

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

**Avaliação das Propriedades do Concreto quando Utilizado
após o Tempo Máximo de Mistura e Transporte
Especificado pela NBR 7212**

Eduardo Polesello

Porto Alegre
2018

EDUARDO POLESELLO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO QUANDO
UTILIZADO APÓS O TEMPO MÁXIMO DE MISTURA E
TRANSPORTE ESPECIFICADO PELA NBR 7212**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
2018

CIP - Catalogação na Publicação

Polesello, Eduardo

Avaliação das Propriedades do Concreto quando Utilizado após o Tempo Máximo de Mistura e Transporte Especificado pela NBR 7212 / Eduardo Polesello. -- 2018.

226 f.

Orientadoras: Prof.a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Prof.a. Dra. Angela Borges Masuero.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Concreto dosado em Central. 2. Tempo de mistura. 3. Durabilidade. 4. Superplastificante. I. Dal Molin, Prof.a. Dra. Denise Carpena Coitinho, orient. II. Masuero, Prof.a. Dra. Angela Borges,

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

EDUARDO POLESELLO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO QUANDO
UTILIZADO APÓS O TEMPO MÁXIMO DE MISTURA E
TRANSPORTE ESPECIFICADO PELA NBR 7212**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Construção Civil, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 10 de Maio de 2018.

Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof.a. Angela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vladimir Antonio Paulon (UNICAMP)
Dr. pela Universidade de São Paulo.

Prof. Fernando Antonio Piazza Recena (PUCRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de Leeds, Grã Bretanha.

Dedico este trabalho a você Gisele, pela presença em todos os momentos, e aos meus queridos pais, Ester e Ermindo, pelo exemplo e amor de sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, um grande agradecimento a Deus, pela presença constante em minha vida, pela saúde e proteção, pelas experiências vividas e conquistas alcançadas, guiando meus passos dia após dia.

Aos meus amados pais, a quem agradeço por mais esse momento vivido em minha vida. Muito obrigado pelos ensinamentos e por todo amor e exemplos de vida diários.

A vida se completa quando podemos dividir os momentos vividos com quem amamos. Obrigado Gisele por tornar minha vida mais completa. Sua compreensão, atenção, companheirismo, paciência, presença e amor foram fundamentais para essa conquista. Poder dividir meus dias contigo me torna um ser humano melhor, obrigado!

Minhas queridas orientadoras professoras Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Ângela Borges Masuero, agradeço imensamente por todos esses anos de convívio, amizade e presença nos momentos de maiores dúvidas e angústias. Foi uma honra ter sido orientado por vocês, são exemplos de seres humanos e profissionais. Obrigado pela confiança! Contem sempre comigo.

Aos colegas e amigos do NORIE pelo convívio e amizade. Em especial ao amigo Abraão Bernardo Rohden pela colaboração e apoio incondicionais ao longo dessa pesquisa, ao Marlon Longhi pelo auxílio na análise de alguns resultados, ao Airton pelo auxílio nas etapas de laboratório e a Laura Silvestro pelo apoio na realização nos ensaios de cloretos.

Agradeço ao professor Alexandre Silva de Vargas e ao acadêmico Nicollas A. Thoen, da Universidade Feevale, pelo auxílio na realização e análise de ensaios microestruturais.

Aos amigos e profissionais que sempre contribuíram muito com seus conhecimentos sobre a tecnologia de concreto, em especial ao engenheiro Fábio Viecilli e ao engenheiro e professor Fernando Antonio Piazza Recena.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de qualidade e por oportunizar a conclusão desse sonho. À Universidade Feevale, por permitir o exercício da docência universitária com ética e responsabilidade.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para conclusão desta etapa importante na minha vida. Muito Obrigado!

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

POLESELLO, E. **Avaliação das Propriedades do Concreto quando Utilizado após o Tempo Máximo de Mistura e Transporte Especificado pela NBR 7212**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

As propriedades requeridas em relação à resistência e à durabilidade de um concreto no estado endurecido estão diretamente ligadas às suas condições no estado fresco, sendo assim, etapas como processo de mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto devem ser adequadamente monitoradas e controladas ao longo do tempo, durante seu estado fresco. A norma brasileira NBR 7212 (ABNT, 2012), para execução de concreto dosado em central, estipula o tempo máximo para que o concreto seja completamente descarregado (aplicado) em 150 minutos. No entanto, em diversas situações práticas observam-se contratempos relacionados com atrasos na execução da obra ou no transporte para entrega do concreto, fazendo com que no momento de lançamento este concreto seja rejeitado em função do tempo decorrido entre o início da mistura dos materiais e a aplicação do concreto no canteiro de obra, além de apresentar considerável perda em sua trabalhabilidade. Porém, principalmente, em função de cronogramas de obras, de custo e da preocupação ambiental, fica clara a necessidade de alternativas que viabilizem sua utilização, garantindo as condições adequadas para lançamento e adensamento, sem que haja impactos negativos em suas propriedades finais. O objetivo desta pesquisa consiste na avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, quando mantido em mistura prolongada e utilizado após esse tempo máximo de mistura e transporte especificado pela norma, a partir do primeiro contato do cimento com a água. Os concretos foram produzidos com dois tipos de cimento, CPIV e CPII, e seu abatimento foi mantido ao longo de 6 horas de mistura com a incorporação de aditivo superplastificante à base policarboxilato. Nesse estudo adotaram-se três relações a/c e a produção dos concretos foi realizada em laboratório e em condição real numa central dosadora de concreto. Os resultados obtidos, para os materiais e procedimento utilizados, avaliando o comportamento do concreto em relação ao módulo de deformação, calor de hidratação gerado, carbonatação e penetração de cloretos pela exposição à condição natural, mostram que não há perda no seu desempenho final, quando utilizado acima do tempo especificado por norma, adotando o procedimento de manutenção do abatimento com a incorporação de aditivo superplastificante à base de policarboxilato, conforme proposta deste estudo. Análises do comportamento reológico e microestruturais em pastas de cimento, com as mesmas características utilizadas na produção dos concretos, corroboram com os resultados obtidos.

Palavras-chave: *Concreto dosado em central, tempo de mistura, durabilidade, superplastificante.*

ABSTRACT

POLESELLO, E. **Avaliação das Propriedades do Concreto quando Utilizado após o Tempo Máximo de Mistura e Transporte Especificado pela NBR 7212.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

Evaluation of Compressive Strength and Water Absorption of Concrete Used after the Maximum Time of Mixing and Transport Specified by NBR 7212.

The required properties in relation to the concrete strength and durability in the hardened state are directly linked to its fresh state conditions, thus, steps such as concrete mixing, transporting, launching and compacting must be properly monitored and controlled during this material production. The Brazilian Standard (NBR 7212/2012) for central mixed concrete stipulates as 150 minutes the maximum time for completely concrete discharging (applying). However, there are setbacks related to execution or transportation delays, resulting in workability loss, often causing this concrete rejection in building plants. Therefore, due to work schedules, cost and environmental concern, it is clear the need for alternatives that make feasible this concrete use, guaranteeing the appropriate launching conditions and densification, without negative impacts on its hardened properties. In this context, this research subject is to evaluate the concrete mechanical properties and durability, when kept in prolonged mixing conditions and used after the maximum mixing and transport time specified by the Brazilian standard. The concretes were produced with two kinds of Portland Brazilian cement, called CP IV e CP II, with fixed consistency and with polycarboxylate superplasticizer addition. Additionally, three water/cement ratios were analyzed in concretes mixed in the laboratory and central mixed conditions. In this research, where analyzed concretes with an overpass time of application, maintaining the consistency with superplasticizer addition. With the materials and procedures utilized, it was not observed loss on concrete performance related to the modulus of elasticity, hydration heat, carbonation and chloride penetration under natural exposure. The rheological and microstructural analysis in cement pastes, reproducing the concrete proprieties, corroborates with this conclusion.

Key-words: *Concrete produced in mix plant, mixing time, durability, superplasticizer.*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | 13 |
| LISTA DE TABELAS | 20 |
| 1. INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1. Problema de Pesquisa e Justificativa | 25 |
| 1.2. Objetivos | 27 |
| 1.2.1. Objetivo Principal | 27 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 27 |
| 1.3. Estrutura do Trabalho | 28 |
| 2. CONCRETO: COMPORTAMENTO E PROPRIEDADES | 29 |
| 2.1. Hidratação do Cimento | 29 |
| 2.2. Comportamento do Concreto nas Primeiras Idades | 36 |
| 2.2.1. Perda de Trabalhabilidade | 37 |
| 2.2.2. Efeito da Mistura Prolongada | 40 |
| 2.3. Reologia do Concreto Fresco | 43 |
| 2.3.1. Parâmetros Reológicos | 47 |
| 2.4. Aditivos para Concreto | 49 |
| 2.4.1. Aditivos Redutores de Água | 50 |
| 2.4.2. Ação dos Aditivos Superplastificantes | 52 |
| 2.4.3. Interação do Aditivo com o Cimento | 56 |
| 2.4.4. Efeitos do Uso do Aditivo Superplastificante | 61 |
| 2.5. Redosagem do Concreto | 65 |
| 2.5.1. Redosagem do Concreto com Água | 65 |
| 2.5.2. Redosagem do Concreto com Cimento | 66 |
| 2.5.3. Redosagem do Concreto com Aditivo | 67 |
| 2.5.3.1. Resistência à compressão | 67 |
| 2.5.3.2. Absorção e permeabilidade à água | 71 |
| 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 74 |
| 3.1. Definição das Variáveis de Estudo | 74 |
| 3.2. Planejamento Experimental | 77 |

| | |
|--|------------|
| | 11 |
| 3.3. Caracterização dos Materiais | 80 |
| 3.3.1. Cimento Portland | 80 |
| 3.3.2. Agregado Miúdo | 81 |
| 3.3.3. Agregado Graúdo | 82 |
| 3.3.4. Aditivo e Água | 83 |
| 3.4. Produção dos Concretos | 83 |
| 3.4.1. Traços Utilizados | 83 |
| 3.4.2. Produção em Laboratório | 84 |
| 3.4.3. Produção na Central Dosadora de Concreto..... | 86 |
| 3.5. Ensaio Realizados | 90 |
| 3.5.1. Calor de Hidratação | 91 |
| 3.5.1.1. Calor de hidratação em blocos de concreto | 92 |
| 3.5.1.2. Calor de hidratação em pastas | 93 |
| 3.5.2. Caracterização Reológica | 96 |
| 3.5.3. Módulo de Elasticidade | 99 |
| 3.5.4. Durabilidade do Concreto | 100 |
| 3.5.4.1. Carbonatação | 100 |
| 3.5.4.2. Penetração de Íons Cloreto | 102 |
| 3.5.5. Análise Microestrutural | 105 |
| 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 108 |
| 4.1. Calor de Hidratação | 108 |
| 4.1.1. Calor de Hidratação em Pastas | 109 |
| 4.1.2. Calor de Hidratação em Blocos de Concreto | 113 |
| 4.2. Comportamento Reológico | 119 |
| 4.2.1. Curvas de Cisalhamento | 119 |
| 4.2.2. Áreas de Histerese | 131 |
| 4.2.3. Parâmetros Reológicos | 133 |
| 4.2.3.1. Tensão de Escoamento | 135 |
| 4.2.3.2. Viscosidade Plástica | 140 |
| 4.3. Módulo de Elasticidade | 143 |
| 4.3.1. Concretos Produzidos em Laboratório | 144 |

| | |
|--|------------|
| | 12 |
| 4.3.2. Concretos Produzidos na Central de Concreto | 145 |
| 4.3.3. Análise dos Resultados do Módulo de Elasticidade | 147 |
| 4.4. Durabilidade do Concreto | 150 |
| 4.4.1. Carbonatação | 150 |
| 4.4.2. Penetração de Íons Cloreto | 157 |
| 4.5. Análise Microestrutural | 170 |
| 4.5.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 171 |
| 4.5.2. Análise Termogravimétrica (TGA) | 174 |
| 4.5.3. Espectrometria por Infravermelho com Transformação de Fourier (FTIR) | 179 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 182 |
| 5.1. Conclusões | 184 |
| 5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros | 186 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 188 |
| APÊNDICE A – Áreas de Histerese obtidas pelo Ensaio de Reologia em Pastas | 199 |
| APÊNDICE B – Tensões de Escoamento e Viscosidades obtidas pelo Ensaio de Reologia em Pastas | 212 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: consumo aparente de cimento (fonte: snic.org) | 23 |
| Figura 2: consumo relativo de cimento pelas centrais dosadoras de concreto ao longo do tempo (MARANHÃO; REGATTIERI, 2011)..... | 24 |
| Figura 3: representação esquemática resumida da formação e hidratação do clínquer Portland (NEVILLE; BROOKS, 2013) | 30 |
| Figura 4: representação esquemática da liberação de calor durante a hidratação do cimento (NELSON, E.B. 1990)..... | 32 |
| Figura 5: microestrutura durante a hidratação do cimento Portland: (a) grão de cimento anidro e o efeito da hidratação depois de (b) 10 minutos, (c) 10 horas, (d) 18 horas, (e) 1 a 3 dias e (f) 2 semanas (Scrivener e Pratt, 1984, apud Bishop et al, 2003)..... | 35 |
| Figura 6: Efeito da temperatura no consumo de água necessário para obtenção de um abatimento de 75 mm no concreto (SOROKA, RAVINA; 1998). | 38 |
| Figura 7: Resistência à compressão e abatimentos de concretos quando submetidos à mistura prolongada (KIRCA <i>et al.</i> , 2002)..... | 41 |
| Figura 8: Representação esquemática das camadas adsorvidas de ligação e das pontes líquidas de ligação entre duas partículas imersas num meio líquido (PILEGGI, 2001 <i>apud</i> FRANÇA <i>et al.</i> , 2012). | 43 |
| Figura 9: Diferentes comportamentos de fluxos possíveis dos fluidos (adaptado de HOPPE <i>et al.</i> , 2007)..... | 44 |
| Figura 10: Equação de Bingham para um fluido (FERRARIS, 1999). | 46 |
| Figura 11: Reologia de concretos com: (a) mesmas tensões de escoamento e diferentes viscosidades e (b) mesmas viscosidades e diferentes tensões de escoamento (FERRARIS, 1999). | 48 |
| Figura 12: Diagrama esquemático do efeito dos superplastificantes no concreto nos estados fresco e endurecido (COLLERPADI, 2005). | 51 |
| Figura 13: Ilustração esquemática do polímero sulfonado (SNF) e seu efeito de repulsão eletrostática sobre a dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, 2005)..... | 53 |
| Figura 14: Potencial zeta de pastas de cimento com superplastificantes a base policarboxilato (PC) e a base naftaleno sulfonado (SNF) (COLLEPARDI, 2005)..... | 54 |
| Figura 15: Ilustração esquemática do superplastificante a base policarboxilato (PC) e seu efeito de repulsão estérica na dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, 2005). . | 55 |
| Figura 16: Adsorção do superplastificante (SMF) sobre os compostos do cimento na hidratação (RAMACHANDRAN, 1987). | 57 |
| Figura 17: Evolução da fração de superplastificante adsorvido durante hidratação do C ₃ A com gipsita em uma solução de cal saturada (POURCHET <i>et al.</i> , 2006)..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 18: Microscopia eletrônica de varredura com imagem típica de etringita obtida uma hora após o início da hidratação da mistura de C_3A e gipsita (a) sem superplastificante ou (b) com 5% de policarboxilato (POURCHET <i>et al.</i> , 2006). | 59 |
| Figura 19: Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários para o concreto aos 3 dias de idade com cimento tipo CPIV e relação a/c de 0,68 (a) sem aditivo superplastificante no tempo de mistura 0 hora, e com aditivo superplastificante nos tempos de (b) 4 horas e (c) 6 horas. Magnificação: 5000 X (POLESELLO, 2012). | 60 |
| Figura 20: Perda de abatimento de concretos (temperatura: 20°C) com superplastificantes a base policarboxilato e naftaleno (COLLEPARDI, 1993). | 64 |
| Figura 21: Resistência média à compressão aos 28 dias do concreto produzido em laboratório com (a) cimento CP IV 32 RS e (b) CP II Z 32 (POLESELLO, 2012). | 69 |
| Figura 22: Resistência média à compressão aos 28 dias do concreto produzido na central dosadora com (a) cimento CP IV 32 RS e (b) CP II Z 32 (POLESELLO, 2012). | 69 |
| Figura 23: Efeito da redosagem com superplastificante na resistência à compressão de concretos produzidos com adições minerais (ERDOĞDU <i>et al.</i> , 2011). | 70 |
| Figura 24: Efeito da redosagem com superplastificante no comportamento do concreto, produzido pela central dosadora, em relação à absorção de água por capilaridade para as relações a/c de 0,68; 0,52 e 0,40, de cima para baixo da figura, respectivamente, com (a) cimento CP II Z 32 (b) cimento CP IV 32 RS (POLESELLO, 2012). | 72 |
| Figura 25: Efeito da redosagem na permeabilidade à água (SOBHANI <i>et al.</i> , 2012). | 73 |
| Figura 26: representação esquemática das variáveis dependentes da pesquisa | 76 |
| Figura 27: combinações entre as variáveis independentes da pesquisa | 77 |
| Figura 28: procedimento para manutenção da trabalhabilidade do concreto mantido em mistura prolongada ao longo do tempo | 78 |
| Figura 29: procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova: (a) moldagem dos corpos de prova, (b) cura inicial, (c) identificação e (d) cura final | 85 |
| Figura 30: verificação e restabelecimento do abatimento à condição inicial (120+-20mm) com a incorporação de aditivo superplastificante à mistura durante o período de 6 horas ... | 86 |
| Figura 31: processo de carregamento do concreto na central dosadora: (a) carregamento dos agregados, (b) transporte dos agregados e (c) carregamento do caminhão | 87 |
| Figura 32: processo de dosagem final do concreto na central dosadora: (a) dosador, (b) água final e (c) aspecto final do concreto | 87 |
| Figura 33: adição do superplastificante ao concreto: (a) cano de pvc adaptado para colocação do aditivo, (b) posicionamento do cano e (c) adição do aditivo ao concreto | 88 |
| Figura 34: modelo de fôrmas para produção dos blocos de concreto: (a) detalhe das partes da fôrma (b) detalhe dos encaixes e (c) fôrmas prontas para concretagem | 89 |
| Figura 35: concretagem dos blocos de concreto: (a) concretagem de meio bloco e vibração, (b) concretagem de todo o bloco e (c) vibração final do concreto | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figura 36: (a) parede construída com os blocos e (b) localização da parede em relação ao mar (disponível em: < https://www.google.com.br/maps >)..... | 90 |
| Figura 37: detalhamento dos ensaios realizados na pesquisa | 91 |
| Figura 38: (a) modelo de termopar utilizado, (b) posicionamento do termopar no centro do bloco de concreto e (c) proteção do termopar e acabamento final do bloco | 92 |
| Figura 39: (a) instrumento utilizado para leitura, (b) proteção superior dos blocos com placa de poliestireno expandido, e (c) leitura da temperatura nos blocos de concreto | 93 |
| Figura 40: curva típica de um calorímetro semi-adiabático (SANDBERG; BENINI, 2008) | 94 |
| Figura 41: (a) calorímetro semi-adiabático utilizado no ensaio e (b) detalhe dos pontos de leitura do aparelho..... | 95 |
| Figura 42: preparo das pastas para ensaio no calorímetro: (a) preparo e pesagem dos materiais, (b) incorporação do superplastificante e mistura da pasta e (c) introdução das pastas no calorímetro para ensaio | 96 |
| Figura 43: reômetro Brookfield R/S Plus: (a) modelo utilizado na pesquisa e (b) detalhe do cilindro interno utilizado para mistura das amostras durante ensaio | 97 |
| Figura 44: programa de medição utilizado para o ensaio reológico (TALERO <i>et al.</i> , 2013).. | 97 |
| Figura 45: (a) argamassadeira utilizada, (b) processo de mistura das pastas e (c) descanso das pastas de cimento..... | 98 |
| Figura 46: ensaio do módulo de elasticidade secante (E_{cs}): (a) preparo do corpo de prova e (b) execução do ensaio | 100 |
| Figura 47: (a) extração de corpos de prova, (b) corpo de prova extraído, (c) ensaio de compressão diametral e (d) corpos de prova para ensaio de carbonatação..... | 101 |
| Figura 48: ensaio de carbonatação do concreto: (a) aspersão de fenolftaleína, (b) aspecto das amostras e (c) leituras da profundidade de carbonatação com auxílio de um gabarito para indicar sempre a mesma posição de leitura..... | 102 |
| Figura 49: coleta das amostras: (a) marcação das profundidades de perfuração, (b) coleta do pó e (c) armazenamento das amostras..... | 103 |
| Figura 50: (a) equipamento e concentrações padrão para calibração e (b) calibração | 104 |
| Figura 51: procedimento de ensaio: (a) pesagem 3g da amostra, (b) medição 20 ml de água, (c) agitação mecânica, (d) descanso da mistura e (e) leitura do % de cloretos..... | 105 |
| Figura 52: processo de secagem das amostras após lavagem com álcool isopropílico em (a) 1 minuto, (b) 10 minutos, (c) 20 minutos e (d) 30 minutos | 106 |
| Figura 53: calorimetria semi-adiabática das pastas com cimento tipo CP II Z 32 para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$ | 109 |
| Figura 54: (a) temperatura máxima registrada na hidratação das pastas com cimento tipo CP II Z 32 e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor para cada pasta | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 55: calorimetria semi-adiabática das pastas com cimento tipo CP IV 32 RS para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$ | 110 |
| Figura 56: (a) temperatura máxima registrada na hidratação das pastas com cimento tipo CP IV 32 RS e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor para cada pasta | 111 |
| Figura 57: influência da dosagem do aditivo superplastificante sobre o momento em que ocorre a máxima temperatura registrada nas curvas calorimétricas das pastas estudadas para (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS..... | 112 |
| Figura 58: calor de hidratação dos blocos de concreto produzidos com cimento tipo CP II Z 32 para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$ | 114 |
| Figura 59: (a) temperatura máxima registrada na hidratação dos blocos produzidos com cimento tipo CP II Z 32 e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor em cada bloco | 114 |
| Figura 60: calor de hidratação dos blocos de concreto produzidos com cimento tipo CP IV 32 RS para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$ | 115 |
| Figura 61: (a) temperatura máxima registrada na hidratação dos blocos produzidos com cimento tipo CP IV 32 RS e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor em cada bloco. | 115 |
| Figura 62: comportamento do aumento da temperatura gerada pelo calor de hidratação com a aceleração das reações para (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS..... | 116 |
| Figura 63: comportamento do concreto, avaliando o calor de hidratação com a resistência à compressão aos 28 dias, em função do tipo de cimento | 118 |
| Figura 64: influência da dosagem do aditivo superplastificante sobre o momento em que ocorre a máxima temperatura registrada nas curvas calorimétricas do concreto produzido na central dosadora para (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS..... | 119 |
| Figura 65: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,40$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas..... | 120 |
| Figura 66: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,52$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas..... | 121 |
| Figura 67: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,68$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas..... | 122 |
| Figura 68: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,40$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas | 123 |
| Figura 69: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,52$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas | 124 |
| Figura 70: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,68$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 71: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,52$, mantida sem mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas e f) 5 horas | 127 |
| Figura 72: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,52$, mantida sem mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas | 128 |
| Figura 73: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,52$, mantida em mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas | 129 |
| Figura 74: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,52$, mantida em mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas | 130 |
| Figura 75: comportamento das áreas de histerese obtido pelas curvas de cisalhamento nas pastas produzidas com (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS..... | 132 |
| Figura 76: comportamento das áreas de histerese obtido pelas curvas de cisalhamento para pastas produzidas com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS..... | 132 |
| Figura 77: comportamento da tensão de escoamento obtido pelas curvas de cisalhamento nas pastas produzidas com (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 136 |
| Figura 78: comportamento da tensão de escoamento obtido pelas curvas de cisalhamento para pastas produzidas com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 136 |
| Figura 79: comportamento do abatimento do concreto e da tensão de escoamento da pasta produzidos com relação a/c igual a 0,40 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 138 |
| Figura 80: comportamento do abatimento do concreto e da tensão de escoamento da pasta produzidos com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 139 |
| Figura 81: comportamento do abatimento do concreto e da tensão de escoamento da pasta produzidos com relação a/c igual a 0,68 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 139 |
| Figura 82: comportamento da viscosidade obtido pelas curvas de cisalhamento nas pastas em estudo para (a) relação $a/c=0,40$ com cimento CII Z 32, (b) relação $a/c=0,40$ com cimento CP IV 32 RS, (c) relação $a/c=0,52$ com cimento CII Z 32, (d) relação $a/c=0,52$ com cimento CP IV 32 RS, (e) relação $a/c=0,68$ com cimento CII Z 32 e (f) relação $a/c=0,68$ com cimento CP IV 32 RS | 141 |
| Figura 83: comportamento da viscosidade $V03$ obtido pelas curvas de cisalhamento para pastas produzidas com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS..... | 143 |
| Figura 84: comportamento do concreto produzido em laboratório quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias em função de: (a) relação água/cimento e (b) tipo de cimento | 145 |

