.R., STUDART, A.R., PILEGGI, R.G. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**, São Paulo, Fazendo Arte, 2000.

OLIVEIRA, S. **Avaliação do Potencial Mitigador da Sílica Ativa e do Metacaulim Frente à Formação De Etringita Tardia (DEF) em Concreto**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Goiás, 2022.

OLIVEIRA, A. M. OLIVEIRA, A. P. VIEIRA, J. D. NEVES JUNIOR, A. CASCUDO, O. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. **Journal of Building Engineering**. V. 64, abr, 2023.

ONISHI, K.; BIER, T. **Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments**. Cement and Concrete Research, v.40, p. 1034-1040, 2010.

ORVALEZ, G. TOCQUER, L. BERTRAND, F. COUSSOT, P. Rheopexy and tunable yield stress of carbon black suspensions. **Soft Matter**, jun. 2013.

OUYANG, J. HAN, B. CHEN, G. ZHAO, L. OU, J. A viscosity prediction model for cement paste with nano-SiO₂ particles. **Construction and Building Materials**. v. 185, p. 293-301, out. 2018.

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, maio 2005.

PERA, J. HUSSON, S. GUILHOT, B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. **Cement and Concrete Composites**, v. 21 n. 2, p. 99-105, abr. 1999.

PEREIRA, T.A.C., LIBORIO, J.B.L. Técnicas de empacotamento de partículas para obtenção de CAD. In: **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**, Curitiba, Out. 2000.

PILEGGI, R.G. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratários**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 1996.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. Tese de Doutorado - São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2001.

POURJAVADI, A. et al. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles. **Materials and Design**. v. 42, p. 94-101, mai. 2012.

QIAN, Y. LESAGE, K. CHEIKH, K. E. SCHUTTER, G. Effect of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) on dynamic yield stress, thixotropy and flocculation state of fresh cement pastes in consideration of the Critical Micelle Concentration (CMC). **Cement and Concrete Research**. v. 107, p. 75-84, mai. 2018.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland**: estudo em pasta. p. 172, 2008.

QUERCIA, G.; SPIESZ, P.; HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. SCC modification by use of amorphous nano-silica. **Cement and Concrete Composites**. v. 45, p. 69-81, 2014.

RIVA, R. D. D. **Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. 2010. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ROBERT, C. R. SATHVAN, D. ANAND, K. B. Effect of superplasticizers on the rheological properties of fly ash incorporated cement paste. **Materials Today: Proceedings**. v. 5, n. 11, p. 23955-23963, 2018.

RODRIGUES, C. F. P. **Caracterização Experimental de Pastas de Cimento Reforçadas com Fibras de PVA e Polipropileno**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2014.

RODRIGUES, M. I. LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2 ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 358p.

ROJAS, M. F. CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems. **Cement and Concrete Research**. v. 32, n. 1, p. 133-138, jan. 2002.

ROJAS-RAMIREZ, R. A. MACIEL, M. H. ROMANO, R. C. O. PILEGGI, R. G. COELHO, A. C. V. The impact of vermiculite residual fines in the rheological properties of cement pastes formulated with different waste contents. **Applied Clay Science**. v. 170, p. 97-105, mar. 2019.

ROJO-LÓPEZ, G. GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. MARTÍNEZ-ABELLA, F. GONZÁLEZ-TABOADA, I. Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. **Case Studies in Construction Materials**. v. 17, maio, 2022.

ROMANO, R. C. O. CARDOSO, F. A. PILEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 13.

ROMANO, R. C. O. TORRES, D. R. PILEGGI, R. G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219-226. Maio, 2015.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. **MRS Bulletin**, New York, v. 18, p. 45-49, 1993.

SAHRAOUI, M. BOUZIANI, T. Effects of fine aggregates types and contents on rheological

and fresh properties of SCC. **Journal of Building Engineering**, v. 26, nov. 2019.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete - A review. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2060–2071, 2010.

SANDBERG, P. BENINI, H. O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais. **Revista Concreto**, v. 36, n. 51, p. 22-26, set. 2008.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação de mestrado – Brasília: Universidade de Brasília, 2006.

SANTOS, F. N. SOUZA, S. R. G. BOMBARD, A. J. F. VIEIRA, S. V. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 92-103, jul. 2017.

SATO, V. Y. Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. Dissertação de mestrado – Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

SENFF, L. **Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento**. 2009. 194p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SCHRAMM, G. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

SHANAHAN, N. TRAN, V. WILLIAMS, A. ZAYED, A. Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 745-753, jul. 2016.

SHULTZ, M. A. STRUBLE, L. J. Use of oscillatory shear to study flow behavior of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 273-282, 1993.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de auto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. 358p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, M. A. PEPE, M. ANDRADE, R. G. M. PFEIL, M. S. TOLEDO FILHO, R. D. Rheological and mechanical behavior of High Strength Steel Fiber-River Gravel Self Compacting Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 606-618, set. 2017.

SINGH, R. B. SINGH, B. Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 354-364, fev. 2018.

SKARE, E. L. SHEIATI, S. CEPURITIS, R. MORTSELL, E. SMEPLASS, S. SPANGENBERG, J. JACOBSEN, S. Rheology modelling of cement paste with manufactured sand and silica fume: Comparing suspension models with artificial neural network predictions. **Construction and Building Materials**, v. 317, jan. 2022.

SOUZA, T. C. PINTO, G. CRUZ, V. S. MOURA, M. LADEIRA, L. O. CALIXTO, J. M. Evaluation of the rheological behavior, hydration process, and mechanical strength of Portland cement pastes produced with carbon nanotubes synthesized directly on clinker. **Construction and Building Materials**. v. 248, jul. 2020.

ŠTEFANČIĆ, M. MLADENOVIC, A. BELLOTTO, M. JEREB, V. ZAVRŠNIK, L. Particle packing and rheology of cement pastes at different replacement levels of cement by α - Al_2O_3 submicron particles. **Construction and Building Materials**. v. 139, p. 256-266, mai. 2017

STROEVEN, P., STROEVEN, M. SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1299-1304, 1999.

SUHR, S. Interactions between sulphates minerals and C_3A in cement paste rheology. In: **Rheology of fresh cement and Concrete**, 1990, Londres. Proceedings. London: E & FN Spon, p. 37,46, 1991.

SUN, K. WANG, S. ZENG, L. PENG, X. Effect of styrene-butadiene rubber latex on the rheological behavior and pore structure of cement paste. **Composites Part B**. v. 163, p. 282-289, abr. 2019.

SUN, Z. VOIGT, T. SHAH, S. P. Rheometric and ultrasonic investigations of viscoelastic properties of fresh Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**. v. 36, p. 278-287, 2006.

TAMBARA JÚNIOR, L. U. D. **Análise comparativa das propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas do concreto autoadensável de cimento branco com adição de cinza volante**. 2013, 109p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

TATTERSALL, G.H. BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh concrete. **Great Britain: Pitman Books Limited**, 1983. 475p.

TCHAMDJOU, W. H. J. CHERRADI, T. ABIDI, M. L. OLIVEIRA, A. P. Influence of different amounts of natural pozzolan from volcanic scoria on the rheological properties of Portland cement pastes. **Energy Procedia**. v. 139, p. 696-702, dez. 2017.

TING, L. QIANG, W. SHIYU, Z. Effects of ultra-fine ground granulated blast-furnace slag on initial setting time, fluidity and rheological properties of cement pastes. **Powder Technology**. v. 345, p. 54-63, mar. 2019.

TISSERAND, C. FLEURY, M. RUNEL, L. BRU, P. MEUNIER, G. Passive **Microrheology for Measurement of the Concentrated Dispersions Stability** N UK Colloids. Berlin Heidelberg, p. 101-105, 2012.

VANCE, K.; SANT, G.; NEITHALATH, N. The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 38–48, 2015.

VARHEN, C. DILONARDO, I. ROMANO, R. C. O. PILEGGI, R. G. FIGUEIREDO, A. D. Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and

shrinkage of microconcretes. **Construction and Building Materials**. v. 125, p. 375-286. ago. 2017.

WALLEVIK, J. E. Relationship between the Bingham parameters and slump. In: **Cement and Concrete Research**, n.36, p. 1214 – 1221, 2006.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1279–1288, 2011.

WANGLER, T. PILEGGI, R. GUREL, S. FLATT, R. J. A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup. **Cement and Concrete Research**, v. 155, maio, 2022.

WEISS, J. Experimental determination of the “time zero” to (maturity-zero Mo), In: **Proceedings of the Early age cracking in cementitious systems – RILEM**, Cachan, France, 2002, edited by A. Bentur, p.195-206, 2002.

XU, Z. ZHANG, D. LI, H. SUN, X. ZHAO, K. WANG, Y. Effect of FA and GGBFS on compressive strength, rheology, and printing properties of cement-based 3D printing material. **Construction and Building Materials**. v. 339, jul, 2022.

YAHIA, A. TANIMURA, M. SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler – effect of powder content and w/c ratio. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 532-539, mar. 2005.

YU, R. ZHOY, F. YIN, T. WANG, Z. DING, M. LIU, Z. LENG, Y. GAO, X. SHUI, Z. Uncovering the approach to develop ultra-high performance concrete (UHPC) with dense meso-structure based on rheological point of view: Experiments and modeling. **Construction and Building Materials**. v. 271, fev. 2021.

ZHANG, Y. KONG, X. GAO, L. LU, Z. ZHOU, S. DONG, B. XING, F. In-situ measurement of viscoelastic properties of fresh cement paste by a microrheology analyzer. **Cement and Concrete Research**. v. 79, p. 291–300, 2016.

ZHANG, C. KONG, X. YIN, J. FU, X. Rheology of fresh cement pastes containing polymer nanoparticles. **Cement and Concrete Research**. v. 144, jun. 2021.

APÊNDICE A

Estudo das Propriedades no Estado Fresco e Endurecido de Concretos com Adições Minerais: Contribuição por Meio de Meta-Análise, Mapeamento e Revisão Sistemática de Literatura para Delineamento de Futuras Pesquisas no Tema

Study of Properties in the Fresh and Hardened State of Concrete with Mineral Additions: Contribution through Meta-Analysis, Mapping and Systematic Review of Literature for the Outline of Future Research on the Topic

Jéssica Rodrigues dos Santos¹ <https://orcid.org/0000-0002-6331-1514>

Andrielli Moraes de Oliveira² <http://orcid.org/0000-0001-8977-785X>

Oswaldo Cascudo² <https://orcid.org/0000-0003-1879-6396>

¹ Mestranda do PPG-GECON da Universidade Federal de Goiás;

² Professor (a) Doutor (a) da Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil – PPG GECON

Resumo

As propriedades do concreto no estado endurecido são também reflexo das propriedades e características no seu estado fresco. Estudos de reologia e otimização de dosagens de concreto de cimento Portland assumem um papel importante na correlação com propriedades mecânicas, durabilidade e de desempenho em campo. Assim, por meio da Revisão Sistemática de Literatura (RSL), é objetivo deste artigo analisar os principais ensaios no estado fresco e endurecido de pastas e concretos, observando-se também os tipos e percentagens de adições mineraias mais comumente utilizadas para delineamento de futuras pesquisas no tema. Para tanto, strings de busca foram definidas e pesquisadas nas principais bases científicas. Como resultado tecnológico, após análise das publicações, observou-se que os ensaios de abatimento de tronco de cone, funil V, caixa L e mini-slump foram comumente mencionados nos estudos, bem como as adições mineraias cinza volante e sílica ativa em respectivos teores 10 a 25% e de 2 a 10% em substituição parcial ao cimento Portland. Além disso, análises de porosidade e microestrutura e penetração de cloretos foram as principais propriedades dos concretos no estado endurecido relacionada a sua durabilidade.

Palavras-chave: Reologia; estado fresco; concreto; adições mineraias; durabilidade.

Abstract

The properties of concrete in its hardened state are also a reflection of the properties and characteristics in its fresh state. Portland cement concrete rheology and optimization studies play an important role in the correlation with mechanical properties, durability and field performance. Thus, through the Systematic Literature Review (RSL), the aim of this article is to analyze the main tests in the fresh and hardening states of pastes and concrete, also observing the types and percentages of mineral additions most commonly used to design future research on the subject. For this purpose, search strings were defined and searched in the main scientific databases. As a technological result, after analyzing the publications, it was observed that the slump tests, V funnel, L box and mini-slump were commonly mentioned in the studies, as well as the mineral additions fly ash and silica fume in respective contents 10 to 25% and 2 to 10% in partial replacement of Portland cement. Besides that, porosity and microstructure analyze and chloride penetration were the main properties of concretes in the hardened state related to their durability.

Keywords: Rheology; fresh state; concrete; mineral additions; durability.

Introdução

A reologia é a ciência que estuda a deformação de um corpo sólido, líquido ou gasoso sob influência de tensões. De acordo com Wallevik (2006) há um entendimento de que as propriedades reológicas fundamentais para a representação do concreto no seu estado fresco são a tensão de escoamento e a viscosidade plástica. As características reológicas são fundamentais para entender um dos principais parâmetros do concreto na construção civil: a trabalhabilidade.

Adicionalmente, a consistência e a fluidez do concreto podem ser expressas em termos de tensão de escoamento (que é a tensão mínima necessária para iniciar o fluxo) e viscosidade plástica (resistência de um material à deformação contínua) – a partir de curvas de fluxo, modelos e equações reológicas [27]. Logo, as propriedades do concreto em seu estado fresco podem ser avaliadas quali e quantitativamente utilizando-se parâmetros reológicos, como a fluidez – traduzida em termos de coesão e viscosidade; a consistência, enquanto densidade e empacotamento de partículas e, ainda a homogeneidade em forma de segregação e exsudação, sendo que todas essas propriedades resultado da reologia [3].

Para estudos mais complexos e aprofundados, é atraente abordar pesquisas mais simplificadas em pastas, avançando-se para concretos com a interveniência de agregados [3]. Em campo e de forma mais rápida em laboratório, ensaios de abatimento, funil V, caixa L, entre outros são muito utilizados, porém, estes ensaios não são capazes de medir e correlacionar variáveis como propriedades de tensão de escoamento, tensão cisalhante, temperatura, tempo, dentre outras [12].

Ferraris e Hill (2003) citam que granulometria da composição, finos, adições minerais, aditivos, energia e tempo de mistura podem influenciar o comportamento de pastas e concretos no estado fresco da mistura. Especificamente sobre as adições minerais, há controvérsias sobre seu uso e melhorias na trabalhabilidade e no comportamento mecânico e durabilidade no estado endurecido [18] [23][22].

Neste contexto, é objetivo do presente trabalho conduzir uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) para analisar as principais propriedades no estado fresco de pastas e concretos, observando-se também os tipos e percentagens de adições minerais mais comumente utilizadas para delineamento de futuras pesquisas no tema de reologia. Observou-se também as metodologias de ensaios e normatizações pertinentes usualmente empregadas para a caracterização do concreto no seu estado fresco e no estado endurecido. A contribuição do artigo é a síntese e reunião destas informações em um único documento.

Metodologia

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) consiste em uma investigação detalhada e direcionada em identificar, selecionar, analisar e sintetizar as informações mais pertinentes sobre o assunto estudado. A RSL é composta por três fases: planejamento (elaboração de um protocolo de revisão), condução (seleção dos estudos) e documentação (extração de dados e análises detalhadas dos trabalhos selecionados) [11].

De forma resumida, na primeira etapa da revisão foi determinada a questão da pesquisa com base na metodologia de P.I.C.O.C - população, intervenção, controle, outcomes (resultados) e

context (aplicação), seguida da seleção das fontes de pesquisa, determinação de string de busca e utilizando estratégias para a seleção de artigos (critérios de inclusão ou exclusão a partir da leitura de títulos, resumos e o artigo completo).

Na segunda fase foi realizada a busca a partir da string definida na etapa anterior e observada a seleção dos artigos, a partir dos critérios de inclusão ou exclusão dos mesmos, com base na leitura, primeiramente de títulos, seguida dos resumos e da leitura do artigo completo. Por fim, na documentação foi observada a extração e o levantamento de dados dos artigos e a análise bibliométrica e qualitativa do material levantado.

A análise do P.I.C.O.C. (Tabela 1) foi realizada com o intuito de formar uma base para a elaboração das questões de pesquisa.

Tabela 1: Análise do P.I.C.O.C.

P.I.C.O.C.	
População	Livros, dissertações, teses, artigos e normas que contenham conteúdos relacionados com conceitos e ensaios sobre reologia de pastas de cimento e concreto
Intervenção	Caracterização reológica de pastas de cimento e concretos e estudo de técnicas e procedimentos de ensaios de reologia em pastas e concretos, exceto de materiais asfálticos e outros tipos de materiais.
Controle	<ul style="list-style-type: none"> • Schramm, G. 2006 (livro – “Reologia e Reometria”) • Reis, J. 2008 (dissertação – “Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos, por meio, do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso.”) • Castro, A. 2007 (tese – “Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho”)
Resultados (outcomes)	Obter informações e análises que sejam o suficiente para compreender as metodologias de ensaio baseando-se nos princípios reológicos do material, identificar normas que auxiliam nesse processo.
Aplicação (context)	Obtenção de embasamento teórico para a realização de ensaios reológicos para a elaboração da metodologia da dissertação e a reprodução de uma tabela completa de caracterização reológica de concretos destinados a estruturas de parques geradores de energia ou outras obras de infraestrutura e validando esses ensaios e concretos visando a durabilidade.

Fonte: Autores (2021).

A partir da análise da Tabela 1, foram definidas questões norteadoras da pesquisa. A partir disso, algumas simulações e buscas prévias foram realizadas para determinar o termo de busca ou string, que utilizando alguns sinônimos, ao final foi definido como: *Rheolog* OR rheometry) AND (“cement paste” OR concrete) AND (“supplementary cementitious materials” OR silica OR metacaulim OR “fly ash”) and (durability OR “mechanical properties”)*. Para a pesquisa com esses termos, foram utilizadas as bases de buscas eletrônicas: *Science Direct, Scopus, Engineering Village e Web of Science*.

Por fim, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão dos artigos selecionados, apresentados no Tabela 2.

Na condução da RSL, foi efetuada a busca por meio da string em cada uma das bases de busca eletrônicas, sendo que a quantidade de publicações obtidas está descrita no Tabela 3.

Com o auxílio da ferramenta Start, software utilizado para a seleção e compilação dos artigos exportados das bases de busca, foi realizada uma seleção minuciosa das publicações a partir dos critérios de seleção, incluindo a sequência de exclusão por título, resumo e leitura completa.

Tabela 2: Critérios de inclusão e exclusão de artigos.

CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
Termos de busca contidos no título, palavras-chave ou resumo	Não abordar Reologia, adições minerais ou propriedades mecânicas
Descrição dos ensaios reológicos e de resistência mecânica	Reologia em materiais diferentes de pasta de cimento/argamassas ou concreto
Disponível para acesso	Indisponível para acesso

Fonte: Autores (2021).

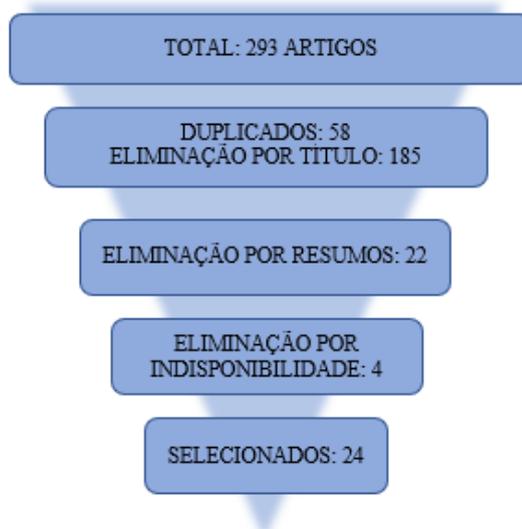
Tabela 3: Quantidade de publicações obtidas em cada base de pesquisa.

BASE DE DADOS	QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES
<i>Web Of Science</i>	176
<i>Engineering Village</i>	56
<i>Science Direct</i>	44
<i>Scopus</i>	17
TOTAL	293

Fonte: Autores (2021).

A partir das análises dos títulos, 185 artigos foram rejeitados, 58 estavam duplicados e 54 foram aceitos. Após isso, com a avaliação dos resumos obteve-se 22 artigos descartados e 28 aceitos. Por fim, verificou-se que 4 artigos estavam indisponíveis, totalizando assim em 24 artigos selecionados, conforme demonstrado na Figura 1. Dessa forma, partiu-se para a etapa de análise das publicações selecionadas.

Por fim, na etapa de documentação, foram postas análises bibliométricas e análises críticas relativas ao conteúdo dos artigos, com o auxílio de uma planilha, que continha dados como: título e autores, ano de publicação, palavras-chave, fonte de publicação, país onde foi realizada a pesquisa, fator de impacto (JCR), objetivos da pesquisa, adições utilizadas, ensaios de caracterização dos materiais, ensaios realizados no estado fresco e endurecido, propriedades, normas utilizadas e principais conclusões.

Figura 1: Seleção dos artigos

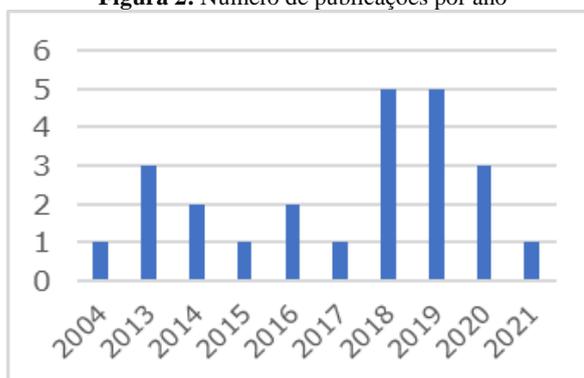
Fonte: Autores (2021).

Apresentação e Discussão dos Resultados

A apresentação dos principais resultados estão divididos em dois tópicos: análise bibliométrica (visão ampla e técnica dos artigos) e uma análise crítica (análise mais detalhada dos artigos).

Resultados da Análise Bibliométrica

A primeira análise realizada a partir da seleção dos artigos foi a quantidade de artigos por ano de publicação (Figura 2). Observa-se um intervalo de 2005 até 2012 sem publicações relevantes selecionadas, o que pode indicar que o estudo focado em reologia voltou a ser mais abordado mais recentemente nos últimos anos. Além disso, os anos com maior número de publicações foram 2018 e 2019, com um leve decréscimo até o ano atual (2021). Isso indica que há uma resposta a demandas de estudos nesta área, uma vez dada a importância do controle tecnológico do concreto na sua durabilidade, desempenho e comportamento mecânico.

Figura 2: Número de publicações por ano

Fonte: Autores (2021).

Outra análise realizada foi a concentração dos estudos por país de publicação, demonstrado na Figura 3, por meio de uma ferramenta de análise bibliométrica *VOSviewer*.

Figura 3: Mapa de concentração de publicações por países.



Fonte: Autores (2021).

O mapa da figura demonstra que existe uma maior concentração de periódicos que abordam o tema da pesquisa na China, França, Coreia do sul, Iran, Estados unidos, Paquistão e Hong Kong. E, apesar do Brasil estar presente no mapa, sua colaboração é ainda tímida com apenas um artigo [24].

Outra análise realizada foi quanto ao fator de impacto, dado pelo *Journal Citation Report (JCR)*, ilustrado na Tabela 4. É possível observar pela Tabela 4 que a maioria dos artigos selecionados (66%) se encontram em periódicos com uma boa avaliação. 75% deles estão em periódicos com um fator de impacto significativo e que 34% das publicações (8 artigos) vieram da *Construction and Building Materials*, um dos principais periódicos da área da engenharia civil. A análise e classificação por autores não foi realizada, uma vez que não foi encontrado a repetição de autores entre os artigos.

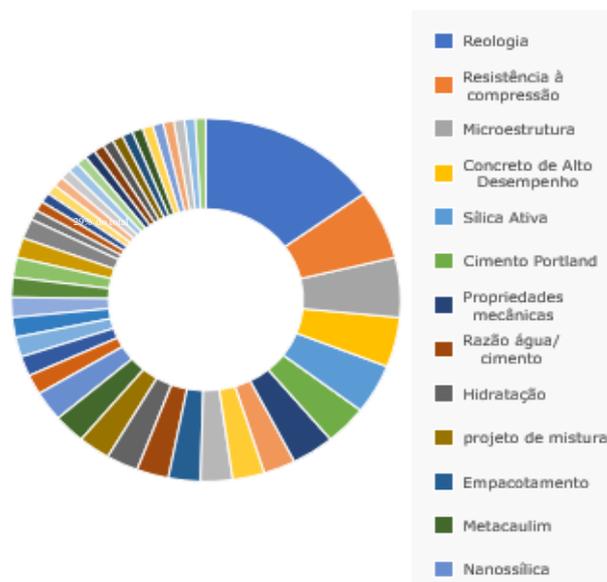
Tabela 4: Fator de Impacto dos periódicos e a quantidade de artigos selecionados em cada um.

PERIÓDICO	FATOR DE IMPACTO (JCR)	ARTIGOS
<i>Cement And Concrete Research</i>	8,328	3
<i>Powder Technology</i>	4,142	2
<i>Construction And Building Materials</i>	4,419	8
<i>Cement & Concrete Composites</i>	6,257	3
<i>Journal Of Cleaner Production</i>	7,246	1
<i>Composites Part B</i>	7,635	1
<i>Structural Concrete Journal</i>	2,174	1
<i>Journal Of Adhesion Science and Technology</i>	1,365	1
<i>Revista Matéria</i>	0,248	1
<i>Materials</i>	3,057	1
<i>Mechanics Of Materials</i>	2,993	1
<i>Advances In Materials Science and Engineering</i>	1,271	1

Fonte: Autores (2021).

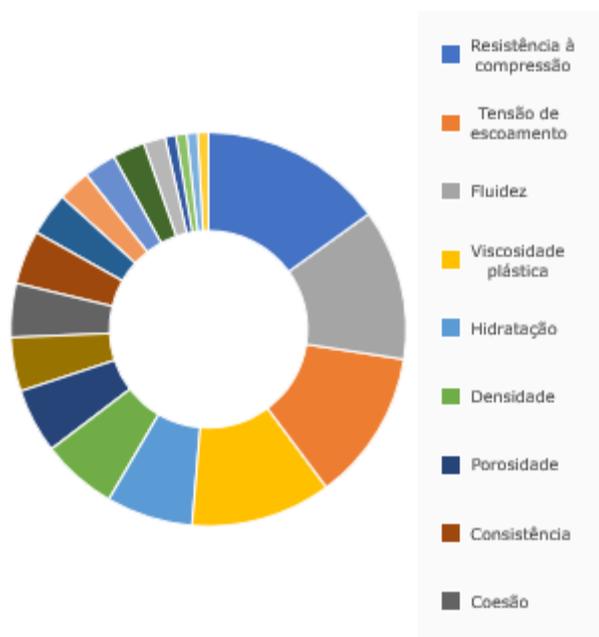
trabalhos (em amarelo - 54%). Propriedades de hidratação e porosidade foram mencionadas. Já no estado endurecido, a resistência à compressão foi a propriedade mais estudada como propriedade resposta, presente em 17 dos 24 artigos (em azul - 71%).