| | |
|--|-----|
| Figura 85: comportamento do concreto produzido na central quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias em função de: (a) relação água/cimento e (b) tipo de cimento | 147 |
| Figura 86: comportamento do concreto produzido em laboratório quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias em relação ao produzido na central..... | 148 |
| Figura 87: comportamento do módulo de elasticidade em relação à resistência à compressão do concreto | 149 |
| Figura 88: aspecto da carbonatação nas amostras extraídas dos blocos de concreto produzido com cimento CP II Z 32 para relação a/c igual a (a) 0,68, (b) 0,52 e (c) 0,40 | 151 |
| Figura 89: aspecto da carbonatação nas amostras extraídas dos blocos de concreto produzido com cimento CP IV 32 RS para relação a/c igual a (a) 0,68, (b) 0,52 e (c) 0,40 | 152 |
| Figura 90: valores médios observados de profundidade de carbonatação para os concretos produzidos com: (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 153 |
| Figura 91: comportamento do concreto produzido na central quanto à verificação da profundidade de carbonatação aos 2 anos de idade em função (a) relação a/c, (b) tipo de cimento e (c) tempo de mistura..... | 154 |
| Figura 92: influência da relação a/c na profundidade de carbonatação: (a) estudo de Salta (1996) apud Rodrigues (2017) e (b) resultados da atual pesquisa | 155 |
| Figura 93: comportamento carbonatação do concreto em relação à dosagem de cimento utilizada nos traços produzidos com (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS | 156 |
| Figura 94: comportamento da carbonatação em relação à absorção de água por capilaridade do concreto..... | 157 |
| Figura 95: perfis de cloretos, aos 2 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP II Z 32 para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40 | 158 |
| Figura 96: perfis de cloretos, aos 2 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP IV 32 RS para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40..... | 159 |
| Figura 97: comportamento do concreto quanto à penetração de cloretos avaliado para um período de exposição ao ambiente natural de 2 anos em função (a) da relação a/c, (b) do tipo de cimento, (c) da profundidade de verificação, (d) interação da relação a/c com a profundidade de verificação e (e) interação entre o tipo de cimento com a profundidade de verificação..... | 161 |
| Figura 98: perfis de cloretos, aos 6 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP II Z 32 para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40 | 164 |
| Figura 99: perfis de cloretos, aos 6 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP IV 32 RS para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40..... | 164 |
| Figura 100: comportamento do concreto quanto à penetração de cloretos avaliado para um período de exposição ao ambiente natural de 6 anos em função (a) da relação a/c, (b) da profundidade de verificação, (c) interação da relação a/c com a profundidade de verificação e (d) interação entre o tipo de cimento com a profundidade de verificação | 166 |

- Figura 101: influência quanto ao % cloretos solúveis no concreto, aos 2 anos de exposição, em comparação com (a) relação a/c e (b) absorção de água por capilaridade 167
- Figura 102: distribuição típica de cloretos livres (HONG e HOOTON, 2000)..... 168
- Figura 103: comportamento do concreto quanto ao % cloretos solúveis em comparação com a carbonatação para concreto com cimento (a) CP II Z 32 e (b) CP IV 32 RS 169
- Figura 104: MEV por elétrons secundários para pasta com cimento CP II Z 32 e relação a/c de 0,40 nos tempos de mistura de a) 0 hora, b) 4 horas e c) 6 horas. Magnificação: 2000 X 171
- Figura 105: MEV por elétrons secundários para pasta com cimento CP II Z 32 e relação a/c de 0,40 nos tempos de mistura de a) 4 horas e b) 6 horas. Magnificação: 10000 X 172
- Figura 106: comportamento do concreto produzido na central dosadora em relação à sua durabilidade avaliada em função: a) da absorção de água por capilaridade (POLESELLO, 2012) e b) da profundidade de carbonatação aos 2 anos de exposição..... 173
- Figura 107: comportamento do concreto produzido na central dosadora em relação à sua durabilidade avaliada em função: a) da penetração de íons cloreto aos 2 anos de exposição e b) da penetração de íons cloreto aos 6 anos de exposição..... 174
- Figura 108: Perfis de TG e DTG da pasta de cimento redosada com aditivo superplastificante à base policarboxilato para: a) cimento, e para os tempos de mistura de: b) 0h, c) 2h antes da adição do aditivo, d) 2h após adição do aditivo, e) 4h após adição do aditivo e f) 6h após adição do aditivo 175
- Figura 109: Perfis de TG da pasta de cimento para o tempo de mistura 0h e para as pastas redosadas com aditivo superplastificante à base policarboxilato nos tempos 2h, 4h e 6h .. 176
- Figura 110: Perfis de DTG da pasta de cimento para o tempo de mistura 0h e para as pastas redosadas com aditivo superplastificante à base policarboxilato nos tempos 2h, 4h e 6h .. 176
- Figura 111: Decomposição da água combinada para as pastas analisadas ao longo do tempo de mistura, pela curva termogravimétrica para uma faixa de temperatura até 300°C 178
- Figura 112: comportamento da decomposição de água combinada, até a temperatura de 300°C em relação a hora do pico máximo de temperatura registrado no calor de hidratação dos concretos produzidos na central dosadora, para relação a/c igual a 0,52 179
- Figura 113: Espectro FTIR a) do cimento anidro, e para os tempos de mistura de: b) 0h, c) 2h após adição do aditivo, d) 4h após adição do aditivo e e) 6h após adição do aditivo 180

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido em laboratório com cimento tipo CP IV 32 RS | 79 |
| Tabela 2: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido em laboratório com cimento tipo CP II Z 32 | 79 |
| Tabela 3: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido na central dosadora de concreto com cimento tipo CP IV 32 RS..... | 79 |
| Tabela 4: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido na central dosadora de concreto com cimento tipo CP II Z 32 | 79 |
| Tabela 5: características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados na pesquisa | 80 |
| Tabela 6: características químicas dos cimentos utilizados na pesquisa | 81 |
| Tabela 7: características físicas do agregado miúdo | 81 |
| Tabela 8: características físicas do agregado graúdo | 82 |
| Tabela 9: especificações técnicas dos aditivos | 83 |
| Tabela 10: proporcionamento dos materiais utilizados nas dosagens dos concretos | 84 |
| Tabela 11: estágios de medições realizados no ensaio reológico | 98 |
| Tabela 12: Áreas de histerese das curvas de cisalhamento | 131 |
| Tabela 13: caracterização do comportamento reológico das misturas..... | 134 |
| Tabela 14: Tensão de escoamento das curvas de cisalhamento..... | 135 |
| Tabela 15: Módulo de elasticidade secante médio, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 dias, do concreto produzido em laboratório | 144 |
| Tabela 16: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos produzidos em laboratório..... | 144 |
| Tabela 17: Módulo de elasticidade secante médio, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 dias, do concreto produzido na central dosadora | 146 |
| Tabela 18: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos produzidos na central dosadora..... | 146 |
| Tabela 19: Resultados da ANOVA para a profundidade de carbonatação aos 2 anos de idade dos concretos produzidos na central dosadora | 153 |
| Tabela 20: Resultados da ANOVA para penetração de cloretos no concreto com exposição ao ambiente natural por 2 anos..... | 160 |
| Tabela 21: Resultados da ANOVA para penetração de cloretos no concreto com exposição ao ambiente natural por 6 anos..... | 165 |
| Tabela 22: Resumo dos resultados obtidos na pesquisa para as propriedades analisadas nos os concretos produzidos na central dosadora..... | 183 |

1 INTRODUÇÃO

Propriedades mecânicas e durabilidade de um concreto no estado endurecido estão diretamente ligadas às suas condições no estado fresco. Etapas de mistura, transporte, bombeamento, lançamento e adensamento dependem da reologia apresentada pelo concreto. Assim, um controle adequado e monitoramento de propriedades, no estado fresco até o momento de aplicação do concreto, como por exemplo, a trabalhabilidade, é fundamental para obter-se o desempenho final esperado.

É importante também observar que, para situações em que há a necessidade de um ritmo acelerado no cronograma das obras, isso demanda de seus coordenadores um aperfeiçoamento e alinhamento de todos os processos envolvidos durante a construção. Não basta apenas estipular prazos para execução de cada etapa da obra, mas sim, monitorar para que realmente estes prazos sejam cumpridos. O atraso de uma etapa, automaticamente, por envolver agendamento de várias equipes de trabalho, pode gerar um “efeito dominó”, acumulando, ao final, dias e até meses de atraso na entrega da obra, resultando em prejuízos financeiros irreversíveis.

Dentro desse contexto, as etapas de concretagem requerem um cuidado especial, pois além de toda organização e preparação da obra, há o envolvimento e participação de uma equipe externa à obra, para logística no fornecimento e lançamento do concreto. Atualmente, pela praticidade, comodidade e por exigências do mercado por um melhor controle na dosagem, assim como uniformidade e homogeneidade mais constante das misturas, cada vez mais o concreto consumido no Brasil sai de centrais dosadoras. Em função de sua resistência, durabilidade, trabalhabilidade e infinitas possibilidades arquitetônicas, o concreto está presente em obras cada vez mais complexas de engenharia, mostrando, com isso, a importância do conhecimento em relação ao seu comportamento diante das necessidades exigidas em cada situação.

Existem ao menos três razões principais pelo elevado índice de consumo do concreto. A primeira refere-se à excelente resistência do concreto à água, diferentemente da madeira e do aço comum, tornando-se um material ideal para construção de estruturas para controle,

armazenamento e transporte de água, como o uso na construção de barragens. Como segunda, destaca-se a facilidade com a qual elementos estruturais de concreto podem ser obtidos através de uma variedade de formas e tamanhos. Isso porque o concreto fresco é de consistência plástica, favorecendo o fluxo do material para o interior das fôrmas. A terceira razão para a popularidade do concreto entre engenheiros decorre do baixo custo, comparativamente a outros materiais estruturais, e da rápida disponibilidade do material para uma obra (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para Neville e Brooks (2013), um concreto é satisfatório quando apresenta, em seu estado fresco, uma consistência que permita fácil adensamento e que tenha a coesão necessária para possibilitar o transporte e o seu lançamento sem que ocorra segregação. Por outro lado, no estado endurecido, o concreto deve apresentar uma resistência à compressão satisfatória, por ser uma maneira fácil de verificar o atendimento às especificações e porque várias propriedades do concreto estão relacionadas a ela, tais como, massa específica, resistência à abrasão e à tração, durabilidade entre outras. Neville (2016) destaca que a durabilidade não significa uma vida infinita e tampouco a resistência do concreto a qualquer ação, mas é de extrema importância considerá-la de maneira explícita, juntamente com a resistência do concreto, na etapa de projeto, em decorrência das várias condições de exposição que as estruturas de concretos são expostas.

Como o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, demanda especial atenção, tendo um considerável impacto na geração de resíduos de construção. Segundo Garvin¹ (2004) apud Kazaz *et al.* (2015), de 40 a 50% da energia produzida no mundo e 16% dos recursos hídricos disponíveis são consumidos para produção de materiais de construção que acabam como resíduos, representando 50% da emissão total de CO₂ na atmosfera. Nesta poluição ambiental e consumo de recursos, deve-se notar que a fabricação de cimento tem um papel importante, que pode ser observado, ao longo da história, através do registro do seu consumo, conforme figura 1, mostrando a tendência no aumento de consumo.

¹ S. Garvin, Construction waste: the bigger picture, Presentation at Seminar “Waste Minimization in Construction – 2004: Saving Money by Reducing Waste”, Livingston, Scotland, 2004.

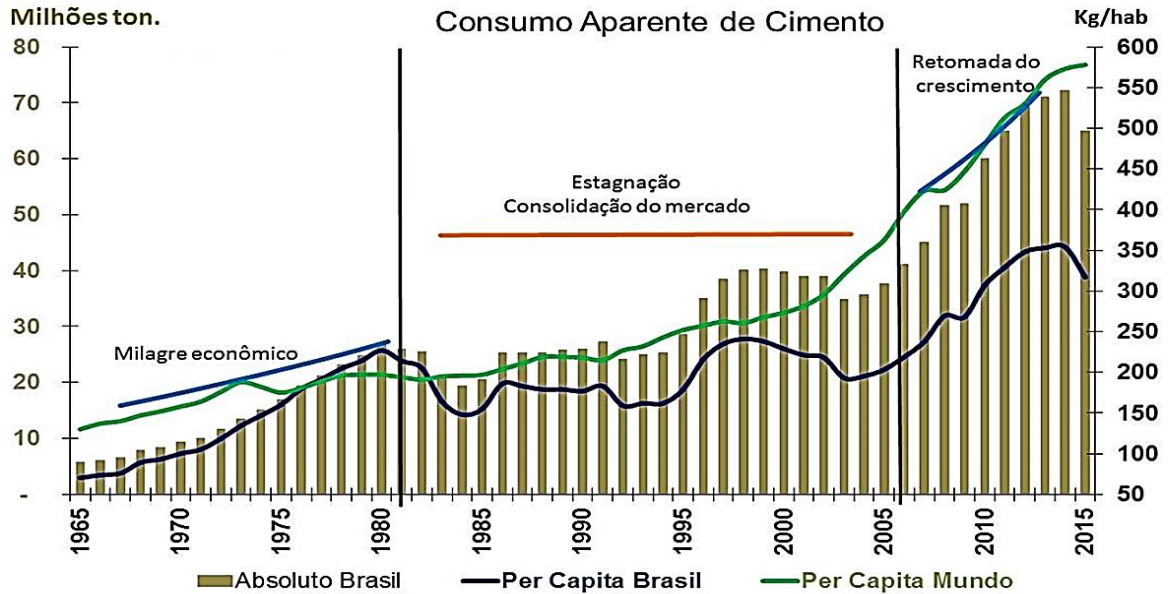


Figura 1: consumo aparente de cimento (fonte: snic.org²)

Essa demanda, em especial no Brasil, apresenta períodos de crescimento ou estagnação onde se manteve constante, porém, desde 2014 os números registram redução nesse consumo, reflexo de um período de forte crise política e econômica que o país enfrenta. A atividade da construção civil foi 7,6% menor em 2015 com relação a 2014, e na indústria do cimento não poderia ser diferente, registrando retração de 9,5% no consumo do insumo, totalizando 65 milhões de toneladas, ou seja, retornou-se ao nível de consumo em 2011 (snic.org).

Em função desses expressivos números relacionados ao consumo de cimento, uma preocupação que este setor tem está relacionada, conforme citado acima, a geração de gases de efeito estufa originados durante sua produção, o que tem demandado muitos esforços na eficácia dos processos buscando a redução dessas emissões. Paralelamente, é indispensável à preocupação da cadeia construtiva em relação à adoção de alternativas capazes de reduzir a geração da perda de cimento ou resíduos de materiais que demandem sua utilização para a produção, contribuindo na diminuição desse impacto ao meio ambiente.

No Brasil, em decorrência do amadurecimento e desenvolvimento do setor, observa-se que o consumo de cimento em centrais dosadoras de concreto tem aumentado (figura 2),

² Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.

passando dos 8,9% em 1996 para 18% no ano de 2010, mostrando a evolução da participação que o concreto dosado em central apresenta diante das demandas da construção civil (MARANHÃO; REGATTIERI, 2011).

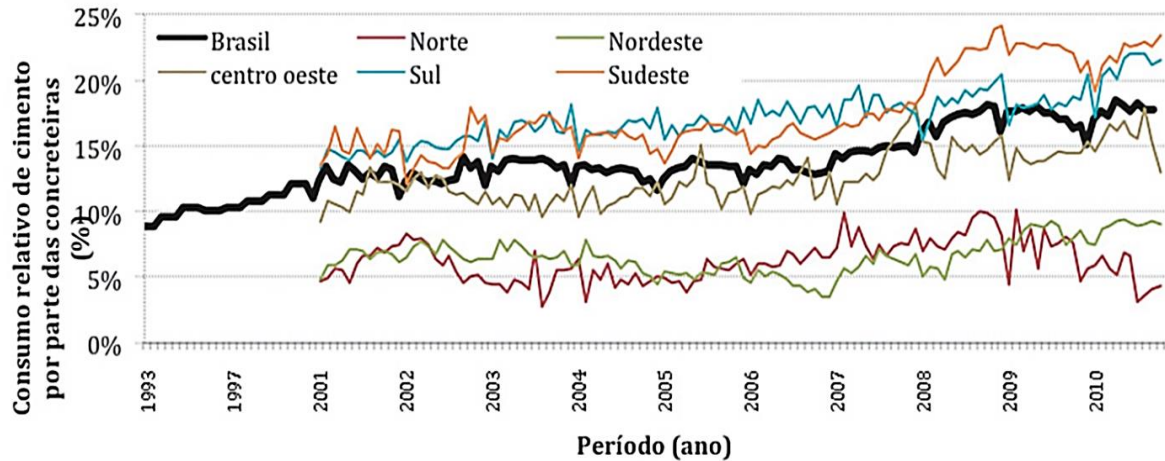


Figura 2: consumo relativo de cimento pelas centrais dosadoras de concreto ao longo do tempo (MARANHÃO; REGATTIERI, 2011)

No ano de 2013, segundo dados do Relatório Nacional da Indústria do Cimento (snic.org), 21% da demanda de cimento foi consumida pelas centrais dosadoras de concreto (concreteiras). Mesmo com a forte crise econômica enfrentada nos últimos anos, os dados preliminares apontam que em 2017 a demanda de consumo de cimento por concreteiras é, aproximadamente, de 15% (snic.org). Sendo assim, uma grande preocupação das concreteiras, devido ao impacto ambiental, está no que diz respeito ao resíduo gerado durante a produção do concreto.

Em diversas situações, observam-se contratempos relacionados com atrasos na execução da obra ou no transporte para entrega do concreto, resultando em demora na descarga dos caminhões betoneiras; com isso, no momento do lançamento e adensamento registra-se claramente a perda em sua trabalhabilidade. Em decorrência disso, muitas vezes, este concreto é rejeitado pelo tempo decorrido entre o início da mistura dos materiais e a aplicação do concreto no canteiro de obra exceder o tempo preconizado por norma para sua utilização. Fica claro, principalmente em função de perdas financeiras e do dano ambiental, a preocupação com o descarte desse concreto e a necessidade de alternativas que viabilizem sua utilização sem que haja impacto negativo em suas propriedades finais.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

A redução dos resíduos gerados na construção civil vem sendo cada vez mais foco de estudos em função da preocupação ambiental devido ao descarte desse material. Em relação ao concreto, dados apresentados pela *National Ready Mixed Concrete Association* mostram que nos Estados Unidos 5% do volume produzido retornam para as centrais dosadoras. Segundo levantamentos realizados pelo *Instituto Mexicano del Cemento Y del Concreto*, no México, esse índice gira em torno de 2,5%, enquanto que no Reino Unido esse índice é de 1,5% de acordo com o relatório *The Concrete Industry Sustainability Performance Report* (VIEIRA, 2011).

Segundo dados da Associação Brasileira de Serviços de Concretagem (ABESC), estima-se que o índice de desperdício do concreto dosado em central no Brasil chega a 9%. Polesello *et al.* (2010), em estudo realizado em quatro centrais dosadoras de concreto localizadas no estado do Rio Grande do Sul, verificaram que esse índice superou 4%, sendo que em duas delas aproximou-se de 6%, enquanto que Vieira (2011), em estudo realizado em centrais dosadoras ao longo de todo o Brasil, registrou esse índice em quase 2%, identificando que desse volume de concreto devolvido para a central em torno de 20% está relacionado com fatores relacionados ao tempo limite de utilização especificado por norma (concreto vencido, obra não preparada, problemas de obra, problemas de trajeto e/ou quebra de bomba). Para que se obtenha um índice de desperdício tão baixo conforme estudo apresentado por Vieira (2011) é imprescindível que as centrais dosadoras tenham um controle rigoroso no processo de produção do concreto.

No Brasil, o volume de concreto fornecido pelas empresas dosadoras de concreto apresenta períodos de considerável aumento, por exemplo, entre os anos de 2005 a 2012 registrou-se um crescimento de 180%. No ano de 2012, essas empresas produziram 51 milhões de metros cúbicos de concreto, segundos dados de uma pesquisa apresentada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2013). Sendo assim, fica clara a necessidade de desenvolvimento de processos e soluções eficientes tecnicamente, que contribuam para diminuição do volume de concreto devolvido às centrais. Surge, então, o questionamento em relação ao limite do tempo de mistura e transporte do concreto em 150 minutos, já que o aumento desse tempo refletirá diretamente na redução do concreto residual e, conseqüentemente, do impacto ambiental gerado.

A norma brasileira NBR 7212 (ABNT, 2012), que orienta a execução de concreto dosado em central, prescreve o tempo máximo de transporte da central até a obra em 90 min, bem como o tempo máximo para que o concreto seja descarregado (aplicado) completamente

em 150 min. Porém, frequentemente, ocorrem situações onde caminhões ficam carregados por períodos que excedem esse limite, conforme já citado, em função de atrasos no transporte ou na descarga. Diante de tal situação, enfrentam-se duas realidades:

- a) o concreto é aceito pelo engenheiro da obra pelo simples fato de não se perceber alteração na temperatura do concreto; no qual, provavelmente, será feita alguma correção do abatimento com a adição de água, apesar de não permitido por norma, afetando com isso sua relação a/c e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas e de durabilidade;
- b) o concreto é devolvido para a central dosadora que deve dar um destino ao mesmo, processo esse cada vez mais complicado por ser um resíduo agressivo ao meio ambiente e por envolver grandes volumes.

A dúvida de utilizar ou não o concreto após 150 minutos existe, pois não há conhecimento consolidado quanto às propriedades finais de concretos aplicados com tempo de mistura que já tenham excedido o tempo especificado por norma.

A faixa de tempo viável para utilização do concreto está vinculada às reações de hidratação do cimento e à perda de abatimento que ocorre com o concreto fresco, um fenômeno normal definido como sendo a perda de fluidez com o passar do tempo. Essa propriedade do concreto é particularmente importante no caso de concreto dosado em centrais, pelo fato do primeiro contato da água com o cimento ser na central, enquanto que o lançamento/adensamento ocorrerá alguns minutos ou horas depois, quando o caminhão betoneira chegar ao canteiro de obra.

Contribuindo para o entendimento dessa lacuna de conhecimento, realizou-se amplo estudo que avaliou o comportamento de dois tipos de cimentos e produção de concreto em condição de laboratório e condição real em uma central dosadora. Polesello (2012) constatou que, adotando o procedimento de manutenção do abatimento com aditivo superplastificante ao longo do tempo, não há perda na resistência à compressão do concreto e nem alteração no seu comportamento em relação à absorção de água por capilaridade, analisando essas propriedades na idade referência de 28 dias.

Face ao constatado, e por ainda haver poucos dados e estudos que analisam esse tempo limite de mistura e transporte do concreto, preconizado pela norma, justifica-se a necessidade em aprofundar o estudo em relação ao impacto nas propriedades, mecânicas e de durabilidade, finais do uso de concretos com tempo de mistura superior ao especificado pela norma.

1.2 OBJETIVOS

Para analisar o comportamento do concreto ao longo do tempo, estabeleceu-se um objetivo principal e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal dessa pesquisa consiste na avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto utilizado após o tempo máximo de mistura e transporte especificado pela NBR 7212 de 150 minutos, a partir do primeiro contato do cimento com a água, quando mantido em mistura prolongada³ com a utilização de aditivo superplastificante à base de policarboxilato.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa, que pretende avaliar as alterações decorrentes da mistura prolongada além do tempo previsto por norma e adotando-se o procedimento da redosagem com aditivo superplastificante à base de policarboxilato, sobre as propriedades finais do concreto, podem ser listados como:

- a) avaliar o comportamento do calor de hidratação gerado no concreto produzido em escala real na central dosadora, assim como em pastas de cimento;
- b) analisar o comportamento reológico do efeito da mistura prolongada e da redosagem com aditivo superplastificante em pastas de cimento produzidas com as mesmas relações água/cimento utilizadas na produção dos concretos;
- c) analisar a influência do tempo de mistura do concreto sobre o módulo de elasticidade do concreto, tanto em laboratório como em escala real (central de concreto);
- d) estimar os efeitos na durabilidade, através da verificação da profundidade de carbonatação e da penetração de íons cloreto, do concreto quando produzido pela central dosadora e exposto em ambiente natural;
- e) comparar o comportamento de concretos produzidos em laboratório e na central dosadora, quanto aos resultados finais obtidos nas propriedades analisadas;

³ Mistura prolongada considera-se quando o concreto permanece em mistura acima do tempo especificado por norma de 150min.

- f) avaliar se ocorrem alterações na microestrutura do material devido ao procedimento adotado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução, abordando considerações iniciais sobre o assunto, identificando o problema e a justificativa dessa pesquisa. São descritos o objetivo principal e os específicos, assim como é apresentada a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica, pela qual, buscam-se possíveis justificativas para a adoção do limite especificado por norma para o tempo máximo de mistura e transporte do concreto de 150 minutos. Inicialmente, abordam-se os mecanismos da hidratação do cimento e o comportamento do concreto nas primeiras idades. Salienta-se a influência do uso dos aditivos no comportamento do concreto, abordam-se os parâmetros relacionados à reologia do concreto e, por fim, faz-se um levantamento de estudos que abordem o tema da redosagem e seu efeito sobre as propriedades finais do concreto.

O programa experimental, detalhado no capítulo três, apresenta a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, assim como a dosagem e os procedimentos adotados para a produção do concreto em laboratório e na central dosadora. A apresentação e detalhamento de todos os ensaios necessários para determinação das propriedades analisadas encerra esse capítulo.

No capítulo quatro apresentam-se os resultados obtidos através do programa experimental proposto e, especialmente, registram-se as análises e discussões em função de cada comportamento obtido nas propriedades finais do concreto.

Por fim, no capítulo cinco, são feitas considerações finais sobre o comportamento do concreto quando utilizado acima do limite de tempo especificado por norma e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que possam contribuir no estado da arte sobre o tema.

2 CONCRETO: COMPORTAMENTO E PROPRIEDADES

Neste capítulo serão apresentadas questões referentes ao comportamento do concreto nas primeiras idades, o efeito de sua permanência em mistura prolongada, assim como, da presença de aditivos na mistura e, por fim, estudos sobre as propriedades do concreto quando o mesmo é submetido a um processo de redosagem ao longo do tempo. Inicialmente apresenta-se uma breve revisão sobre a hidratação do cimento para auxiliar no entendimento dos demais itens abordados.

2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O concreto é um material composto pela mistura de um aglomerante (cimento) com agregados graúdos e miúdos e água, podendo ainda ter em sua composição adições minerais e aditivos químicos. Quando misturado, deve oferecer condições de plasticidade para seu lançamento e adensamento, apresentando adequada coesão e adquirindo ao longo do tempo resistência, em função das reações que ocorrem entre o cimento e a água. O cimento é constituído por silicatos e aluminatos de cálcio que, ao serem misturados com a água, hidratam-se e produzem o endurecimento da pasta resultando, então, em elevada resistência mecânica (PETRUCCI, 2005).

Conforme citado por Metha e Monteiro (2008), Brunauer e Copeland⁴ (1964) descreveram a importância da hidratação do cimento Portland para a tecnologia do concreto:

A química do concreto é essencialmente a química da reação entre o cimento e a água... O conhecimento sobre os compostos formados quando o cimento Portland reage é importante porque o cimento em si não é um material cimentante; seus produtos de hidratação, sim, têm ação cimentante. O conhecimento da quantidade

⁴ BRUNAUER, S. and COPELAND, L.E., *The Chemistry of Concrete*, Sci. Am., April 1964.

de calor liberado é importante porque o calor às vezes é benéfico e outras vezes é um problema... O conhecimento da velocidade de reação é necessário porque determina o tempo de pega e endurecimento. A reação inicial deve ser suficientemente lenta para permitir que o concreto seja lançado, por outro lado, após o lançamento do concreto, é sempre desejável um rápido endurecimento.

O mecanismo de hidratação do cimento é caracterizado por um processo de dissolução-precipitação nas primeiras fases que envolvem a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos e formação de hidratos em solução, seguido por um processo topoquímico ou hidratação no estado sólido em que as reações acontecem diretamente na superfície dos compostos de cimento anidro sem que os mesmos entrem em solução (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Na figura 3 está apresentado, de forma resumida, um modelo da formação e hidratação do clínquer.

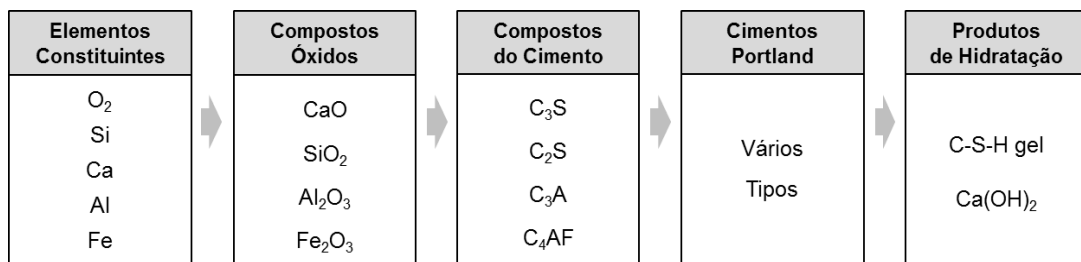


Figura 3: representação esquemática resumida da formação e hidratação do clínquer Portland (NEVILLE; BROOKS, 2013)

A hidratação do cimento é a combinação de processos químicos e físicos. As reações químicas desempenham um papel importante, mas outros aspectos como a aglomeração, a adsorção, a evaporação e a liberação de energia térmica devem ser bem estudados e analisados para melhor entendimento do processo (STARK, 2011). As reações do processo de hidratação dos compostos anidros do cimento com a água são simultâneas, entretanto nem todos os compostos se hidratam a mesma velocidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O cimento Portland é formado principalmente por quatro compostos: C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF (TAYLOR, 1990; POURCHET *et al.*, 2006; NEVILLE e BROOKS, 2013). Segundo Taylor (1990), esses compostos se originam a temperaturas da ordem de 1300-1450°C, por uma série de reações entre a cal, a alumina, sílica e óxido de ferro, durante a calcinação do clínquer. Uma adequada qualidade de cimento é obtida quando as proporções necessárias dos quatro óxidos são convenientemente distribuídas em todas as partes do clínquer. As

principais reações que ocorrem podem ser divididas em três grupos: (a) reações abaixo dos 1300°C em que se destacam a calcinação, decomposição dos minerais de argila e a reação da cal formada dos produtos de decomposição da argila mineral; (b) reações entre 1300-1450°C onde se forma um material fundido, caracterizando as bolas (massas) de clínquer (essa é conhecida como temperatura de clínquerização onde 20 a 30% do material só se funde a essa temperatura), sendo que o produto da cristalização conta essencialmente com cristais de C_3S , C_2S ; e, (c) reações durante o resfriamento quando a fase líquida se cristaliza formando, principalmente, as fases de aluminato e ferro.

Ramachandran e Beaudoin⁵ (1999) apud Kirchheim (2008) destacam, como regra geral, que o índice de hidratação dos compostos no cimento se processa na seguinte ordem: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. Este índice depende do tamanho do cristal, das suas imperfeições, da distribuição, do tamanho das partículas, da superfície específica, da presença de adições, da temperatura de queima do clínquer, entre outros.

Conforme descrito por Bullard *et al.* (2011), a hidratação do cimento envolve vários processos químicos associados, cada um dos quais ocorre a uma velocidade que é determinada pela natureza do processo e pelo estado do sistema naquele instante. Estes processos se enquadram em uma das seguintes categorias:

- *Dissolução ou dissociação*: envolve desprendimento de unidades moleculares a partir da superfície de um sólido em contato com a água;
- *Difusão*: descreve o transporte de componentes da solução através do volume de poros da pasta de cimento ou ao longo das superfícies de sólidos na camada de adsorção;
- *Crescimento*: envolve a fixação superficial, a incorporação de unidades moleculares na estrutura de um sólido, cristalino ou amorfo, na sua camada de auto adsorção;
- *Nucleação*: dá início à precipitação de sólidos heterogeneamente na superfície dos sólidos ou homogeneamente na solução, quando a força da energia livre para formar o sólido prevalece sobre a energia de formação da nova interface sólido-líquido;
- *Complexação*: reações entre íons simples para formar íons complexos ou complexos moleculares adsorvidos em superfícies sólidas;
- *Adsorção*: acumulação de íons ou outras unidades moleculares numa interface, tais como a superfície de uma partícula sólida em um líquido.

⁵ RAMACHANDRAN, V.S. and BEAUDOIN, J.J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology – Principles, Techniques and Applications*. Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications – William Andrew Publishing, LLC, 1999

O processo de hidratação do cimento é bastante complexo e consiste de uma série de reações químicas individuais que ocorrem tanto em paralelo quanto sucessivamente. Quando os compostos reagem com a água para adquirir estados estáveis, esse processo é acompanhado por liberação de energia em forma de calor. Sendo assim, essas reações de hidratação dos compostos do cimento são reações exotérmicas (OLDER, 2003; MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE e BROOKS, 2013). O grau de hidratação do cimento pode ser acompanhado por meio da determinação dos teores das fases anidras e hidratadas, pela determinação do teor de água quimicamente combinada, pela determinação da concentração iônica na fase aquosa e pela evolução do calor liberado pelas reações de hidratação (TAYLOR, 1990).

As reações exotérmicas, da evolução do calor em função do tempo de hidratação, podem ser definidas em cinco etapas: estágio inicial ou período de pré-indução (I), período de indução ou dormência (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e, por fim, estágio final (V) ou período de difusão (TAYLOR, 1990; NELSON, 1990; BENTZ *et al.* 1994). A figura 4 mostra essas etapas da hidratação ao longo do tempo.

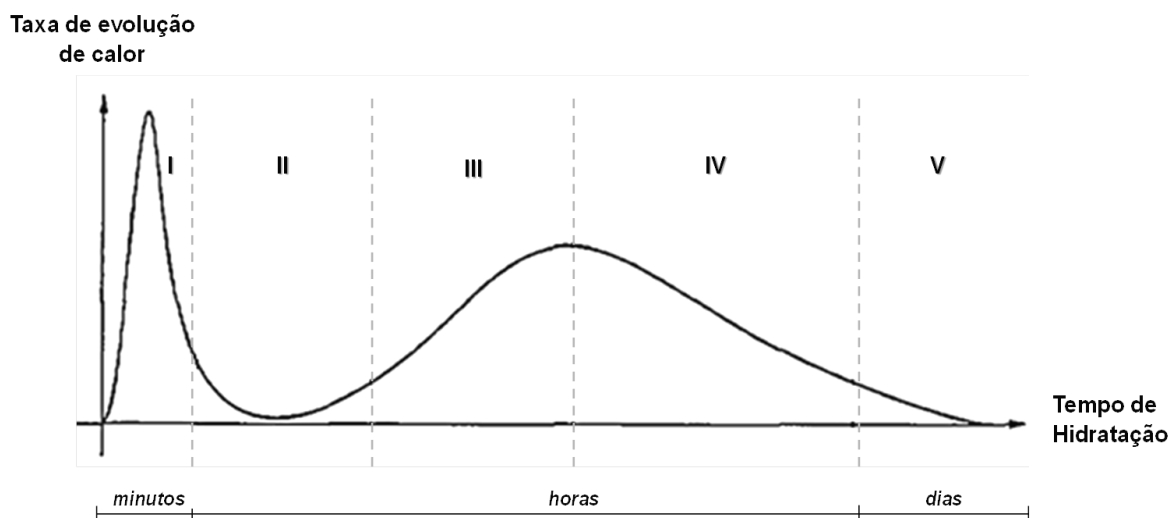


Figura 4: representação esquemática da liberação de calor durante a hidratação do cimento (NELSON, E.B. 1990)

O estágio inicial, ou período de pré-indução (I), ocorre imediatamente após o contato da água com o cimento, liberando uma grande quantidade de calor. Neste estágio, onde partes dos compostos, como álcalis e sulfatos de cálcio, são facilmente solubilizados e dissolvidos em água liberando íons K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} e Ca^{2+} . Simultaneamente, inicia-se a dissolução dos

silicatos e aluminatos mais reativos do cimento. As reações das fases anidras de C_3S , C_3A e C_4AF formam pequenas agulhas de etringita na superfície dos grãos de cimento e um gel amorfo de C-S-H, principalmente proveniente da dissolução do C_3S , tais reações são responsáveis pela formação do primeiro pico de liberação de calor (TAYLOR, 1990; JOLICOEUS e SIMARD, 1998). Conforme Older (2003), como a relação CaO/SiO_2 do hidrato produzido é menor do que do silicato tricálcico, a hidratação desta fase está associada com um aumento da concentração de Ca^{2+} e OH^- na fase líquida e, ao mesmo tempo, íons de silicato entram também na fase de líquido, embora sua concentração permaneça muito baixa. O aluminato tricálcico se dissolve e reage com os íons de Ca^{2+} e SO_4^{2-} presentes na fase líquida, produzindo etringita (AFt) que se precipita sobre a superfície dos grãos de cimento. A fração de C_3S hidratado no período de pré-indução é baixa, cerca de 2 a 10% enquanto que a quantidade de C_3A que reage neste período pode variar de 5 a 25%.

Passados os minutos iniciais o fluxo de calor diminui drasticamente, iniciando o estágio de indução ou dormência (II), onde predominam as reações dos aluminatos que desaceleram pela presença da etringita envolvendo os grãos. Segundo Ogbonna (2009), até a metade do período de dormência corresponderia ao tempo para aplicação do concreto, pois com a evolução desse período, pelo ganho de rigidez, a pasta torna-se pouco trabalhável. A duração deste período de indução vai depender da quantidade de sulfatos adicionados inicialmente ao clínquer, sendo mais extenso quanto maior for esta quantidade (LEA, 1998⁶ apud KIRCHHEIM, 2008). Nesta etapa, a presença adequada de sulfatos é um fator de extrema importância, pois contribui para a formação da etringita, para o espessamento da camada de C-S-H e para o aumento em solução dos íons Ca^{2+} e OH^- . No entanto, a interação de um aditivo químico com qualquer uma das espécies reativas ou a sua interferência com os processos de difusão, de nucleação ou crescimento, pode ter um impacto significativo sobre o comportamento de pastas de cimento e concretos durante o período de indução (JOLICOEUS e SIMARD, 1998).

Ao final do período de indução, a taxa de liberação de calor das reações de hidratação do cimento aumenta acentuadamente com a retomada de reações, caracterizando o período de aceleração (III). O número e a energia das interações (físicas e químicas) entre as partículas do sistema aumentam, convertendo rapidamente o sistema em uma matriz rígida (início da pega) (JOLICOEUS e SIMARD, 1998). A concentração de íons Ca^{2+} na solução diminui gradualmente e ocorre a dissolução do sulfato de cálcio com redução na concentração de

⁶ LEA, F. M. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London: Arnold. 1998

íons SO_4^{2-} em solução, devido à adsorção dos íons na superfície do C-S-H e formação da fase AFt (OLDER, 2003). Pela hidratação da alita (C_3S) e da belita (C_2S) ocorre a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sendo este, o principal período da hidratação do cimento, durante o qual há um ganho de resistência da pasta. Os grãos de cimento reagem da superfície para o interior, tornando as partículas anidras menores. O período de evolução máxima de calor ocorre, tipicamente, entre o período de 10 a 20 horas após a mistura e, em seguida, ocorre uma diminuição gradual do calor de hidratação do cimento (OGBONNA, 2009).

A taxa de hidratação diminui, caracterizando o período de desaceleração (IV), na medida em que o material hidratado cobre as partículas (BENTZ *et al.*, 1994). O C-S-H continua a ser formado pela hidratação do C_3S e do C_2S , no entanto, a contribuição do C_2S neste estágio aumenta com o tempo, resultando em uma redução na taxa de formação de hidróxido de cálcio. Após esgotar-se o sulfato de cálcio, a concentração de SO_4^{2-} na fase líquida diminui e, como consequência, a fase AFt formada nas primeiras fases da hidratação começa a reagir obtendo-se o monossulfato (OLDER, 2003). No estágio final (V), o sistema continua a reagir lentamente com uma taxa de liberação de calor muito baixa. Neste estágio os grãos de cimento estão cobertos por uma camada de hidratos, a qual vai se tornando cada vez mais espessa, dificultando ainda mais que as moléculas de água cheguem às partes não hidratadas das partículas de cimento, com isso a hidratação vai se reduzindo porque é controlada predominantemente pela difusão das moléculas de água através das camadas de hidratos (AİTCIN, 2000).

Segundo Bishop *et al.* (2003), a hidratação do cimento é, obviamente, muito mais complexa do que a soma das reações individuais de cada um dos minerais de sua composição. As fases de aluminato são mais reativas e reagem mais rapidamente, afetando consideravelmente a hidratação das fases de silicato. O modelo apresentado por Scrivener e Pratt⁷ (1984), *apud* Bishop *et al.* (2003), está representado na figura 5.

⁷ Scrivener, K. L.; Pratt, P. L. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1984, 31, 351.