Figura 5: Gráfico de explosão solar com a distribuição das palavras-chave.



Fonte: Autores (2021).

Figura 6: Gráfico de explosão solar com as propriedades e características estudadas nas publicações.



Fonte: Autores (2021).

Para a investigação dos ensaios que foram realizados nos estudos, foram elaborados gráficos de *aster plot* (obtidos pelo POWER BI) apresentados nas Figuras 7 e 8, sendo que para a sua construção, foi contabilizado a quantidade de ensaios em cada uma das 24 publicações analisadas.

Figura 7: Gráfico de explosão solar dos ensaios realizados no concreto no estado fresco.



Fonte: Autores (2021).

Figura 8: Gráfico de explosão solar dos ensaios realizados no concreto no estado endurecido.



Fonte: Autores (2021).

Os ensaios em reômetros e viscosímetros são os mais realizados no concreto em seu estado fresco (Figura 8) (em azul claro - 14 artigos – 58%), seguidos dos ensaios de abatimento de tronco de cone (em azul escuro - 8 artigos – 33%). Em paralelo, na figura 9 os ensaios de resistência à compressão (em rosa - 17 artigos – 71%) e de microscopia eletrônica de varredura (em verde escuro - 5 artigos – 21%) no estado endurecido foram os mais abordados nas pesquisas. Na Figura 9, observa-se que porosidade, a penetração de cloretos e a caracterização da microestrutura por MEV e DRX foram mencionados. Estes ensaios podem ter relação com a durabilidade do concreto.

A literatura [3, 5, 6, 7, 12, 18, 20, 23, 24, 26, 28, 33-35] aborda que as pesquisas realizadas em reômetros ou viscosímetros, determinam propriedades como tensão de escoamento, viscosidade plástica ou tixotropia. Como resultado exploratório, foi possível observar frequências de ensaios mais realizados no estado fresco e endurecido e também propriedades

de interesse em concretos e pastas.

No que tange ao apontamento das principais adições minerais estudadas e mencionadas, a Tabela 4 apresenta os teores mais estudados. A cinza volante foi bastante citada [3, 6, 14, 12, 15, 16, 18, 20, 23, 25] seguida pela sílica ativa [3, 5, 7, 23, 24, 25, 28, 33, 35, 36]. Algumas pesquisas avançaram na utilização de misturas binárias e ternárias ou em teores de adição binária. Os percentuais de cada adição mineral são variáveis e têm faixa de teores mínimos e máximos, como esperado.

Tabela 5: Faixa de porcentagens de adições utilizadas nos estudos

ADIÇÕES UTILIZADAS	PORCENTAGENS UTILIZADAS NOS ARTIGOS EM MASS
Cinza Volante	10% - 25%
Escória Granulada De Alto Forno	20% - 30%
Sílica Ativa	2% - 10%
Metacaulim	3% - 35%
Nanossílica	1% - 5%
Fíler Calcário	5% - 30%

Fonte: Autores (2021).

Outros tipos de informações também foram analisados, como as normas ou procedimentos utilizados para a realização dos ensaios, seus objetivos gerais e suas principais conclusões. A literatura [3] mencionou a norma ASTM C 1738 – “Standard Practice for High-Shear Mixing of Hydraulic Cement Pastes” que é um procedimento padrão para a determinação de ensaios reológicos em pastas de cimento; [4] e [15] citam um procedimento “Specification and Guidelines for SCC” pela EFNARC que determina procedimentos para a realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone, funil V e Caixa L, com o apoio da ACI 237.

Pesquisas [5, 23 e 31] utilizaram a EN 12350-8:2010, a qual trata do ensaio de abatimento de tronco de cone, a EN 12350-9:2010 que menciona o ensaio de Funil V, EN 12350-10:2010 com os procedimentos do ensaio da Caixa L e o autor [14] utiliza a ASTM C230 para determinar o ensaio de espalhamento do tronco de cone.

Outro estudo [27] citou procedimentos da ASTM: a ASTM 1738 e a ASTM C305 – “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency”, ambas determinam procedimentos para ensaios reológicos. O estudo [16] referiu-se a ASTM C1611 (espalhamento pelo tronco de cone).

Conclusões

A partir da Revisão Sistemática de Literatura delineada, pode-se concluir que:

- estudos de reologia em materiais cimentícios está sempre vinculado ao estudo das propriedades mecânicas em seu no estado endurecido;
- as principais propriedades reológicas estudadas foram: viscosidade plástica e tensão de escoamento;
- a ASTM C 1738 possui procedimento para a determinação de ensaios reológicos em pastas de cimento;
- as adições mais utilizadas nestes estudos foram a cinza volante (10-25%) e a sílica ativa (2-

10%);

- os principais ensaios no estado fresco de concretos são abatimento de tronco de cone, funil V, caixa L e mini-slump foram comuns nas pesquisas analisadas.

Referências

- [1] AGOSTINHO, L. B. Estudo reológico de pastas de cimento portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, UNB, Brasília, 2017.
- [2] ARORA, A. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, v. 103, p. 179–190, 2018.
- [3] BANFILL, P. *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. British Society of Rheology, p. 61 e 130, 1991.
- [4] BARKAT, A. Effects of local metakaolin addition on rheological and mechanical performance of self-compacting limestone cement concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 33, n. 9, p. 963–985, 2019.
- [5] BENAICHA, M. BELCAID, A. ALAOUI, A. H. JALBAUD, O. BURTSCHHELL, Y. Effects of limestone filler and silica fume on rheology and strength of self-compacting concrete. *Structural Concrete*, v. 20, n. 5, p. 1702–1709, 2019.
- [6] CHANG, P.-K. An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 4, p. 623–629, 2004.
- [7] CHEN, J. J. Use of superfine zeolite in conjunction with silica fume — Effects on rheology and strength of cementitious paste. *Powder Technology*, v. 328, p. 75–83, 2018.
- [8] CHEN, M. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119090, 2020.
- [9] COUTO, P. B. Caracterização reológica de pastas de cimento portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional. Dissertação de mestrado, Faculdade de Tecnologia, UNB, 2016.
- [10] CYR, M. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. Tese de Doutorado—Toulouse: INSA de Toulouse e Université de Sherbrooke, 1999.
- [11] DRESCH, Aline. LACERDA, Daniel Pacheco. ANTUNES, José Antônio Valle Júnior. *Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2015. 173p
- [12] GHAFARI, E.; FEYS, D.; KHAYAT, K. Feasibility of using natural SCMs in concrete for infrastructure applications. *Construction and Building Materials*, v. 127, p. 724–732, 2016.
- [13] GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and

associated methodologies”, health information and libraries journal, v 26, p. 91–108, may 2009.

[14] HOU, P. K. Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 12–22, 2013.

[15] JALAL, M.; FATHI, M.; FARZAD, M. Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*, v. 61, p. 11–27, 2013.

[16] JALAL, M.; TEIMORTASHLU, E.; GRASLEY, Z. Performance-based design and optimization of rheological and strength properties of self-compacting cement composite incorporating micro/ nano admixtures. *Composites Part B: Engineering*, v. 163, p. 497–510, 2019.

[17] JIAO, D., SHI, C., YUAN, Q., AN, X., LIU, Y., LI, H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete - A review. *Cement Concrete Composites*. p. 83, 146 e1 59, 2017.

[18] KASHANI, A. NICOLAS, R S. QIAO, G. G. DEVENTER, J. S. J. PROVIS, J. L. Modelling the yield stress of ternary cement–slag–fly ash pastes based on particle size distribution. *Powder Technology*, v. 266, p. 203–209, 2014.

[19] KE, G.; ZHANG, J. Effects of retarding admixture, superplasticizer and supplementary cementitious material on the rheology and mechanical properties of high strength calcium sulfoaluminate cement paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 18, n. 1, p. 17–26, 2020.

[20] KIM, Y. J. Investigation of Rheological Properties of Blended Cement Pastes Using Rotational Viscometer and Dynamic Shear Rheometer. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, 2018.

[21] LAVERGNE, F. et al. Effect of nano-silica particles on the hydration, the rheology and the strength development of a blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, v. 95, p. 42–55, 2019.

[22] LI, P. RAN, J. NIE, D. ZHANG, W. Improvement of mix design method based on paste rheological threshold theory for self-compacting concrete using different mineral additions in ternary blends of powders. *Construction and Building Materials*, v. 276, 2021.

[23] LING, G. SHUI, Z. SUN, T. GAO, X. WANG, Y. SUN, Y. WANG, G. LI, Z. Rheological behavior and microstructure characteristics of SCC incorporating metakaolin and silica fume. *Materials*, v. 11, n. 12, 2018.

[24] MACIEL, G. DE F.; BARBOSA, M. P.; PEREIRA, J. B. Análise comparativa da tensão limite de escoamento de argamassas por meio da técnica de Pashias e reometria rotacional. *Revista Materia*, v. 21, n. 4, p. 866–879, 2016.

[25] MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, v. 78, p. 120–131, 2017.

- [26] MOHAMMED, A. Characterization and modeling the flow behavior and compression strength of the cement paste modified with silica nano-size at different temperature conditions. *Construction and Building Materials*, v. 257, p. 119590, 2020.
- [27] NAZAR, S. YANG, J. THOMAS, B. S. AZIM, I. REHMAN, S. K. U. Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, v. 272, p. 122701, 2020.
- [28] SADRMOHTAZI, A.; TAJASOSI, S.; TAHMOURESI, B. Effect of materials proportion on rheology and mechanical strength and microstructure of ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 1103–1112, 2018.
- [29] TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. “Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review”, *British journal of management*, v 14, p. 207-222, sep. 2003
- [30] TATTERSALL, G.H. *Workability and Quality Control of Concrete*. E & FN Spon, London Great Britian, 1991.
- [31] SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 121–129, 2014.
- [32] WALLEVIK, O. H, WALLEVIK, J.E. Rheology as a tool in concrete science: The use os rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*. v. 41, n. 12, p. 1279-1288, 2011.
- [33] WANG, M.; YAO, H. Effects of polycarboxylate ether grafted silica fume on flowability, rheological behavior and mechanical properties of cement-silica fume paste with low water-binder ratio. *Construction and Building Materials*, v. 272, 2021.
- [34] WU, Z.; KHAYAT, K. H.; SHI, C. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. *Cement and Concrete Research*, v. 123, 2019.
- [35] YUN, K.-K.; CHOI, S.-Y.; YEON, J. H. Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 78, p. 194–202, 2015.
- [36] ZAPATA, L. E. Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO₂ additions. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 708–716, 2013.

APÊNDICE B

Estudo do efeito das adições minerais e de aditivos químicos plastificantes e super plastificantes em parâmetros reológicos de matrizes cimentícias: uma contribuição por meio de meta-análise, mapeamento e revisão sistemática de literatura para delineamento de futuras pesquisas no tema

Jéssica Rodrigues dos Santos¹ <https://orcid.org/0000-0002-6331-1514>
Andrielli Moraes de Oliveira² <http://orcid.org/0000-0001-8977-785X>
Oswaldo Cascudo² <https://orcid.org/0000-0003-1879-6396>

¹ Mestranda do PPG-GECON da Universidade Federal de Goiás

² Professor (a) Doutor (a) da Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil – PPG GECON

Resumo

É importante que o concreto tenha as melhores propriedades tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, por meio do estudo de suas composições para garantia de sua trabalhabilidade e vida útil. O estudo de propriedades reológicas e, conseqüentemente, a otimização de dosagens de concreto de cimento Portland atigem uma fundamental atribuição com o desempenho em serviço e sua durabilidade. Nesse contexto, é objetivo deste trabalho conduzir uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) para analisar o efeito de adições minerais (principalmente a sílica ativa) e de aditivos químicos (plastificantes e superplastificantes) em propriedades reológicas de pastas de cimento Portland. Assim, a *string* de busca foi definida e utilizada nas principais bases científicas. Foram feitas análises bibliométricas acerca de dados como principais fontes, países, artigos/autores e palavras chaves e também uma análise crítica sobre o tema da RSL em si. Nos estudos analisados, as porcentagens ideais utilizadas de sílica ativa e aditivos químicos para trazer as melhores propriedades reológicas não são as melhores escolhas para os resultados de resistência a compressão, portanto, o ideal é a realização de estudos mais aprofundados para encontrar um equilíbrio, uma vez que é necessário um bom desempenho tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto.

Palavras-chave: propriedades reológicas; trabalhabilidade; sílica ativa; aditivos químicos

1. INTRODUÇÃO

A tendência dos modelos de construção tem tomado um caminho cada vez mais sofisticado quanto à estética, exigente quanto às suas propriedades (como altas resistências,

impermeabilidade, trabalhabilidade e durabilidade) e de sustentabilidade, na tentativa de reduzir os resíduos produzidos e utilizando materiais alternativos na composição dos concretos (JUSTNES; NG, 2016; LIU *et al.*, 2017).

Com o intuito de se atingir altas resistências, tem sido empregue relações água/ligante cada vez mais baixas e para que isso não interfira na sua trabalhabilidade e desempenho em seu estado fresco, a resposta está no uso de aditivos químicos, como plastificantes e superplastificantes (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esses materiais permitem a diminuição do teor de água no concreto em até 40%, a depender da sua base química, levando a redução da porosidade e aumentando a durabilidade do concreto, além de propiciar melhorias significativas na trabalhabilidade e reologia, facilitando a concretagem em locais de difícil acesso e evitando altos índices de segregação e exsudação, se utilizados corretamente (SPIRATOS *et al.*, 2006).

Além disso, para auxiliar no quesito da sustentabilidade e diminuir o uso de cimento, para a redução da emissão de CO₂ durante a sua produção e produzir misturas mais ecoeficientes e menos intensivos em energias, a alternativa bastante abordada na composição dos concretos atuais tem sido a aplicação de adições minerais (naturais ou sintéticos) como a sílica ativa, cinzas volantes, escórias granuladas, metacaulim, cinza da casca de arroz, entre vários outros (NEVILLE, 2016; DOAN *et al.*, 2017). De acordo com Alonso *et al.* (2013), a inclusão dessas adições minerais também pode vir a aumentar a fluidez e trabalhabilidade da mistura e a durabilidade do concreto – e se utilizadas em conjunto com superplastificantes tendem a diminuir a relação água/ligante da mistura e assim, auxiliam a produzir concretos de alto desempenho.

A reologia dos materiais cimentícios é a ciência que vai estudar o comportamento e as deformações desses materiais sob a influência de ações/forças externas (TATTERSALL; BANFILL, 1983). As características reológicas são fundamentais para entender um dos principais parâmetros do concreto na construção civil: a trabalhabilidade.

Dentro do campo da construção, alguns termos como fluidez, coesão e trabalhabilidade são empregados para definir o comportamento do concreto no estado fresco sob escoamento, entretanto essas expressões se tornam muito subjetivas por serem obtidas de maneira empírica. Dessa forma, cria-se a necessidade de descrever esse comportamento de maneira mais quantitativa e com grandezas físicas – surge, a partir disso, o uso de aparelhos mais

sofisticados para descrever o fluxo de pastas de cimento, argamassas e concretos (FERRARIS *et al.*, 2001).

Segundo Tattersall e Banfill (1983) a qualidade da estrutura de concreto armado depende, logicamente, da qualidade dos seus componentes de mistura, entretanto não é o único coeficiente para definir suas características. A qualidade do material final depende ainda das suas propriedades reológicas em seu estado fresco, durante a sua aplicação nas formas, isto é, o concreto precisa fluir e preencher todo o recipiente sem apresentar problemas como segregação ou exsudação.

Para a análise do efeito do aditivo químico e das adições minerais no desempenho do concreto, é feito o estudo do seu comportamento reológico, uma vez que a presença desses materiais impacta diretamente na reologia da pasta de cimento, mudando sua viscosidade e trabalhabilidade e, conseqüentemente, alterando sua microestrutura e resistência de forma permanente (BANFILL, 2005; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013).

De acordo com Tattersall e Banfill (1983), ensaios mais simples como o de abatimento de tronco de cone são muito sensíveis, uma vez que dependem da energia de quem está realizando o ensaio ou não são capazes de descrever as propriedades com grandezas físicas, tornando ensaios realizados por meio de viscosímetros e reômetros mais confiáveis e precisos para determinar o desempenho de materiais cimentícios em seu estado fresco. Assim, propriedades fundamentais como tensão de escoamento e a viscosidade plásticas são usadas para caracterizar essas misturas.

Entretanto, de acordo com Ferraris *et al.* (2001) a reologia da pasta de cimento e a reologia do concreto não podem ser equiparadas, já que o concreto é composto por agregados que podem vir a influenciar as características da sua composição e podem vir a atuar como dissipadores de calor e cisalham a pasta de cimento durante o processo de mistura. No entanto, propriedades de fluxo da pasta de cimento, se mensuradas de forma correta, podem ser utilizadas para determinar o comportamento e definir as quantidades das adições minerais e aditivos químicos.

Assim, para a compreensão ampla e completa do comportamento e o mecanismo de atuação dos aditivos e das adições e como isso impacta no desempenho de concretos, é importante o estudo das propriedades reológicas em pastas de cimento por meio de reômetros para a verificação do seu comportamento e para expressar as quantidades ideais a serem utilizadas

(BURGOS-MONTES *et al.*, 2013).

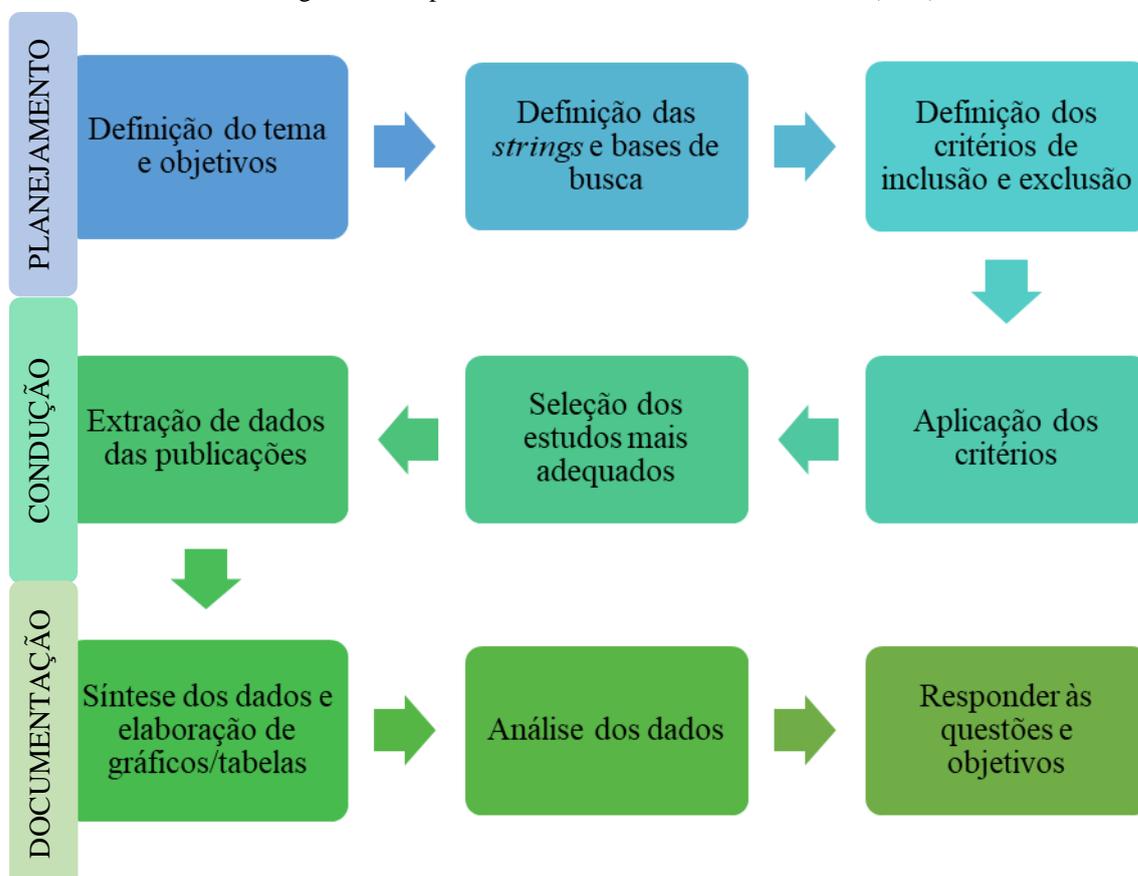
Por fim, é objetivo do presente trabalho conduzir uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) para analisar o efeito das adições minerais e dos aditivos químicos (plastificantes e superplastificantes) nas propriedades reológicas de pastas, argamassas e concretos de cimento Portland. Destaca-se ainda que a RSL é uma ferramenta útil, uma vez que proporciona a organização e avaliação das informações extraídas de artigos, a partir de pesquisas anteriores e, em sequência, uma análise crítica dessas informações. A classificação de dados por meio da RSL tem sido amplamente empregada em trabalhos científicos e em inúmeras áreas do conhecimento (PEDRO; NUNES; MACHADO-LIMA; 2013; VAZ; CARASEK. 2019; ASHMED *et al.*, 2021; OLENA, *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2022).

O presente artigo avança com contribuições em sistematizar, organizar e reunir informações sobre o estudo de propriedades reológicas de pastas ou concretos de cimento portland contendo adições minerais e aditivos químicos como uma espécie de guia, de forma a atualizar, consubstanciar e balizar estudos futuros no tema.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste artigo, foi utilizada a metodologia de Revisão Sistemática de Literatura (RSL) que corresponde a um estudo detalhado utilizado para mapear, descobrir, selecionar, avaliar de forma crítica, sintetizar e agrupar resultados e discussões de estudos anteriores que são relevantes e abordam assuntos e informações pertinentes sobre algum tema estudado. A RSL é dividida em três etapas (Figura 1), sendo elas: a fase de planejamento, que consiste na concepção de um protocolo de revisão; a fase da condução com a seleção dos artigos encontrados e, por fim, a documentação, que é a fase em que são feitas as análises detalhadas das publicações selecionadas (DRESCH *et al.*, 2015).

Figura 1 – Etapas da Revisão Sistemática de Literatura (RSL)



2.1 Planejamento

Inicialmente foi determinado um protocolo de revisão, definindo o objetivo da pesquisa que consiste em analisar os principais efeitos do uso de aditivos químicos e adições minerais nas propriedades reológicas de materiais cimentícios. Foram estabelecidas, ainda, questões para orientar a pesquisa e buscar suas respostas após a análise de todos os dados retirados das publicações, na conclusão desse artigo, dispostas a seguir:

- quais os tipos e teores de adição mineral utilizada e o seu impacto nas propriedades reológicas dos materiais cimentícios?
- quais os tipos e teores de aditivos químicos utilizados e os seus impactos nas propriedades reológicas dos materiais cimentícios?
- foram feitas correlações entre ensaios reológicos e outros ensaios feitos no estado

fresco dos materiais cimentícios?

- em uma análise geral, quais os teores de adições e aditivos que geraram melhores resultados reológicos das pastas de cimento e por quê?

O intuito de se responder às questões está no pressuposto que irá auxiliar na compreensão de como as pesquisas e estudos estão sendo realizados quanto ao tema abordado, entendendo o porquê da quantidade e do tipo de material utilizado na composição dos concretos, além de trazer o entendimento e a experiência de ensaios e resultados já obtidos para uma possível consideração em futuras pesquisas.

Para determinar a *string*, foram definidas as palavras-chave a serem adotadas para a pesquisa: Reologia; pasta de cimento; adições minerais; aditivos químicos ou, em inglês, *rheology*, *cement paste*; *concrete*; *supplementary cementitious materials*; *Chemical admixtures*.

A partir disso, algumas simulações e buscas prévias foram realizadas para a escolha do termo de busca ou *string*, que utilizando alguns sinônimos, ao final foi definido como: *Rheology AND (“cement paste” OR concrete) AND (supplementary cementitious materials OR admixture)*, utilizada nas seguintes bases de buscas eletrônicas: *Science Direct*, *Scopus*, *Engineering Village* e *Web of Science*.

Antes de seguir para a próxima etapa, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão (Tabela 1) definidos para delimitar se as pesquisas se encaixavam ou não dentro dos objetivos do trabalho e então selecionar os artigos encontrados nas bases de busca citadas acima.

Tabela 1 – Critérios de inclusão e exclusão de artigos.

CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
Artigos de pesquisa/revisão da literatura que tratem sobre reologia em pastas de cimento	Artigos escritos em outra língua a não ser inglês e espanhol
Artigos que correlacionem o uso de adições minerais e/ou aditivos químicos com propriedades reológicas em pastas	Artigos que abordem reologia em outros materiais que não sejam cimentícios (como o asfalto, por exemplo)
Capítulos de livros ou livros integrais que abordem ensaios reológicos em pastas de cimento	Artigos que não façam o uso de adições minerais (especificamente sílica ativa, metacaulim, nanossílica e cinza da casca de arroz)
Disponível para acesso	Artigos que não utilizem reômetros ou viscosímetros em sua metodologia
	Indisponível para acesso

2.2 Condução

Nesta etapa se dá início à busca e seleção dos artigos encontrados nas bases internacionais citadas a partir da *string* já definida, a partir dos critérios de seleção definidos na etapa anterior.

Com o auxílio da ferramenta *Parsif.al*, plataforma online utilizada para a seleção e compilação dos artigos exportados das bases de busca, foi feita a seleção minuciosa das publicações a partir dos critérios de seleção, incluindo a sequência de seleção por título, resumo e leitura completa, além da localização e retirada dos trabalhos duplicados, isto é, que foram encontrados mais de uma vez nas plataformas de busca. Também é feita uma análise do fator de impacto *Journal Citation Reports* (JCR) para averiguar a relevância das revistas dentro da comunidade científica e, conseqüentemente, avaliando os artigos selecionados.

Ainda nesta fase, é feita uma avaliação da relevância e qualidade dos artigos encontrados, verificando se o contexto, a metodologia utilizada e os resultados serão relevantes para a análise crítica na fase de documentação. Logo após, é feita o levantamento e extração de todos os dados que são pertinentes ao estudo e que podem vir a responder os objetivos e as questões de pesquisa.

2.3 Documentação

Por fim, na etapa de análise dos dados obtidos a partir dos resultados, são postas análises bibliométricas e análises críticas relativas ao conteúdo das publicações.

Com o auxílio de uma ferramenta chamada *VOSviewer* foram feitas análise das palavras-chaves, coautorias e cocitações. Esse software propicia a elaboração e visualização de redes de coocorrência de termos extraídos de textos científicos, como periódicos e pesquisadores, gerando mapas e tabelas de redes e *clusters*.

Também foi utilizada uma planilha feita no excel que continha dados como: título e autores, ano de publicação, adições minerais e aditivos químicos utilizados e suas respectivas quantidades, os resultados dos ensaios reológicos realizados e se foram satisfatórios, relação dos ensaios com propriedades dos materiais em seu estado endurecido e informações relevantes dos estudos para a construção de tabelas para auxiliar nas discussões das análises e considerações finais desse artigo.