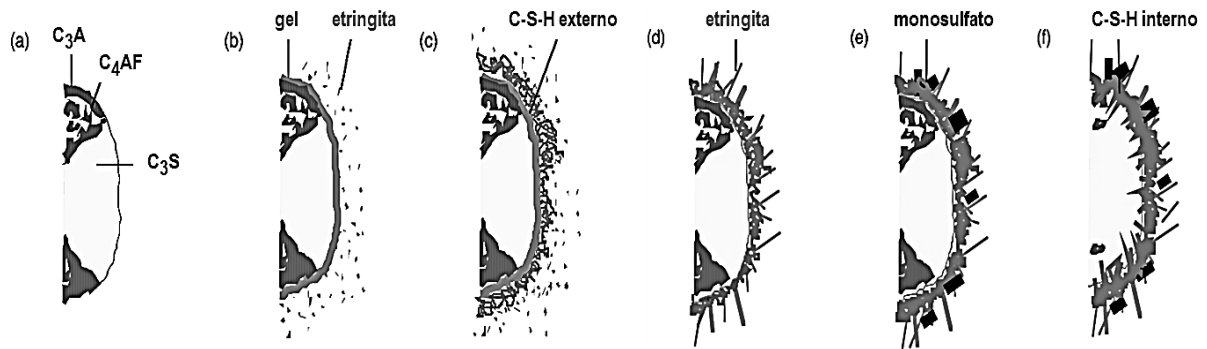


Figura 5: microestrutura durante a hidratação do cimento Portland: (a) grão de cimento anidro e o efeito da hidratação depois de (b) 10 minutos, (c) 10 horas, (d) 18 horas, (e) 1 a 3 dias e (f) 2 semanas (Scrivener e Pratt, 1984, apud Bishop et al, 2003)

Para Scrivener e Pratt⁶ (1984) apud Bishop *et al.* (2003), nos primeiros minutos da hidratação (figura 5b), as fases de alumínio e ferro reagem com a gipsita e formam um gel amorfo na superfície dos grãos de cimento e começa a aparecer a etringita. Após esse período inicial, a hidratação desacelera e começa o período de indução, com posterior período de aceleração depois de cerca de 3 horas. Cerca de 30% do cimento reage durante o período de 3 a 24 horas para formar hidróxido de cálcio e o C-S-H, sendo que o desenvolvimento do C-S-H neste período ocorre em duas fases. Depois de 10 horas de hidratação (figura 5c), o C_3S produziu “C-S-H externo”, que cresce para fora a partir das hastas de etringita formadas em vez de diretamente do C_3S , por isso, na fase inicial da reação os íons de silicato devem migrar para formar o C-S-H. Na parte final do período de aceleração, após 18 horas, o C_3A continua a reagir com a gipsita formando etringita (figura 5d). Essa rede de etringita e C-S-H aparecem para formar uma camada hidratante sobre a superfície anidra do C_3S e, uma pequena camada de “C-S-H interno” se forma internamente nesta camada. Após 1 a 3 dias de hidratação as reações ficam mais lentas e começa o período de desaceleração, onde o C_3A reage com a etringita formando alguns monossulfato (figura 5e). O “C-S-H interno” continua a crescer perto da superfície do C_3S , diminuindo a distância entre a camada hidratante e o C_3S anidro. Com 2 semanas de hidratação (figura 5f) a lacuna entra a camada hidratante e o grão fica completamente preenchida com C-S-H.

A hidratação do cimento não é linear ao longo do tempo; procede-se muito lentamente no início, permitindo que a mistura seja devidamente aplicada antes de endurecer (BISHOP *et al.*, 2003). O processo de hidratação, para relações água/cimento suficientemente elevadas, evolui até que todo o cimento original seja consumido. No entanto, o resíduo de partículas de cimento maiores pode persistir mesmo em pastas já no estado endurecido. Para baixas relações água/cimento, a reação pode parar na presença de quantidades significativas de

material não reagido, devido à ausência de um volume suficiente de água necessária para o processo de hidratação (OLDER, 2003).

Segundo Aïtcin (2000), o fim da hidratação do cimento Portland ocorre quando não existe mais fase anidra (concreto de alta relação água/aglomerante bem curado), quando a água não pode mais chegar às fases não hidratadas (sistemas muito densos e defloculados) ou quando não existe mais água disponível (caso isto aconteça, relação água/aglomerante muito baixa).

2.2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES

Uma vez que as propriedades do concreto no estado endurecido, tais como resistência e durabilidade, estão relacionadas com o adensamento do concreto do estado fresco, é fundamental que a trabalhabilidade do concreto no estado fresco permita que ele seja adequadamente transportado, lançado, adensado e acabado de forma relativamente fácil, sem que haja segregação (NEVILLE e BROOKS, 2013). Para tal, a norma brasileira NBR 7212 (ABNT, 2012) especifica que o período de tempo máximo até o fim das operações de lançamento e adensamento do concreto não deve ser superior a 150 minutos, para o caso de concreto dosado em central. Para padrões britânicos (BS 5328 – Parte 3, 1990) esse tempo máximo para descarga limita-se em 120 minutos (2 horas), não permitindo nenhuma adição de água para correção de abatimento.

O cimento, quando misturado com certa quantidade de água, de modo a obter uma massa plástica, inicia as reações entre essa água e os compostos do cimento. Depois de certo tempo a mistura começa a perder esta plasticidade e a esse período denomina-se tempo de início de pega, fenômeno que se evidencia pelo aumento brusco de viscosidade da pasta e pela elevação da temperatura. Convencionou-se denominar fim de pega a situação em que a pasta cessa de ser deformável para pequenas cargas e se torna um bloco rígido (PETRUCCI, 2005).

A determinação dos tempos de início e fim de pega é importante, pois através deles se tem a ideia do tempo disponível para trabalhar, transportar, lançar e adensar argamassas e concretos, bem como transitar sobre eles ou iniciar o procedimento de cura (PETRUCCI, 2005). Os tempos de início e fim de pega determinam a taxa de solidificação de uma pasta de cimento. De forma semelhante, a pega do concreto é definida como o início da solidificação em uma mistura fresca de concreto. Os principais fatores que controlam os

tempos de pega do concreto são: composição do cimento, relação água/cimento, temperatura e aditivos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A pega é resultante principalmente da hidratação do C_3A e do C_3S e é acompanhada por mudanças de temperatura na pasta de cimento. O início da pega corresponde a uma rápida elevação na temperatura, e o fim da pega ao pico de temperatura. Em termos gerais, a pega refere-se à passagem do estado plástico para um estado rígido (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.2.1 Perda de Trabalhabilidade

O transporte do concreto pré-misturado para o canteiro de obras deve ser feito o mais rápido possível para minimizar os efeitos de enrijecimento e de perda de trabalhabilidade e não dificultar, após o lançamento, o adensamento e o acabamento apropriados. Em condições normais, geralmente há uma perda desprezível da consistência durante os primeiros 30 minutos após o início da hidratação do cimento Portland. Quando o concreto é mantido em reduzido estado de agitação ou remisturado periodicamente, pode ocorrer alguma perda de abatimento com o tempo que, geralmente, não representa risco sério para o lançamento e adensamento do concreto durante os primeiros 90 minutos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A trabalhabilidade do concreto é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O termo manipular inclui as operações de primeiras idades como o lançamento, adensamento e acabamento (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Desconsiderando-se a perda de água por evaporação, a perda do abatimento do concreto com o tempo varia em função do consumo de cimento da mistura, do tipo de cimento, da temperatura do concreto e da trabalhabilidade inicial (NEVILLE e BROOKS, 2013). O aumento na temperatura tem um efeito significativo sobre a taxa de hidratação do cimento Portland, resultando em redução nos tempos de início de pega e, conseqüentemente, em perda de trabalhabilidade do concreto, o que pode ser observado no consumo de água necessário para obtenção de um mesmo abatimento quando há a alteração na temperatura, que influencia diretamente na perda de água por evaporação, conforme ilustrado na figura 6 (SOROKA e RAVINA; 1998).

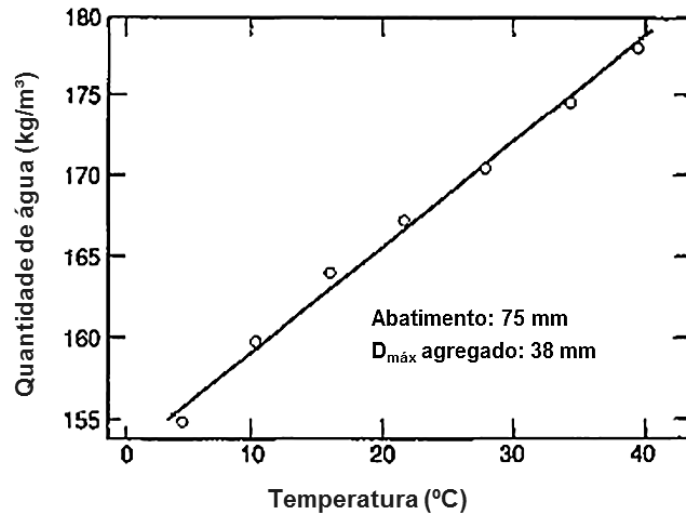


Figura 6: Efeito da temperatura no consumo de água necessário para obtenção de um abatimento de 75 mm no concreto (SOROKA, RAVINA; 1998).

Quando submetido a elevadas temperaturas, o concreto fresco endurece em um intervalo de tempo menor, o que diminui a trabalhabilidade durante os processos de aplicação, adensamento e acabamento do material. De uma forma geral, os tempos de início e fim de pega diminuem na medida em que a temperatura aumenta o que, obviamente, está relacionado com o aumento da taxa de hidratação do cimento, principalmente nos primeiros instantes (HEIKAL et al., 2005).

A elevação da taxa de evaporação favorece o surgimento de processos de retração com o aumento da probabilidade de surgirem fissuras. A velocidade de evaporação depende também, além da temperatura ambiente, da velocidade e da umidade relativa do ar. Essas condições afetam a estrutura dos poros do concreto, observando-se poros maiores para concretos expostos a altas temperaturas; efeito que reflete em maior permeabilidade, resultando em concretos com redução no seu desempenho em relação à durabilidade (ALMUSALLAM, 2001). Além desses fatores externos, quando a temperatura do concreto fresco aumenta, a perda inicial de abatimento é maior e ocorre em uma taxa mais rápida, diminuindo a trabalhabilidade, o que pode gerar problemas relacionados ao transporte, lançamento, adensamento e acabamento (BASHAM, 1992).

Os principais fatores que diminuem a trabalhabilidade do concreto ao longo do tempo são a evaporação, hidratação, absorção e agitação. Destes, provavelmente a evaporação e a hidratação aceleram com o tempo, dependendo das condições ambientais. Absorção ou agitação são susceptíveis de produzir efeitos significativos apenas ao utilizarem-se

agregados com alta taxa de absorção (DEWAR e ANDERSON, 1992). Metha e Monteiro (2008) relatam que a perda de abatimento ocorre quando a água livre da mistura é consumida pelas reações de hidratação, por adsorção nas superfícies dos produtos de hidratação e por evaporação. Em condições normais, o volume de produtos de hidratação é pequeno durante os primeiros trinta minutos após a adição de água ao cimento, e a perda de abatimento é insignificante. A partir daí, o concreto começa a perder o abatimento a uma determinada taxa que é função, principalmente, do tempo, das condições climáticas, da composição do cimento e dos aditivos/adições presentes.

Para Chandra e Björnström (2002) e Erdoğan *et al.* (2011), a perda de trabalhabilidade envolve processos químicos e físicos, atribuindo a perda de consistência na pasta de cimento durante a fase de dormência principalmente à coagulação física de partículas de cimento, em vez de processos químicos. No período durante o qual ocorre essa perda na trabalhabilidade, o aluminato tricálcico reage com a gipsita. O produto evolui para uma estrutura cristalina e é distribuído na massa. Há evidências de que concretos feitos com cimento tendo moderado a alto teor C_3A ($C_3A \geq 9,0\%$) mostram perda de abatimento mais elevadas.

A água adicionada ao concreto fresco, em algum momento após a mistura inicial, tem um efeito como se tivesse sido adicionada inicialmente. Assim, há a possibilidade de restaurar a trabalhabilidade do concreto ao valor especificado, desde que a água possa ser misturada intimamente com a massa de concreto. Isso será normalmente possível apenas quando um caminhão betoneira é usado para transportar o concreto. Quando o concreto é verificado no momento da entrega e apresenta uma menor trabalhabilidade do que o especificado, há três possíveis razões (DEWAR e ANDERSON, 1992):

- a) água insuficiente adicionada inicialmente;
- b) maior taxa de evaporação (ou absorção) do que o previsto;
- c) maior taxa de hidratação do que o esperado.

Segundo esses autores, o ajuste com água adicionada para compensar (a) ou (b) não irá resultar em uma menor resistência do que o esperado, enquanto a água extra para combater a (c) resultará em uma menor resistência. No entanto, no momento da entrega não será possível uma análise precisa para determinar qual razão se aplica. Com isso, na prática, entende-se que a adição de água ao concreto para correção do abatimento implicará em perda da sua resistência à compressão.

A perda de abatimento do concreto fresco é um fenômeno normal e pode ser definida como sendo a perda de fluidez com o passar do tempo. Essa propriedade do concreto é

particularmente importante no caso de concreto dosado em centrais, visto que o proporcionamento e o início da mistura dos materiais ocorrem na central, enquanto que o lançamento e/ou adensamento somente será feitos alguns minutos ou horas depois, quando o caminhão betoneira chegar ao canteiro de obras (WEIDMANN *et al.*, 2007). O aumento no período de mistura do concreto antes da descarga, particularmente em climas quentes, resulta em aumento na temperatura, que acelera a hidratação do cimento, provocando rápida perda de umidade devido à evaporação levando, com isso, à perda do abatimento (KIRCA *et al.*, 2002).

2.2.2 Efeito da Mistura Prolongada

Misturas prolongadas do concreto são frequentemente observadas, principalmente quando o concreto é dosado em central, resultado das distâncias entre a central e os locais de entrega ou devido a atrasos no andamento da obra (BASKOCA *et al.*, 1998). A mistura prolongada do concreto acelera o endurecimento, o mesmo acontece com a taxa de perda do abatimento, que na maior parte traz inconveniente, especialmente quando longos períodos de transporte estão envolvidos, como geralmente é o caso de concreto pré-misturado (ERDOĞDU, 2005).

Em estudo realizado em laboratório, simulando a mistura prolongada do concreto dosado em central, Kirca *et al.* (2002) observam que o aumento na perda da trabalhabilidade do concreto é percebido com o acréscimo do tempo de mistura. Em função disso, o aumento da temperatura do concreto, do grau de hidratação, e de eventuais ações pela mistura prolongada são as principais causas dessa perda no abatimento. Há um aumento da temperatura do concreto em função do tempo de entrega prolongado (mistura prolongada), da alta temperatura ambiente e em função das elevadas quantidades de cimento. Ainda segundo esses autores, para os dois tipos de concreto analisados (25,0 MPa e 35,0 MPa) constatou-se uma significativa perda do abatimento com o aumento no tempo de mistura, analisando ainda que a perda do abatimento após um período inicial é maior para o concreto com maior consumo de cimento em função da sua hidratação. Observou-se um aumento na resistência à compressão com o aumento do tempo de mistura, quando nenhum processo de ajuste de abatimento ocorreu (figura 7).

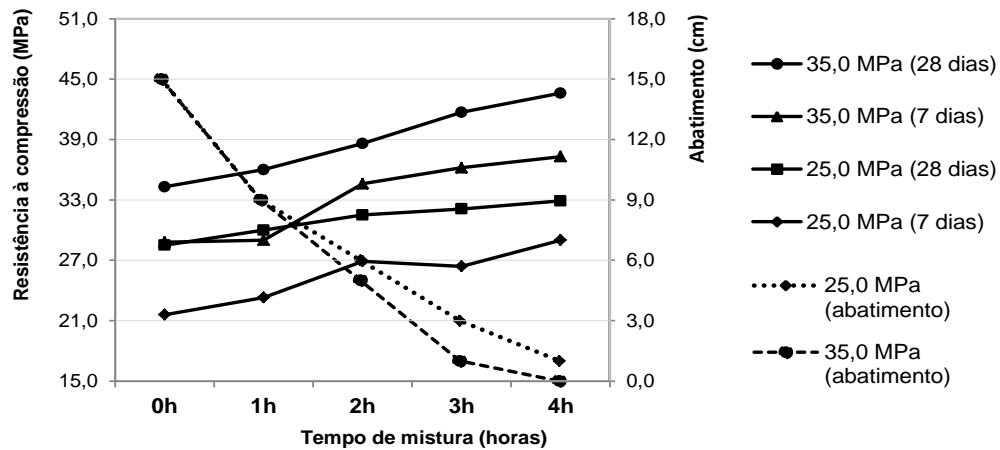


Figura 7: Resistência à compressão e abatimentos de concretos quando submetidos à mistura prolongada (KIRCA *et al.*, 2002).

Alhozaimy (2007) registrou que com a diminuição do abatimento entre o momento da chegada do caminhão na obra até o meio da descarga, foi verificado um ligeiro aumento na resistência à compressão quando não houve nenhuma correção da trabalhabilidade do concreto com adição de água. Kirca *et al.* (2002) atribuem esse comportamento ao fato de que o aumento no tempo de mistura causou uma diminuição na relação água/cimento, tornando o concreto menos poroso, conseqüentemente mais denso, devido à perda de água por evaporação. Outra possível razão para o acréscimo da resistência à compressão em função da mistura prolongada poderia ser o efeito de movimentação contínua da mistura, que quebra os produtos de hidratação da superfície de grãos de cimento, possibilitando uma hidratação mais completa desses grãos, apresentando como resultado o aumento da resistência à compressão, nas idades avaliadas aos 7 e 28 dias. Para tanto, há uma necessidade de estudos mais detalhados que mostrem esse comportamento.

O comportamento da perda de abatimento para concretos com adições minerais para uma mistura prolongada por até 90 minutos está apresentado no estudo de Erdoğan *et al.* (2011), no qual registraram que a perda de abatimento do concreto ao longo do tempo pode ser minimizada com a adição de cinza volante na produção do concreto. Partindo de um abatimento inicial de 200 ± 10 mm, para adição de 20% e 30% de cinza volante ao concreto, em relação à massa de cimento, registraram-se ao final dos 90 minutos de mistura, respectivamente, abatimentos de 100 e 130 mm, enquanto que para concreto sem adição o abatimento final foi aproximadamente de 80 mm. Essa melhor capacidade de reter a perda de abatimento é atribuída à forma das partículas de cinza volante que, com isso, reduzem o atrito interno entre os materiais constituintes do concreto e, por outro lado, a utilização de

cinzas volantes aumenta o volume de pasta da mistura melhorando muito a trabalhabilidade do concreto. Em contrapartida, com a adição de 10% de sílica ativa, registram uma maior perda do abatimento neste período, comportamento este atribuído ao tamanho das partículas de sílica que é muito pequeno em comparação com o cimento, apresentando uma maior área superficial específica e, por conseguinte, demandando maior consumo de água na mistura.

Para Soroka e Ravina (1998), a redução na perda do abatimento pela utilização de cinzas volantes ocorre pelo fato que a superfície de suas partículas pode ser parcialmente coberta com um sulfato alcalino que é facilmente solúvel. Assim, o processo de hidratação do cimento Portland tem um efeito de retardamento sobre a formação dos aluminatos agindo, as cinzas volantes, como um retardador mais eficaz do que uma quantidade de gipsita equivalente. Aparentemente, devido à solubilidade da gipsita em água ser baixa, limitando a quantidade de íons de sulfato que entram em solução, as cinzas volantes disponibilizam o sulfato por um longo período de tempo retardando, com isso, o processo de hidratação do C_3A .

Corroborando com isso, ao analisar cimentos com diferentes percentuais de pozolana na sua composição, Polesello (2012) registrou o efeito na perda de abatimento ao longo das duas primeiras horas de mistura de concretos produzidos com dois tipos de cimentos, sendo que os concretos produzidos com cimento tipo CP II Z 32 apresentaram maior perda se comparado aos produzidos com cimento tipo CP IV 32 RS, tanto na produção em laboratório quanto em uma central dosadora, porém, verificou-se que em laboratório, com misturador de eixo inclinado, a perda do abatimento foi maior. Em média a perda de abatimento para os concretos produzidos em laboratório com cimento CP II Z 32 foi de 41,2% e com o CP IV 32 RS de 36,5%, enquanto que para central dosadora registrou-se uma perda média de 32,8% para concretos produzidos com CP II Z 32 e 19,4% no caso de CP IV 32 RS.

Ramachandran⁸ (1995) apud Kirca *et al.* (2002) observa que ajustes na trabalhabilidade do concreto podem ser feitos com a utilização de aditivos químicos, sugerindo sua adição no momento da entrega do concreto, permitindo com isso um controle preciso sobre a perda de abatimento sem que ocorra redução na resistência. Salienta que, se adicionado na central dosadora de concreto, mesmo facilitando sua dosagem, poderia acelerar a perda de abatimento, quando comparado ao concreto sem aditivo, pelo deslocamento e agitação do caminhão betoneira. Entretanto, aditivos redutores de água, em especial os

⁸ RAMACHANDRAN, V.,S., *Concrete Admixtures Handbook*, second ed., Noyes Data, New Jersey, 1995, p.448.

superplastificantes, reduzem significativamente a quantidade de água (30% ou mais) promovendo melhores desempenhos reológicos e mecânicos em argamassas e concretos, necessários para a obtenção de propriedades reológicas aceitáveis (ADJOUJ *et al.*, 2014).

2.3 REOLOGIA DO CONCRETO FRESCO

O concreto pode ser caracterizado como uma suspensão concentrada de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento) que não é um fluido homogêneo. A própria pasta de cimento é composta de partículas (grãos de cimento) em um líquido (água). Porém, o concreto fresco, quando observado em escala macroscópica, flui como um líquido (FERRARIS, 1999). O líquido quando adicionado ao sistema promove a formação de aglomerados, unindo as partículas finas por forças de adesão, aumentando o esforço para mistura, com posterior surgimento de forças capilares (figura 17). Essas partículas pequenas fortemente ligadas devido ao aumento das forças de Van der Waals, conduzem a heterogeneidades, sendo necessária uma força de cisalhamento imposta pela mistura para quebrar esses aglomerados, facilitando a homogeneização do sistema (PILEGGI, 2001⁹ apud FRANÇA *et al.*, 2012).