3. RESULTADOS DA RSL E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES

A apresentação dos resultados, obtidos por meio dos métodos descritos anteriormente, estão divididos em três tópicos: seleção dos estudos, detalhando os resultados da etapa de condução; análise bibliométrica, com uma visão ampla e técnica dos artigos; e uma análise crítica, com uma análise mais detalhada dos resultados e discussões dos artigos.

3.1 Seleção dos estudos

Na Tabela 2 estão apresentados os autores/ano de publicação e títulos dos 41 artigos selecionados para o estudo.

A busca em cada uma das bases de busca eletrônicas citadas está detalhada na Tabela 3, com a quantidade total de artigos encontrados. Foram encontrados 1436 artigos duplicados, resultando em 2926 artigos a serem analisados. A partir da leitura dos títulos, 2614 artigos foram rejeitados utilizando os critérios de exclusão pois abordavam assuntos que não se encaixavam no tema dessa pesquisa. Em seguida, com a avaliação dos resumos, 174 artigos foram descartados por tratarem de questões específicas que não seriam interessantes para as análises posteriores, como a utilização de adições minerais não usuais ou por não focarem nas propriedades reológicas utilizando adições ou aditivos nas composições, por exemplo.

Tabela 2 – Apresentação dos artigos finais selecionados

AUTOR/ANO	TÍTULO	AUTOR/ANO	TÍTULO
Agostinho et al., 2021	<i>Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosilica</i>	Ahari et al., 2015	<i>Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials</i>
Alonso et al., 2013	<i>Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes</i>	Banfil, 2011	<i>Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures</i>
Burgos-Montes et al., 2013	<i>Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers</i>	Burgos-Montes et al., 2012	<i>Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions</i>
Chalah et al., 2022	<i>Effect of silica fume on cement rheology properties in presence of superplasticisers</i>	Dongmin et al., 2011	<i>Research on the effect of polycarboxylate superplasticizers on rheology properties of compounds cementitious system</i>
Fares et al., 2022	<i>Polycarboxylate superplasticizer and viscosity modifying agent: Mode of addition and its effect on cement paste rheology using image analysis</i>	Ferraris et al., 2001	<i>The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete</i>
Güneyisi et al.,	<i>Fresh and rheological behavior of</i>	Hanehara;	<i>Interaction between cement and</i>

2015	<i>nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete</i>	Yamada, 1999	<i>chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology</i>
Huang et al., 2018	<i>The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent</i>	Khan et al., 2016	<i>Utilization of Supplementary Cementitious Materials in HPC: From Rheology to Pore Structure</i>
Kong et al., 2013	<i>Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers</i>	Koutný et al., 2018	<i>Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume</i>
Kucharska; Moczko, 1994	<i>Influence of silica fume on the rheological properties of the matrices of high-performance concretes</i>	Ling et al, 2018	<i>Rheological Behavior and Microstructure Characteristics of SCC Incorporating Metakaolin and Silica Fume</i>
Liu et al., 2017	<i>Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio</i>	Lu et al., 2015	<i>Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability</i>
Ma; Wang, 2013	<i>Rheological Properties of Self-compacting Concrete Paste Containing Chemical Admixtures</i>	Mardani-Aghabaglou et al., 2013	<i>Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete</i>
Mehdipour et al, 2017	<i>Rheology, hydration, and strength evolution of interground limestone cement containing PCE dispersant and high volume supplementary cementitious materials</i>	Navarrete et al., 2022	<i>Effect of supplementary cementitious materials on viscosity of cement-based pastes</i>
Papo; Piani, 2004	<i>Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes</i>	Park et al., 2005	<i>Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures</i>
Phan et al., 2006	<i>Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes</i>	Puertas et al., 2005	<i>Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes</i>
Rahman et al., 2014	<i>Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures</i>	Rojo-López et al., 2022	<i>Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler</i>
Salem, 2002	<i>Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement–silica fume and calcium hydroxide–silica fume pastes</i>	Santos et al., 2017	<i>Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments</i>
Senff et al., 2009	<i>Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars</i>	Shanahan et al., 2016	<i>Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture</i>
Turkmenoglu et al., 2022	<i>Micro and/or Nano-Silica modified moderate and high strength concrete: Rheology and synergistic effects on strength, elastic & inelastic behavior and microstructure</i>	Vikan et al., 2007	<i>Correlating cement characteristics with rheology of paste</i>
Yan et al., 2018	<i>Influence of Polycarboxylate Superplasticizer on Rheological</i>	Zapata et al., 2013	<i>Rheological performance and compressive strength of</i>

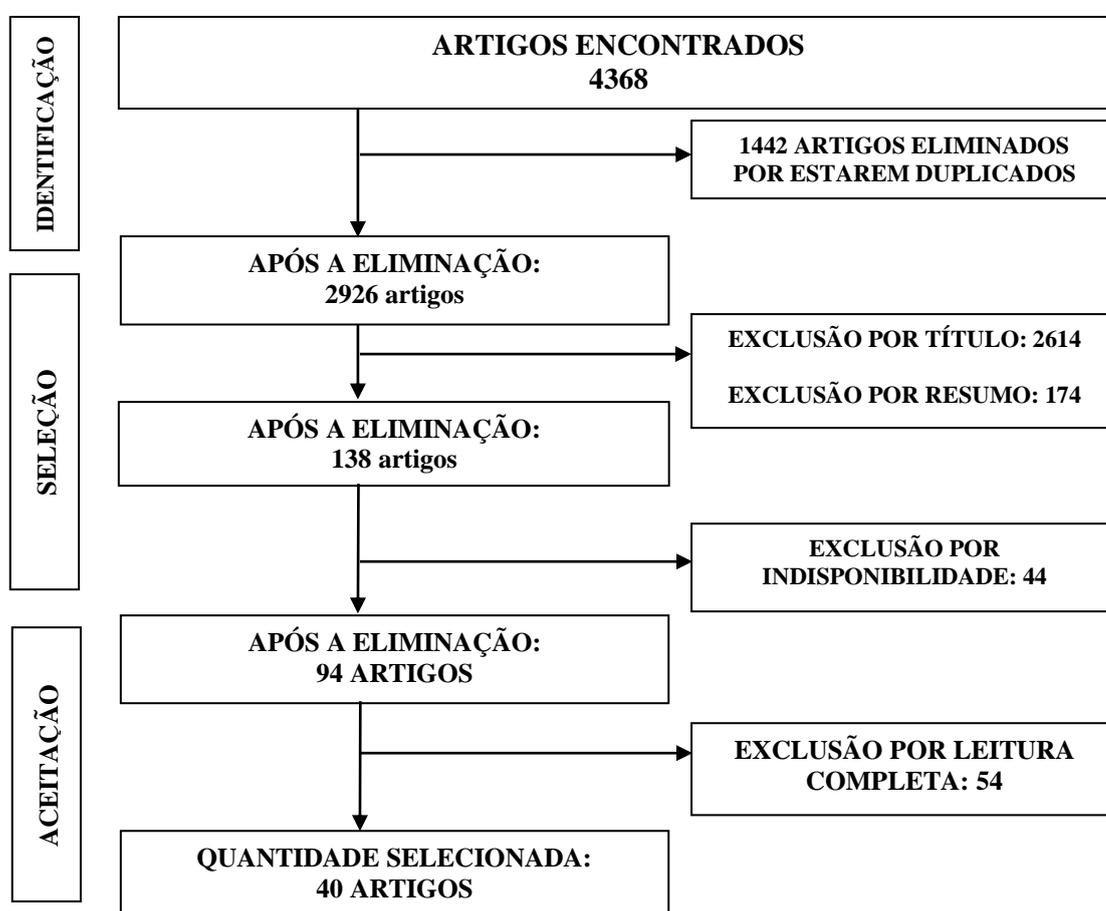
	<i>Behavior in Cement Paste</i>		<i>superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO₂ additions</i>
Zhang et al., 2020	<i>Toward the viscosity reducing of cement paste: Optimization of the molecular weight of polycarboxylate superplasticizers</i>	Zhang et al., 2022	<i>Effect of water to binder ratio, polycarboxylate superplasticizer and metakaolin dosages on rheological and viscoelastic properties of fresh metakaolin-air lime pastes</i>

Entretanto 44 dentre os artigos restantes estavam indisponíveis, totalizando em 94 artigos selecionados para a leitura integral, dos quais 40 foram aceitos por se encaixarem melhor na tentativa de responder os objetivos e as questões de pesquisa deste trabalho. Todo esse processo pode ser visto de maneira simplificada na Figura 2.

Tabela 3 – Quantidade de publicações encontradas em cada base de busca

BASE DE BUSCA	QUANTIDADE DE ARTIGOS
<i>Engineering Village</i>	582
<i>Scopus</i>	118
<i>Web of Science</i>	699
<i>Science Direct</i>	2969
TOTAL DE ARTIGOS	4368

Figura 2 – Etapas de seleção dos artigos



3.2 Análise Bibliométrica

A primeira análise feita a partir da seleção dos artigos foi a análise realizada quanto ao fator de impacto dado pelo *Journal Citation Report* (JCR) dos periódicos que os artigos foram publicados, demonstrado na Tabela 4, ordenados pela quantidade de artigos encontrados em cada periódico.

Tabela 4 – Fator de Impacto dos periódicos e a quantidade de artigos selecionados em cada um

Periódico/Jornal	JCR	Quantidade de Artigos
<i>Construction and Building Materials</i>	6,141	15
<i>Cement and Concrete Research</i>	10,933	9
<i>Cement & Concrete Composites</i>	7,586	2
<i>Advances in Cement Research</i>	1,791	2
<i>Journal of Building Engineering</i>	5,318	3
<i>Rheologica Acta</i>	2,824	1
<i>Materials</i>	3,748	1
<i>Journal of Wuhan University of Technology</i>	1,271	2
<i>Materials and Design</i>	9,417	1
<i>Case Studies in Construction Materials</i>	4,934	1
<i>Materials Today: Proceeding</i>	26,943	1
<i>KSCE Journal of Civil Engineering</i>	2,115	1
<i>Key Engineering Materials</i>	0,224	1

A partir da tabela, percebe-se que a maioria dos artigos selecionados, em torno de 70%, estão contidos nas revistas com melhores índices JCR, representando que são artigos publicados em periódicos relevantes dentro da comunidade científica na engenharia e que, logo, são de grande qualidade. Além disso, apenas três artigos foram publicados em revistas com JCR baixo, representando 7% da seleção.

Também foi realizada a análise do acoplamento bibliográfico dessas fontes/jornais, os quais tinham pelo menos 1 artigo publicado/selecionado, juntamente com as suas citações e a força total do *link*, visto na Tabela 5. Cada *link* tem uma força, que é representado por um valor numérico, sendo que quanto maior é esse número, mais forte é o *link*. Já o *link* simboliza a relação/conexão entre dois itens (que pode ser uma publicação, um autor ou uma palavra-chave).

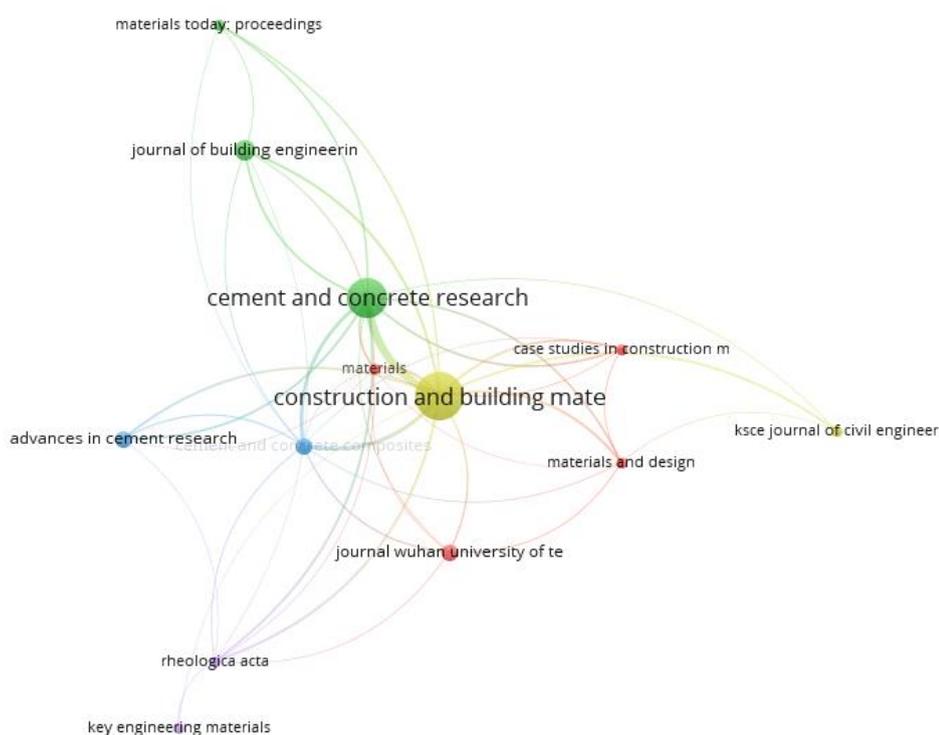
Tabela 5 – Principais fontes dos artigos

Fonte/Jornal	Artigos	Citações	Força total do link
<i>Construction and Building Materials</i>	15	1453	272
<i>Cement & Concrete Research</i>	9	1764	238
<i>Cement and Concrete Composites</i>	2	159	77
<i>Rheologica Acta</i>	1	69	35
<i>Materials</i>	1	23	34
<i>Journal of Building Engineering</i>	3	13	33

<i>Materials and Design</i>	1	44	30
<i>Advances in Cement Research</i>	2	239	29
<i>Case Studies in Construction Materials</i>	1	3	26
<i>Journal Wuhan University of Technology</i>	2	26	19
<i>Materials Today: Proceeding</i>	1	0	16
<i>KSCE Journal of Civil Engineering</i>	1	13	12
<i>Key Engineering Materials</i>	1	2	3

Pela Tabela 5 se observa que os três primeiros jornais – *Construction and Building Materials*, *Cement & Concrete Research* e *Cement and Concrete Composites*, são os mais importantes no que diz respeito ao número de citações e quantidade de publicações selecionadas (como também visto na tabela anterior). Ao mesmo tempo, a força do *link* ou vínculo desses jornais demonstra a quantidade de referências simultâneas citadas por dois periódicos, como por exemplo o jornal *Construction and Building Materials* que participa com o maior número de citações com outros periódicos – força total do *link*: 272. Essa ligação forte com os outros jornais é mais bem percebida no mapa contido na Figura 3.

Figura 3 – Mapa de acoplamento bibliográfico de fontes



Outra análise realizada foi a concentração dos estudos por país de publicação que demonstra as principais regiões que contribuem com relação ao número de publicações sobre o tópico estudado e na descrição de citações da temática, visto pela tabela 6 e pela Figura 4.

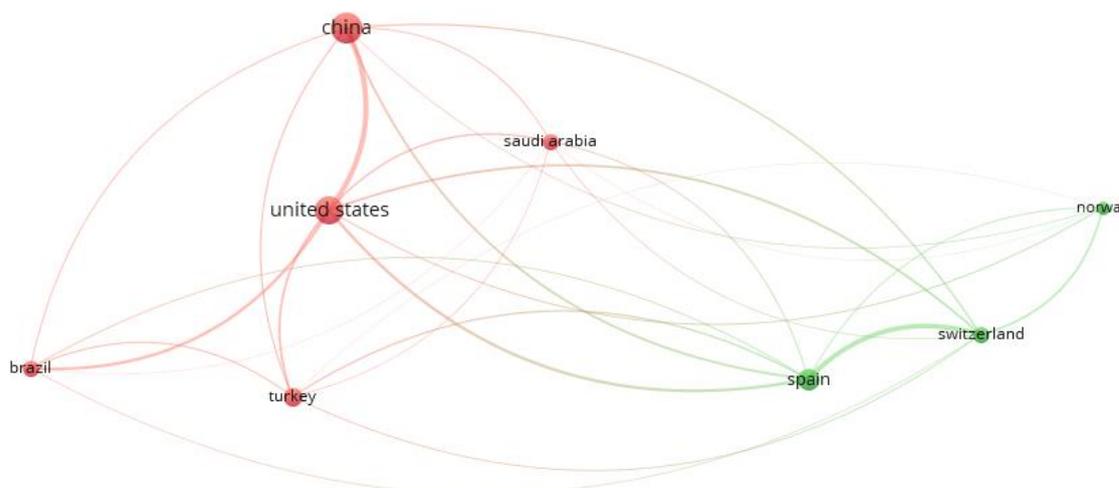
Estados Unidos, Espanha e China foram os países que mais contribuíram ao se analisar o número de artigos selecionados, com nove, cinco e onze artigos, respectivamente. Entretanto, ao se considerar o número de citações, ao invés de China, Brasil está entre os três principais países, os quais a ordem se dá por Estados Unidos, Espanha e Brasil, com 991, 562 e 560 citações, respectivamente. Ao se analisar a força total do *link* dos países, os Estados Unidos tiveram a maior força – com 401, indicando o impacto dos artigos de uma região em outros países que colaboram dentro desse tema de pesquisa. Esse conjunto de análises representam o efeito dessas nações no seguimento da linha de estudo utilizada na pesquisa.

Tabela 6 – Principais países pesquisadores dentro dos artigos selecionados

País	Artigos	Citações	Força total da ligação
Estados Unidos	9	991	401
Espanha	5	562	288
China	11	400	274
Suíça	3	376	253
Brasil	3	560	97
Turquia	4	261	92
Arábia Saudita	3	72	51
Noruega	2	260	50

Além disso, pela Figura 4, é possível ver o vínculo entre os países de acordo com o número de citações, no qual o tamanho do nó demonstra a participação (número de publicações) do país dentro do tema da pesquisa.

Figura 4 – Mapa de acoplamento bibliográfico por países.



Foi realizado o acoplamento bibliográfico de documentos, analisando o número de citações de

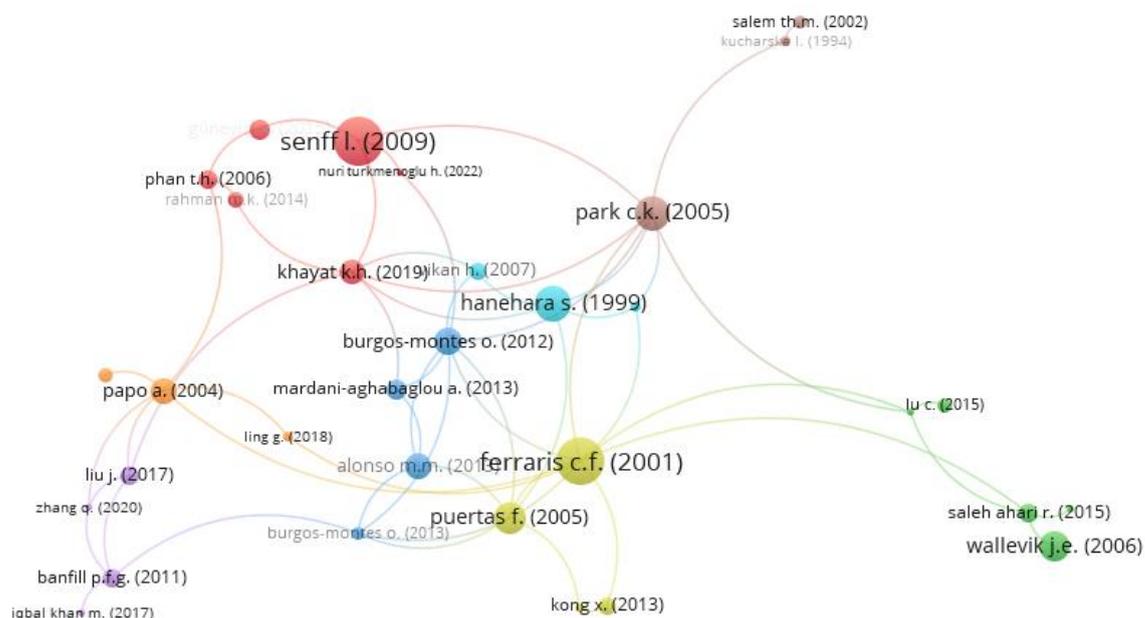
um artigo de pesquisa que aponta o impacto dessa publicação em uma área específica sobre o tema. A Tabela 7 conta com os nove principais artigos dentro da seleção feita, ordenados de acordo com o número de citações, com seus autores/ano de publicação e o título dos artigos. Os três primeiros artigos da tabela, com os maiores números de citações, estão ainda contidos nas principais revistas analisadas na tabela 5 – *Cement and Concrete Research* e *Construction Building Materials*, indicando a importância das publicações em revistas de grande impacto.

A visualização dos principais artigos/publicações conectados dentro da seleção realizada é observada na Figura 6 abaixo. Através da contagem dos nós, observa-se que 25 publicações estão interligadas baseado nas citações, demonstrando uma rede de cocitações entre os autores, sendo que a proximidade dos nós (e cores iguais) comprova o quão esses artigos estão interligados em termos de citação.

Tabela 7 – Principais artigos/autores baseado nas citações

Autor	Artigo	Citações	Ligações
Ferraris et al., 2001	<i>The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete</i>	470	10
Park et al, 2005	<i>Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures</i>	265	8
Burgos-Montes et al, 2012	<i>Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions</i>	170	8
Papo; Piani, 2004	<i>Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes</i>	147	6
Puertas et al., 2005	<i>Polycarboxylate superplasticizer admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behavior in cement pastes</i>	213	6
Hanehara; Yamada, 1999	<i>Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behavior of admixture, and paste rheology</i>	269	5
Burgos-Montes et al, 2013	<i>Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers</i>	37	5
Senff et al., 2009	<i>Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers</i>	502	4
Alonso et al., 2013	<i>Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes</i>	139	4

Figura 5 – Mapa de publicações conectadas baseado nas citações



A última análise bibliométrica feita foi a co-ocorrência de palavras-chave, uma vez que tem grande importância dentro das buscas realizadas já que por meio delas é possível nortear o assunto principal dentro do domínio da pesquisa. Por meio da listagem contida na tabela 8, se observa as 13 principais palavras-chaves com os maiores números de ocorrência dentro das publicações selecionadas. As palavras-chaves mais frequentes são: reologia, tensão de escoamento, viscosidade e cimento.

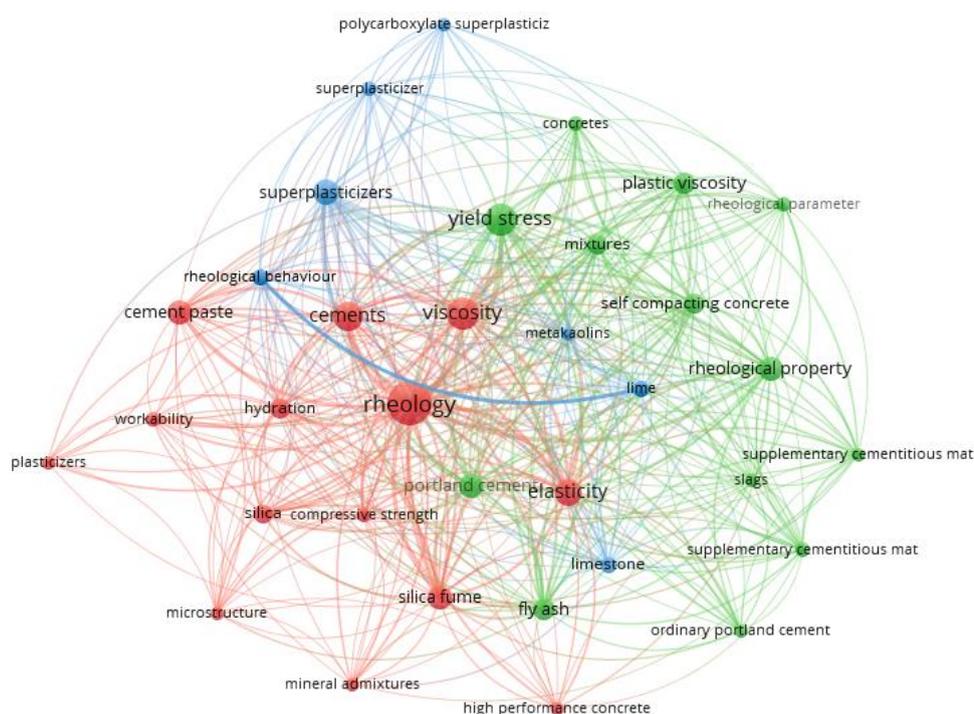
Tabela 8 – Principais palavras chaves baseadas nas citações

Palavra-chave	Ocorrência	Força total da ligação
Reologia	41	260
Tensão de escoamento	21	164
Viscosidade	22	150
Cimento	19	120
Elasticidade	15	120
Sílica ativa	13	106
Superplastificante	14	99
Propriedades reológicas	13	96
Cimento Portland	12	91
Viscosidade plástica	10	84
Misturas	9	78
Pasta de cimento	12	66
Hidratação	9	63

Além disso, também foi feito um mapa de ocorrência dessas palavras-chaves, visto na Figura

6, para visualizar as ligações entre elas. O tamanho do nó simboliza a frequência que a palavra-chave aparece nos artigos (e a sua importância dentro da temática estudada) e a sua localização dentro do mapa demonstra a sua co-ocorrência dentro das publicações. As diferentes cores utilizadas no mapa indicam a ocorrência das palavras-chave de acordo com o foco dos artigos, que podem ser distintos – auxiliando ainda em futuras escolhas das palavras-chave para outras buscas.

Figura 6 – Mapa de ocorrência de palavras-chave.



3.3 Análise Crítica

De forma geral, foi possível verificar o quanto os resultados dos estudos não tendem a variar quando o assunto é o mesmo tipo de material utilizado, a não ser quando se tem condições e combinações diferentes, ou seja, caso as condições de ensaios sejam replicáveis, obtém-se resultados similares, apesar da quantidade de variáveis que influenciam os resultados dos ensaios reológicos.

Primeiramente, foi feita uma análise mais detalhada dos artigos pertencentes aos principais autores determinados pela análise bibliométrica, com foco nos resultados obtidos dos ensaios reológicos e da influência das adições e dos aditivos utilizados.

Agostinho et al. (2021) citam que devido à grande área de superfície da nanossílica, essa

adição mineral requer mais água adsorvida, o que pode remover água livre da mistura e, assim, alterar as propriedades reológicas, portanto seu uso deve ser feito com cautela. Seu artigo traz que o uso de até 1% dessa adição traz benefícios para a mistura, pois tem efeitos leves sobre a reologia. O uso de 2% de nanossílica no concreto tem um efeito negativo nos parâmetros reológicos, o que influencia diretamente na bombeabilidade e capacidade da fôrma de enchimento, sendo que foi encontrado valores de viscosidade muito maiores e a tensão de escoamento vinte vezes maior que a da pasta de referência.

Alonso *et al.* (2013) concluiu que os aditivos químicos utilizados não foram absorvidos somente pelas partículas de cimento, mas também pelas adições minerais utilizadas (cinza volante, fíler calcário e escória granulada de alto-forno). E um resultado bastante esperado foi que dosagens muito altas de superplastificante causam segregação na mistura – além de provocar uma redução drástica na tensão de escoamento.

Além disso, de acordo com os resultados da curva de adsorção obtidas pelos ensaios, quanto maior o percentual de grupos carboxilatos compostos nos aditivos, mais intensamente ele é adsorvido pelas pastas de cimento. Do ponto de vista reológico, a relação grupo carboxilato/grupo éster ótima encontrada para as misturas utilizadas no estudo está na faixa de 0,7% e 1,2% e que o efeito fluidificante dos aditivos químicos nas pastas de cimento é condicionado pela presença das adições minerais.

Algumas considerações importantes foram feitas por **Ahari *et al.* (2015)**: O maior aumento na viscosidade plástica (de 90%) foi observado na mistura composta por 36% de metacaulim e com uma relação a/lig de 0,5 – segundo os autores, isso ocorre devido à alta porosidade dessa adição, que pode absorver tanto a água, quanto o superplastificante; Já a substituição de 12% de cimento por sílica ativa, com uma relação a/lig de 0,44 resultou na maior redução (cerca de 2,3 vezes menos) na viscosidade plástica – explicada devido a esfericidade das partículas dessa adição mineral, que oferece um melhor empacotamento das partículas e resulta em menor tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, em menores valores de viscosidade plástica. Logo, o metacaulim possibilita melhores valores de trabalhabilidade se comparado com a sílica ativa.

Banfil (2011) em seu estudo sobre os efeitos dos redutores de água na reologia do concreto concluiu que o efeito resultante de uma mudança de uso de aditivo químico combinado com a redução da água da mistura é a soma vetorial dos dois efeitos quando plotados em um gráfico

de tensão de escoamento *versus* viscosidade plástica. Além disso, seu estudo confirma que o controle de um fluxo aproximadamente constante do concreto fresco resulta em uma tensão de escoamento constante.

Nos estudos do artigo de **Burgos-Montes *et al.*, (2012)** mostrou que o comportamento reológico das misturas de cimento depende das características físicas e químicas da adição mineral utilizada e, por cima disso, essas características sofrem modificações e são afetadas pela presença de superplastificantes. A redução mais drástica da tensão de escoamento foi obtida ao se utilizar superplastificante com base de policarboxilato. Além disso, devido a alta superfície específica da sílica ativa, a mesma exigiu doses maiores de aditivos químicos nas misturas para que houvesse melhoria no seu comportamento reológico.

Por meio do trabalho de **Burgos-Montes *et al.* (2013)** é comprovado que ao se utilizar até 30% de cinzas volantes em substituição parcial ao cimento, a relação a/lig teve uma redução em misturas com superplastificantes, sendo mais eficaz do que o fíler calcário – devido à morfologia das partículas da adição, que reduz o atrito das partículas dos componentes, aumentando a fluidez da pasta. Uma das considerações finais é que foi estabelecido que para se ter uma trabalhabilidade adequada é necessário uma viscosidade de 1,5 Pa.s e para isso, utilizar 30% de cinza volante e 50% de fíler calcário.

Ferraris *et al.* (2001) concluiu que a substituição do cimento por sílica ativa resultou em um aumento da demanda de água e de aditivo para manter as propriedades reológicas pré-estabelecidas. Além disso, determinou que utilizar as propriedades reológicas para selecionar a dosagem e o tipo de adição mineral é uma abordagem promissora, desde que seja utilizado um reômetro para a medição da viscosidade e das tensões. Ensaio menos sofisticados, como o *minislump* e o cone Marsh, não são confiáveis. Os resultados do ensaio de *minislump* correlacionam-se em certos casos com a tensão de escoamento, mas há uma grande dispersão dos dados. No entanto, não foi observada correlação entre o tempo de fluxo no cone Marshal e os dados de viscosidade plástica.

Fares *et al.* (2022) em seu artigo que trata sobre o modo de adição e o efeito de superplastificantes de policarboxilato na reologia de pastas de cimento determinou que para cada relação água/ligante, existe uma dosagem crítica de aditivo na qual a mistura se segrega – e que uma dosagem específica de um aditivo modificador de viscosidade é necessária para minimizar essa segregação.

No estudo de **Hanehara e Yamada (1999)** as propriedades reológicas e a resistência do concreto são propriedades essenciais exigidas para determinar boa qualidade do concreto. Cimento e aditivos são capazes de causar variações acentuadas na fluidez e produzir rigidez, dependendo das combinações entre si. Os autores ainda ressaltam que, quando novos aditivos são desenvolvidos, um problema de interação das suas partículas com as misturas de cimento deve ser antecipados e estudados.

No trabalho de **Liu et al. (2017)** a adição de aditivo aumentou a densidade de empacotamento e a espessura do filme de água de pastas com a/lig de 0,32 e 0,24. No entanto, o aumento da dosagem de superplastificante teve pouco efeito sobre a densidade de empacotamento e a espessura do filme de água de pastas com um a/lig muito baixo, como 0,16 – devido aos pequenos espaços entre as partículas de ligante e a alta concentração de aditivo não adsorvido na solução intersticial (proporcionando o aumento da viscosidade das pastas).

Dentre os três agentes superplastificantes investigados no trabalho de **Papo; Piani (2004)**, aquele à base de resina poliacrílica modificada se apresenta como o mais eficaz para ser utilizado nas pastas de cimento Portland empregadas, na medida em que promove os menores valores de viscosidade dentro da concentração do dispersante testada. Além disso, os resultados reológicos indicam que este possui uma dosagem ótima que está em perfeita concordância com a sugerida pelo fabricante.

O efeito do superplastificante, segundo **Park et al. (2005)** está explicado no fato de que as moléculas negativas de aditivo químico estariam em torno das partículas positivas de cimento e seriam absorvidas pelas partículas de cimento, resultando na repulsão eletrostática entre as partículas de cimento. Como resultado, essa repulsão induz uma força de dispersão entre as partículas de cimento e aumenta a fluidez.

Park et al. (2005) estudou também o comportamento de três adições diferentes, onde o uso de escória granulada de alto forno e o fíler calcário trazem resultados parecidos – à medida em que se aumenta o percentual do seu uso, existe a tendência de diminuir as tensões de escoamento e os valores de viscosidade plástica, determinando que a escória traz bons resultados de fluidez até o limite de uso de 30%. Já na substituição de cimento Portland por sílica ativa trazem um aumento drástico na tensão de escoamento e na viscosidade plástica à medida em que o percentual dessa adição aumentava – uma vez que as partículas de sílica são altamente reativas e adsorvem facilmente as moléculas de aditivos químicos.

No artigo de **Puertas *et al* (2005)** a partir dos resultados dos estudos reológicos, pôde-se concluir que a baixa dosagem de superplastificantes leva a uma redução substancial (mais de 70%) na tensão de escoamento.

Segundo trabalho de **Santos *et al.* (2017)** aumentar o teor de metacaulim aumentará consideravelmente a tensão de escoamento das pastas e o valor G' . Por exemplo, a tensão de escoamento é de aproximadamente 1 Pa para pastas com 10% de fíler calcário e de referência. À medida que o metacaulim é adicionado à amostra, o limite de elasticidade aparente mostra valores de 3 Pa para a amostra contendo 5% de metacaulim e valores entre 20 e 30 Pa para a amostra contendo 10% de fíler. Por outro lado, o uso de fíler calcário (pelo menos até 10%) não altera a tensão de escoamento consideravelmente quando comparado à referência. Além disso, teores de metacaulim acima de 3,3% levam a um aumento da viscosidade em toda a faixa de frequência analisada e as pastas exibem um comportamento pseudoplástico. Por outro lado, o fíler de calcário não causou alteração na viscosidade.

Assim, esses autores concluem que o metacaulim aumenta a plasticidade e a tixotropia da pasta de cimento, ou seja, melhora a trabalhabilidade da pasta para teores de metacaulim de 5 a 8%, mas torna a trabalhabilidade muito mais difícil para teores acima de 10%, sendo que atua como aditivo tixotrópico e modificador da viscosidade da pasta de cimento, o que não acontece no caso do fíler calcário. O uso de 20% ou mais de metacaulim trazem uma plasticidade tão grande, que sua trabalhabilidade é ruim e é impossível medir as propriedades da pasta no reômetro.

Nos ensaios realizados por **Senff *et al.* (2009)**, amostras com 1% de nanossílica e 0 a 0,2% de superplastificante testadas após a mistura mecânica, apresentaram um valor máximo de tensão de cisalhamento, que foi 50% maior do que o alcançado com o uso de sílica ativa, enquanto as amostras com o uso de 0,4% de superplastificante atingiram valores quase duas vezes maiores do que as que utilizaram sílica ativa. Para a viscosidade plástica, o uso de superplastificante diminuiu seus valores enquanto que o uso de sílica ativa e nanossílica aumentou.

Quando o aditivo é adicionado, ele é adsorvido na superfície das adições minerais, modificando sua interação com as outras partículas na mistura, melhorando a homogeneidade e trazendo maior efeito do empacotamento das partículas. Em geral, os resultados mostraram que o superplastificante atuou com mais intensidade na tensão de escoamento do que a viscosidade plástica. Também foi feita análise da tixotropia, que está relacionada à quebra da

formação da estrutura sob aplicação de cisalhamento – significativamente modificada quando o aditivo e as adições minerais foram acrescentados às misturas.

Shanahan et al. (2016) notou que o aumento adicional no teor de cinzas volantes de até 30% não teve efeito na tensão de escoamento, enquanto a viscosidade plástica voltou ao valor da pasta de referência. A adição de aditivos químicos reduziu significativamente tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade – diminuindo ainda mais com a cinza volante, resultados semelhantes foram notados com o uso da escória granulada de alto forno. Quanto ao metacaulim e a sílica ativa, os resultados se demonstram iguais aos outros já citados.

No estudo de **Vikan et al. (2007)** a influência da substituição de cimento por sílica ativa na resistência ao fluxo depende do tipo de plastificante: a resistência ao fluxo aumentou com o aumento da substituição da adição mineral quando o superplastificante à base de naftaleno sulfonato foi adicionado como um plastificante e diminuiu quando o superplastificante à base de poliacrilato enxertado com poliéster foi adicionado.

Além dessas análises mais específicas de cada artigo, para verificar os teores ideais de adições minerais de acordo com os resultados das propriedades reológicas dos materiais cimentícios foi elaborado uma tabela (Tabela xx), sendo que para a sua construção foram contabilizadas as porcentagens de material utilizados em cada uma das publicações analisadas – lembrando que apesar de definir faixas de percentuais ótimos, pode haver variação dos teores a depender do tipo de cimento, relação a/lig, aditivo químico, tipo de reômetro utilizados, entre outros fatores.

Tabela XX - Faixa de porcentagens de adições utilizadas nos estudos

ADIÇÕES MINERAIS	PORCENTAGENS UTILIZADAS NOS ARTIGOS
Cinza Volante	10% - 50%
Escória Granulada De Alto Forno	20% - 60%
Sílica Ativa	2% - 25%
Metacaulim	3% - 35%
Nanossílica	1% - 5%
Fíler Calcário	5% - 60%

Em alguns dos artigos em que foram feitas análises tanto das adições quanto dos aditivos, observou-se que, além do cimento, as adições minerais também absorviam parte do aditivo (ALONSO *et al.*, 2013; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; BURGOS-MONTES *et al.*, 2012; HANEHARA; YAMADA, 1999; KHAN *et al.*, 2016; MA; WANG, 2013; SHANAHAN *et al.*, 2013; ZAPATA *et al.*, 2013). As adições minerais também demonstraram a tendência de

aumentar os valores das propriedades reológicas, principalmente a sílica ativa (AGOSTINHO *et al.*, 2021; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; CHALAH *et al.*, 2022; FERRARIS *et al.*, 2001; KHAN *et al.*, 2016; KOUTNÝ *et al.*, 2018; KUCHARSKA; MOCZKO, 1994; LU *et al.*, 2015; PARK *et al.*, 2015; SALEM, 2002; SHANAHAN *et al.*, 2013; WU *et al.*, 2013).

Por fim, o uso de aditivos químicos tem grande influência nas propriedades reológicas, ainda que em pequenas quantidades, em conjunto com a relação a/lig utilizada sendo que, na maioria dos artigos foi utilizado um superplastificante com base éter policarboxilato devido seu grande efeito nas misturas cimentícias (AGOSTINHO *et al.*, 2021; AHARI *et al.*, 2015; BANFILL, 2011; CHALAH *et al.*, 2022; FARES *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2018; KONG *et al.*, 2018; MEHDIPOUR *et al.*, 2017; PUERTAS *et al.*, 2005; SANTOS *et al.*, 2017). A faixa de utilização dos aditivos, além de variar bastante, é bem discrepante entre os mais variados tipos de aditivos, dependendo ainda da sua compatibilidade com o cimento e também com a relação a/lig utilizada.

Outros tipos de informações também foram analisados, como as normas ou procedimentos utilizados para a realização dos ensaios. Entretanto, não há uma norma específica para ensaios reológicos e somente alguns procedimentos com algumas instruções técnicas, como citado na literatura. O único artigo que realmente utilizou uma norma reguladora para ensaios reológicos foi Santos *et al.* (2017), com a norma C1749-12: “*Standard guide for measurement of the rheological properties of hydraulic cementitious paste using a rotational rheometer*” (ASTM, 2017).

Um ponto importante a ser enfatizado, uma vez que não se tem normas específicas para ensaios reológicos, mas apenas instruções técnicas, é que o comportamento reológico dos materiais é sempre tratado por meio de gráficos e, a forma de análise mais comum é por meio do estudo das suas curvas sendo que, em alguns casos, pode ser feita a análise dos valores em si e comparados com estudos já consagrados.

Com isso, é essencial entender que para novos estudos de dosagens de concretos para situações práticas, é necessário um estudo dos materiais a serem utilizados e a compatibilidade entre eles – sabendo-se que os ensaios reológicos podem ser grandes auxiliares nesse processo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da Revisão Sistemática de Literatura delineada, pode-se concluir que:

A partir da Revisão Sistemática de Literatura delineada, pode-se concluir que:

- Adições minerais com alta pozolanicidade fazem com que as propriedades reológicas (viscosidade e tensão de escoamento) sejam afetadas significativamente;
- Adições minerais como cinza volante e metacaulim afetam as propriedades reológicas em menor escala, caso sejam utilizados em menores quantidades;
- A sílica ativa e a nanossílica tendem a diminuir as propriedades reológicas dos materiais cimentícios e devem ser utilizadas em combinação com aditivos químicos;
- O uso de sílica ativa não deve ultrapassar o intervalo de 10% a 12% - considerado a sua faixa de teor ótimo e que traz melhores resultados nos estados fresco e endurecido;
- Algumas pesquisas fazem ensaios de resistência à compressão, e uma quantidade menor ainda, fazem alguns ensaios visando determinar parâmetros de durabilidade, porém eles não fazem relações diretas com os efeitos reológicos;
- Geralmente, nos estudos analisados, as porcentagens ideais utilizadas para trazer as melhores propriedades reológicas não são as melhores escolhas para os resultados de resistência a compressão – deve ser feito um estudo mais aprofundado para encontrar um equilíbrio, uma vez que é necessário um bom desempenho tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto.
- De forma geral, as adições minerais e os aditivos químicos performam de maneira positiva nos materiais cimentícios, proporcionando boas características reológicas e um bom desempenho, evitando a segregação e a exsudação das misturas;
- É importante inserir em estudos de dosagens ensaios reológicos para definir os teores ideais de materiais a serem utilizados.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, L. B. PEREIRA, A. C. SILVA, E. F. TOLEDO FILHO, R. D. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanossílica. **Journal of Building Engineering**. v. 34, fev. 2021.

AHARI, R. S. ERDEM, T. K. RAMYAR, K. Thixotropy and structural breakdown properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, 2015.

ALONSO, M. M. PALACIOS, M. PUERTAS, F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. **Cement and Concrete composites**. v. 35, p. 151-162, 2013.

BANFILL, P.F.G. Rheology of fresh cement and concrete. Rheology Reviews. Pp 61-130. **The British Society of Rheology**. 2006.

BANFILL, P. F. G. Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 2955-2960, 2011.

BURGOS-MONTES, O. PALACIOS, M. RIVILLA, P. PUERTAS, F. Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions. **Construction and Building Materials**. v. 31, p. 300-309, 2012.

BURGOS-MONTES, O. ALONSO, M. M. PUERTAS, F. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticizers. **Construction and Building Materials**. v. 48, p. 417-423. ago. 2013.

CHALAH, K. MAHDAD, M. BENMOUNAH, A. KHERIBET, R. AKOUCHE, A. Effect of silica fume on cement rheology properties in presence of superplasticizers. **Materials Today: Proceedings**. v. 58, p. 1246-1250, fev. 2022.

DOAN, D. T. GHAFFARIANHOSEINI, A. NAISMITH, N. ZHANG, T. GHAFFARIANHOSEINI, A. TOOKEY, J. A critical comparison of green building rating systems. **Building and Environment**. V. 123, p. 243-260, 2017.

DONGMIN, W. ZHIHUA, L. WEIFENG, X. Research on the effect of polycarboxylate superplasticizers on rheology properties of compound cementitious system. **Key Engineering Materials**. v. 477, p. 151-156. 2011.

DRESCH, A. LACERDA, D. P. ANTUNES, J. A. V. J. Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: **Bookman**, 2015. 173p

FARES, G. AL-NEGHEIMISH, A. ALHOZAIMY, A. M. KHAN, M. I. Polycarboxylate superplasticizer and viscosity modifying agent: Mode of addition and its effect on cement paste rheology using image analysis. **Journal of building Engineering**. v. 48. 2022.

FERRARIS, C.F., OBLA, K.H., HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

GÜNEYISI, E. GESOGLU, M. AL-GOODY, A. IPEK, S. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 95:29-44, 2015.

HANEHARA, S. YAMANA, K. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behavior of admixture, and paste rheology. **Cement and Concrete Research**. v. 29, p. 1159-1165. 1999.

HUANG, F. LI, H. YI, Z. WANG, Z. XIE, Y. The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent. **Construction and Building Materials**. v. 166, p. 833-838, mar. 2018.

KHAN, M. I. MOURAD, S. M. CHARIF, A. Utilization of Supplementary Cementitious Materials in HPC: From Rheology to Pore Structure. **KSCE Journal of Civil Engineering**. p. 1-11, 2016.

KONG, X., ZHANG, Y., HOU, S. Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers. **Rheologica Acta**, v. 52, n. 7, p. 707-718, 2013.

KOUTNÝ, O. SNOECK, D. VURST, F. V. D. BELIE, N. Rheological behavior of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. **Cement and Concrete Composites**. v. 88, p. 29-40, abr. 2018.

KUCHARSKA, L. MOCZKO, M. Influence of silica fume on the rheological properties of the matrices of high-performance concretes. **Advances in Cement Research**, 6, 24:139-145, 1994.

LING, G. SHUI, Z. SUN, T. GAO, X. WANG, Y. SUN, Y. WANG, G. LI, Z. Rheological behavior and microstructure characteristics of SCC incorporating metakaolin and silica fume. **Materials**, v. 11, n. 12, 2018.

LIU, J. WANG, K. ZHANG, Q. HAN, F. SHA, J. LIU, J. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio. **Construction and Building Materials**. v. 149, p. 359-366, set. 2017.

MA, B. WANG, H. Rheological Properties of Self-compacting Concrete Paste Containing Chemical Admixtures. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**. abr. 2013.

MARDANI-AGHABAGLOU, A. TUYAN, M. YILMAZ, G. ARIÖZ, O. RAMYAR, K. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**. v. 47, p. 1020-1025, 2013.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 120–131, 2017.

MEHTA, P. K MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014. 751p.

NAVARRETE, I. KURAMA, Y. ESCALONA, N. BREVIS, W. LOPEZ, M. Effect of supplementary cementitious materials on viscosity of cement-based pastes. **Cement and concrete research**. v. 151. 2022.

NEVILLE, A. M. Tecnologia do Concreto. Porto Alegre: **Bookman**, 2016.

NG, S. JUSTNES, H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. **Cement and Concrete Composites**. 65:41-54, 2016.

OLENA, K.; YELENA, K.; MAKSIM, B. The impact of the COVID-19 pandemic on the creative industries: A literature review and future research agenda. **Journal of business research**. Khlystova, Olena Ano: 2021 v.:139 p.:1192 -1210.

PAPO, A. PIANI, L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, 34:2097-2101, 2004.

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, maio 2005.

PHAN, T. H. CHAOUICHE, M. MORANVILLE, M. Influence of organic admixtures on the rheological behavior of cement pastes. **Cement and Concrete Research**. v. 36, p. 1807-1813. 2006.

PUERTAS, F. SANTOS, H. PALACIOS, M. RAMÍREZ, S. M. Polycarboxylate superplasticizer admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. **Advances in Cement Research**, 17, 2:77-89, 2005.

RAHMAN, M. K. BALUCH, M. H. MALIK, M. A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**. v. 50, p. 710-717. 2014.

ROJO-LÓPEZ, G. GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. MARTÍNEZ-ABELLA, F. GONZÁLEZ-TABOADA, I. Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. **Case Studies in Construction Materials**. v. 17, maio, 2022.

SALEM, T. M. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement–silica fume and calcium hydroxide–silica fume pastes. **Cement and Concrete Research**, 32:1473-1481, 2002.

SANTOS, F. N. SOUZA, S. R. G. BOMBARD, A. J. F. VIEIRA, S. V. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments. **Construction and Building Materials**. v. 143, p. 92-103, jul. 2017.

SEFFF, L. **Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento**. 2009. 194p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SHANAHAN, N. TRAN, V. WILLIAMS, A. ZAYED, A. Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture. **Construction and Building Materials**. v. 123, p. 745-753, jul. 2016.

SPIRATOS, N. PAGÉ, M. MAILVAGANAM, N.P. MALHOTRA, V.M. JOLICOEUR, C. Superplasticizers for concrete fundamentals, technology and practice. **Handy Chemicals**, Canada; 2006.

TATTERSALL, G.H. BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh concrete. **Great Britain: Pitman Books Limited**, 1983. 475p.

TURKMENOGLU, H. N. BOYACI, B. BARAN, S. BICAKCI, S. N. ATAHAN, H. N. Micro and/or Nano-Silica modified moderate and high strength concrete: Rheology and synergistic effects on strength, elastic & inelastic behavior and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 333, 2022.

VIKAN, H. JUSTNES, H. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1512-1517, 2007.

YAN, H. XING. Z. YANING, K. XIAOFU, W. LIANGLIANG, S. HAOREN, W. Influence of Polycarboxylate Superplasticizer on Rheological Behavior in Cement Paste. **Wuhan University of Technology and Springer**, 2018.

ZAPATA, L. E. Rheological performance and compressive strength of superplasticizer cementitious mixtures with micro/nano-SiO₂ additions. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 708–716, 2013.

ZHANG, C. KONG, X. YIN, J. FU, X. Toward the viscosity reducing of cement paste: Optimization of the molecular weight of polycarboxylate superplasticizers. **Cement and Concrete Research**, v. 144, jun. 2020.

ZHANG, Z. HAN, F. PU, S. ZHOU, H. Effect of water to binder ratio, polycarboxylate superplasticizer and metakaolin dosages on rheological and viscoelastic properties of fresh metakaolin-air lime pastes. *Journal of Building Engineering*, 51, 1:104313. 2022.

APÊNDICE C

Nesse apêndice está contido o protocolo de ensaio descrito no tópico 4.4 do Capítulo 4, com todos as suas subdivisões.

DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE ADITIVO QUÍMICO E ADIÇÃO MINERAL NA COMPOSIÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO POR MEIO DE ENSAIOS REOLÓGICOS PARA A OTIMIZAÇÃO NA DOSAGEM DE CONCRETOS

1. OBJETIVO

Esta instrução de ensaio (IE) de caracterização reológica prescreve o método para determinação dos tipos e teores de aditivo e dos tipos e teores de adição mineral para estimar uma composição com melhores características para concretos a partir de experimentos realizados em reômetros de pasta.

Este método é aplicável a qualquer tipo de cimento, aditivo químico ou adição mineral utilizados para pastas de cimento.

2. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- Instruções Técnicas do Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas.

3. DEFINIÇÕES

Amostra: parte representativa da pasta de cimento a ser analisada, que deve ser feita instantes antes do ensaio;

Ensaio de Fluxo: ensaio reológico que fornece valores de tensão de cisalhamento e viscosidade.

Ensaio Oscilatório: também conhecido como ensaio de varredura de deformação, fornece uma curva que demonstra o comportamento elástico e viscoso da amostra cimentícia durante o incremento da frequência de deformação.

Gap: distância entre a base e a geometria do reômetro

Módulo Elástico (G’): propriedade que determina a cinética de hidratação/tempo da pega da pasta de cimento

Reologia: compreende o estudo de deformação e fluxo de materiais quando submetidos a uma solitação externa. Estuda a relação entre o esforço aplicado a um material capaz de fluir e a deformação resultante

Taxa de Cisalhamento: é a taxa no tempo em que se processa a deformação de cisalhamento. Unidade no SI: s⁻¹.

Tensão de Cisalhamento: é a componente da tensão que é coplanar com a superfície considerada. Fluidos se deformam por cisalhamento. A tensão de cisalhamento, portanto, é a componente da tensão externa aplicada que provoca e mantém certa taxa de deformação. De forma simplificada, relaciona-se com o esforço para manter o fluido em fluxo. Unidade no SI: Pa.

Tensão de Escoamento: é a tensão de cisalhamento mínima necessária para iniciar o escoamento.

Viscosidade: é uma das principais propriedades reológicas de um fluido e indica a facilidade deste escoar continuamente sob ação de uma tensão de cisalhamento externa. Unidade no SI: Pa.s

4. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Equipamentos e Materiais

- Balança com resolução de $\pm 0,01$ g
- Balança de precisão com resolução de $\pm 0,0001$ g
- Béquer de plástico;
- Espátula;
- Misturador mecânico com velocidade de rotação de até 2500 rpm;
- Reômetro de pasta de cimento com geometria de placas paralelas

5. RESPONSÁVEIS PELO ENSAIO

O ensaio pode ser realizado pelos técnicos e alunos do PPG-GECON sob acompanhamento e após treinamento geral do LABITECC com noções administrativas, de segurança, de incêndio e do Sistema de Gestão da Qualidade – SGQ do LABITECC ou pelos técnicos no Laboratório de Furnas, após assinatura de termo de confidencialidade e imparcialidade de pesquisas e do termo de compromisso e responsabilidade do uso do laboratório.

6. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Antes do preparo das pastas, os materiais utilizados foram armazenados em sala com temperatura controlada de 23°C.