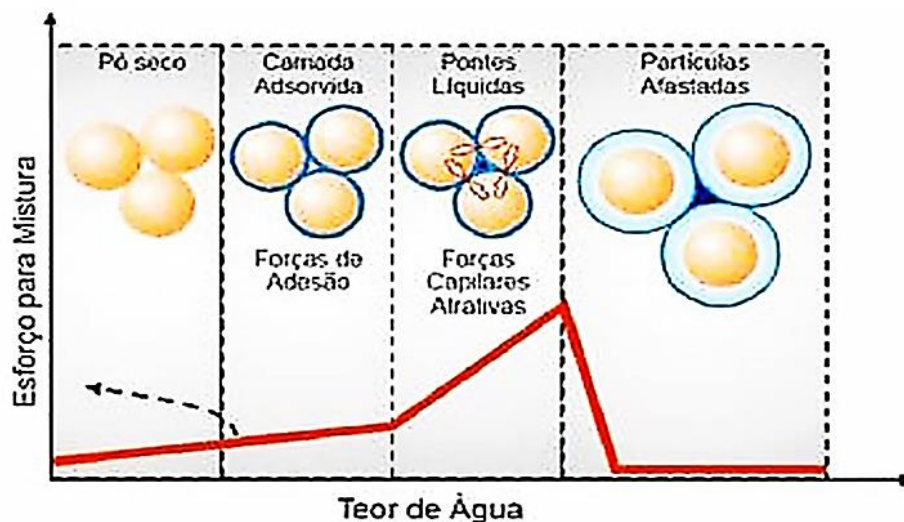


Figura 8: Representação esquemática das camadas adsorvidas de ligação e das pontes líquidas de ligação entre duas partículas imersas num meio líquido (PILEGGI, 2001 *apud* FRANÇA *et al.*, 2012).

⁹ PILEGGI, R. G. *Ferramentas Para o Estudo e Desenvolvimento de Concretos Refratários*. 187 f. São Carlos, 2001. Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

Quando utilizados aditivos dispersantes, reduzem-se os esforços produzidos durante a mistura para quebra dos aglomerados formados. Essa quebra será mais eficiente em função das forças de repulsão originadas pelo desenvolvimento de cargas elétricas na superfície das partículas, pela adsorção superficial de polímeros de cadeias longas que não permitem a aproximação das partículas por impedimento mecânico (estérico) e pela adsorção de polieletrólitos na superfície das partículas (eletroestérico) (FRANÇA *et al.*, 2012).

Sendo assim, como a reologia é uma ciência voltada ao estudo da deformação e do escoamento de um fluido devido à influência de tensões, é adequado estudar o comportamento do concreto no estado fresco através dos conceitos da reologia (CASTRO, 2007). Essas relações entre tensões e deformações que caracterizam reologicamente um material, pela interação das partículas em meio aquoso, exercendo influência nas propriedades da mistura, podem apresentar diferentes comportamentos no fluxo básico dos fluidos possíveis, conforme ilustrado pela figura 18, onde se relacionam a tensão de escoamento e a viscosidade com a taxa de cisalhamento (HOPPE *et al.*, 2007).

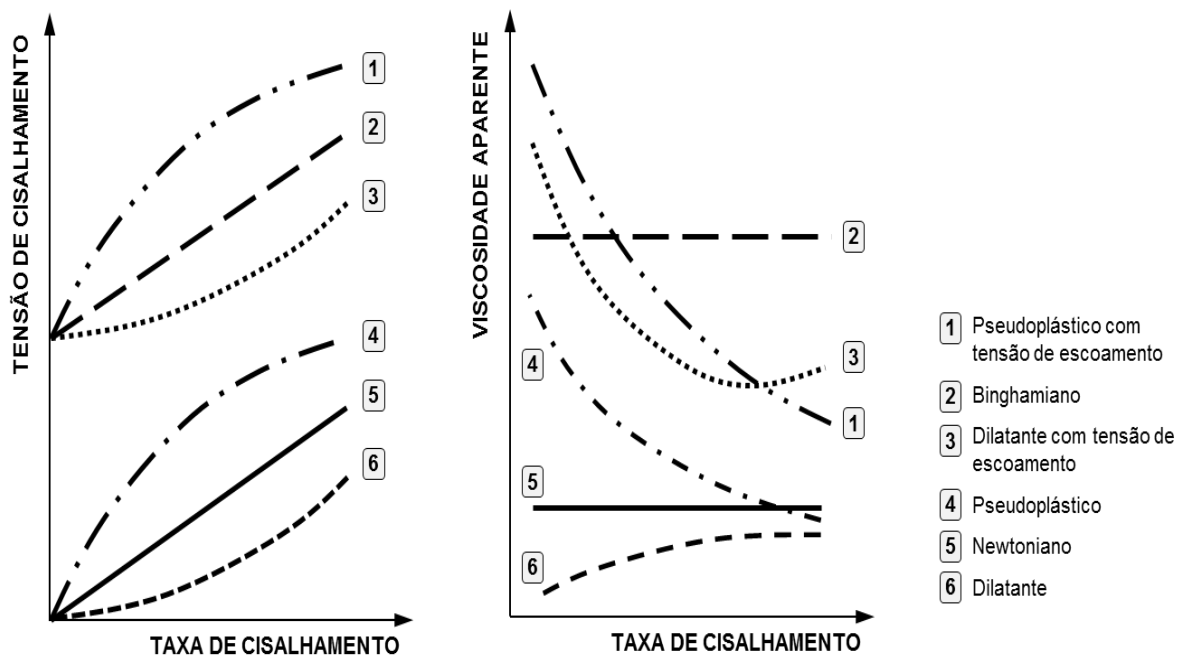


Figura 9: Diferentes comportamentos de fluxos possíveis dos fluidos (adaptado de HOPPE *et al.*, 2007).

Os fluidos newtonianos (ideais) apresentam tensão de escoamento nula e viscosidade constante, entretanto, em sua maioria os fluidos de interesse tecnológico apresentam

características reológicas que se desviam da idealidade. Podem apresentar independentes do tempo, comportamentos pseudoplásticos, quando a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento; ou ainda dilatantes, quando a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Variações desses três comportamentos básicos de fluxos podem, ainda, gerar outros três comportamentos, onde o fluido demanda de uma tensão de cisalhamento mínima para iniciar seu escoamento: fluido de Bingham, semelhante ao newtoniano com tensão de escoamento; pseudoplástico com tensão de escoamento; e, dilatante com tensão de escoamento (ROMANO *et al.*, 2011).

Os ciclos de cisalhamento obtidos quando uma mistura é submetida a uma gradual e crescente taxa de cisalhamento (curva ascendente) com posterior redução uniforme desta taxa a zero ao longo do tempo (curva descendente), originam as curvas de histerese geradas quando essas duas curvas não coincidem, representando a quebra estrutural do material pela ação de um cisalhamento (TATTERSALL e BANFILL, 1983¹⁰ apud CASTRO, 2007). Esses ciclos possibilitam avaliar a eficiência do processo de mistura, através da área de histerese que indica o estado de dispersão, e a caracterização reológica através das curvas de cisalhamento geradas (PILEGGI *et al.*, 2001).

Segundo Schramm (2006), o trabalho feito por unidade de tempo e volume de pasta para quebrar alguma das ligações, inicialmente presentes na mistura, pode ser caracterizado por essa área de histerese obtida entre duas curvas. Áreas de histerese grandes indicam que o processo de mistura não forneceu a energia necessária para quebrar todos os aglomerados da mistura, ocorrendo então à quebra destes nos ciclos de cisalhamento. Por outro lado, baixas áreas de histerese caracterizam alta eficiência na fragmentação de aglomerados da mistura (PILEGGI *et al.*, 2001). Essa histerese reflete alguma falta de equilíbrio entre a microestrutura e a taxa de deformação, muitas vezes porque o material está passando por algum tipo de quebra estrutural durante o cisalhamento. Neste caso, a tensão de cisalhamento com o aumento da taxa é maior que com a diminuição desta taxa, gerando as áreas de histerese (STRUBLE e JI, 2001).

Para que se inicie o escoamento do concreto, observa-se que é necessária uma tensão ou força mínima, indicando a existência de uma tensão de escoamento, evidenciando que sua curva de escoamento não passará pela origem. Essa tensão de escoamento é igual ao ponto de intersecção no eixo de tensão e a viscosidade plástica é a inclinação do gráfico de

¹⁰ TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. *The rheology of fresh concrete*. London: Pitman, 1983, 347 p.

tensão de cisalhamento pela taxa cisalhamento, conforme pode ser visualizado na figura 19 (FERRARIS, 1999; De LARRARD e SEDRAN, 2002).

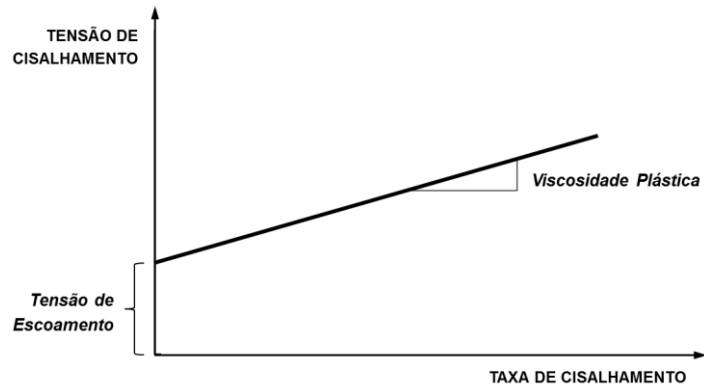


Figura 10: Equação de Bingham para um fluido (FERRARIS, 1999).

Pelo comportamento experimental observado das propriedades de escoamento no estado fresco, o concreto é caracterizado como um fluido binghamiano (FERRARIS, 1999).

O modelo de Bingham é expresso pela equação 1, conforme apresentada abaixo:

$$\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma} \quad \text{Equação 1}$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, τ_0 é a tensão de escoamento, μ é a viscosidade plástica e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (YAHIA e KHAYAT, 2003; PEDRAJAS *et al.*, 2014). A necessidade de uma menor tensão de escoamento indica que o concreto tem uma maior facilidade de escoar pela ação de seu peso próprio, enquanto que, para evitar a segregação dos agregados, é necessária uma maior viscosidade plástica (CASTRO, 2007).

Segundo Ferraris *et al.* (2001), alguns concretos, como um concreto auto adensável, não seguem a função linear descrita por Bingham pois, através desta equação, pelo cálculo resultaria em uma tensão de escoamento negativa. Então, conforme já citado em vários estudos (FERRARIS, 1999; FERRARIS *et al.*, 2001; YAHIA e KHAYAT, 2003; BANFILL, 2006), para descrever o fluxo dessas suspensões é utilizada a equação de Herschel-Bulkey (HB) que fornece uma relação da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento com base em uma função de potência, conforme apresentado pela equação 2:

$$\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}^n \quad \text{Equação 2}$$

Segundo Yahia e Khayat (2003), esse modelo de Herschel-Bulkey descreve uma relação não linear entre a tensão (τ) e taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de um fluido com uma tensão de escoamento (τ_0), sendo K a consistência e n um índice que representa o desvio de um comportamento binghamiano. Quando n é igual a 1, tem-se um fluido com comportamento newtoniano, para n maior que 1, exibe um comportamento de fluido dilatante, enquanto que com n menor que 1, caracteriza um fluido com comportamento pseudoplástico. A equação de Herschel-Bulkey pode ser considerada como uma relação linear para um curto intervalo da taxa de cisalhamento, fornecendo diretamente o cálculo da tensão de escoamento. Contudo, para determinar a viscosidade plástica, além dos parâmetros K e n já apresentados na equação, considera-se uma taxa de cisalhamento máxima obtida no teste $\dot{\gamma}_{m\acute{a}x}$. Desta forma, a viscosidade plástica é determinada através da equação 3 (FERRARIS et al., 2001):

$$\mu = \frac{3 \cdot K}{n+2} * \dot{\gamma}_{m\acute{a}x}^{n-1} \quad \text{Equação 3}$$

No entanto, segundo Ferraris (1999), como a equação Herschel-Bulkey não permite o cálculo da viscosidade plástica diretamente, a equação mais usada para caracterização reológica do concreto é a equação de Bingham, porque os parâmetros utilizados são fatores que podem ser medidos independentemente e porque o fluxo de um concreto real parece seguir esta equação adequadamente na maioria dos casos.

O comportamento de fluxo do concreto fresco segue o mesmo padrão observado em pasta de cimento. O fluxo depende da concentração de partículas e da extensão em que as partículas de cimento são floculadas (STRUBLE e JI, 2001). Para Aguiló *et al.* (1999), a pasta de cimento é responsável pela coesão e fluidez do concreto, sendo assim, considera-se que a trabalhabilidade e outras propriedades reológicas do concreto são largamente dependentes das características da pasta. Hoppe *et al.* (2007) destacam que a reologia dos concretos é afetada com a evolução do enrijecimento da pasta, em decorrência do aumento gradativo da tensão de escoamento e da viscosidade.

2.3.1 Parâmetros Reológicos

Pelo comportamento do concreto fresco ser caracterizado como um fluido plástico ou binghamiano, sua avaliação deve ser feita em termos de dois parâmetros reológicos que são a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (FERRARIS, 1999). Analisando esses dois parâmetros, De Larrard e Sedran (2002) destacam que o primeiro está intimamente

relacionado com o abatimento do concreto, enquanto que a viscosidade plástica diferencia um concreto facilmente trabalhável, em boas condições de lançamento e adensamento, de um com comportamento “pegajoso”, difícil de ser bombeado e adensado, que em decorrência disso, apresenta imperfeições na peça concretada quando a fôrma é retirada. Sendo assim, pode-se supor que a tensão de escoamento é o resultado de atrito intergranular durante o cisalhamento do concreto, enquanto a viscosidade plástica é a assinatura macroscópica do fluxo de água na porosidade do sistema granular.

A importância em se descrever o escoamento do concreto medindo os dois parâmetros, tensão de escoamento e viscosidade plástica, pode ser claramente visualizado ao comparar os parâmetros reológicos de dois concretos quaisquer conforme ilustra a figura 20. Esses concretos podem ter um dos parâmetros idênticos enquanto o outro é muito diferente, o que faz com que o comportamento reológico desses materiais seja muito diferente (FERRARIS, 1999).

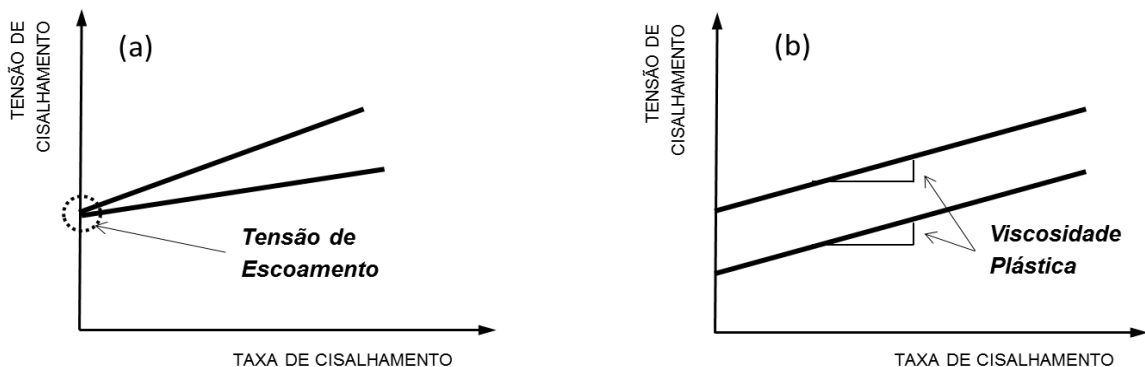


Figura 11: Reologia de concretos com: (a) mesmas tensões de escoamento e diferentes viscosidades e (b) mesmas viscosidades e diferentes tensões de escoamento (FERRARIS, 1999).

A presença de aditivos plastificantes ou superplastificantes geram efeitos sobre a reologia do concreto, predominantemente sobre a tensão de escoamento do material, reduzindo-a em decorrência da interação química dos aditivos com as partículas de cimento, formando uma camada de adsorção que evita a aproximação das partículas, por meio de uma combinação de repulsão eletrostática e, para superplastificantes à base de policarboxilato, estérica. Com isso, enfraquece a estrutura que pode se formar quando a mistura permanece em repouso, reduzindo a tensão de escoamento como consequência (TATTERSALL e BANFILL, 1983 apud CASTRO, 2007).

Segundo Castro (2007), a fluidez de uma mistura à base de cimento é influenciada pelo tempo de adição do superplastificante, não contribuindo para sua fluidez quando a relação a/c é suficiente para tornar a pasta fluida, porém, ao se adicionar de maneira parcelada o aditivo, a viscosidade da mistura diminui, mostrando que existe uma maior dispersão, maior fluidez, da pasta de cimento.

2.4 ADITIVOS PARA CONCRETO

Para Metha e Monteiro (2008), o reconhecimento de que as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido, podem ser modificadas com a incorporação de aditivos à mistura, têm sido responsável por grande crescimento da indústria de aditivos nas últimas décadas. Nessa constante evolução da indústria da construção civil, os aditivos para concreto destacam-se como componentes importantes no processo de desenvolvimento de concretos capazes de atender demandas cada vez mais exigentes do mercado.

A NBR11768 (ABNT, 2011) fixa as condições exigíveis dos materiais a serem utilizados como aditivos para concreto de cimento Portland, e definem aditivos como sendo produtos que, adicionados em pequena quantidade modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. De acordo com esta norma, os aditivos são designados como redutores de água/plastificantes, redutores de água/superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores de pega, aceleradores de resistência e retardadores de pega. Porém, esta revisão bibliográfica se deterá mais em estudos desenvolvidos com aditivos redutores de água, especialmente os superplastificantes, por ser o foco no desenvolvimento da pesquisa.

Aditivos interagem quimicamente com os materiais constituintes do concreto e afetam seu desempenho no estado fresco e endurecido, melhorando propriedades como trabalhabilidade (com redução na demanda de água), resistência e durabilidade. Para tanto, o conhecimento das interações que ocorrem entre os aditivos e os componentes do cimento é fundamental para entender seu mecanismo de ação, pois o tipo e a extensão dessas interações podem influenciar nas propriedades físico-químicas e mecânicas do concreto (RAMACHANDRAN, 1996; COLLERPADI, 2005). As diferentes atuações de cada tipo de aditivo são causadas por vários efeitos, tais como, a adsorção diferenciada, que dificulta a difusão da água e dos íons de cálcio na interface cimento/solução; a ação dos íons Ca^{2+} dos aditivos, que alteram a nucleação/precipitação dos hidratos; e, a forte ação dispersante, que

altera a cinética de crescimento e morfologia dos produtos hidratados (JOLICOEUR e SIMARD, 1998).

2.4.1 Aditivos Redutores de Água

A utilização de aditivos em centrais de concreto é uma prática consolidada. Analisando três relações a/c em estudo de argamassas, sendo adotados três teores diferentes para vários aditivos plastificantes polifuncionais utilizados em centrais de concreto, Weidmann *et al.* (2007) observaram que todas as relações a/c estudadas, o aumento do teor de aditivo propiciou maior fluidez inicial das misturas; porém, maior também foi a perda de fluidez quando decorridos 60 minutos do início da mistura. Verificaram que quanto maior o teor de aditivo empregado, maior foi o retardo no tempo de início de pega.

Aditivos plastificantes e superplastificantes tem sido foco de muitas pesquisas e sua utilização prática é cada vez mais usual pelas centrais dosadoras de concreto. Além de melhorarem a trabalhabilidade, permitem a dosagem de concretos com características específicas para determinadas aplicações e possibilitam redução no custo de produção pela diminuição no consumo de cimento. Segundo Rixom (1998), o conceito de ganho econômico a partir do uso de aditivos pode ser efetivamente obtido desde que sejam tomados cuidados na seleção de um cimento compatível com o aditivo a ser utilizado e vice-versa, mas também o ganho econômico pode ser observado na redução do esforço humano durante o manuseio, lançamento e acabamento do concreto, quando este foi produzido com a utilização de algum aditivo.

A principal diferença entre os aditivos redutores de água, plastificantes e superplastificantes, está no efeito sobre a trabalhabilidade. Com a utilização do superplastificante o abatimento de uma dada mistura é significativamente maior se comparado àquele obtido pelo uso de um aditivo plastificante normal. O superplastificante é capaz de reduzir a demanda de água para um dado abatimento cerca de 20 a 30%, enquanto que o plastificante de 5 a 12% (COLLEPARDI, 1998).

Os aditivos superplastificantes são polímeros solúveis em água com propriedades fluidificantes e dispersantes. Os primeiros superplastificantes foram os lignossulfonados modificados. Nos anos 60 se desenvolveram os superplastificantes derivados de melanina e naftaleno, e mais recentemente, no final do século XX, iniciou-se a comercialização dos superplastificantes à base de polímeros sintéticos, como os copolímeros vinílicos e os policarboxilatos (PALACIOS e PUERTAS, 2004). Segundo Collepardi (2005), o

desenvolvimento de novos superplastificantes determina importantes resultados no que diz respeito a estruturas de concreto, pois possibilitam avanços com ganhos na resistência mecânica e maior durabilidade. A evolução de polímeros sulfonados para policarboxilatos resultou em maiores reduções de água para uma mesma trabalhabilidade com menor perda de abatimento ao longo do tempo. As razões que os superplastificantes são mais eficazes em relação a outras misturas é o número de melhorias que podem ser alcançados por seu uso, conforme ilustra a figura 8.