Para a primeira parte dos ensaios, realizados com os aditivos, o procedimento de mistura consiste em colocar água deionizada e aditivo, previamente misturados, ao recipiente com cimento. Para a segunda parte dos ensaios utilizando a adição, o procedimento de mistura se diferencia pelo fato de introduzir a quantidade de adição escolhida com o cimento e fazer uma “pré-mistura” dos materiais secos e em seguida misturá-los com a água e aditivo.

O material seco deve ser pesado sempre antes de todos os ensaios – enquanto se calibra o reômetro, e armazenado em uma espécie de câmara para evitar a hidratação dos mesmos. Já os materiais líquidos devem ser pesados à medida em que o ensaio é realizado para evitar a evaporação da água.

Dessa forma, primeiramente deve ser realizada uma mistura manual desses materiais com o auxílio de uma espátula durante um minuto, seguida por uma mistura mecânica, utilizando um misturador mecânico, durante três minutos com rotação aproximada de 2500 rpm. Para cada mistura deve ser preparada aproximadamente 120 mililitros de pasta. Com os ensaios realizados somente com os aditivos, a quantidade de cimento deve ser sempre de 100 g, entretanto ao se utilizar as adições, se faz o desconto na quantidade de cimento a depender da quantidade de adição mineral.

7. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

7.1 Inserção da amostra no equipamento para ensaio de Fluxo

Após a preparação da pasta de cimento descrita no tópico anterior, cerca de 2 mililitros de amostra devem ser colocados no reômetro (Figura 1). Nesta ocasião, são realizados os primeiros ajustes do *gap* das placas paralelas (Figura 2) até a distância de 1 mm da amostra,

provocando seu esmagamento (Figura 3).

Uma importante observação é sobre a limpeza do material excedente às placas, o qual deve ser efetuada uma primeira limpeza ao se obter um *gap* de 1,5 mm e uma segunda limpeza, de cunho mais fino, ao chegar ao *gap* de 1,0 mm. Com isso, dá-se início ao ensaio de fluxo da pasta com aproximadamente 10 minutos após o primeiro contato do cimento com os materiais líquidos. Na figura 4 é possível, por meio de um desenho esquemático, observar a representação do esmagamento da amostra pelo equipamento.

Figura 1 – Execução do ensaio de pasta no reômetro - amostra sendo colocada no reômetro



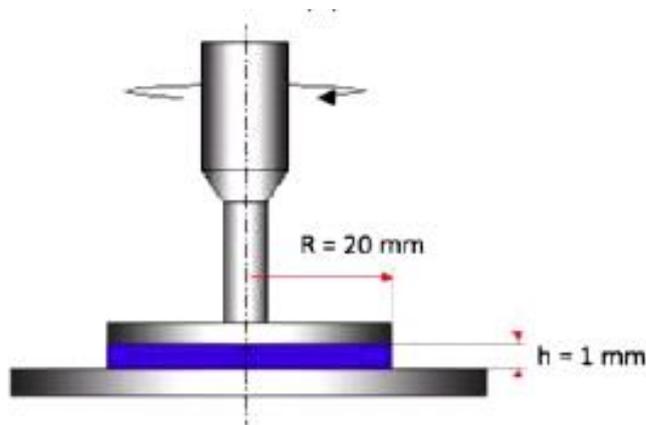
Figura 2 – Execução do ensaio de pasta no reômetro – ajustes do *gap*



Figura 3 – Execução do ensaio de pasta no reômetro – deformação da amostra com 1mm de *gap*



Figura 4 – Representação esquemática do “esmagamento” da amostra pelo reômetro utilizado com o raio da placa (R) e a distância entre as placas (h). Fonte: Adaptado de *TA Instruments* (2010).

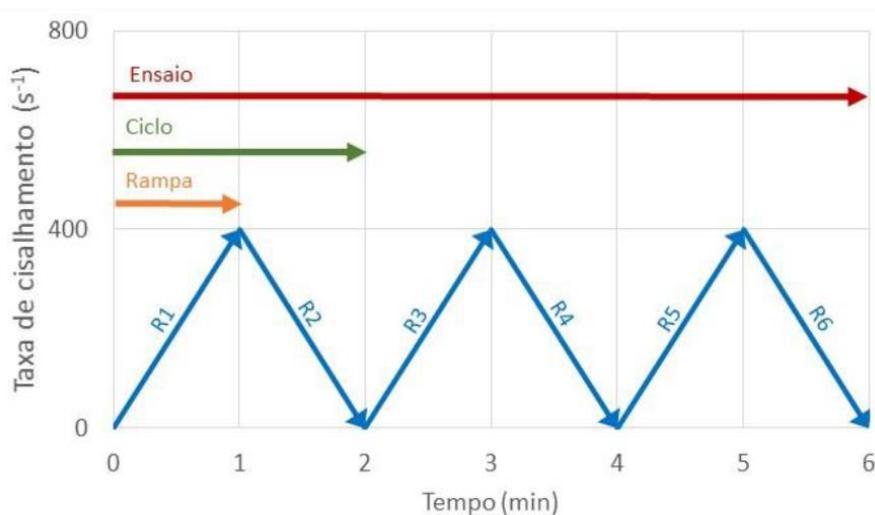


O ensaio de fluxo consiste na execução de três ciclos com duas rampas em cada ciclo: a primeira rampa com aceleração da taxa de cisalhamento (indo de zero a 400s^{-1}) e a segunda com desaceleração (caindo de 400 s^{-1} para zero). Em cada rampa são obtidos 30 pontos de tensão de cisalhamento e viscosidade. Os resultados obtidos com as duas primeiras rampas (primeiro ciclo) são descartados, uma vez que considera-se que a mistura ainda esta em processo de homogeneização e de aderência às placas do reômetro.

Dessa forma, a partir do segundo ciclo é possível utilizar os dados coletados de forma representativa nas propriedades reológicas e, o terceiro ciclo, representa uma validação dos dados obtidos no ciclo anterior. Obtém-se também o teor de saturação dos aditivos e observa-

se se houve ou não segregação da pasta. Os ensaios tem duração aproximada de 35 minutos, contando entre o início da mistura dos materiais até a limpeza dos equipamentos. Na Figura 5 tem-se uma representação esquemática de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo, demonstrando os ciclos e as rampas.

Figura 5 – Esquema de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo. Fonte: Agostinho (2017).



Com a realização dos ensaios de fluxo em pastas contendo somente aditivos, é possível a elaboração de curvas de teor de aditivo x viscosidade para a determinação dos teores ótimos.

7.2 Inserção da amostra no equipamento para ensaio Oscilatório

Como já visto anteriormente, é preparado aproximadamente 120ml de pasta de cimento para a realização do ensaio, a diferença se encontra na utilização de anéis de proteção no reômetro. Com o primeiro anel de proteção já posicionado cerca de 2 ml de amostra é colocada no reômetro (Figura 6a). Logo em seguida são realizados os primeiros ajustes do *gap* das placas paralelas até a distância de 1 mm da amostra, provocando seu esmagamento (Figura 6b). Da mesma forma que nos ensaios de fluxo, no ensaio oscilatório também é importante fazer a limpeza do excesso de material no equipamento.

Após a limpeza é feito o preenchimento da cavidade da geometria com água para evitar a secagem da amostra e gerando uma atmosfera protetora, uma vez que o ensaio tem duração de seis horas (Figura 6c). O segundo anel de proteção é colocado por cima da geometria (Figura 6d) e assim, dá-se início ao ensaio oscilatório da pasta, aproximadamente 10 minutos após o primeiro contato do cimento com os materiais líquidos. Na figura 7 é possível observar, por meio de um desenho esquemático, a representação do esmagamento da amostra pelo

equipamento e o posicionamento dos anéis de proteção.

Figura 6 – Execução do ensaio: (a) amostra sendo colocada no reômetro com o anel previamente posicionado; (b) esmagamento da amostra com 1 mm de *gap*; (c) inserção de água acima da geometria; (d) posicionamento do segundo anel de proteção

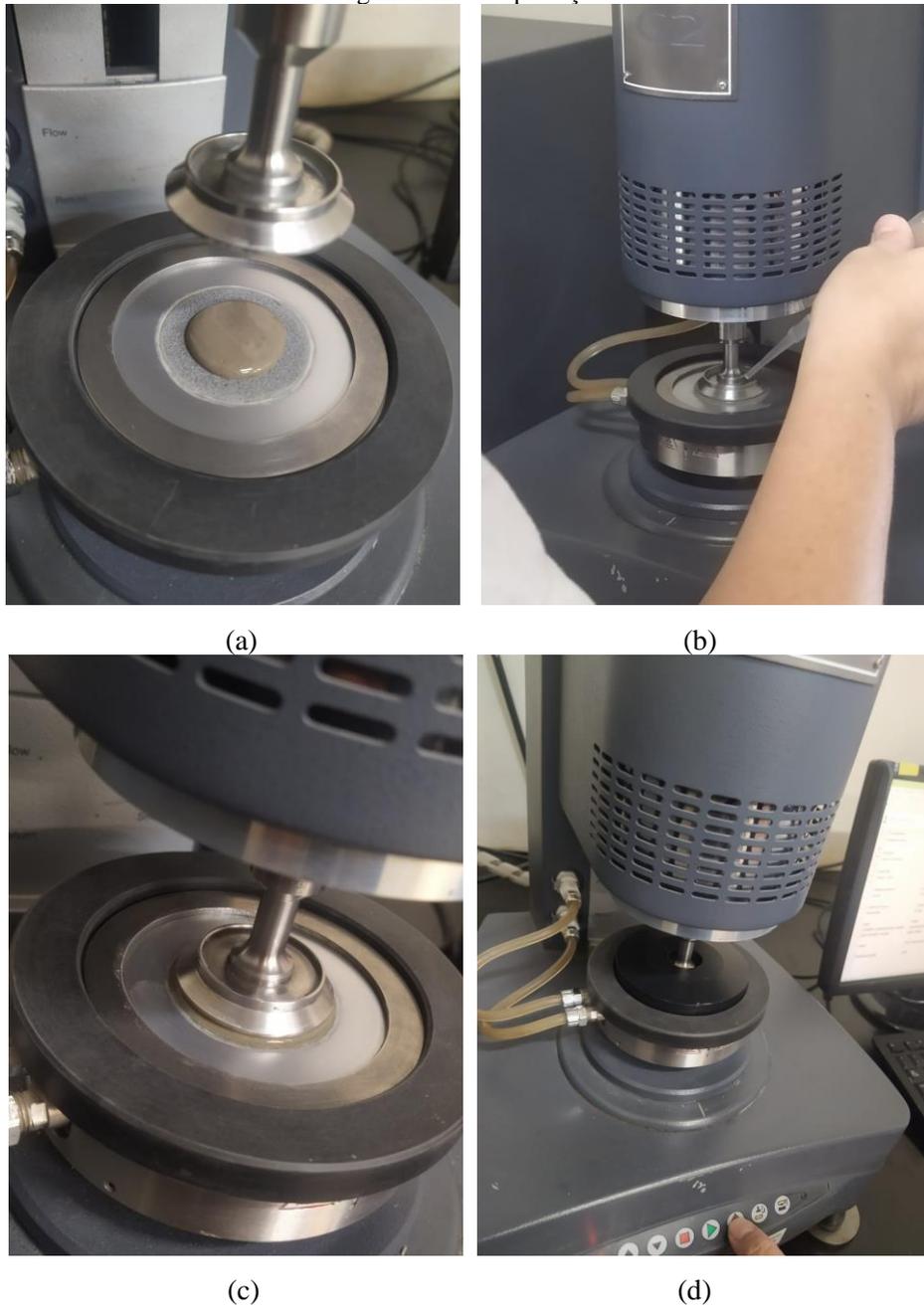
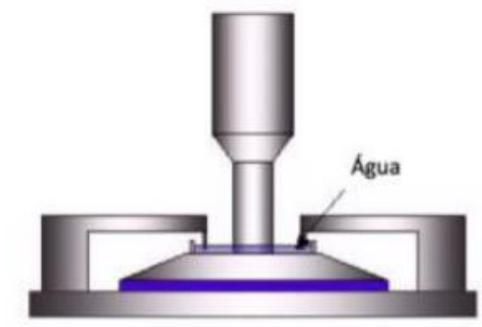


Figura 7 – Demonstração do esmagamento da amostra pelo equipamento com os anéis de proteção devidamente posicionados Fonte: Adaptado de *TA Instruments* (2010).



Dá-se início ao ensaio oscilatório, no qual a amostra sofrerá deformações durante um período de seis horas para que seja determinado o módulo elástico (G') e assim pode ser feito o estudo da cinética de hidratação das pastas de cimento – entendendo o seu comportamento durante o processo de formação dos compostos da pasta.

8. RESULTADOS

A seguir serão descritos os processos de leitura e tratamento dos dados extraídos do reômetro e a forma de produzir as curvas de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento/viscosidade, além de como definir as propriedades reológicas das pastas de cimento.

Para a obtenção de dados e controle dos parâmetros do ensaio, utiliza-se o programa computacional *Rheology Advantage Instrument Control AR* que dispõe de valores medidos de torque (Γ), velocidade angular (Ω), raio da geometria das placas (R) e o *gap* (h). Esses valores permitem o cálculo das propriedades reológicas que serão analisadas: taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), tensão de cisalhamento (σ) e viscosidade (η), dadas pelas seguintes equações:

$$\sigma = 2 \Gamma / \pi R^3 \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \Omega R / h \quad (2)$$

$$\eta = 2 \Gamma h / \Omega \pi R^4 \quad (3)$$

Para a interpretação e tratamento de dados do reômetro, é utilizado o software computacional *TRIOS* da *TA Instruments*. Ele fornece, ao final do ensaio, um arquivo contendo as seguintes informações: tensão de cisalhamento (Pa), taxa de cisalhamento (1/s), viscosidade (Pa.s),

tempo (s), temperatura (°C) e a tensão normal (Pa).

Com esses dados, extrai-se as três primeiras colunas para a produção das curvas de caracterização reológica, que determinam que tipo de fluido é a pasta de cimento, podendo se encaixar nas seguintes definições: pseudoplásticas ou dilatantes – sendo que a primeira é quando a viscosidade diminui ao longo do tempo e a segunda, ocorre o inverso.

Nesse contexto, nas figuras 8 e 9 encontra-se o perfil das curvas realizadas. Para definir a tensão de escoamento, deve-se pegar o valor da tensão de cisalhamento com a maior taxa de cisalhamento, indicando que nesse momento se tem o início do escoamento do fluido. Da mesma forma, é na mesma taxa de cisalhamento que se define a menor viscosidade alcançada pelo fluido. Como são definidas 4 rampas de resultados de tensão e viscosidade (duas de aceleração e duas de desaceleração), faz-se uma média dos valores da quarta e sexta rampa para definição das propriedades reológicas.

Figura 8 – Curva de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento.

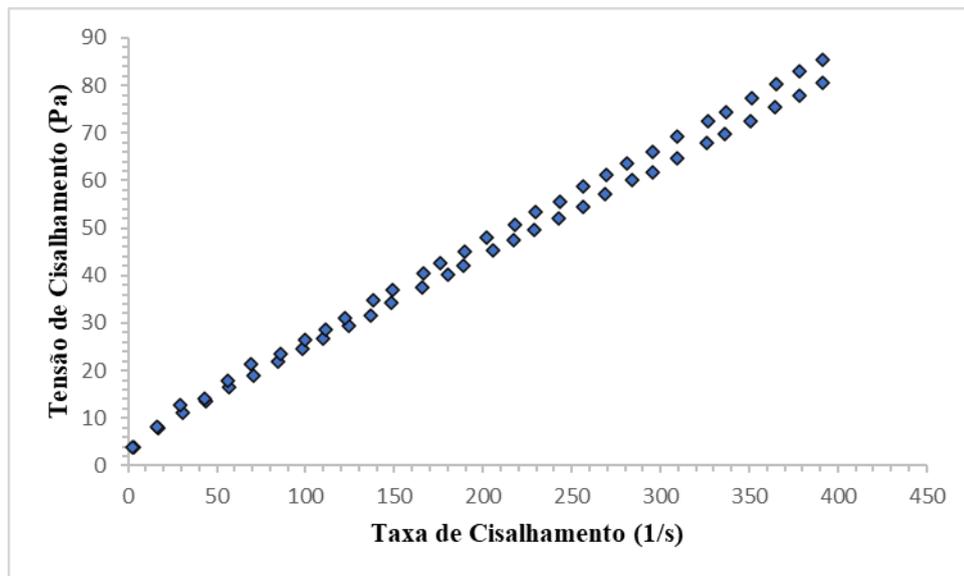
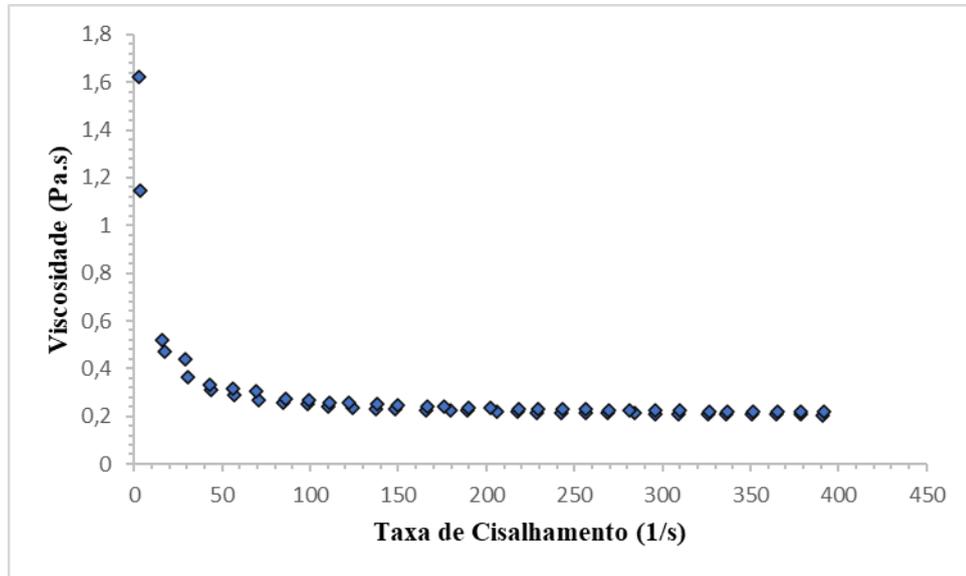
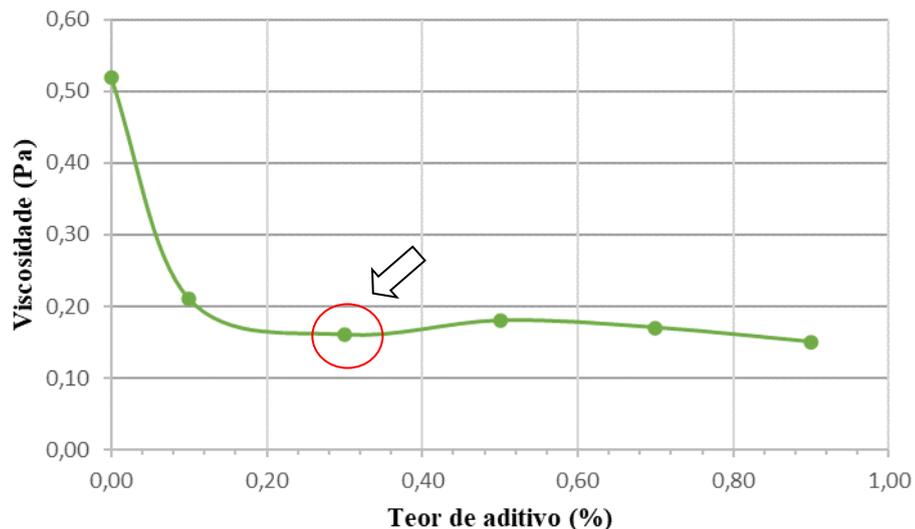


Figura 9 – Curva de taxa de cisalhamento x viscosidade.



Para construir a curva de teor de aditivo x viscosidade para obtenção do teor de saturação do aditivo estudado, faz-se as determinações das viscosidades como descrito acima para cada teor estudado, com um resultado de curva final como demonstrado na figura 10. O teor ótimo é aquele ponto em que a curva se estabiliza.

Figura 10 – Curva de taxa de cisalhamento x viscosidade para determinação do teor ótimo de aditivo.



O ensaio oscilatório, também conhecido como ensaio de varredura de tempo, fornece uma curva que demonstra o comportamento elástico e viscoso da amostra cimentícia durante o incremento da frequência de deformação que fornece um dado muito importante: o módulo

elástico (G') que determina a pega da pasta de cimento.

Dessa forma são elaborados gráficos das curvas de tempo x módulo elástico (G') para determinar o comportamento cinético das pastas, de acordo com a relação a/lig, o tipo e teor de aditivo. Esse comportamento determinará como a pasta se comporta ao longo do tempo, seu processo de consolidação, se a pasta perde ou não fluidez mais rapidamente e se essa e se isso é obtido com mais ou menos dispersão dos seus produtos. Nas figuras 11 e 12 a seguir é possível ver os diferentes comportamentos obtidos através dos estudos oscilatórios de pastas de cimento.

Figura 11 – Curva de tempo *versus* módulo viscoso que representa a cinética de hidratação da pasta de cimento com duração de seis horas e, em destaque, durante a primeira hora.

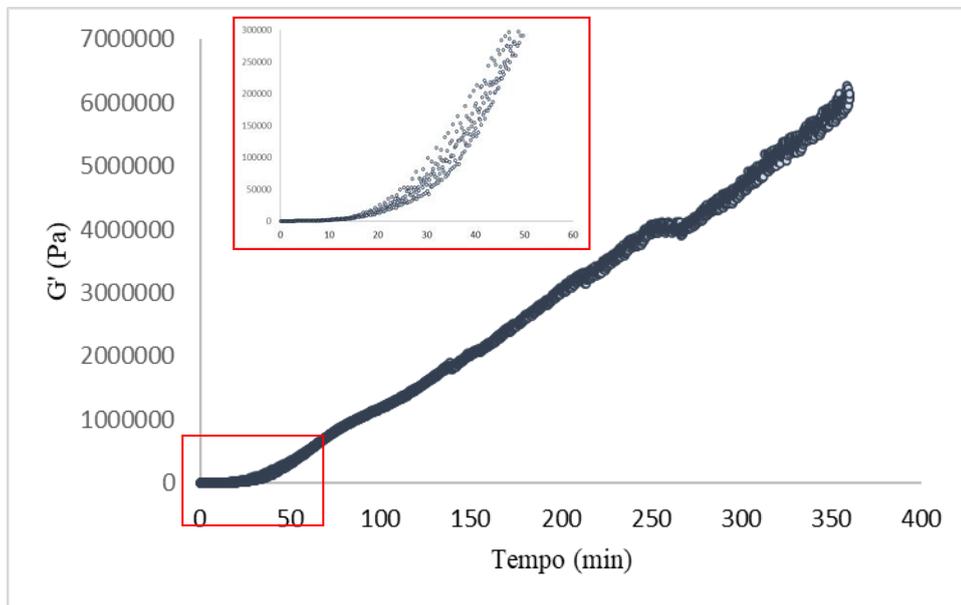
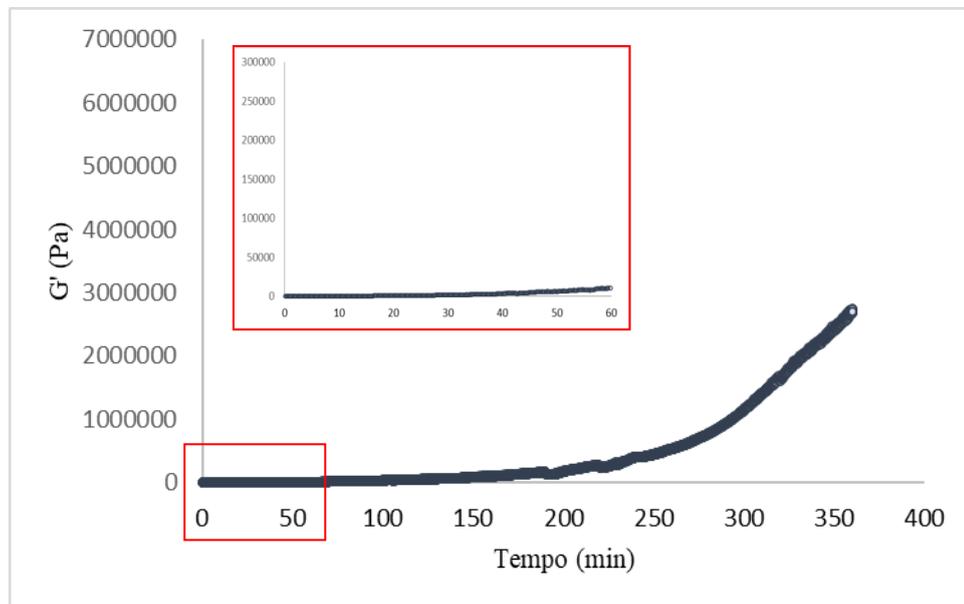


Figura 12 – Curva de tempo *versus* módulo viscoso que representa a cinética de hidratação da pasta de cimento com duração de seis horas e, em destaque, durante a primeira hora



Os resultados finais deste experimento são:

- Cuvas de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento;
- Curvas de taxa de cisalhamento x viscosidade;
- Valores de tensão de escoamento e viscosidade para caracterizar reologicamente as pastas de cimento;
- Curva de teor de aditivo x viscosidade que define o teor de saturação do aditivo estudado;
- Curvas de tempo x módulo elástico para determinação do comportamento cinético das pastas de cimento.

9. RELATÓRIO DE ENSAIO

No relatório de ensaio devem constar:

- título com nome do ensaio;
- finalidade do ensaio;
- nome e endereço do laboratório e do local onde os testes foram feitos, caso seja diferente da do laboratório;
- nome e informações do cliente;
- descrição das amostras com porcentagens e quantidades de materiais utilizadas;
- método de ensaio;
- data e horário de início e final da realização do ensaio;

- identificação da(s) pessoa(s) que realizou (realizaram) o ensaio;
- data da emissão do relatório e seu número de identificação;
- identificação da(s) pessoa(s) que autoriza(m) o relatório;
- condições de ensaio;
- resultados do teste, condições de ensaio e os resultados descritos anteriormente (incluindo os gráficos das curvas) e;
- fontes de incerteza.

APÊNDICE D

ARTIGO PUBLICADO:

OLIVEIRA, A. M.; SANTOS, J. R.; CASCUDO, O. . Estudo Reológico: Viscosidade Plástica e Tensão de Cisalhamento de Pastas de Cimento Analisando a Influência do Tipo e do Teor de Aditivos Químicos. In: 63º Congresso Brasileiro do Concreto - Jubileu de Ouro, 2022, Brasília/DF. **Anais do 63º Congresso Brasileiro do Concreto - Jubileu de Ouro**. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1. p. 1-18

Estudo Reológico: Viscosidade Plástica e Tensão de Cisalhamento de Pastas de Cimento Analisando a Influência do Tipo e do Teor de Aditivos Químicos

Rheological Study: Viscosity and Shear Stress of Cement Pastes Analyzing the Influence of Type and Content of Chemical Admixtures

Andrielli Moraes de Oliveira (1); Oswaldo Cascudo (1); Jéssica Rodrigues dos Santos (1)

(1) GEDur - Grupo de Estudo em Durabilidade, LABITECC - Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, EECA - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, PPG-GECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, UFG – Universidade Federal de Goiás. Avenida Universitária, n. 1488, Qd. 86, Lt. Área, Setor Universitário, Goiânia/GO, Brasil , 74605-220.

E-mail: andriellimorais@ufg.br, ocascudo@ufg.br e santos_rodrigues@discente.ufg.br

Resumo

É de conhecimento que a reologia do concreto é diretamente influenciada pelo comportamento reológico da pasta de cimento. Desta forma, estudos de reologia são relevantes por que podem possibilitar a otimização e a eficiência de dosagens e misturas, propiciando economia de insumos, aumento de produtividade e de tempo. Ao mesmo tempo, o uso de aditivos químicos pode diminuir a viscosidade das misturas e reduzir a demanda de água, o que é muito interessante do ponto de vista de durabilidade de materiais cimentícios. Assim, é objetivo do presente artigo, avaliar propriedades reológicas de pastas de cimento Portland, produzidas com CP-V ARI, em duas relações água/cimento (0,40 e 0,55), analisando-se a interveniência de aditivos químicos. A relação do tipo e do teor de aditivo químico acrescentado a pasta versus propriedades reológicas e custo/benefício foi analisada. Por fim, observou-se que à medida que se aumenta o teor de aditivo utilizado, se reduz a viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento. Esse percentual de redução se deu em escalas diferentes, mas ocorreu para as duas relações a/c estudadas e para os dois tipos de aditivos químicos avaliados. Assim, observou-se que o aditivo tipo RA 02 é mais vantajoso tecnicamente e financeiramente para a menor relação a/c (0,40). Para a maior relação a/c (0,55), o uso do aditivo RA 01 é mais interessante, considerando-se o teor ótimo obtido dos aditivos no presente estudo.

Palavras-Chave: Reologia, pasta de cimento; aditivo químico; reômetro.

Abstract

It is known that the rheology of concrete is directly influenced by the rheological behavior of cement paste. In this way, rheology studies are relevant because they can increase the optimization and the efficiency of mix proportions and mixtures, providing saving materials, more productivity and time. At the same time, the use of chemical admixtures can decrease the viscosity of the mixtures and reduce the water demand, which is very interesting from the point of view of durability of cementitious materials. Thus, the aim of this paper is to evaluate rheological properties of Portland cement pastes produced with CP-V ARI (Brazilian cement), in two water/binder ratios (0.40 and 0.55) and chemical admixtures. The relationship of the type and content of chemical admixtures added to the paste versus rheological properties and cost/benefit was analyzed. Finally, it was observed that with an increase of quantify of chemical admixtures used, the plastic viscosity and the shear stress were reduced. This percentage of reduction occurred on different scales, but it occurred for the two w/c ratios studied and for the two types of chemical admixtures evaluated. Besides that, it was observed that the chemical admixtures type RA 02 was more technically and financially advantageous for the lowest w/c ratio (0.40). For the highest w/c ratio (0.55), the use of the chemical admixtures RA 01 was more interesting, considering the optimal content of the chemical admixtures obtained of the present study.

Keywords: Rheology, cement paste; chemical admixture; rheometer.

1. INTRODUÇÃO

Propriedades de viscosidade plástica e tensão de escoamento são estudadas para obtenção do comportamento reológico de materiais cimentícios. Elas são obtidas a partir de ensaios realizados em viscosímetros ou reômetros (QUARCIONI, 2008).

Sabe-se que a reologia do concreto é diretamente influenciada pelo comportamento reológico da pasta de cimento (CYR, 1999) e/ou da argamassa (FRANÇA *et al.*, 2019) e que falhas no estado fresco destes materiais podem ocasionar defeitos e deficiências em propriedades no estado endurecido, como fissuras, retração, entre outros (ROJAS-RAMIREZ *et al.*, 2019). Nessa direção, França *et al.* (2019) avaliaram a qualidade do processo de mistura (tempo e taxa de adição de água) no comportamento reológico e em propriedades mecânicas de argamassas. Eles concluíram que tempos de mistura muito curtos ou carregamento de água muito lento nas argamassas estudadas conduziram a misturas mal preparadas e com reologia mais desfavorável e, como consequência, com efeitos muito negativos na resistência mecânica (FRANÇA *et al.*, 2019). Assim, estudos reológicos são importantes para aplicabilidade do concreto e para um produto final estrutural com durabilidade e desempenho (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NAZAR *et al.*, 2020).

Também é importante ressaltar que a pasta de cimento Portland fresca tem suas propriedades reológicas modificadas com o tempo (WALLEVIK, 2009) e que materiais com partículas finas tendem a formar aglomerações quando em contato com a água (; WALLEVIK, 2009). Dessa forma, matrizes cimentícias/suspensões podem ser mais estáveis com o acréscimo de aditivos químicos. Esses aditivos químicos atuam por interações físico-químicas, favorecendo a dispersão de partículas em meio aquoso (BANFILL, 2003).

Ao mesmo tempo, estudos recentes vêm avaliando a reologia de pastas e argamassas de cimento Portland, analisando-se o tipo de aditivo químico, a sua composição e base química e o seu teor na mistura para uma ótima reologia. Assim, bases químicas de éter de policarboxilato, melanina, naftaleno, naftaleno sulfonado, lignosulfonato, resina poli acrílica, resina melamínica, poli acrilato e poli acrílico vêm sendo pesquisados nas mais diversas dosagens (FERRARIS *et al.*, 2001; VIKAN;

JUSTNES, 2007; JANOTKA *et al.*, 2010; ALONSO *et al.*, 2013; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; GÜNEYISI *et al.*, 2015; NG; JUSTNES, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017; MSINJILI *et al.*, 2017; MOHAMMED *et al.*, 2020; AGOSTINHO *et al.*, 2021).

Paralelamente, a influência do tipo e do teor de adições minerais pozolânicas e não pozolânicas em propriedades reológicas de matrizes de cimento Portland vêm sendo estudadas (SENFF *et al.*, 2009; BURGOS-MONTES *et al.*, 2013; AHARI *et al.*, 2015; VARHEN *et al.*, 2017; KOUTNÝ *et al.*, 2018; ROJAS-RAMÍREZ *et al.*, 2019; AGOSTINHO *et al.*, 2021).

Assim, é objetivo do presente artigo avaliar propriedades reológicas de pastas de cimento Portland, produzidas com CP V ARI em duas relações água/cimento (0,40 e 0,55), analisando-se a interveniência do uso, do tipo e dos teores em suspensão de partículas de dois aditivos químicos de mesma base química (policarboxilato), determinando ainda o seu teor ótimo, por meio de ensaios de fluxo.

A relevância do artigo é que verificar a eficiência de aditivos, uma vez que misturas reológicas eficientes podem permitir economia de insumos, desenvolvimentos de matrizes cimentícias em concretos com melhor performance e de maior auto adensabilidade, além de ganhos sob o ponto de vista de produtividade, de mão de obra e de ganhos ambientais.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Foram empregadas pastas com aditivos químicos em duas relações água/cimento (a/c) 0,40 e 0,55, escolhidas baseadas em trabalhos desenvolvidos no *Grupo de Estudos em Durabilidade* (GEDur-UFG) e na literatura (OLIVEIRA, 2007; FERREIRA, 2013; MALAGONI, 2016; MACEDO, 2018; OLIVEIRA; CASCUDO, 2018; CASCUDO, 2018; LOPES *et al.* 2021; LOPES, 2022) entre os anos de 2003 a 2022. Além disso, considerou-se também a classe de agressividade ambiental III de agressividade forte, com risco de deteriorado grande e máxima relação água/cimento para concretos estruturais com armadura de 0,55 (ABNT NBR 6118, 2014).

Para tanto, foi utilizado cimento CP V-ARI RS⁴ (ABNT NBR 16698, 2018) por ter menor teor de adições minerais e dois tipos de aditivos químicos dispersantes à base de policarboxilatos, a saber: um RA 2 - redutor de água tipo 2⁵ (superplastificante) e um plastificante RA 1 - redutor de água tipo 1⁶ (plastificante) (ABNT NBR 11768-1, 2019a), designados no presente trabalho de A e B, respectivamente. Esses aditivos são muito utilizados na região de forma comercial em concreteiras. Foram realizados ensaios de caracterização física e química do cimento e dos aditivos empregados no presente estudo (Tabela 1 e Tabela 2).

Antes do preparo das pastas, os materiais utilizados foram armazenados em sala com temperatura controlada de 23°C e dosagens de referência-REF (sem aditivos

⁴ Cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) - CP V que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos na ABNT NBR 16698 (2018).

⁵ Aditivos redutores de água tipo 2 são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes, hiperplastificantes, entre outros (ABNT NBR 11768-1, 2019a).

⁶ Aditivos redutores de água tipo 1 são conhecidos comercialmente por aditivos plastificantes, polifuncionais, multifuncionais, entre outros (ABNT NBR 11768-1, 2019a).

químicos) foram inicialmente preparadas. A seguir, pastas com aditivo A nos teores de 0,3%, 0,5%, 0,7%, 0,9%, 1,2% e 1,5% em massa em relação a massa de cimento foram produzidas. A faixa recomendada pelo fabricante do aditivo A é de 0,3% a 1,5% em relação a massa de cimento. Para o aditivo B, os teores de 0,3%, 0,5%, 0,7% e 0,9% foram estudados. A faixa recomendada pelo fabricante é de 0,3% a 0,9%.

Tabela 1 – Caracterização física do cimento.

Propriedade	Unidade	Resultado	Limites NBR 16697 (2018)	ABNT
Massa Específica	(g/cm ³)	2,97	-	NBR 16605 (2017)
Finura por Meio do Peneirador Aerodinâmico	Retido # 75 mm (%)	0,60	≤ 6,0	NBR 12826 (2014)
Área Específica - (Blaine)	(cm ² /g)	5,83	-	NBR 16372 (2012)
Água de Consistência - Pasta	(%)	32	-	NBR 16606 (2018)
Determinação dos Tempos de Pega	Início (h:min)	1:30	≥ 1:00h	NBR 16607(2018)
	Fim (h:min)	2:50	≤ 10:00h	

Tabela 2 – Caracterização dos aditivos químicos (ABNT NBR 11768-3, 2019b).

Características	Aditivo A – Superplastificante- RA 2	Aditivo B – Plastificante – RA 1
Base química	Policarboxilato	Policarboxilato
Aspecto	Líquido viscoso	Líquido viscoso
Homogeneidade	Homogêneo	Homogêneo
Cor	Marrom claro - uniforme	Marrom escuro - uniforme
pH	3,94	8,16
Massa específica (g/cm ³)	1,07	1,08
Resíduos sólidos (%)	32,82	19,67

O procedimento de mistura, em resumo, consistiu em colocar água e aditivo, previamente misturados, ao recipiente com cimento. Assim, primeiramente, foi realizada uma mistura manual desses materiais com o auxílio de uma espátula durante um minuto, seguida por uma mistura mecânica, utilizando um misturador modelo IKA RW 20 digital (Figura 1a), durante três minutos com rotação aproximada de 2500 rpm (Figura 1b). Foi preparada aproximadamente 120 mililitros de pasta em cada mistura (utilizando sempre 100 gramas de cimento).

Para os ensaios reológicos, utilizou-se um reômetro do tipo rotacional modelo AR G2, fabricante TA Instruments, vinculado a um computador que emitiu resultados de taxa de cisalhamento de forma gráfica, simultaneamente ao ensaio (Figura 2).

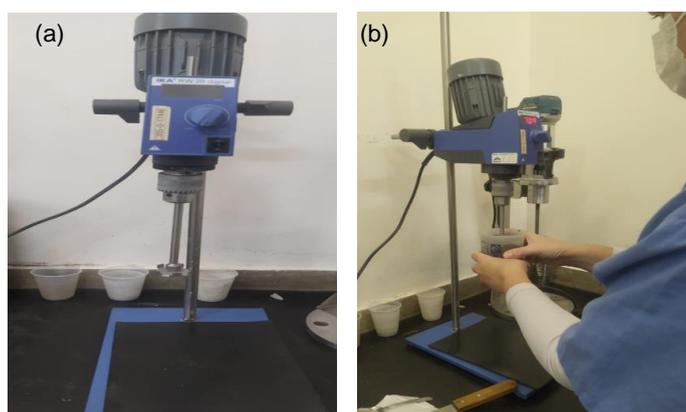


Figura 1 – Misturador utilizado no preparo das pastas modelo IKA RW 20: (a) parado e (b) durante rotação aproximada de 2500 rpm.

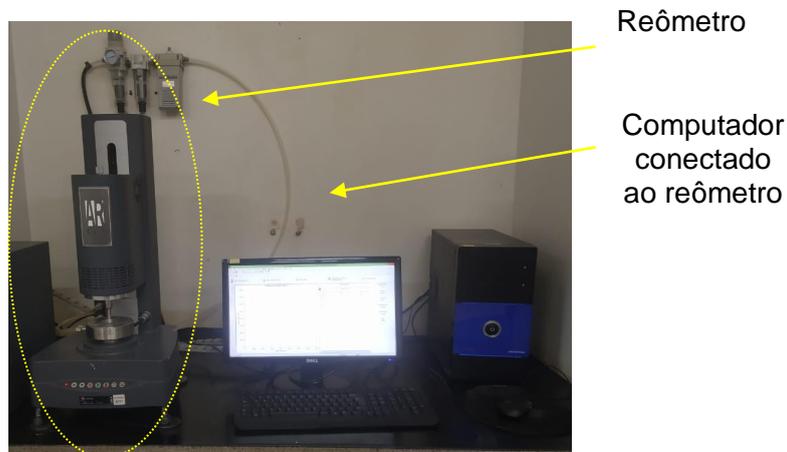


Figura 2 – Reômetro rotacional vinculado ao computador.

A geometria utilizada para os ensaios foi de placas paralelas (com um raio de 20 mm), sendo que a placa superior contém ranhuras na superfície e na placa inferior um adesivo texturizado, ambos para garantir o cisalhamento interno do material e, ao mesmo tempo, evitar o escorregamento das placas a amostra. A escolha por essa geometria foi a facilidade de limpeza e manuseio, emprego de pequena quantidade de material, o ajuste da distância entre as placas (*gap*) e o ganho de altas taxas de cisalhamento. A altura mínima do *gap*, de acordo com a sugestão do fabricante do equipamento, é de 1% do diâmetro da geometria. Para a obtenção de dados e controle dos parâmetros do ensaio, utilizou-se o programa computacional *Rheology Advantage Instrument Control AR* que dispõe de valores medidos de torque, velocidade angular, raio da geometria das placas e o *gap*, permitindo o cálculo das propriedades reológicas de tensão de cisalhamento e viscosidade.

Assim, após a preparação da pasta de cimento, cerca de 2 mililitros de amostra foram colocados no reômetro (Figura 3a). Nesta ocasião, foram realizados os primeiros ajustes do *gap* das placas paralelas (Figura 3b) até a distância de 1 mm da amostra, provocando seu esmagamento (Figura 3c). Uma importante observação é sobre a limpeza do material excedente às placas, o qual foi efetuada uma primeira limpeza ao se obter um *gap* de 1,5 mm e uma segunda limpeza, de cunho mais fino, ao chegar ao *gap* de 1,0 mm. Com isso, dá-se início ao ensaio de fluxo da pasta com aproximadamente 10 minutos após o primeiro contato do cimento com os materiais líquidos. Na figura 4 é possível, por meio de um desenho esquemático, observar a representação do esmagamento da amostra pelo equipamento.

Os ensaios reológicos são divididos em ensaios de fluxo e ensaios oscilatórios. Neste trabalho, a metodologia de ensaio seguiu instrução técnica de Furnas (FURNAS, 2020). Assim, apenas o ensaio de fluxo foi executado e consistiu na execução de três ciclos com duas rampas em cada ciclo: a primeira rampa com aceleração da taxa de cisalhamento (indo de zero a 400s^{-1}) e a segunda com desaceleração (caindo de 400s^{-1} para zero). Em cada rampa foram obtidos 30 pontos

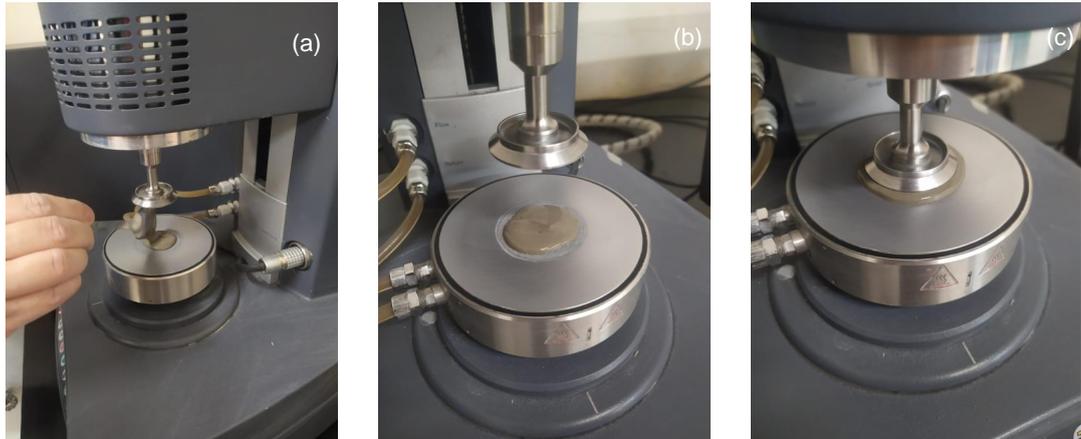


Figura 3 – Execução do ensaio de pasta no reômetro: (a) amostra sendo colocada no reômetro; (b) ajustes do *gap* e (c) deformação da amostra com 1 mm de *gap*.

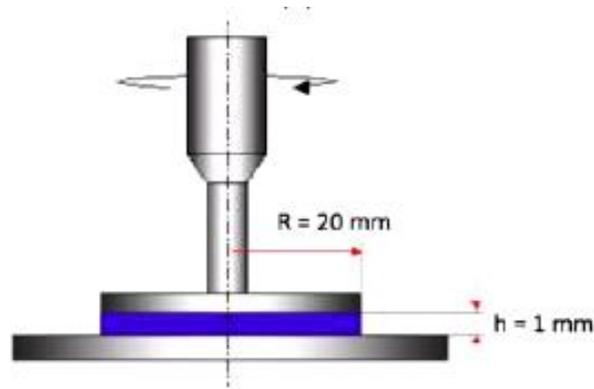


Figura 4 – Representação esquemática do “esmagamento” da amostra pelo reômetro utilizado com o raio da placa (R) e a distância entre as placas (h). Fonte: Adaptado de *TA Instruments* (2010).

Os resultados obtidos com as duas primeiras rampas (primeiro ciclo) foram descartados, uma vez que considerou-se que a mistura ainda estava sendo homogeneizada e tendo aderência às placas do reômetro. Dessa forma, a partir do segundo ciclo foi possível utilizar os dados coletados de forma representativa nas propriedades reológicas e, o terceiro ciclo, foi uma validação dos dados obtidos no ciclo anterior. Foi obtido também o teor de saturação dos aditivos e observado se houve ou não segregação da pasta. Os ensaios tiveram duração aproximada de 35 minutos, contando entre o início da mistura dos materiais até a limpeza dos equipamentos. Na Figura 5 tem-se uma representação esquemática de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo, demonstrando os ciclos e as tampas.

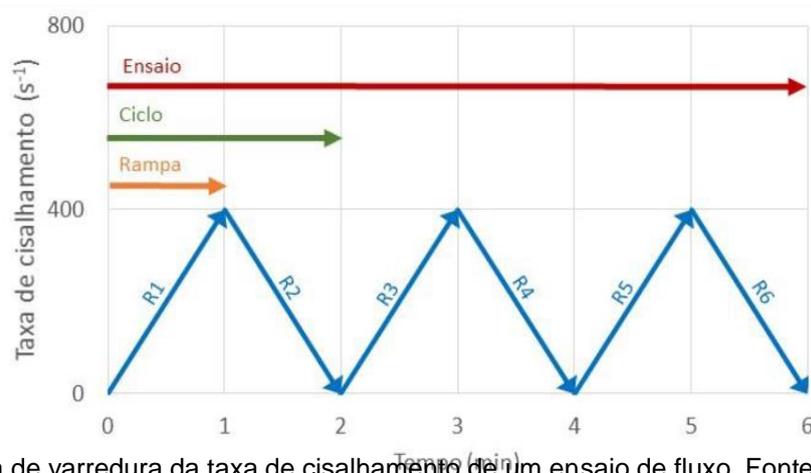


Figura 5 – Esquema de varredura da taxa de cisalhamento de um ensaio de fluxo. Fonte: Agostinho (2017).

Para a interpretação e tratamento de dados do reômetro, foi utilizado o *software* computacional *TRIOS* da *TA Instruments*. Dados de viscosidade e de tensão de escoamento puderam ser aquiridos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os resultados de viscosidade plástica e de tensão de cisalhamento das pastas estudadas. É importante ressaltar que não foi possível executar o ensaio com a pasta de referência (sem aditivos) na relação água/cimento (a/c) 0,40, devido à sua alta viscosidade, ultrapassando o limite de exequibilidade do reômetro.

Nas Figuras 6 a 9 estão apresentados graficamente os resultados de tensão de escoamento e viscosidade para os aditivos químicos “A” e “B”.

Tabela 3 – Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento pastas estudadas nas relações a/c 0,40 e 0,55 e de acordo com os teores de aditivo utilizadas.

PASTA		TEOR DE ADITIVO (%)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de cisalhamento (Pa)
Relação a/c 0,40	REF	0,0	-	-
	Aditivo "A" tipo RA2 – Superplastificante	0,3	1,11	435,25
		0,5	0,82	321,55
		0,7	0,36	142,30
		0,9	0,30	117,50
		1,2	0,26	103,50
		1,5	0,24	92,60
		1,7	0,27	105,35
		Aditivo "B" tipo RA 01 – Plastificante	0,3	0,86
	0,5		0,99	335,75
	0,7		0,89	347,85
	0,9		0,82	321,45
	1,2		0,69	271,60
	1,5		0,59	230,8
	2,0		0,54	211,80
	2,5		0,38	147,25
	3,0		0,26	100,68
	4,0		0,23	88,21
	5,0		0,23	91,29
	6,0		0,23	88,45
Relação a/lig 0,55	REF	0,0	0,52	202,4
	Aditivo "A" tipo RA2 – Superplastificante	0,1	0,21	81,82
		0,3	0,16	64,10
		0,5	0,10	38,22
		0,7	0,06	25,33
		0,9	0,08	30,27
		1,2	0,06	22,51
		1,5	0,07	28,08
		Aditivo "B" tipo RA 01 – Plastificante	0,1	0,20
	0,3		0,20	79,50
	0,5		0,16	60,95
	0,7		0,16	62,95
	0,9		0,14	55,31

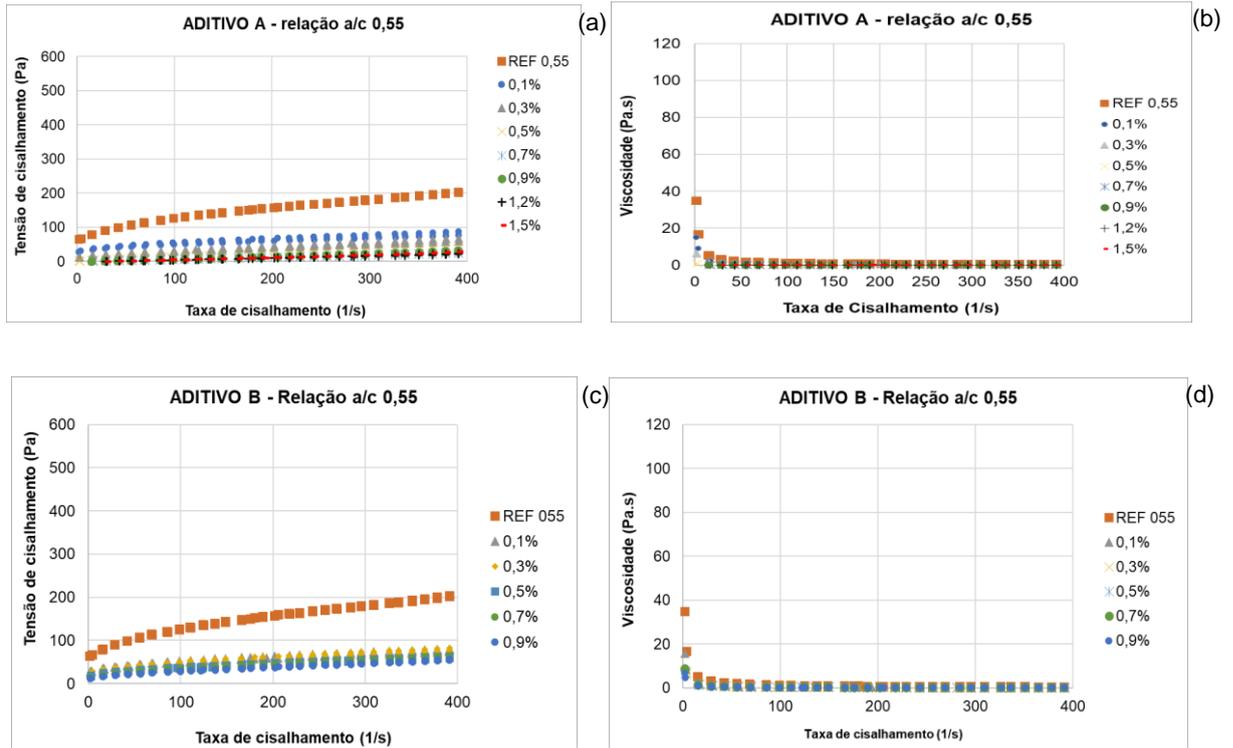


Figura 6 – Propriedades reológicas dos aditivos com relação a/lig de 0,55 (a) gráfico de tensão do aditivo A; (b) gráfico de viscosidade do aditivo A; (c) gráfico de tensão do aditivo B e (d) gráfico de viscosidade do aditivo B.