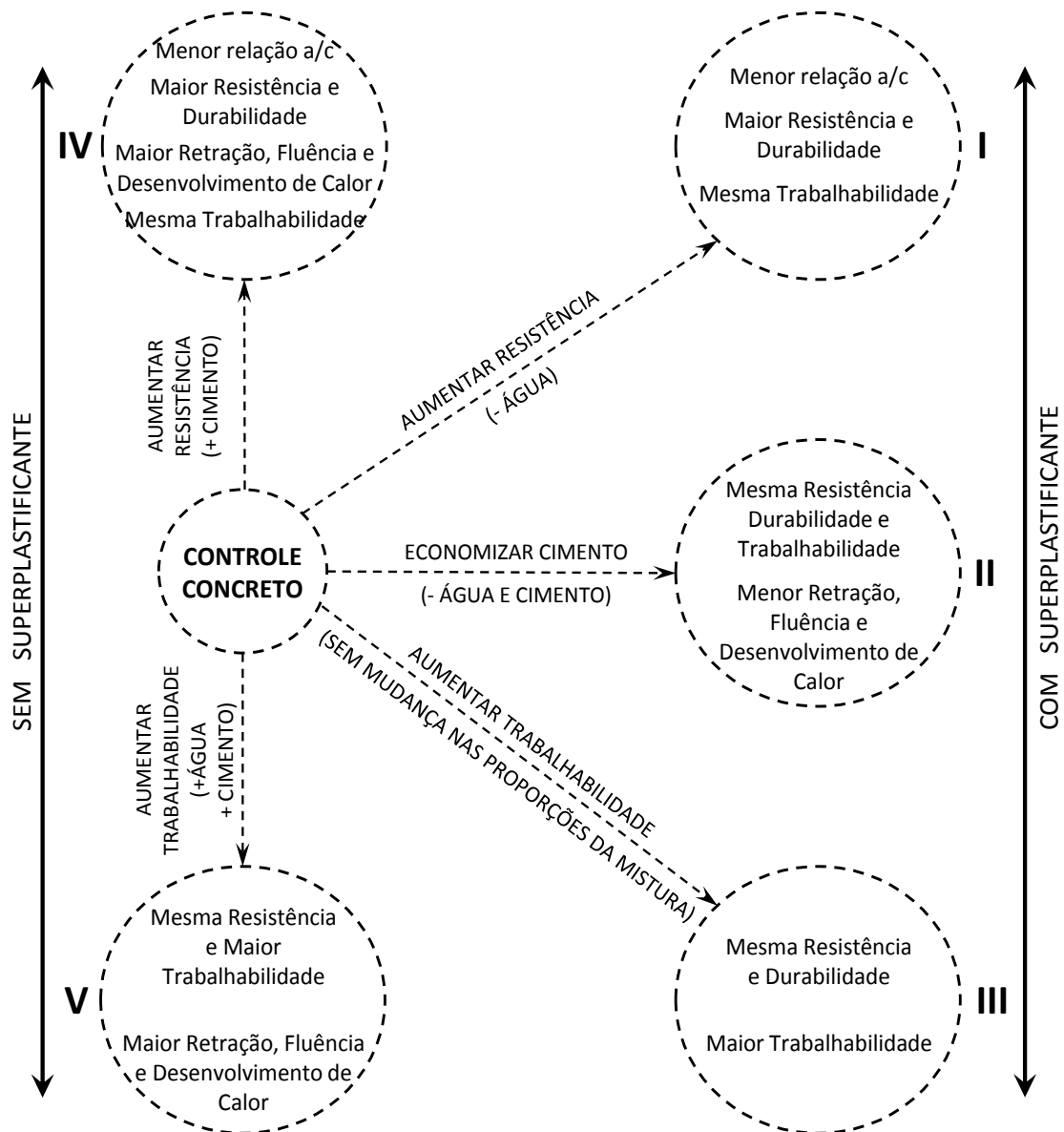


Figura 12: Diagrama esquemático do efeito dos superplastificantes no concreto nos estados fresco e endurecido (COLLERPADI, 2005).

Collerpadi (2005), através do diagrama resume que, quando um superplastificante é usado como redutor de água para uma dada trabalhabilidade (I), melhora as propriedades do concreto endurecido e, em particular, aumenta a resistência e durabilidade, devido à redução na porosidade e permeabilidade capilar, ambos relacionados a uma menor relação água/cimento (a/c). Outro modo de uso de superplastificantes envolve a redução de água e de cimento, de modo que trabalhabilidade e resistência do concreto com superplastificante são as mesmas que as do concreto sem o aditivo (II). Sendo o superplastificante, neste caso, redutor de cimento, resulta em redução no calor de hidratação, uma propriedade que é útil para concretagem em climas quentes ou estruturas com grandes massas de concreto. Há também um efeito benéfico sobre a redução da retração e fluência devido a maior proporção agregado/cimento, conseqüentemente diminuindo o volume de pasta na mistura, relacionadas com a redução do teor de cimento e aumento de agregado, compensando essa diminuição do volume total de cimento e água. Finalmente, se superplastificantes são adicionados sem alterar o teor de água e cimento, irá melhorar a trabalhabilidade do concreto (III), que é uma importante característica para concretos utilizados nas áreas que contem alta concentração de armadura e que exijam uma mistura mais trabalhável. As mudanças (I) e (II), obtidas na presença de superplastificantes, podem ser realizadas sem o aditivo, aumentando o teor de cimento (IV) ou ambos os teores de cimento e água em uma dada relação a/c (V), respectivamente. Para ambas as situações (IV) e (V) ocorre maior retração, fluência e calor de hidratação em função do aumento no consumo de cimento.

Metha e Monteiro (2008) destacam a alta eficiência na redução de água dos aditivos superplastificantes, capazes de reduzir cerca de três a quatro vezes mais a água de amassamento comparado com os aditivos redutores de água normais. Seu uso contribui para uma ótima dispersão das partículas de cimento e, quando adsorvido por essas partículas, ajuda a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e eleva acentuadamente a fluidez do sistema.

2.4.2 Ação dos Aditivos Superplastificantes

A ação dispersante dos superplastificantes atua nas menores partículas de cimento de aglomerados grosseiros que predominam na pasta de cimento da mistura de concreto. Devido ao efeito de dispersão, há um aumento na fluidez da pasta de cimento. Esse efeito da dispersão está associado ao desenvolvimento da carga eletrostática sobre as partículas de cimento. As forças de atração eletrostáticas existentes entre as partículas de cimento, que provocam a aglomeração, poderiam ser evitadas pela adsorção de polímeros aniônicos

carregados negativamente, tais como os sulfonados formaldeídos naftaleno condensado (SNF) e sulfonados formaldeídos melanina condensado (SMF), pela presença de grupos de SO_3^- na superfície das partículas de cimento. A dispersão das partículas estaria relacionada com a repulsão elétrica produzida pelos grupos carregados negativamente (SO_3^-) no outro lado da cadeia polimérica principal (COLLEPARDI, 2005), conforme ilustra figura 9.

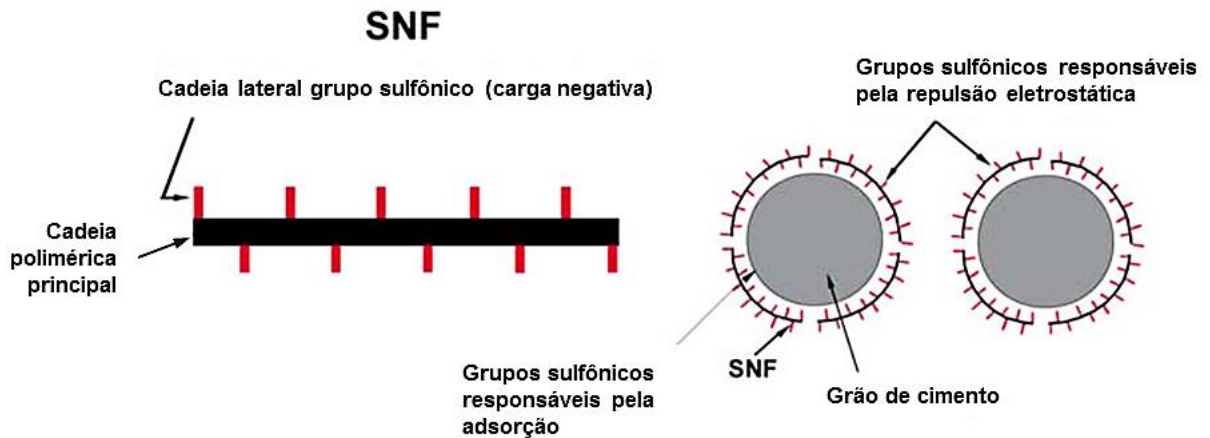


Figura 13: Ilustração esquemática do polímero sulfonado (SNF) e seu efeito de repulsão eletrostática sobre a dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI, 2005).

A repulsão eletrostática das partículas de cimento foi determinada por meio de medidas do potencial zeta¹¹, sendo que resultados experimentais adicionais disponíveis, citados por Collepardi (2005), não confirmam este mecanismo para a ação de superplastificantes de polímeros acrílicos. Pela figura 10 pode-se observar que o potencial zeta de partículas de cimento tratadas com superplastificantes à base policarboxilato parece bem menor que o registro feito para base naftaleno, observando que para dosagem de até 0,3% de policarboxilato, em massa, observa-se um potencial quase que eletricamente neutro nas partículas de cimento, mostrando que o aumento da fluidez provocado pelo superplastificante não está necessariamente relacionado com a repulsão eletrostática associada às medições do potencial zeta (COLLERPADI, 2005).

¹¹ Potencial Zeta é a diferença de potencial entre o meio de dispersão e a camada estacionária do fluido em contato com a partícula dispersante.

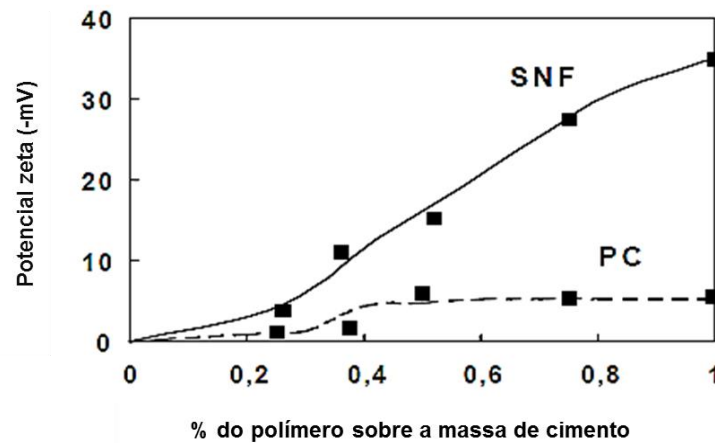


Figura 14: Potencial zeta de pastas de cimento com superplastificantes a base policarboxilato (PC) e a base naftaleno sulfonado (SNF) (COLLEPARDI, 2005).

Segundo Colleparidi (2005), para misturas com polímeros acrílicos, a própria adsorção do polímero, em vez de repulsão eletrostática, é responsável pela dispersão de grandes aglomerados de partículas de cimento, resultando em aumento notável da fluidez. A fluidez da mistura está associada à força de repulsão entre as partículas de cimento, que compreende as forças de Van Der Waals e a força de repulsão eletrostática gerada pela carga elétrica sobre as partículas de cimento. Considera-se, no entanto, que a incorporação de aditivos à base policarboxilato, em adição a tais forças, aumenta a força de repulsão eletrostática pela adsorção do aditivo na superfície das partículas de cimento, gerando a força de repulsão estérica a partir da pressão osmótica para aliviar o aumento da densidade causado pela sobreposição das camadas de adsorção (UCHIKAWA et al, 1997).

Esse mecanismo de dispersão realizado pelos superplastificantes à base de policarboxilatos pode ser mais relacionado com o efeito de impedimento estérico (produzido pelas cadeias neutras laterais) em vez da presença de grupos carregados negativamente (figura 11). Em outras palavras, essas cadeias na superfície do cimento por si só impediriam a floculação de grandes aglomerados de partículas de cimento (COLLERPADI, 2005).

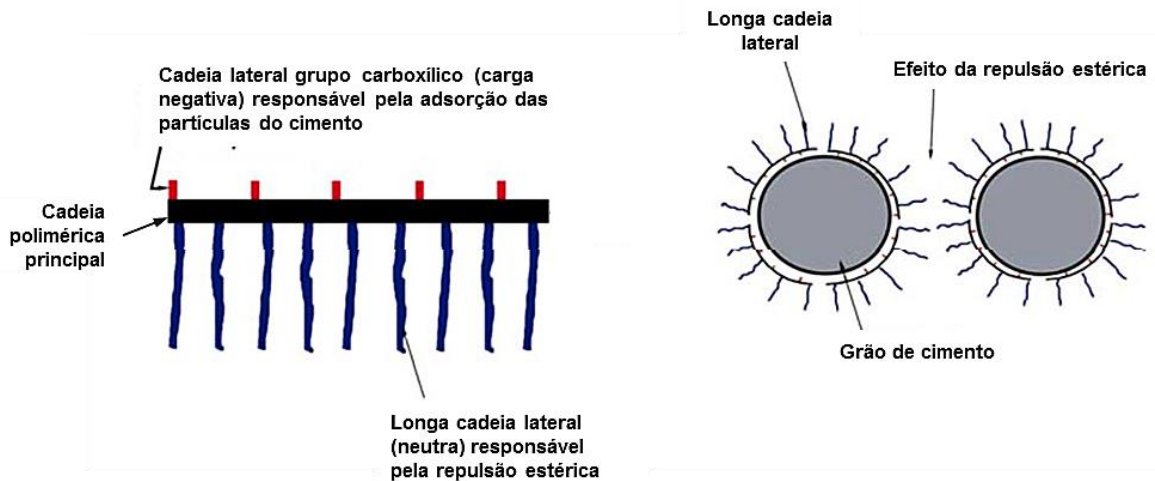


Figura 15: Ilustração esquemática do superplastificante a base policarboxilato (PC) e seu efeito de repulsão estérica na dispersão das partículas de cimento (COLLEPARDI,2005).

Outros estudos, como realizado por Uchikawa *et al.* (1997), registram que a ação dispersante das partículas de uma mistura com aditivo superplastificante à base de policarboxilato é atribuída principalmente à força de repulsão estérica, enquanto que à base de naftaleno sulfonato é atribuída, principalmente, à força de repulsão eletrostática. Analisando os efeitos da estrutura química dos aditivos superplastificantes à base policarboxilato na fluidez das pastas de cimento, Yamada *et al.* (2000) constataram que para cadeias laterais mais longas pode-se relacionar maior fluidez com menor tempo de pega da mistura, e quanto maior a quantidade de grupos sulfônicos na cadeia do polímero maior a fluidez para uma mesma dosagem do aditivo.

Mangane *et al.* (2018) registram o melhor desempenho dos superplastificantes à base policarboxilato, em comparação a outros superplastificantes, atribuindo tal comportamento ao seu modo de ação, envolvendo a repulsão estérica e seu moderado efeito na cinética de hidratação do cimento. O uso do superplastificante à base policarboxilato evita o excesso de cargas negativas e, pela boa repulsão das partículas de cimento, resulta em boa redução na demanda de água ao mesmo tempo em que melhora a consistência da mistura, apresentando efeito direto na melhoria da resistência mecânica.

Verificando a influência do tipo de aditivo superplastificante na durabilidade do concreto, Huang *et al.* (2016) registraram que concretos produzidos com aditivo superplastificante à base policarboxilato, quando comparado ao superplastificante à base polinaftaleno, tem melhores desempenhos em relação à durabilidade apresentando, através de verificação

pelos respectivos ensaios, menores profundidades de carbonatação, menor penetração de água e uma maior resistência à penetração de íons cloreto.

Na repulsão estérica, barreiras físicas de pequena extensão são criadas entre as partículas de cimento, sendo que, um lado da cadeia polimérica é adsorvido na superfície do grão de cimento, enquanto que o lado longo não adsorvido da cadeia cria a repulsão estérica. Como efeito, a influência na retenção do abatimento é maior quando ocorre a repulsão estérica, se comparada com a repulsão eletrostática, mesmo com dosagem de aditivos policarboxilatos significativamente menores do que usadas por superplastificantes do tipo naftaleno ou melanina-sulfonado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.4.3 Interação do Aditivo com o Cimento

O sucesso do uso de aditivos em uma ampla gama de condições exige uma compreensão mínima dos conceitos básicos de química do cimento e das interações cimento-aditivo (JOLICOEUR e SIMARD, 1998). O uso de aditivos é geralmente baseado em procedimento experimental devido a uma compreensão incompleta do seu mecanismo de ação. Uma abordagem é estudar as interações que ocorrem entre os aditivos e os componentes da hidratação do cimento. O tipo e a extensão da interação podem influenciar as propriedades físico-químicas e mecânicas do concreto, como demanda de água, cinética de hidratação, a composição dos produtos, tempos de pega, microestrutura, resistência e durabilidade (RAMACHANDRAN, 1996).

Rixon e Mailvaganam¹² (1999) apud Mello *et al.* (2009) relatam que a adsorção nas partículas de cimento depende dos grupos funcionais dos dispersantes e ocorre preferencialmente nos aluminatos em relação aos silicatos. A quantidade de aditivo adsorvido depende também do instante no qual ele é incorporado ao sistema cimento/água, sendo menor quando adicionado depois de misturar o cimento com a água, conferindo uma melhora significativa da trabalhabilidade. Já, quanto maior a finura do cimento, maior a quantidade de aditivo necessária para melhorar a fluidez da mistura.

Segundo Jolicoeur e Simard (1998), após os primeiros minutos das reações de hidratação, as interações entre o cimento e o aditivo podem ser melhores descritas como sendo as interações entre os aditivos e os produtos da hidratação do cimento. Ramachandran (1987)

¹² RIXON, R.; MAILVAGANAM, N. P. Chemical Admixtures for concrete. Londres: E and FN Spon, 1999.

relatou o efeito de dispersão das partículas do cimento na presença de um superplastificante. A figura 12 mostra as características de adsorção de um aditivo superplastificante à base de formaldeído sulfonado melanina (SMF) no cimento e nos compostos C_3A e C_3S em meio aquoso.

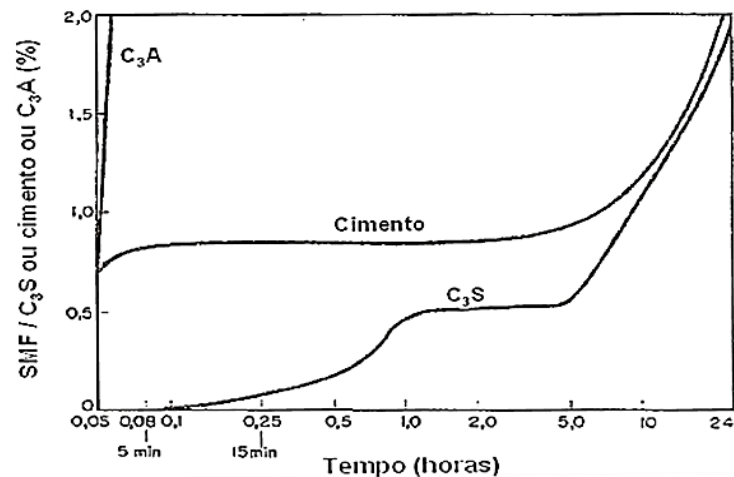


Figura 16: Adsorção do superplastificante (SMF) sobre os compostos do cimento na hidratação (RAMACHANDRAN, 1987).

Para Ramachandran (1987), a adsorção do superplastificante no C_3A ocorre em quantidades substanciais, mesmo dentro de alguns segundos. A hidratação do C_3A ocorre quase que imediatamente após contato com água, o produto, aluminato hexagonal, é conhecido por absorver quantidades grandes de forma irreversível do SMF. Embora presente apenas em pequenas quantidades (~10%) no cimento, o componente C_3A deve influenciar profundamente o efeito do superplastificante no cimento em função da sua capacidade de adsorver grandes quantidades do aditivo. Em relação ao C_3S , experimentos mostram que na primeira hora uma pequena quantidade de adsorção ocorre na superfície. Não há nenhuma adsorção adicional durante o período de indução, mas após 5 horas ainda ocorre adsorção devido ao aumento da dispersão e hidratação. A quantidade de SMF adsorvido no cimento varia com o tempo de exposição à solução. Após a adsorção imediata causada pelo componente C_3A -gipsita, essa é quase nula até cerca de 4-5 horas, mas após 5 horas a adsorção é contínua e causada pelo C_3S no cimento. Adsorção e dessorção em experimentos com C_3S hidratado mostram que, em dessorção, o superplastificante não dissolve na solução, indicando que está irreversivelmente adsorvido pelo C_3S hidratado. Adsorção de SMF tem sido estudada com C_3A +gipsita pré-hidratado por vários períodos. A

mistura que não é pré-hidratada adsorve quase todo SMF dentro de alguns minutos, enquanto que para uma mistura pré-hidratada por 5-30 minutos a taxa de adsorção é menor.

Ramachandran (1981) observou que após o período de indução ou dormência em torno de 2 horas, a hidratação do C_3S é iniciada e aumenta gradativamente até atingir, após 6 a 7 horas, um pico. Em seguida a taxa de hidratação diminui gradualmente tornando-se bastante lenta em 17 horas. A adição de superplastificante base melanina afeta a taxa de hidratação do C_3S , observada em função das baixas taxas de desenvolvimento de calor. Na adição de 2% a taxa de desenvolvimento de calor às 7 horas é reduzida em aproximadamente 50%. Um complexo de adsorção formado pela reação do C_3S ou cimento com o aditivo e a água sobre as superfícies não hidratadas é capaz de retardar a hidratação.

Analisando a interação de três diferentes superplastificantes com o C_3A quando a hidratação ocorre na presença de gipsita, Pourchet *et al.* (2006) observam que no caso do aditivo difosfonato não houve modificação na taxa média de precipitação da etringita, enquanto que para o naftaleno sulfonado houve um retardo nessa precipitação também observado para o policarboxilato, porém com uma diminuição na precipitação da etringita menos acentuada. Para o difosfonato a adsorção não acontece nos primeiros minutos, contrariamente aos demais, de forma mais acentuada para o naftaleno sulfonado onde grande parte do aditivo (cerca de 30%) é adsorvido nos primeiros minutos (figura 17). Após, um aumento linear de adsorção é observado durante a precipitação da etringita com todos os superplastificantes.

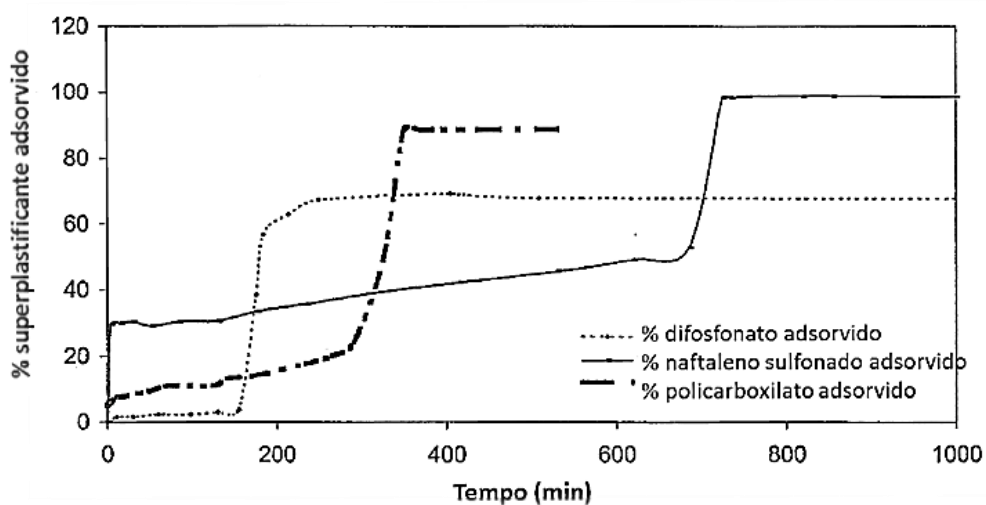


Figura 17: Evolução da fração de superplastificante adsorvido durante hidratação do C_3A com gipsita em uma solução de cal saturada (POURCHET *et al.*, 2006).