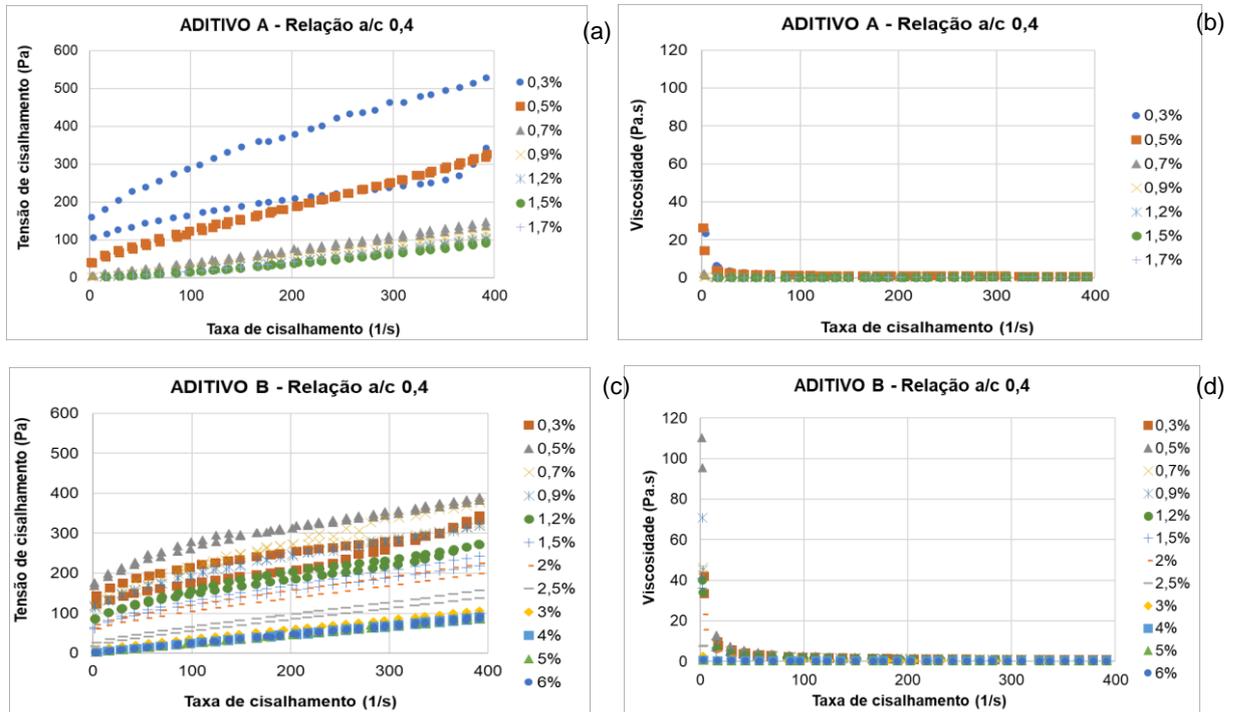


Figura 7 – Propriedades reológicas dos aditivos com relação a/c de 0,4 (a) gráfico de tensão do aditivo A; (b) gráfico de viscosidade do aditivo A; (c) gráfico de tensão do aditivo B e (d) gráfico de viscosidade do aditivo B.

Da Tabela 3, observa-se, como comportamento geral e esperado que a medida que se aumentou o teor de aditivo utilizado, se reduziu a viscosidade plástica da pasta.

Esse percentual de redução se deu em escalas diferentes, mas ocorreu para as duas relações a/c estudadas e para os dois tipos de aditivos químicos avaliados.

Da tabela 3, notou-se também que os parâmetros reológicos convergiram para um resultado esperado: com um comportamento pseudoplástico típico de pastas de cimento no qual com o acréscimo do teor de aditivo químico, a viscosidade e a tensão de cisalhamento diminuíram, isto é, a pasta ficou mais fluída e a trabalhabilidade aumentou.

Ao mesmo tempo, um maior efeito na redução da viscosidade, foi observado com o uso do aditivo “A” para as pastas de relação a/c 0,40 e 0,55. Isto provavelmente pode ser explicado pelo alto teor de sólidos do aditivo “A” (32,82%), comparativamente ao aditivo “B” (19,67%). Além disso, as moléculas desses aditivos podem ser diferentes, embora tenham a mesma base química (policarboxilato).

Ademais, especificamente para a pasta de relação a/c 0,40, menores teores de aditivo “A” em relação ao aditivo “B” foram necessários para se obter menores valores de viscosidade. Já para a pasta de relação a/c 0,55, o uso do aditivo “A” ou “B” em pequena porcentagem (0,1%) fez os valores de viscosidade reduzirem em aproximadamente 60% em relação a pasta de referência - sem aditivo. Isto está relacionado a maior quantidade de água das pastas de relação a/c 0,55. Para a pasta a/c 0,55, o acréscimo do teor de aditivo “B”, reduziu os valores de viscosidade em menor proporção do que para o aditivo “A”.

Em paralelo, o simples acréscimo de água, alterando a relação a/c de 0,40 para 0,55 nas pastas, já reduziu significativamente a tensão de cisalhamento, sobretudo com o uso dos aditivos químicos. A literatura relata valores de tensão de escoamento para pastas de cimento variando de 10 Pa a 100 Pa, viscosidade de 0,01 Pa.s a 1,0 Pa.s e ruptura estrutural significativa (BANFILL, 2003). Os valores obtidos na presente para tensão de escoamento foram bem superiores ao mencionados e na faixa para viscosidade.

À medida que os ensaios foram sendo realizados com o aditivo B, percebeu-se que este não atingia a estabilidade no valor da viscosidade. Logo, os teores utilizados de aditivo B foram excedidos em relação ao valor recomendado pelo fabricante até que este atingisse a estabilidade (que será vista mais adiante nos gráficos de teor de aditivo x viscosidade – Figura 10). É importante enfatizar que foram realizadas correções nas quantidades de água acrescentadas à mistura para manter a relação a/c preestabelecida, conforme o acréscimo do teor de aditivo, considerando o teor de sólidos deles.

Das Figuras 6 e 7, notou-se que a viscosidade foi reduzida com o aumento da taxa de cisalhamento e que a tensão de cisalhamento também aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Na Figura 8, em caráter representativo dos ensaios, é possível observar diferentes resultados obtidos dos ensaios de acordo com a quantidade de aditivo escolhido. Na Figura 8a, a pasta ainda estava muito viscosa e com quantidade insuficiente de aditivo. Na Figura 8c, a pasta da figura teve uma quantidade de aditivo excedente, uma vez que apresentou exsudação. Assim, analisando visualmente, o ideal é a consistência da pasta, observada na figura 8b (que foi obtida a partir de valores intermediários de aditivos).

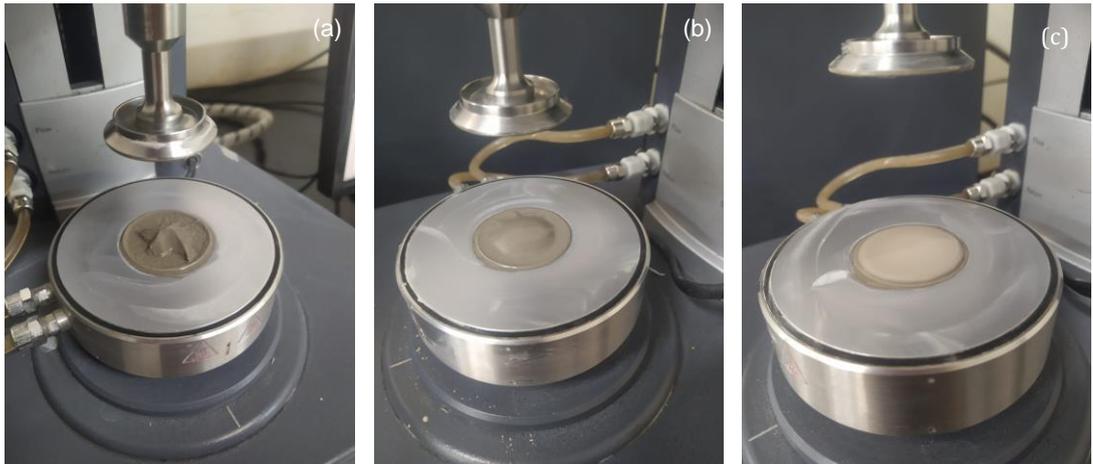


Figura 8 – Condição das pastas em caráter representativo após o ensaio de reologia: (a) viscosa; (b) trabalhável e (c) líquida e com exsudação.

Uma importante observação a ser feita é que as pastas de cimento contendo uma relação a/c de 0,55 foram mais estáveis e mais trabalháveis, inclusive até mesmo na análise tátil-visual. Já as pastas de cimento com relação a/c 0,40 tiveram uma tendência de se tornarem menos viscosas e mais trabalháveis com teores de aditivos mais altos, mesmo com o superplastificante tipo A. As justificativas para esse fato é que a menor relação a/c demanda mais água ou aditivo para plastificar a mistura.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas informações sobre os teores utilizados dos aditivos químicos nas pastas *versus* viscosidade medida pelo reômetro. Os teores ideais dos aditivos (teor de saturação e eficiência dos aditivos) foram determinados graficamente pela alteração na inclinação das curvas apresentadas em que a viscosidade se mantém aproximadamente sem alterações. A Tabela 4 apresenta um resumo das informações obtidas.

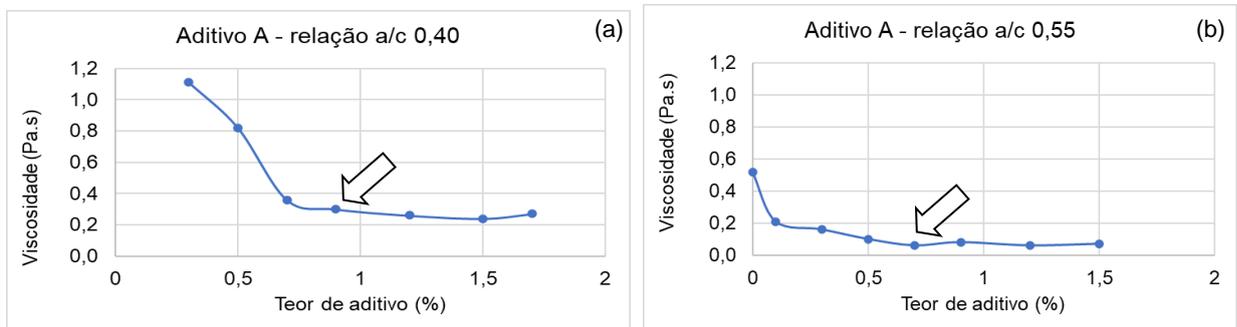


Figura 9 – Informações do teor de aditivo A estudado (%) tipo RA 2 - redutor de água tipo 2 (superplastificante) *versus* viscosidade plástica (Pa.s) para as pastas de relação a/c (a) 0,40 e (b) 0,55.

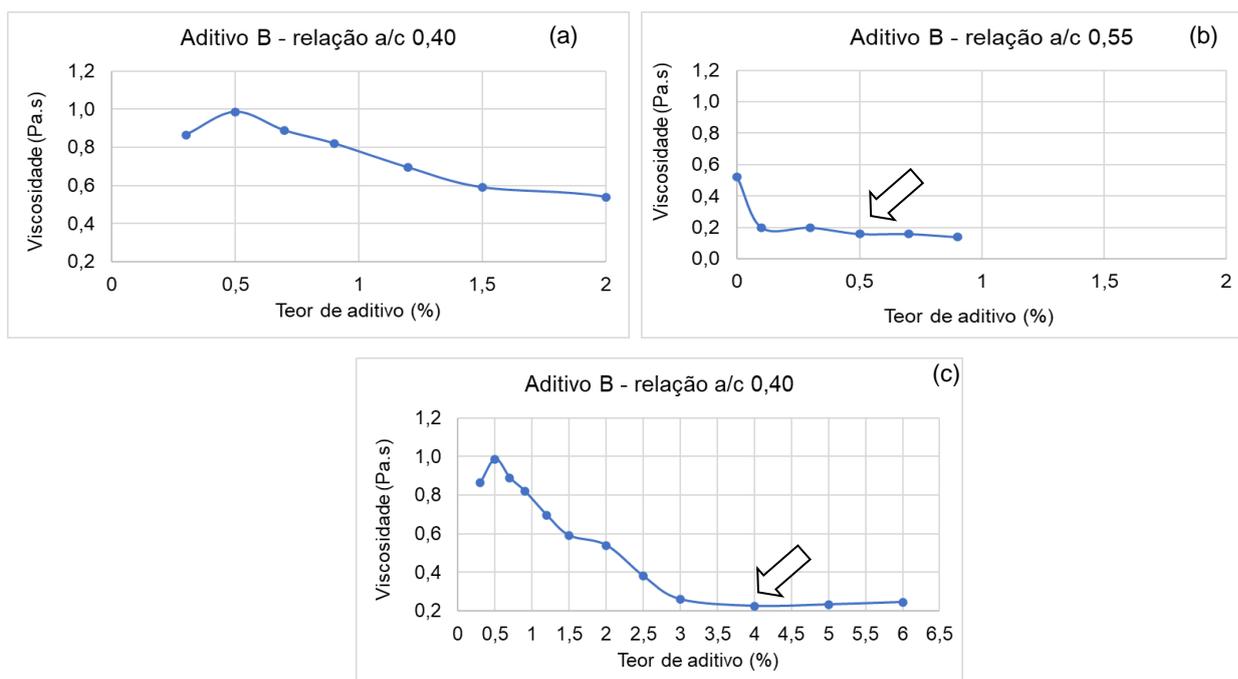


Figura 10 – Informações do teor de aditivo B estudado (%) tipo RA 1 - redutor de água tipo 1 (plastificante) versus viscosidade plástica (Pa.s) para as pastas de relação a/c (a) 0,40, (b) 0,55 e (c) 0,40.

Tabela 4 – Valores obtidos de teor ótimo/saturação de aditivos químicos utilizados nas pastas de relação a/c 0,40 e 055.

Pastas/ relação a/c	Teor ótimo/saturação do aditivo	
	A - tipo RA 2 - redutor de água (superplastificante)	B - tipo RA 1 - redutor de água (plastificante)
0,40	0,9%	0,7%
0,55	4,0%	0,5%

Da Figura 9, observamos que o teor (%) ótimo (de saturação) do aditivo A (tipo RA 2 - redutor de água tipo 2 -superplastificante) para as pastas de relação a/c 0,40 e 0,55 são respectivamente 0,90% e 0,70% (Tabela 1). Estes teores estão dentro da faixa recomendada pelo fabricante 0,30% a 1,5%.

Entretanto, para a pasta com aditivo B (tipo RA 1 - redutor de água tipo 1 - plastificante) e relação a/c de 0,40, o teor ótimo de aditivo extrapolou o máximo recomendado pelo fabricante (entre 0,3% e 0,9%) e apresentou teor ótimo de 4%. Este alto teor não foi esperado. Para a pasta de relação a/c 0,55, o teor ótimo obtido foi de 0,5% de aditivo (Figura 10 e Tabela 4).

Fazendo-se uma análise simplista de custo e viabilidade (Tabela 5), sob a ótica tecnológica para uso do aditivo A, o investimento seria de R\$ 2.500,00/tambor de 200 litros (\$ 506,07⁷ dólares), sendo R\$ 12,50/litro (\$ 2,53) e 32,82% de teor de sólidos. Assim, o preço por percentual de sólido do aditivo superplastificante foi de R\$ 76,17 (\$ 15,41).

Na mesma direção, já para o aditivo B, o investimento seria de R\$ 1.100,00/tambor de 200 litros (\$ 222,67 dólares), sendo R\$ 5,50/litro (\$ 1,13) e 19,67% de teor de

⁷ Valor do dólar atual R\$ 4,94 em 17/05/22.

sólidos de forma que o preço por percentual de sólido do aditivo plastificante foi de R\$ 55,92 (\$11,32).

Assim, para a relação a/c 0,55, simulando um concreto estrutural e considerando-se o consumo de 250 kg do mesmo cimento CP V-ARI utilizando por metro cúbico de concreto, teríamos o valor de 1,75 kg de aditivo A ou 1,87 litros de aditivo A por metro cúbico. Isso totaliza o investimento de R\$ 23,41 (\$ 4,73) de aditivo por metro cúbico de concreto. Para o aditivo B, o consumo desse aditivo seria 1,25 kg ou 1,35 litros, somando R\$ 7,42 (\$ 1,50) de aditivo por metro cúbico de concreto (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo das informações de investimento e viabilidade dos aditivos.

Aditivo	Informações dos aditivos testados				
	Teor ótimo/saturação do aditivo	Teor de sólidos do aditivo	Preço por tambor de 200 litros - em reais e em dólar (entre parênteses)	Preço por litro de aditivo - em reais e em dólar (entre parênteses)	Simulação para 1 m ³ de concreto ⁸ /Preço só do aditivo - em reais e em dólar (entre parênteses)
A – pasta 0,40	0,7%	32,82%	R\$ 2.500,00 \$ 506,07	R\$ 12,50/litro (\$ 2,53)	R\$ 23,41 (\$ 4,73)
B – pasta 0,40	4,0%	17,67%	R\$ 1.100,00 \$ 222,67	R\$ 5,50/litro (\$ 1,13)	R\$ 74,20 (\$ 15,02)
A – pasta 0,55	0,7%	32,82%	R\$ 2.500,00 \$ 506,07	R\$ 12,50/litro (\$ 2,53)	R\$ 23,41 (\$ 4,73)
B – pasta 0,55	0,5%	17,67%	R\$ 1.100,00 \$ 222,67	R\$ 5,50/litro (\$ 1,13)	R\$ 7,42 (\$ 1,50)

Fez-se uma extrapolação na Tabela 5, tentando precificar os aditivos químicos estudados por metro cúbico (m³) de concreto. Na ocasião de uso dos aditivos em campo, são necessárias análises adicionais de viabilidade e compatibilidade com o cimento, análise de trabalhabilidade e auto adensabilidade do concreto, possibilidade de redução de consumo de cimento, condições de transporte/lançamento e adensamento do concreto, entre outros.

Os resultados da Tabela 5 parecem sugerir que para o concreto com menor relação a/c (0,40), o aditivo A tipo superplastificante e com maior teor de sólidos, apesar de ser mais oneroso financeiramente, faz a compensação pela menor quantidade de aditivo utilizada e menor custo por m³ de concreto. O mesmo não ocorreu para a relação a/c maior (0,55) a qual parece indicar o uso do aditivo tipo B – plastificante de forma mais eficiente. Isto também evidencia que um mesmo aditivo pode ter desempenhos diferentes a depender da relação a/c utilizada.

Destaca-se que a base química dos aditivos estudados foi a mesma (policarboxilato), contudo informações mais específicas não foram informadas pelos fabricantes.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões, a partir dos experimentos realizados, podem ser listadas:

⁸ Com consumo de 250 kg de cimento e relação a/c 0,55.

- obteve-se um comportamento pseudoplástico típico de pastas de cimento no qual com o acréscimo do teor de aditivo químico, a viscosidade e a tensão de cisalhamento diminuíram, isto é, a pasta ficou mais fluída e a trabalhabilidade aumentou. Isso aconteceu em escalas diferentes, mas ocorreu para as duas relações a/c estudadas e para os dois tipos de aditivos químicos avaliados.
- um maior efeito na redução da viscosidade foi observado com o uso do aditivo “A” para as pastas de relação a/c 0,40 e 0,55. Isto provavelmente pode ser explicado pelo alto teor de sólidos do aditivo “A” (32,82%), comparativamente ao aditivo “B” (19,67%), embora possuam a mesma base química (polycarboxilato).
- para a pasta de relação a/c 0,40, menores teores de aditivo “A” em relação ao aditivo “B” foram necessários para se obter menores valores de viscosidade. Já para a pasta de relação a/c 0,55, o uso do aditivo “A” ou “B” em pequena porcentagem (0,1%) fez os valores de viscosidade reduzirem em aproximadamente 60% em relação a pasta de referência - sem aditivo. Isto está relacionado a maior quantidade de água das pastas de relação a/c 0,55. Para a pasta a/c 0,55, o acréscimo do teor de aditivo “B”, reduziu os valores de viscosidade em menor proporção do que para o aditivo “A”.
- o simples acréscimo de água, alterando a relação a/c de 0,40 para 0,55 nas pastas, já reduziu significativamente a tensão de cisalhamento, sobretudo com o uso dos aditivos químicos.
- o teor (%) ótimo (de saturação) do aditivo A (tipo RA 2 - redutor de água tipo 2 -superplastificante) para as pastas de relação a/c 0,40 e 0,55 foram respectivamente 0,90% e 0,70%. Estes teores estiveram dentro da faixa recomendada pelo fabricante 0,30% a 1,5%.
- entretanto, para a pasta com aditivo B (tipo RA 1 - redutor de água tipo 1 - plastificante) e relação a/c de 0,40, o teor ótimo de aditivo extrapolou o máximo recomendado pelo fabricante (entre 0,3% e 0,9%) e apresentou teor ótimo de 4%. Este alto teor não foi esperado. Para a pasta de relação a/c 0,55, o teor ótimo obtido foi de 0,5% de aditivo
- sem aditivo químico não foi possível obter parâmetros para a pasta de relação a/c 0,40 (referência) por falta de trabalhabilidade e altas viscosidades;
- para baixas relações a/c (0,40), o superplastificante – aditivo A foi mais efetivo nas propriedades reológicas e na relação custo-benefício do aditivo. O mesmo não ocorreu para a relação a/c maior (0,55) a qual parece indicar o uso do aditivo tipo B – plastificante ser mais eficiente.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto de P&D - PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFG/EECA/LABITECC. Os autores expressam agradecimento a todos esses parceiros, bem como ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelas bolsas concedidas aos pesquisadores autores deste artigo.

6. REFERÊNCIAS

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

_____. **ABNT NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação do Índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro: ABNT: 4 p. 2018.

_____. **ABNT NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

_____. **ABNT NBR 11768-3: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 2: Ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.

_____. **ABNT NBR 12826 – Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

_____. **ABNT NBR 16606 – Cimento Portland – Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro: ABNT: 4 p. 2018.

_____. **ABNT NBR 16607 – Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro: ABNT: 4 p. 2018.

_____. **ABNT NBR 16372 - Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AGOSTINHO, L. B. **Estudo reológico de pastas de cimento Portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. 2017. 148p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

AGOSTINHO, L. B. PEREIRA, A. C. SILVA, E. F. TOLEDO FILHO, R. D. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosilica. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 2021.

ALONSO, M. M. PALACIOS, M. PUERTAS, F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, p. 151-162, 2013.

BANFILL, P. F. G. The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review. **11th International Cement Chemistry Congress**, n. May, p. 61–130, 2003.

BURGOS-MONTES, O. ALONSO, M. M. PUERTAS, F. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 417-423, 2013.

CYR, M. **Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires**. Tese de Doutorado - Toulouse: INSA de Toulouse e Université de Sherbrooke, 1999.

- FRANÇA *et al.* Influence of mixing process on mortars rheological behavior through rotational rheometry. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 81-90, 2019.
- FERRARIS, F.C.; OBLA, K.H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 245-255, 2001.
- FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- JANOTKA, I. PUERTAS, F. PALACIOS, M. KULIFFAYOVA, M. VARGA, C. Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 791-802, 2010.
- KOUTNÝ, O. SNOECK, D. VURST, F. V. D. BELIE, N. Rheological behavior of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 29-40, 2018.
- LIU, J. WANG, K. ZHANG, Q. HAN, F. SHA, J. LIU, J. Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 356-366, 2017.
- LOPES, R.C.; OLIVEIRA, A.M.; CASCUDO, O. Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos como Parâmetro de Durabilidade em Concretos com Diferentes Classes de Resistência Mecânica e sem Adições Minerais. In: (CONGRESOS LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN y CONGRESOS DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 16, 2 022, Evento eletrônico. **Anais...** ALCONPAT. p.2124-2134.
- LOPES, R. C. **Estudo de ensaios e parâmetros de transporte de cloretos no concreto para aplicação em modelos preditivos de vida útil**. 2022. 229 f. Dissertação (Mestrado Em Geotecnia, Estruturas E Construção Civil) - Universidade Federal De Goiás, Goiânia, 2022.
- MACEDO, R. H. **Permeabilidade ao gás em concreto com adições minerais e sua contribuição no campo dos indicadores de durabilidade**. 2018. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.
- MALAGONI, M. A. A. **Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais**. 2016. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- MEHTA, P. K MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014. 751p.
- MOHAMMED, A. RAFIQ, S. MAHMOOD, W. NOAMAN, R. AL-DARKAZALI, H. GHAFOR, K. QADIR, W. Microstructure characterizations, thermal properties, yield stress, plastic viscosity and compression strength of cement paste modified with nanosílica. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 10941-10956, 2020.

- MSINJILI, N. S. SCHMIDT, W. MOTA, B. LEINITZ, S. KÜHNE, H. C. ROGGE, A. The effect of superplasticizers on rheology and early hydration kinetics of rice husk ash-blended cementitious systems. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 511-519, 2017.
- NAZAR, S. YANG, J. THOMAS, B. S. AZIM, I. REHMAN, S. K. U. Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, 2020.
- NG, S. JUSTNES, H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 41-54, 2016.
- OLIVEIRA, A. M. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzidas por cloretos**. 2007. 276p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.
- OLIVEIRA, A. M., CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 467 - 477, 2018.
- SANTOS, F. N. SOUSA, S. R. G. BOMBARD, A. J. F. VIEIRA, S. L. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using mixture design of experiments. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 92-103, 2017.
- SEFF, L. LABRINCHA, J. A. FERREIRA, V. M. HOTZA, D. REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2487-2491, 2009.
- QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta**. 2008. 172p. Tese de doutorado. (Escola politécnica), Universidade de São Paulo, 2008.
- ROJAS-RAMIREZ, R. A. MACIEL, M. H. ROMANO, R. C. O. PILEGGI, R. G. COELHO, A. C. V. The impact of vermiculite residual fines in the rheological properties of cement pastes formulated with different waste contents. **Applied Clay Science**. v. 170, p. 97-105, mar. 2019.
- TA INSTRUMENTS. **AR-G2/AR 2000ex Rheometers - Operator's Manual New Castle**. TA Instrument, 2010.
- VARHEN *et al.* Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behavior and shrinkage of micro concretes. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 375-386, 2016.
- VIKAN, H. JUSTNES, H. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1512-1517, 2007.
- WALLEVIK, J. E. Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 1, p. 14–29, 2009.

APÊNDICE **E**:

ARTIGO PUBLICADO:

OLIVEIRA, A. M.; SANTOS, J. R.; CASCUDO, O. ; CASTRO, A. Avaliação do Comportamento Cinético de Pastas de Cimento por Meio de Ensaio Oscilatórios: Estudo de Dosagem de Aditivos. **REVISTA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PETRÓPOLIS**, v. 16, p. 58--66, 2022

AValiação DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS DE CIMENTO POR MEIO DE ENSAIOS OSCILATÓRIOS: ESTUDO DO TIPO DE ADITIVO QUÍMICO

Andrielli M. de Oliveira^{1*}, Jéssica R. dos Santos¹, Alexandre de Castro², Oswaldo Cascudo¹

¹ LABITECC – Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, PPGGECON – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção, EECA- Escola de Engenharia Civil e Ambiental, UFG - *Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil.*

² *ELETROBRAS FURNAS, Aparecida de Goiânia, 74923-650, GO, Brasil*

Palavras-chave: Reologia, Ensaio Oscilatórios, Pasta de Cimento, Aditivo Químico, Reômetro.