Os compostos adsorvidos modificam as propriedades da superfície do cimento e suas interações com a fase líquida da pasta de cimento (JOLICOEUR e SIMARD, 1998). Segundo Pourchet *et al.* (2006), a presença do policarboxilato retarda a precipitação da etringita e, considerando que o aditivo pode diminuir a taxa de dissolução do C_3A , ele atua principalmente no crescimento da etringita, dando origem a menores tamanhos dos cristais de etringita formada, conforme ilustra a figura 14. Neville (2014) também destaca que o aditivo superplastificante, ao interagir com o C_3A , causa retardo da hidratação, apresentando como consequência física a formação de pequenos cristais de etringita de forma aproximadamente cúbica, em vez de cristais em forma de agulhas.

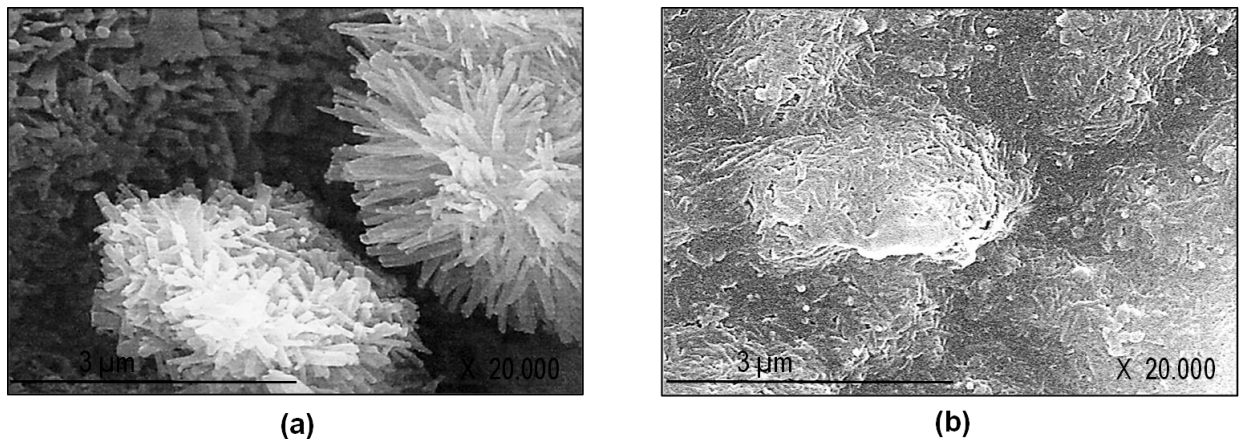


Figura 18: Microscopia eletrônica de varredura com imagem típica de etringita obtida uma hora após o início da hidratação da mistura de C_3A e gipsita (a) sem superplastificante ou (b) com 5% de policarboxilato (POURCHET *et al.*, 2006).

Polesello (2012) observa comportamento semelhante quando adota o procedimento de redosagem do concreto ao longo do tempo com a incorporação do aditivo superplastificante à base de policarboxilato, buscando a manutenção da trabalhabilidade por até 360 minutos de mistura. Conforme ilustrado pela figura 15, a presença de cristais de etringita é menos perceptível à medida que há a incorporação do aditivo ao concreto ao longo do tempo de mistura e, ao final de 360 minutos, é notável a densificação da matriz de cimento com cristais de tamanhos bem inferiores aos observados nos tempos anteriores.

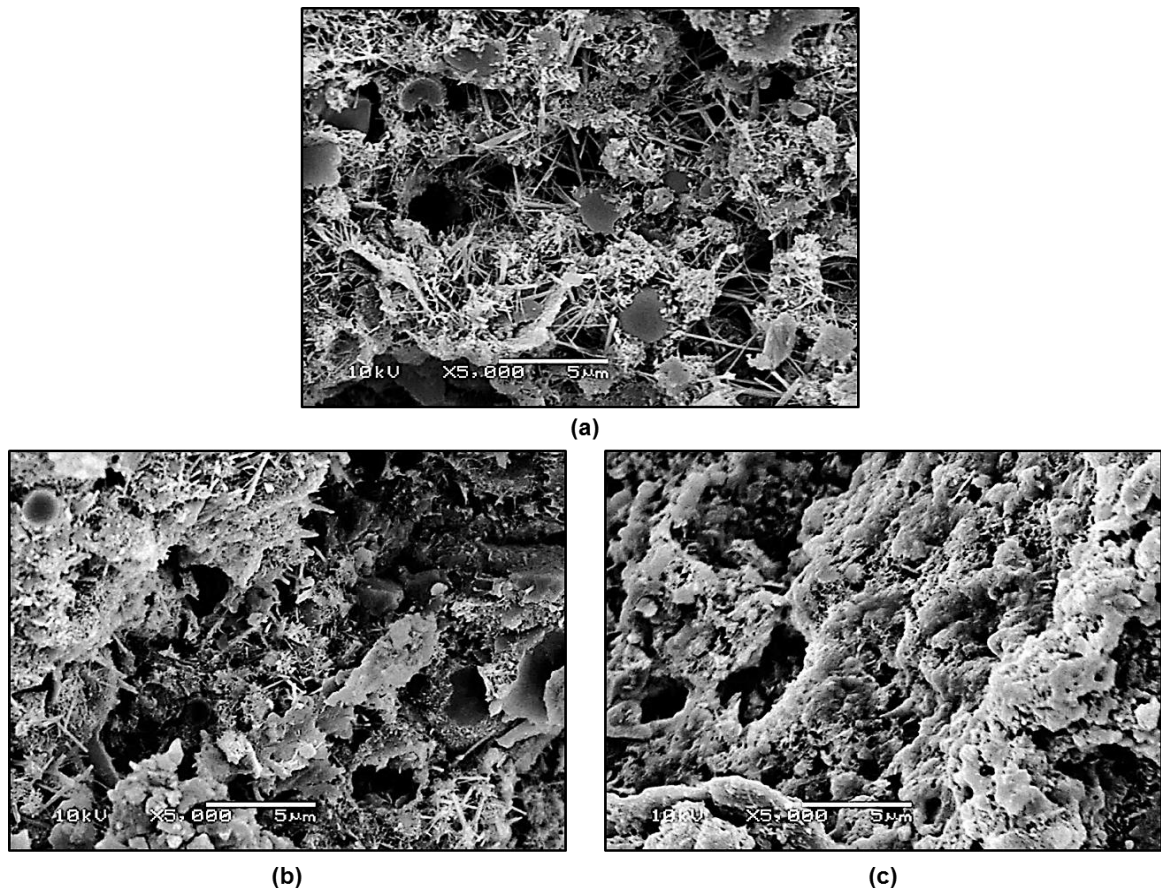


Figura 19: Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários para o concreto aos 3 dias de idade com cimento tipo CPIV e relação a/c de 0,68 (a) sem aditivo superplastificante no tempo de mistura 0 hora, e com aditivo superplastificante nos tempos de (b) 4 horas e (c) 6 horas. Magnificação: 5000 X (POLESELLO, 2012).

Prince *et al.* (2003) observaram que a adsorção de moléculas de superplastificante na superfície das partículas do sistema cimentício parece diminuir a taxa de dissolução dos constituintes e modificar a natureza dos diferentes compostos hidratados, constataram ainda que a adsorção do superplastificante resulta em uma diminuição da temperatura de decomposição da etringita, fenômeno ligado à mudança na morfologia da etringita já observado por alguns autores.

Também com o objetivo de estabelecer interações fundamentais entre os aditivos superplastificantes e o cimento, Bassioni (2010) estudou o efeito de dois tipos de superplastificantes, um de base melanina e outro naftaleno, com quatro cimentos de composições químicas diferentes. A variação no comportamento de adsorção com os diferentes tipos de cimento é muito importante para dar uma indicação de dosagens necessárias do aditivo. Em casos extremos, a adsorção pode ser tão baixa quanto 10%,

confirmando a incompatibilidade entre cimento e aditivo. Outro fator importante pode contar com o tipo de disponibilidade (solubilidade) do transportador de sulfato no cimento. O comportamento de adsorção é afetado pela carga aniônica dos polímeros na água e nas soluções dos poros dos cimentos: quanto maior a carga aniônica, melhor a adsorção. Para as relações estudadas, o cimento que apresenta menor teor de C_3A mostrou melhor efeito de liquefação e adsorveu em todos os casos a menor quantidade de superplastificante. Cimentos com alto teor de sulfato e CaO livre necessitaram dosagens de aditivo bem mais elevadas para se obter o mesmo resultado. Não se observou diferenças significativas em relação aos valores de fluxo de calor, o que proporciona uma visão de até que ponto a produção de cimento (e, conseqüentemente, a emissão de CO_2 gerada nessa produção) pode ser minimizada usando aditivos adequados que dão boa trabalhabilidade e compatibilidade e contribuindo com um grande valor ambiental.

Experimentos de dessorção indicam que o superplastificante (formaldeído sulfonado melanina – SMF) é irreversivelmente adsorvido. Uma interação química parece ocorrer entre C_3A e a mistura C_3A -gipsita com SMF. Esses resultados explicam melhor o efeito fluidificante do superplastificante, quando ele é adicionado ao concreto alguns minutos depois que a água de mistura. Adicionado junto com a água da mistura, o superplastificante é rigidamente anexado em quantidades substanciais pela mistura C_3A -gipsita, deixando apenas pequenas quantidades para a dispersão da fase de silicato. Com adição tardia na mistura a adsorção é em menor escala, permitindo que seja deixado o bastante na solução para promover a dispersão das fases silicato e reduzir a viscosidade do sistema (RAMACHANDRAN, 1987).

2.4.4 Efeitos do Uso do Aditivo Superplastificante

Quanto menor a relação a/c de um concreto, maior será a perda do abatimento para o mesmo nível de abatimento inicial. A redução da relação a/c em concreto com superplastificantes, conseqüentemente com a distância menor entre as partículas do cimento, provoca uma perda de abatimento mais significativa em função da evaporação ou pela reação com o cimento durante o transporte. Uma maneira adequada para controlar melhor essa perda de abatimento é adicionar o aditivo no momento da descarga do concreto (COLLEPARDI, 1998). Entretanto, Collepardi (1998) destaca alguns contratempos práticos ligados à adição do aditivo superplastificante no momento da descarga do concreto: necessidade de tempo adicional para que a mistura fique homogênea com eficiente incorporação do aditivo; não permite um controle mais exato no abatimento final e na

dosagem da mistura. Segundo Ramachandran (1981), a perda do abatimento pode ser diminuída pela adição de uma dosagem maior do que normal de superplastificante ou adicionando-o em momentos diferentes à mistura, mas a inclusão na formulação em pequenas quantidades de um retardador parece oferecer boas vantagens em relação à economia.

Hartmann e Helene (2003) evidenciam a influência do uso de aditivos superplastificantes sobre as propriedades do concreto fresco e propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto endurecido, estudando quatro diferentes tipos de aditivos superplastificantes: dois à base de policarboxilato, um lignossulfonato e um naftaleno sulfonado. O efeito de retardo nos tempos de pega das pastas de cimento foi observado, em grau mais acentuado para o aditivo à base lignossulfonado. Por outro lado, os demais aditivos apresentaram perda de abatimento muito elevada. Quando utilizados como redutores de água é notável o ganho na resistência à compressão, assim como, na resistência à penetração de íons cloreto. De acordo com os autores, o melhor desempenho referente à resistência à compressão dos concretos com aditivos à base policarboxilato pode ser explicado pela melhor defloculação da pasta de cimento associado ao mecanismo de repulsão estérica que estes aditivos apresentam.

Mudanças na morfologia e microestrutura dos produtos da reação de hidratação, das misturas à base de cimento Portland, são observadas com a presença de aditivo superplastificante. Observou-se a formação da etringita nas primeiras idades para aditivos a base de melanina sintética, mas em menor quantidade que sem aditivos, enquanto que esta fase não se forma com aditivos a base de copolímeros vinílicos e nem para altas dosagens de aditivo a base de policarboxilato, isso porque a natureza do aditivo influencia sobre a adsorção mesmo nas partículas do cimento (PUERTAS e VÁZQUEZ, 2001). A presença de aditivo à base de policarboxilato afeta a velocidade de reação de hidratação do cimento (tipo CP II E). Quanto maior o teor, maior foi o tempo de início e fim de pega. Esse retardo nas reações de hidratação está diretamente relacionado com o estado de dispersão das partículas, que por meio do mecanismo eletroestérico mantém as partículas de cimento afastadas e com potencial de dissociação e precipitação de hidratos reduzidos. Além disso, quanto maiores os teores de aditivo, maiores foram as diferenças entre o início e o final de pega (LYRA, 2010).

Hsu *et al.* (1999), em estudo realizado com cimento Portland tipo I e aditivo superplastificante base naftaleno, observaram que, em uma relação a/c de 0,30 e dosagem de aditivo superplastificante de 2% sobre a massa de cimento, valores altos de abatimento são obtidos e esses são quase constantes independente do tempo de adição do aditivo.

Enquanto que, com a diminuição da dosagem do aditivo (1%, 0,5%) o abatimento obtido diminui com o tempo indicando, em parte, que a influência do tempo de adição do aditivo na trabalhabilidade do concreto depende de sua dosagem.

A família dos superplastificantes à base de produtos policarboxílicos é de alta reatividade que, segundo Papayianni *et al.* (2005), em dosagens elevadas não têm o efeito colateral em retardar o endurecimento do concreto, possibilitando a produção de concretos com um grande volume de cinzas volantes ou escória. Comparando três aditivos superplastificantes, constataram esse melhor desempenho do aditivo à base de policarboxilato em relação aos polímeros sulfonado e sintético. Observaram-se maiores perdas na trabalhabilidade nos concretos com superplastificantes à base de polímeros sulfonado e sintético, quando comparados ao produzido com aditivo à base de policarboxilato. Na resistência à compressão observou-se, para uma dosagem de 2% sobre a massa de cimento, crescimento de 50% em relação ao concreto de referência (sem aditivo) para o aditivo à base de policarboxilato, enquanto que, quando utilizado os polímeros sulfonado e sintético esse incremento na resistência à compressão foi de 25% e 18%, respectivamente.

O desempenho da utilização e do tipo de aditivo pode ser analisado pela perda de fluidez em uma pasta de cimento. Para uma pasta de cimento CII Z 32 constatou-se, tanto para o tempo de 30 quanto para 60 minutos após a dosagem, que o tipo de aditivo contribui significativamente para a perda de fluidez, sendo que o aditivo a base de lignosulfonato apresentou perda de fluidez superior aos aditivos à base de naftaleno e policarboxilato. Este último apresentou a menor perda de fluidez (SILVA *et al.*, 2009). Segundo os mesmos autores, o teor de sólidos de redosagem é afetado principalmente pelo tipo de aditivo adicionado. O tempo de redosagem não mostrou evidência suficiente para influenciar no teor de redosagem. Dentre os aditivos, o policarboxilato foi o que necessitou menor teor de sólidos para a redosagem após 30 e 60 minutos.

Chandra and Björnström (2002) observaram que o aumento de fluidez em argamassas de cimento, devido à adsorção do aditivo superplastificante sobre as partículas de cimento, dificulta o processo de hidratação, contudo a perda de abatimento, que ocorre devido à retomada no processo de hidratação do sistema, é inevitável por causa da exigência intrínseca para as misturas de cimento que devem se definir e endurecer em um tempo relativamente curto. Dentre os fatores que condicionam a velocidade da perda de abatimento, após um tempo da incorporação do superplastificante, incluem-se o valor inicial do abatimento da mistura, o tipo e quantidade de superplastificante adicionado, o tempo de adição do superplastificante, a umidade e temperatura ambiente, os critérios de mistura e a presença de outro aditivo na mistura (RAMACHANDRAN, 1987).

Collerpadi *et al.* (1993), através de estudos do efeito do aditivo à base de policarboxilato sobre as propriedades do concreto pré-misturado, identificaram um desempenho melhor desse aditivo em relação ao com base naftaleno quanto à perda imediata do abatimento. Embora estes superplastificantes venham sendo utilizados com diferentes teores de polímero ativo, o policarboxilato foi mais eficaz na capacidade de redução de água, bem como na manutenção do abatimento inicial, conforme apresentado na figura 16.

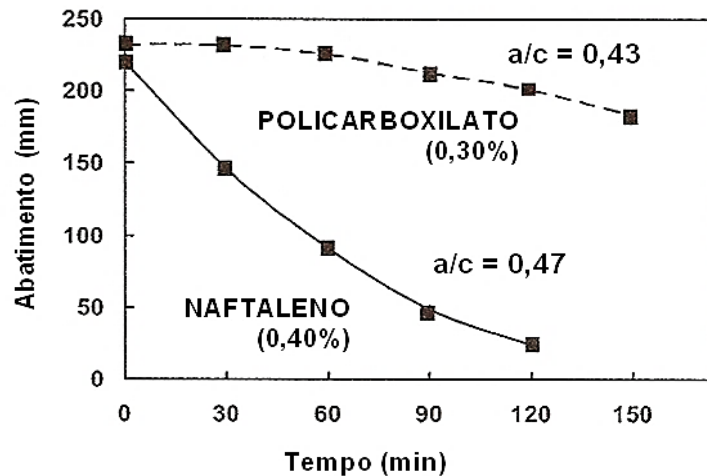


Figura 20: Perda de abatimento de concretos (temperatura: 20°C) com superplastificantes a base policarboxilato e naftaleno (COLLEPARDI, 1993).

As propriedades do estado fresco do concreto, tais como manutenção do abatimento e a incorporação de ar, são afetadas pelo modo de adição dos aditivos à mistura. A importância no momento da adição de aditivos redutores de água, no abatimento e na manutenção do abatimento do concreto, é bem menor para aditivos à base policarboxilato do que para aditivos à base naftaleno, melanina, lignossulfonado e retardadores. Isso ocorre em função da repulsão estérica do policarboxilato e, possivelmente, ao tamanho das moléculas desses polímeros, que ainda podem dispersar os grãos de cimento mesmo se parcialmente aprisionados pela precipitação dos produtos de hidratação do cimento (HARTMANN *et al.*, 2011).

Segundo Gettu & Roncero¹³ (2000) apud Hartmann *et al.* (2011), aditivos superplastificantes à base policarboxilato tem a habilidade de manter a trabalhabilidade da mistura até que suas cadeias poliméricas sejam aprisionadas e cobertas pelos produtos de hidratação do cimento. O restabelecimento das propriedades reológicas do concreto fresco pode ser obtido adicionando novas quantidades de aditivo, realizando, assim, a redosagem. Com isso, haverá novamente a adsorção na superfície dos grãos em hidratação que aprisionaram as moléculas de aditivo.

2.5 REDOSAGEM DO CONCRETO

Uma adequada trabalhabilidade é fundamental para um bom lançamento, adensamento e acabamento do concreto. Segundo Erdoğan *et al.* (2011), a prática da redosagem do concreto, no canteiro de obras antes da descarga, é frequentemente utilizada para restabelecer o abatimento à condição inicial realizando, dessa forma, de maneira mais fácil e mais rápida, as operações de lançamento e adensamento do concreto.

Caso haja necessidade de correção, na prática, esta pode ser feita com aditivos, com adição de cimento e água, mantendo a relação a/c ou, como geralmente se observa em obras, com adição de água, mesmo, esta última, não sendo permitido por norma. Sobhani *et al.* (2012) relatam que a redosagem com aditivos é altamente recomendável, quando comparado à redosagem com água, em função dos efeitos benéficos registrados na resistência à compressão e na permeabilidade à água do concreto em seu estado endurecido.

2.5.1 Redosagem do Concreto com Água

A prática da redosagem do concreto com adição de água, não permitida por norma, compromete as propriedades finais do concreto, em função da alteração (elevação) da relação água/cimento (a/c) inicial da mistura. O efeito de tal medida é observado, claramente, no resultado da resistência à compressão, conforme observado por vários estudos já realizados e detalhados a seguir.

¹³ GETTU, R.; RONCERO, J. *Aditivos superfluidificantes para hormigones de altas prestaciones. In: Simposio sobre aditivos para hormigones*, 4, Madrid, 1998, Proceedings... Madrid, 1998.

Teixeira (2007), em estudo realizado numa central dosadora de concreto, para um traço de concreto com resistência pré-definida de 20,0MPa, quantificou a perda de resistência à compressão quando houve correção do abatimento com adição de água ao concreto, obtendo, após 2,5 horas, uma queda de 34% e ao final de 4 horas, uma redução de resistência de 44%. Erdoğdu (2005) também registrou essa queda na resistência à compressão em função da adição de água em concretos com até 150 minutos, onde em intervalos de 30 minutos o abatimento inicial foi restabelecido com a adição de água, verificando que essa redução é bastante acentuada por até 90 min de mistura e observando um ligeiro decréscimo posterior. No final de 150 min de mistura, uma perda de resistência de mais de 40% é observada em relação à resistência inicial do concreto.

Para Alhozaimy (2007) a prática de redosagem com água, aumentando o abatimento do concreto é frequentemente realizada, para facilitar as operações de lançamento e adensamento do concreto. Avaliando 12 canteiros de obras, registrou que quando a adição de água, durante a descarga do concreto, for realizada para correção do abatimento dentro do limite inicial pré-definido, de 100 ± 25 mm, identifica-se uma redução inferior a 10% na resistência à compressão aos 28 dias de idade, enquanto que, quando essa adição de água resulta em abatimentos superiores ao limite inicialmente definido para a mistura, essa perda na resistência pode ser superior a 35%. Avaliando o comportamento de concretos até 6 horas de mistura, Barboza *et al.* (2017) verificaram uma redução do abatimento de 11,54% já nas primeiras duas horas de mistura e adotando a correção do abatimento com a adição de água, até o tempo de 6 horas de mistura, registraram uma queda na resistência à compressão do concreto de 57,47%, aos 28 dias de idade, quando comparado as amostras correspondentes ao início da mistura no tempo zero.

2.5.2 Redosagem do Concreto com Cimento

Para evitar os efeitos prejudiciais em relação à resistência à compressão do concreto, muitas vezes, além da adição somente de água, uma pequena quantidade de cimento extra também pode ser adicionada, na redosagem do concreto ao longo do tempo, mantendo, assim, o abatimento da mistura e sua relação a/c (KULKARNI, PRAKJASDH, 2007).