Resumo. Estudos reológicos são interessantes para estudos e análises da ação fluidificante de aditivos químicos em misturas com materiais cimentícios. Esses aditivos químicos podem diminuir a viscosidade das misturas e reduzir a demanda de água, o que é muito atraente do ponto de vista de durabilidade de materiais cimentícios. Dessa forma, é objetivo avaliar o comportamento reológico de pastas de cimento, por meio da propriedade de módulo elástico (G'), sob interveniência do tipo de aditivo químico (plastificante RA1 e superplastificante RA2). Esses aditivos possuem mesma base química (polícarboxilato) e diferentes teores de sólidos em suspensão. As pastas foram produzidas com CP V ARI e relação água/ligante 0,55. Por meio da análise dos resultados, foi possível inferir que o aditivo super plastificante (designado neste trabalho como “A”) foi mais compatível com o cimento utilizado (CP V-ARI RS) do que o aditivo plastificante (“B”). O aditivo “A” retardou o tempo de pega da mistura (aproximadamente 50 minutos) e a manteve mais trabalhável por muito mais tempo. Este comportamento pode ser desejável em algumas aplicações de campo e em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto, por exemplo. Em termos de desempenho, podemos elucidar a seguinte sequência de desempenho em relação ao G' : pasta com aditivo superplastificante (A), pasta com aditivo plastificante (B) e pasta de referência (sem aditivo).

*Endereço de e-mail: andriellimorais@ufg.br

Endereços de e-mail: andriellimorais@ufg.br*, santos_rodrigues@discente.ufg.br, ocascudo@ufg.br, alexcasp@furnas.com.br.

EVALUATION OF THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTES THROUGH OSCILLATORY TESTS: STUDY OF THE TYPE OF CHEMICAL ADMIXTURE

Keywords: Rheology, Oscillatory Tests, Cement Paste, Chemical Admixture, Rheometer.

Abstract. Rheological studies are interesting for studies and analysis of the fluidizing action of chemical admixtures in mix designs with cementitious materials. These chemical admixtures can minimize the viscosity of the mixtures and reduce the demand of water. This is very attractive from the point of view of durability of cementitious materials. Thus, the aim of the paper is to evaluate the rheological behavior of cement pastes, through the property of elastic modulus (G'), under the intervention of the types of chemical admixtures (plasticizer RA1 and superplasticizer RA2). These admixtures are based on polycarboxylate and they have had different levels of solids in suspended. The pastes were produced with Brazilian Portland Cement type CP V-ARI RS and a water/binder ratio of 0.55. Through the analysis of the results, it was possible to infer that the superplasticizer chemical admixture (A) was more compatible with the cement used than the plasticizer chemical admixture (B). Chemical admixture A delayed the setting time of the mixture (approximately 50 minutes) and kept it more workable for much longer time. This behavior may be desirable in some field applications and in operations of preparing, mixing, transporting and molding of concrete, for example. In terms of performance, it was possible to elucidate, in descending order of performance, related to G' : paste with superplasticizer chemical admixtures, paste with plasticizer chemical admixtures and reference paste (without chemical admixtures).

1 INTRODUÇÃO

Ensaio de reologia são muito interessantes e importantes em diversas indústrias, como a alimentícia, a cosmética e beleza, a farmacêutica, a de bebidas, a de tintas, de petróleo, de aditivos químicos, dentre outros. A reologia pode auxiliar na fabricação de produtos, na determinação de seu controle de qualidade, na manutenção de sua vida útil e na escolha de sua textura e fluidez.

Dentre os ensaios reológicos possíveis de serem realizados em pastas cimentícias, tem-se o ensaio oscilatório. Ele é também chamado de teste dinâmico e associa a velocidade angular com a deformação oscilatória resultante. Esse tipo de ensaio é comumente utilizado para analisar a cinética e o desenvolvimento de reações de hidratação de pastas de cimento ao longo do tempo [5]. Também esse ensaio mede propriedades ainda no período viscoelástico do material, uma vez que o módulo elástico independe da deformação aplicada [32].

Estudos reológicos com pastas e argamassas de cimento Portland com o uso de aditivos químicos, analisando-se a interveniência do tipo, da base química e de seu teor/quantidade vêm sendo desenvolvidos, inclusive com análises tecnológicas de investimento e benefícios técnicos vinculados às misturas. Diversos tipos de aditivos químicos, inclusive com bases de éter de policarboxilato, melanina, naftaleno, naftaleno sulfonado, lignosulfonato, resina poli acrílica, resina melamínica, poli acrilato e poli acrílico vêm sendo testados em matrizes cimentícias [2, 3, 5, 7–11, 13, 14, 17–21, 24–35].

Ao mesmo tempo, estudos relacionam o tipo de aditivos, adições minerais e a reologia com comportamento estrutural, moldabilidade e impressões 3D. Isso demonstra a importância do comportamento reológico dos materiais, sua aplicação e sua correlação com propriedades no estado endurecido [6, 12, 33].

Dessa forma, é objetivo avaliar o comportamento reológico de pastas de cimento, por meio do módulo elástico (G'), sob interveniência do tipo de aditivo químico (plastificante e superplastificante). As pastas foram produzidas com CP V-ARI RS e relação água/ligante de valor igual a 0,55.

Estudos reológicos com matrizes cimentícias são relevantes, sobretudo no Brasil em que poucos estudos neste campo vêm sendo desenvolvidos. Esses estudos são balizadores para entender a dinâmica do comportamento de hidratação do cimento Portland e seu limite para trabalhabilidade e adensabilidade quando aplicados em concretos.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidas pastas com relação água/ligante (a/l) 0,55, escolhidas com base em pesquisas desenvolvidas no Grupo de Estudos em Durabilidade (GEDur-UFG) [15-16, 22]. Foi utilizado cimento CP V-ARI RS com massa específica de $2,97 \text{ g/cm}^3$ e área específica - (Blaine) de $5,83 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Também dois tipos de aditivos químicos dispersantes à base de policarboxilatos, a saber: um RA 2 - redutor de água tipo 2 (superplastificante) com 32,82% de teor de sólidos e um plastificante RA 1 - redutor de água tipo 1 (plastificante) [1], com 19,67% de teor de sólidos, designados no presente trabalho de A e B foram utilizados, respectivamente. Esses aditivos são muito utilizados de forma comercial em uma produtora de concreto (concreteira) na região de Goiânia/GO.

A partir de ensaios de fluxo realizados anteriormente [23], foram definidos os teores ótimos desses aditivos, os quais foram: 0,7% e 0,5%, em relação à massa de cimento, para os respectivos aditivos A e B, respectivamente.

O procedimento de mistura, em resumo, consistiu em colocar água e aditivo, previamente misturados ao recipiente com cimento. A mistura manual desses materiais foi realizada com o auxílio de uma espátula durante um minuto, seguida por uma mistura mecânica, utilizando um

misturador modelo IKA RW 20 digital, durante três minutos com rotação aproximada de 2500 rpm. Foi preparada aproximadamente 120 mililitros de pasta em cada mistura (utilizando sempre 100 gramas de cimento).

Para os ensaios reológicos, utilizou-se um reômetro do tipo rotacional modelo AR G2, fabricante TA *Instruments*, vinculado a um computador que emitiu resultados de taxa de cisalhamento de forma gráfica, simultaneamente ao ensaio. Para a obtenção de dados, controle dos parâmetros do ensaio e tratamento de dados, utilizou-se os *softwares Rheology Advantage Instrument Control AR e TRIOS da TA Instruments*.

O ensaio oscilatório executado consistiu na execução de dois ciclos com duas rampas em cada ciclo, sendo: a primeira rampa com aceleração da taxa de cisalhamento (indo de zero a 400s^{-1}) e a segunda com desaceleração (caindo de 400 s^{-1} para zero). Em cada rampa, foram obtidos 30 pontos com os dados citados anteriormente. Essa primeira parte do ensaio tem o objetivo de ajustar o material à geometria e prepará-lo para a próxima etapa, sendo que as duas primeiras rampas foram descartadas já que a mistura estava ainda sendo homogeneizada e tendo aderência às placas do reômetro. Adicionalmente, as amostras foram submetidas a deformações por um período de seis horas para obtenção dos valores de módulo elástico (G').

Por meio de ensaios de fluxo anteriores [24], já se tem a informação de que essas pastas tem um comportamento pseudo plástico típico de pastas de cimento, uma vez que a medida em que se acrescentou aditivo químico, a viscosidade e a tensão de cisalhamento tiveram tendência de redução de valor, já que o material ganhou fluidez e, conseqüentemente, aumentou a trabalhabilidade. As pastas de cimento foram estáveis e trabalháveis, inclusive até mesmo na análise tátil-visual.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados de viscosidade e da tensão de cisalhamento das pastas estudadas, obtidas a partir da média das duas últimas rampas da primeira etapa do ensaio. Nas Figuras 1 a 2 estão apresentadas as curvas de tempo *versus* módulo elástico (G') para cada condição de estudo.

O ensaio oscilatório, também conhecido como ensaio de varredura de deformação, forneceu como resultado, curvas que demonstram o comportamento elástico (módulo elástico - G' que determina o início da pega) das pastas cimentícias, durante o incremento da frequência de deformação.

Tabela 1: Valores de viscosidade e de tensão de cisalhamento das pastas estudadas, de acordo com o aditivo utilizado.

Pasta		Teor de Aditivo (%) em relação à massa de cimento	Viscosidade [Pa.s]	Tensão de Cisalhamento [Pa]
	REF 0,55	0,0	0,296	116,70
Relação a/l 0,55	Aditivo A Superplastificante	0,7	0,071	28,22
	Aditivo B Plastificante	0,5	0,153	60,19

A literatura relata [4] valores de tensão de escoamento para pastas de cimento de 10 a 100 Pa, viscosidade de 0,01 a 1 Pa.s e de ruptura estrutural significativa. Comparando os dados da Tabela 1 com literatura, os valores de viscosidade obtidos estão próximos à faixa sugerida por Banfill [4], demonstrando que os aditivos têm efeitos mais drásticos na tensão do que na viscosidade propriamente dita, sendo ainda sim, influente.

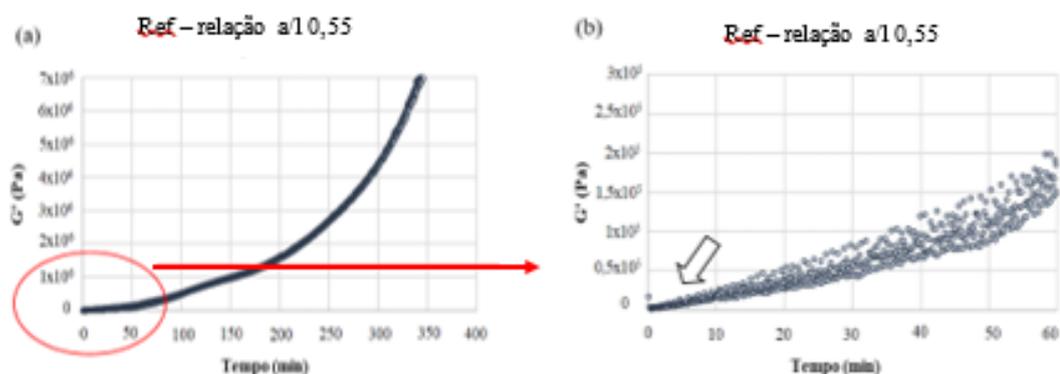


Figura 1: Curva do ensaio oscilatório realizado em pasta de cimento referência com relação a/1 0,55: (a) com duração de aproximadamente 6 horas (360 minutos) e (b) ampliação da primeira hora de ensaio.

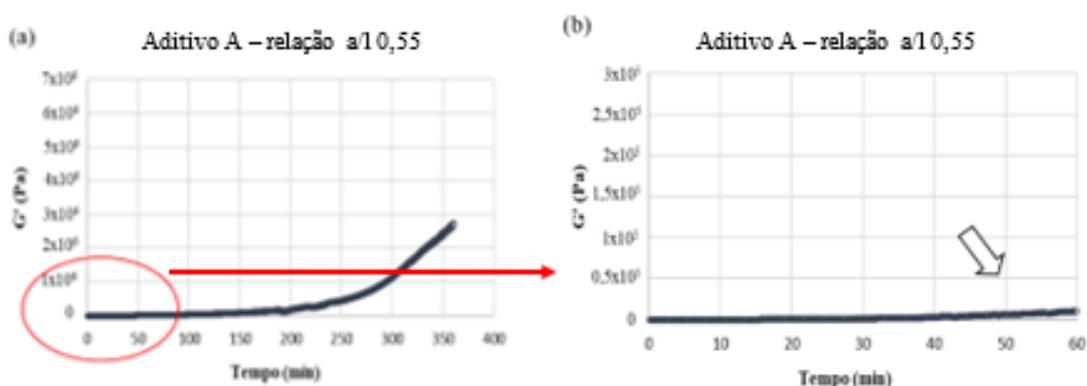


Figura 2: Curva do ensaio oscilatório realizado em pasta de cimento com relação a/1 0,55 e 0,7% do aditivo A - superplastificante: (a) com duração de aproximadamente 6 horas (360 minutos) e (b) na primeira hora do ensaio.

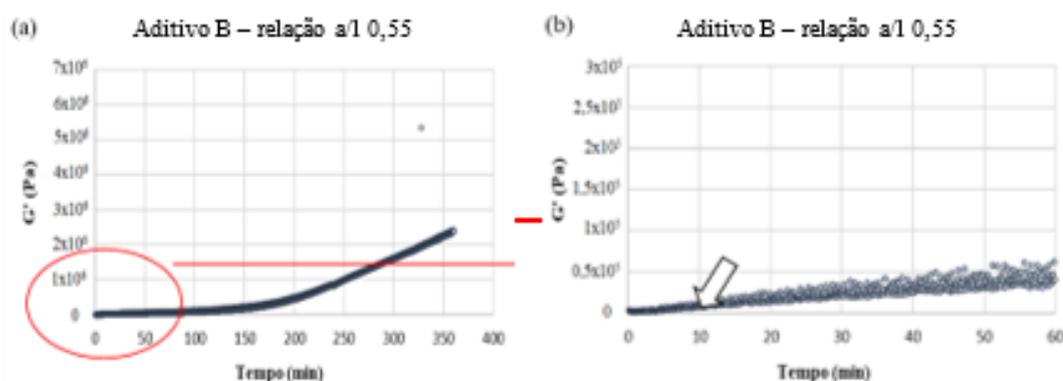


Figura 3: Curva do ensaio oscilatório realizado em pasta de cimento com relação a/1 0,55 e 0,5% do aditivo B - plastificante: (a) com duração de 6 horas (360 minutos) e (b) na primeira hora do ensaio.

Fazendo uma primeira análise com os resultados do ensaio na pasta de referência com relação a/1 de 0,55 (Figura 1), é possível observar que o processo de consolidação da pasta se inicia antes mesmo dos primeiros dez minutos de ensaio (Figura 1b), demonstrando que a pasta logo perde fluidez. Entretanto, é uma consolidação mais dispersa, onde os processos de solidificação da pasta vão ocorrendo aos poucos. Além disso, todo o seu processo de hidratação ocorre de forma suave, visto que a sua curva tende a ser exponencial (Figura 1a).

Já as Figuras 2 e 3 demonstram o comportamento das pastas com o uso de um superplastificante (aditivo A) e o uso de um plastificante (aditivo B), respectivamente. Por meio das Figuras 2 e 3, é possível notar o quanto os aditivos influenciam de forma diferente entre si o comportamento da pasta de cimento. O aditivo A retarda o início do processo de consolidação da pasta para um tempo próximo de cinquenta minutos, enquanto que o aditivo B tem pouco efeito sobre a pasta (se comparado à pasta de referência), com início do processo de pega próximo de dez minutos de ensaio (Figuras 2 b e 3b).

Com isso, é possível inferir que, mesmo com o uso dos aditivos estudados, os produtos de hidratação da pasta vão sendo formados logo na primeira hora após a mistura de seus componentes. Além disso, as curvas com aditivos são menos abruptas, ao contrário das curvas da pasta de referência.

Por meio das Figuras 1, 2 e 3, também é possível observar com clareza, o efeito dos aditivos químicos nos valores do módulo viscoso (G') para as pastas estudadas. A pasta de referência confirma a sua consolidação de forma mais rápida, como esperado. Isto é possível de ser notado pelo formato mais exponencial da curva e isso denota endurecimento mais rápido desta pasta.

No que tange ao aditivo A (superplastificante) (Figura 2) no teor de 0,7% em relação à massa de cimento, observa-se um comportamento que retardou o tempo de pega da mistura (aproximadamente 50 minutos) e a manteve mais fluida (observe a curva menos abrupta, com dados mais organizados e menos dispersos) por muito mais tempo. A pasta com aditivo A manteve-se mais trabalhável com o tempo, sendo um comportamento desejável neste estudo e interessante em aplicações de campo, em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento. Adicionalmente, a pasta com aditivo B (plastificante) (Figura 3) foi mais fluida que a pasta sem aditivos com o avançar do tempo.

Em resumo, o melhor desempenho do aditivo A (superplastificante) foi esperado em relação ao aditivo B (plastificante), inclusive pelo seu maior teor de sólidos em comparação a pasta sem aditivos.

Fazendo uma primeira análise com os resultados do ensaio na pasta de referência com relação a/l de 0,55 (Figura 1), é possível observar que o processo de consolidação da pasta se inicia antes mesmo dos primeiros dez minutos de ensaio (Figura 1b), demonstrando que a pasta logo perde fluidez. Entretanto, é uma consolidação mais dispersa, onde os processos de solidificação da pasta vão ocorrendo aos poucos. Além disso, todo o seu processo de hidratação ocorre de forma suave, visto que a sua curva tende a ser exponencial (Figura 1a).

Já as Figuras 2 e 3 demonstram o comportamento das pastas com o uso de um superplastificante (aditivo A) e o uso de um plastificante (aditivo B), respectivamente. Por meio das Figuras 2 e 3, é possível notar o quanto os aditivos influenciam de forma diferente entre si o comportamento da pasta de cimento. O aditivo A retarda o início do processo de consolidação da pasta para um tempo próximo de cinquenta minutos, enquanto que o aditivo B tem pouco efeito sobre a pasta (se comparado à pasta de referência), com início do processo de pega próximo de dez minutos de ensaio (Figuras 2 b e 3b).

Com isso, é possível inferir que, mesmo com o uso dos aditivos estudados, os produtos de hidratação da pasta vão sendo formados logo na primeira hora após a mistura de seus componentes. Além disso, as curvas com aditivos são menos abruptas, ao contrário das curvas da pasta de referência.

Por meio das Figuras 1, 2 e 3, também é possível observar com clareza, o efeito dos aditivos químicos nos valores do módulo viscoso (G') para as pastas estudadas. A pasta de referência confirma a sua consolidação de forma mais rápida, como esperado. Isto é possível de ser notado pelo formato mais exponencial da curva e isso denota endurecimento mais rápido desta pasta.

No que tange ao aditivo A (superplastificante) (Figura 2) no teor de 0,7% em relação à

massa de cimento, observa-se um comportamento que retardou o tempo de pega da mistura (aproximadamente 50 minutos) e a manteve mais fluida (observe a curva menos abrupta, com dados mais organizados e menos dispersos) por muito mais tempo. A pasta com aditivo A manteve-se mais trabalhável com o tempo, sendo um comportamento desejável neste estudo e interessante em aplicações de campo, em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento. Adicionalmente, a pasta com aditivo B (plastificante) (Figura 3) foi mais fluida que a pasta sem aditivos com o avançar do tempo.

Em resumo, o melhor desempenho do aditivo A (superplastificante) foi esperado em relação ao aditivo B (plastificante), inclusive pelo seu maior teor de sólidos em comparação a pasta sem aditivos.

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões, com base nos resultados obtidos, podem ser listadas:

- o aditivo A (superplastificante) com maior teor de sólidos foi mais compatível com o cimento CP V-ARI RS do que o aditivo B (plastificante), uma vez que a sua cinética de hidratação foi condizente com o esperado para esse tipo de aditivo químico;
- a pasta com o melhor resultado da cinética de hidratação avaliada foi a pasta com 0,7% do aditivo A, a qual apresentou um retardo nas reações de pega e endurecimento de quase 50 minutos, se comparada com a pasta de referência (sem aditivos);
- a pasta com aditivo A foi mais fluida e trabalhável por mais tempo (este desempenho foi esperado e desejável e pode ser interessante em algumas aplicações em campo e em operações de preparo, mistura, transporte, lançamento e adensamento de concretos) e
- em termos de desempenho, podemos elucidar em ordem decrescente em relação ao G' : pasta com aditivo superplastificante (A), pasta com aditivo plastificante (B) e pasta de referência (sem aditivo).

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto de P&D - PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFG/EECA/LABITECC. Os autores expressam agradecimento a todos esses parceiros, bem como ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelas bolsas concedidas aos pesquisadores autores deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 11768-1: *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.
- [2] L. B. Agostinho. *Estudo reológico de pastas de cimento Portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica*. 2017. 148p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- [3] L. B. Agostinho, A. C. Pereira, E. F. Silva e R. D. Toledo Filho. Rheological study of Portland cement pastes modified with superabsorbent polymer and nanosílica. *Journal of Building Engineering*, 34:102024, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102024>
- [4] P. F. G. Banfil. *The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review*. 11th International Cement Chemistry Congress, May: 61–130, 2003.

- [5] A. M. Betioli Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland. Tese de Doutorado—Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2007.
- [6] J. Bonilla-Cruz, M. A. Ávila-Lopez, F. E. L. Rodríguez, A. Aguilar-Elguezabal e T. E. Lara-Ceniceros. 3D printable ceramic pastes design: correlating rheology & printability. *Journal of the European Ceramic Society*, 42, 13:6033-6039, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.029>
- [7] O. Burgos-Montes, M. M. Alonso e F. Puertas. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 48:417-423, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.008>
- [8] F. C. Ferraris, K.H. Obla e R. Hill. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31:245-255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00454-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00454-3)
- [9] E. Guneyisi, M. Gesoglu, A. Al-Goody e S. Ipek. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 95:29-44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.142>
- [10] F. Han, S. Pu, Y. Zhou, H. Zhang e Z. Zhang. Effect of ultrafine mineral admixtures on the rheological properties of fresh cement paste: a review. *Journal of Building Engineering*, 51, 1:104313. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104313>
- [11] I. Janotka, F. Puertas, M. Palacios, M. Kuliffayova e C. Varga. Metakaolin sand-blended-cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 24:791-802, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.028>
- [12] K. Kondepudi, K. V. L. Subramaniam, B. Nematollahi, S. H. Bong e J. Sanjayan. Study of particle packing and paste rheology in alkali activated mixtures to meet the rheology demands of 3D Concrete Printing. *Cement and Concrete Composites*, 131:104581, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104581>
- [13] O. Koutný, D. Snoeck, F. V. D. Vurst e N. Belie. Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. *Cement and Concrete Research*, 88:29-40, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.009>
- [14] L. Kucharska e M. Moczko Influence of silica fume on the rheological properties of the matrices of high-performance concretes. *Advances in Cement Research*, 6, 24:139-145, 1994. <https://doi.org/10.1680/adcr.1994.6.24.139>
- [15] R. C. Lopes. *Estudo de ensaios e parâmetros de transporte de cloretos no concreto para aplicação em modelos preditivos de vida útil*. 2022. 229 f. Dissertação (Mestrado Em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal De Goiás, Goiânia, 2022.
- [16] R.C. Lopes, A.M. Oliveira e O. Cascudo. Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos como Parâmetro de Durabilidade em Concretos com Diferentes Classes de Resistência Mecânica e sem Adições Minererais. In: CONGRESOS LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN y CONGRESOS DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 16, 2022, Evento eletrônico. Anais... ALCONPAT. p. 2124-2134.

- [17] S. M. Mansour, M. T. Abadlia, K. Bekkour e I. Messaoudene. Improvement of Rheological Behaviour of Cement Pastes by Incorporating Metakaolin. *European Journal of Scientific Research*, 42, 3:442-452, 2010. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
- [18] A. Mohammed, S. Rafiq, W. Mahmood, R. Noaman, H. Al-Darkazali, K. Ghafor e W. Qadir. Microstructure characterizations, thermal properties, yield stress, plastic viscosity and compression strength of cement paste modified with nanosilica. *Journal of Materials Research and Technology*, 9:10941-10956, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.083>
- [19] N. S. Msinjili, W. Schmidt, B. Mota, S. Leinitz e H. C. Kühne, A. Rogge. The effect of superplasticizers on rheology and early hydration kinetics of rice husk ash-blended cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 150:511-519, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.197>
- [20] M. Nehdi, S. Mindess e P. C. Aytcin. Statistical modelling of the micro filler effect on the rheology of composite cement pastes. *Advances in Cement Research*, 9, 33:37-46, 1997. <https://doi.org/10.1680/adcr.1997.9.33.37>
- [21] S. Ng e H. Justnes. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 65:41-54, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.005>
- [22] A. M. Oliveira e O. Cascudo. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 192:467-477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>
- [23] A. M. Oliveira, O. Cascudo e J.R. Santos. Estudo Reológico: Viscosidade Plástica e Tensão de Cisalhamento de Pastas de Cimento Analisando a Influência do Tipo e do Teor de Aditivos Químicos Rheological Study: Viscosity and Shear Stress of Cement Pastes Analyzing the Influence of Type and Content of Chemical Admixtures. In: 63° CBC – CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Anais... 63° CBC, Brasília, IBRACON: São Paulo, p.1-15.
- [24] A. Papo e L. Piani. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 34:2097-2101, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.017> Get rights and content
- [25] C. K. Park, M. H. Noh e T. H. Park. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35:842-849, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.002>
- [26] F. Puertas, H. Santos, M. Palacios e S. M. Ramírez. Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research*, 17, 2:77-89, 2005.
- [27] M. Sahmaran, H. Christianto e I. O. Yaman. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement Concrete Research*, 28:432-440, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003>
- [28] T. M. Salem. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement–silica fume and calcium hydroxide–silica fume pastes. *Cement and Concrete Research*, 32:1473-1481, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00809-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00809-8)
- [29] F. N. Santos, S. R. G. Sousa, A. J. F. Bombard e S. L. Vieira. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using mixture design of experiments. *Construction and Building Materials*, 143:92-103, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.001>

- [30] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza e W. L. Repette. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23:2487-2491, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005>
- [31] N. Shanahan, V. Tran, A. Williams e A. Zayed. Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture. *Construction and Building Materials*, 123:745-753, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.094>
- [32] M. A. Schultz e L. J. Struble. Use of oscillatory shear to study flow behavior of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, 23,2:273-282, 1993.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90092-N](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90092-N)
- [33] H. Valera, G. Barluenga, I. Palomar e A. Sepulcre. Synergies on rheology and structural build-up of fresh cement pastes with nanoclays, nanosilica and viscosity modifying admixtures. *Construction and Building Materials*, 308:125097, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125097>
- [34] H. Vikan e H. Justnes. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone. *Cement and Concrete Research*, 37:1512-1517, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.012>
- [35] X. Zhang e J. Han. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30:827-830, 2000.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00236-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00236-2)