Em função do aumento da porosidade se a redosagem do concreto for feita somente com água, Pharande *et al.* (2014) avaliaram a durabilidade em função da resistência à compressão de concretos sujeitos ao ataque de sulfatos, quando redosados com água e uma quantidade de cimento extra de 5%, a cada 15 minutos, por um período total de 90 minutos. Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova foram imersos em uma

solução com 10% de Na_2SO_4 . Após 90 dias de imersão na solução o ganho percentual na resistência à compressão, em relação à referência, para os tempos de redosagem de 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos, 60 minutos, 75 minutos e 90 minutos foram de 11,15%, 16,11%, 18,84%, 20,36%, 19,76% e 10,03%, respectivamente. No entanto, deve-se salientar que este estudo merece um maior aprofundamento já que medir a resistência em corpos de prova com ataque a sulfatos em idades baixas pode levar a distorções nos resultados, além do que, o aumento do consumo de cimento para uma mesma relação a/c reflete em alguns efeitos não desejáveis como o aumento de custo e maior possibilidade de incidência de retração no concreto. Segundo Emmons (1993), todos os sulfatos são potencialmente danosos ao cimento Portland por reagirem com o hidróxido de cálcio, formando o gesso, e com o aluminato tricálcico, a etringita. Essa reação é expansiva, gerando pressões internas, fissuração e rompendo o concreto. Como resultado, a superfície da estrutura sofre uma desintegração, seguida de perda de massa e redução na resistência do concreto. Irassar (2009) também salienta que o ataque de sulfato à matriz de cimento é um processo complexo que envolve o movimento de íons sulfato para dentro da matriz de cimento através dos poros, por meio de diferentes mecanismos de transporte que avançam com o tempo de exposição, e a interação da solução agressiva com alguns compostos da pasta de cimento para formar compostos expansivos que produzem fissuras e perda de resistência.

2.5.3 Redosagem do Concreto com Aditivo

A prática em ajustar o abatimento com água deve ser descartada, já que essa medida impacta diretamente na perda da resistência à compressão do concreto (SOBHANI *et al.*, 2012). Para tal, a utilização de aditivos superplastificantes se apresenta como boa alternativa, pois permite restabelecer a trabalhabilidade do concreto sem o afetar de forma negativa, assim como quando utilizada a água, as propriedades finais do concreto, conforme apresentado na sequência.

2.5.3.1 Resistência à compressão

Kirca *et al.* (2002), procurando simular uma situação semelhante à realidade de obra em que o concreto utilizado é concreto pré-misturado e transportado com caminhão betoneira, reproduziram em laboratório concretos com duas classes de resistências mantidos em mistura prolongada por até 4 horas, analisando seu comportamento a cada hora. O

abatimento inicial de 150 mm foi restabelecido nos tempos pré-determinados por dois processos de ajustes distintos: somente com água e água com aditivo superplastificante base melanina em três diferentes dosagens (1,5%, 3,0% e 4,5% da massa de água). Com a utilização do superplastificante, uma menor quantidade de água é necessária para ajustar o abatimento. Como consequência, as relações água/cimento finais das misturas com o aditivo são mais baixas do que utilizado somente água. Assim, a diminuição da resistência à compressão destes concretos, onde o abatimento foi restabelecido com aditivo superplastificante, é menor do que a diminuição da resistência daqueles concretos ajustados com água. Mesmo pequenos aumentos são observados na resistência à compressão dos concretos que são ajustados com superplastificante.

Pequenos ganhos na resistência à compressão ao final de 120 minutos, quando o concreto foi redosado com aditivo superplastificante com dosagem de 0,5% após 60 minutos da mistura inicial dos materiais, também foi registrado por Hanayneh e Itani (1989), analisando quatro relações a/c, observando que esse aumento da resistência diminui à medida que a relação a/c aumenta.

Analisando essa utilização de aditivo superplastificante na manutenção do abatimento do concreto, porém por um período de 150 minutos, Erdoğan (2005), restabelecendo o abatimento à condição inicial com o aditivo a cada 30 minutos, também observou um ganho de resistência à compressão no concreto, registrando, ao final desse período avaliado, um ganho superior a 10% em comparação à resistência do concreto de referência. O autor registra que o ganho de resistência está relacionado com o aumento verificado na massa específica do concreto em torno de 27 kg/m³, o que corresponde a uma redução ligeiramente acima de 1% no teor de ar do concreto.

Através de processo semelhante de redosagem do concreto ao longo do tempo com aditivo superplastificante à base de poliacarboxilato, porém para um período de até 360 minutos de mistura, Polesello (2012) registrou, tanto para condição em laboratório quanto para condição real de produção de concreto em caminhões betoneiras, a influência deste procedimento de redosagem sobre a resistência à compressão, conforme apresentado pelas figuras 21 e 22.

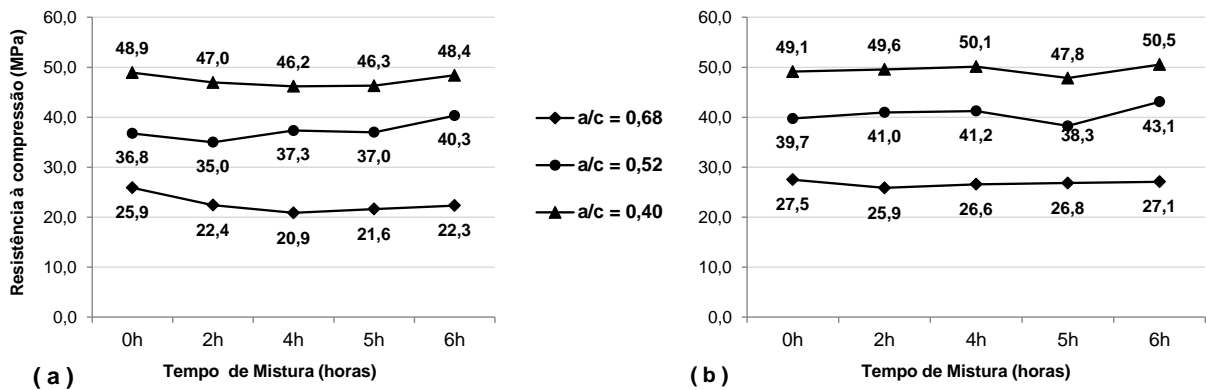


Figura 21: Resistência média à compressão aos 28 dias do concreto produzido em laboratório com (a) cimento CP IV 32 RS e (b) CP II Z 32 (POLESELLO, 2012).

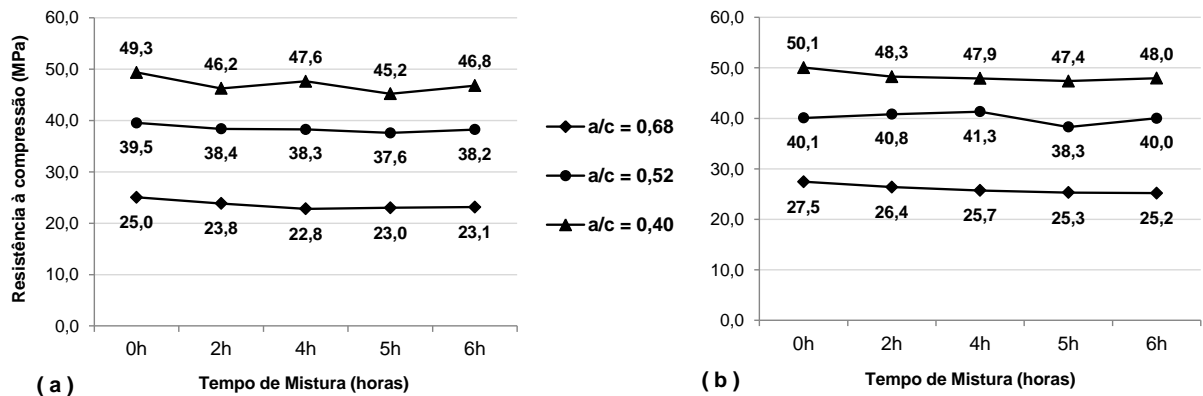


Figura 22: Resistência média à compressão aos 28 dias do concreto produzido na central dosadora com (a) cimento CP IV 32 RS e (b) CP II Z 32 (POLESELLO, 2012).

Os resultados apresentados por Polesello (2012) mostram que há uma pequena perda de resistência durante o primeiro intervalo de tempo estudado, até 2 horas, período ainda contemplado para utilização conforme especificado pela NBR 7212 (2012), porém, após esse tempo, percebe-se manutenção da resistência à compressão. Para a condição de produção de concreto na central dosadora, quando analisados os resultados de 2 horas até 6 horas, comprova-se estatisticamente que o tempo de mistura não influencia no desempenho em relação à resistência à compressão do concreto. Na condição de laboratório o tempo de mistura mostrou-se significativo, em função de um ganho na resistência observado no intervalo de tempo de 5 horas para 6 horas, comportamento atrelado à evaporação mais suscetível que existe no misturador de laboratório, onde a quantidade de concreto é consideravelmente inferior em relação ao caminhão betoneira.

Esse comportamento, de manutenção ou até ganho na resistência à compressão, está associado, também, a agitação contínua do concreto durante o processo de hidratação com uma possível quebra dos primeiros produtos de hidratação formados, que são maiores e mais frágeis. Adicionalmente, com a presença do aditivo superplastificante à base de policarboxilato, observa-se a formação de cristais de etringita menores e, como consequência, há uma densificação da matriz da mistura.

Ravina e Soroka (1994) também associam o aumento na resistência ao efeito de moagem em função da agitação, que pode remover produtos de hidratação dos grãos de cimento, deixando-os numa graduação mais fina, esperando-se que esse efeito aumente com o tempo de mistura. Assim, quando o tempo de mistura é parado, em função dessa graduação mais fina do cimento e da remoção dos produtos de hidratação de sua superfície, uma quantidade de cimento é exposta à água, melhorando a hidratação e resultando, assim, em aumento na resistência.

Estudando a influência de adições minerais para concretos redosados com aditivo superplastificante, por um período de até 90 minutos, Erdoğdu *et al.* (2011) observaram que em todas as misturas analisadas há um ganho de resistência à compressão ao longo do tempo de mistura (figura 23) que varia de 15% a 20%, sendo esse comportamento atribuído à redução da água de mistura e a diminuição do teor de ar que ocorre em função do tempo de mistura do concreto.

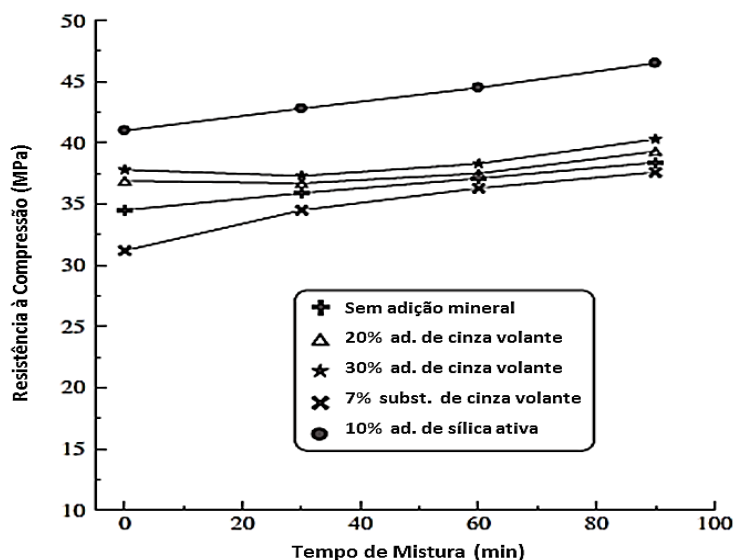


Figura 23: Efeito da redosagem com superplastificante na resistência à compressão de concretos produzidos com adições minerais (ERDOĞDU *et al.*, 2011).

2.5.3.2 Absorção e permeabilidade à água

A durabilidade de um concreto está ligada à sua porosidade capilar. A permeabilidade do concreto à água depende principalmente da relação água/cimento, que determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares, considerando o tipo de aglomerante, e da dimensão máxima do agregado, que influencia a espessura e as microfissuras na zona de transição entre agregado graúdo e pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

É através dos poros que os agentes agressivos do meio ambiente penetram e se difundem no concreto. Polesello (2012) verificou o comportamento em relação à absorção de água por capilaridade de concretos redosados com aditivo superplastificante, por um período de até seis horas, sendo realizada a redosagem a cada hora a partir da segunda hora de mistura. Ficou comprovado por uma análise de variância dos resultados, que ao final, o tempo de mistura do concreto não influenciou significativamente na absorção de água, tanto para concretos produzidos em condições laboratoriais como para os produzidos na central dosadora de concreto. Um concreto redosado com 6 horas de mistura apresenta comportamento semelhante ao de um concreto recém-misturado, quando adotada a redosagem com aditivo superplastificante à base de policarboxilato para manutenção do abatimento ao longo do tempo. A figura 24 ilustra os resultados, de absorção da água por capilaridade, obtidos para o concreto produzido na central dosadora.

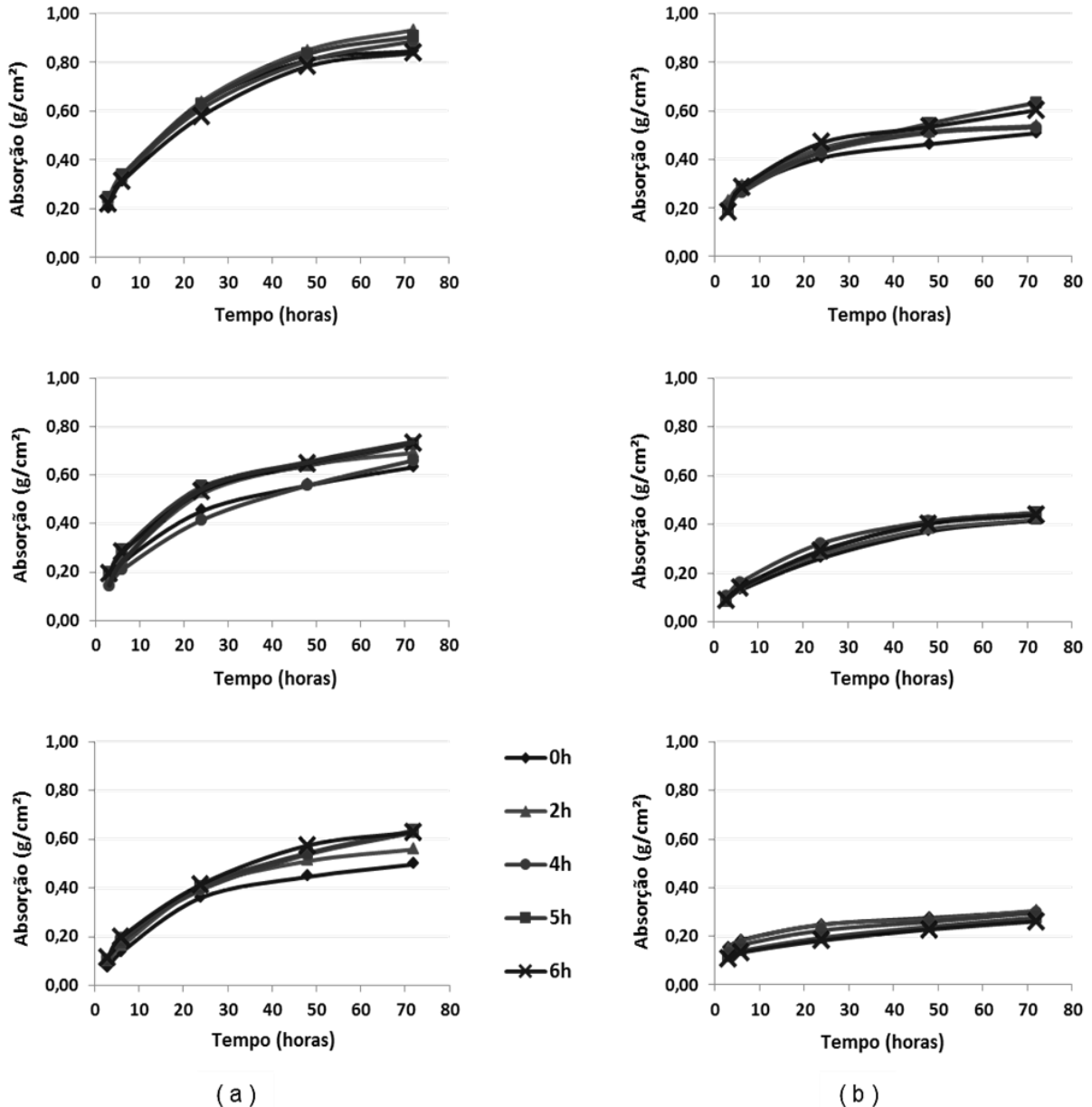


Figura 24: Efeito da redosagem com superplastificante no comportamento do concreto, produzido pela central dosadora, em relação à absorção de água por capilaridade para as relações a/c de 0,68; 0,52 e 0,40, de cima para baixo da figura, respectivamente, com (a) cimento CP II Z 32 (b) cimento CP IV 32 RS (POLESELLO, 2012).

Sobhani *et al.* (2012) registraram a permeabilidade à água em concretos onde a redosagem foi realizada em intervalos de tempo de 15 minutos até um período final de 90 minutos de mistura. Adotaram, para tal, três processos de redosagem: com água (RW), com aditivo superplastificante (RS) e com água retida (RWW) da quantidade total inicial, sendo que, para esse terceiro processo, um percentual fixo de aditivo superplastificante foi definido na dosagem de referência. Os resultados obtidos em relação à permeabilidade para concretos

redosados com água retida (RWW) apresentaram um comportamento semelhante ao do concreto de referência, enquanto que para redosagem com água (RW) houve um aumento em média de 19% na permeabilidade. No entanto, quando a redosagem foi feita com aditivo superplastificante (RS), a permeabilidade do concreto diminuiu cerca de 13% em relação ao concreto padrão de referência (figura 25).

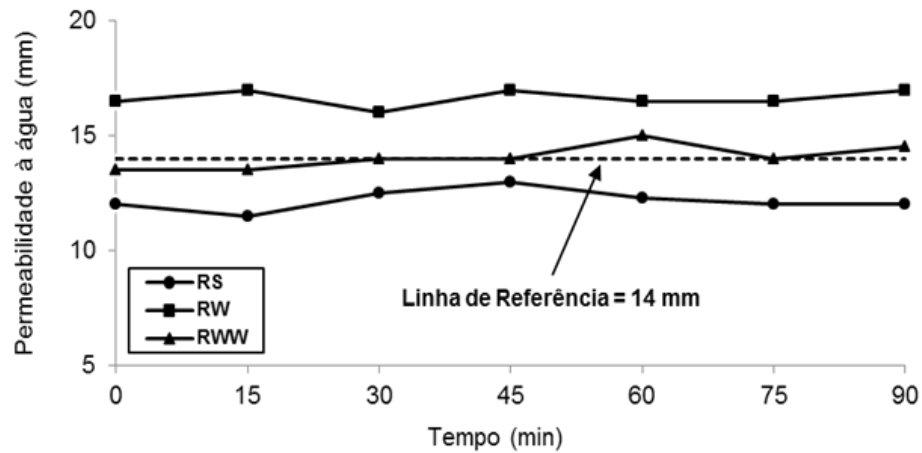


Figura 25: Efeito da redosagem na permeabilidade à água (SOBHANI *et al.*, 2012).

Conforme já mencionado ao longo dessa revisão bibliográfica, aditivos à base policarboxilato apresentam-se como boa alternativa quanto à melhoria das propriedades do concreto, principalmente na manutenção do abatimento ao longo do tempo, inclusive através de processo de redosagem, se necessário. Em várias situações práticas há a necessidade de restabelecimento do abatimento, porém, se feito com água, impacta nas propriedades do concreto. Então, a utilização do aditivo à base policarboxilato mostra-se como uma opção adequada.

O programa experimental detalhado no capítulo 3 pretende, com a utilização desse aditivo, avaliar, através de um processo de redosagem, a possibilidade de utilização de concretos com tempos superiores ao especificado pela norma, de 150 minutos, sem que haja comprometimento da qualidade final do concreto no estado endurecido.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental proposto pela pesquisa objetiva verificar os efeitos no comportamento do concreto quando utilizado acima do tempo limite, até adensamento final, especificado pela norma NBR 7212 (ABNT, 2012). Para atender o objetivo, inicialmente, foi feita a definição das variáveis de estudo da pesquisa e o planejamento experimental, que envolve a caracterização dos materiais empregados, seguida pelo detalhamento de todos os processos de produção, preparo e moldagem do concreto, assim como especificações dos procedimentos utilizados na realização dos ensaios para determinação das propriedades de interesse.

3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO

As variáveis de resposta (dependentes) foram definidas de maneira que se pudessem quantificar as características de qualidade do concreto, quando utilizado acima do tempo máximo de mistura e transporte especificado por norma, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Algumas dessas variáveis foram escolhidas por serem padrões práticos adotados para a verificação da qualidade do concreto, tais como, a trabalhabilidade¹⁴, pela facilidade de execução do ensaio, e a resistência à compressão aos 28 dias de idade, por ser a propriedade de controle mais utilizada e referência na especificação do concreto em projetos estruturais. Além destas, em estudo anterior apresentado por Polesello (2012), verificou-se o consumo de aditivo superplastificante, por ser uma variável importante desta pesquisa, e a absorção de água por capilaridade, pela qual se tem uma primeira informação do concreto em relação à sua durabilidade.

¹⁴ A trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi determinada indiretamente através do ensaio de abatimento do tronco de cone conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Para melhor entendimento do efeito da mistura prolongada do concreto em tempos superiores ao limite máximo especificado por norma definiram-se, ainda, as variáveis de resposta detalhadas a seguir:

- **calor de hidratação:** já que o calor gerado pelas reações de hidratação impacta diretamente na perda da trabalhabilidade do concreto com o passar do tempo de mistura, conforme já descrito e verificado em estudo anterior (KIRCA *et al.*, 2002). Esta verificação foi feita para o concreto e também em pastas de cimento;
- **comportamento reológico:** para analisar as mudanças que ocorrem com a incorporação do aditivo superplastificante devido ao processo de redosagem, ao longo do tempo (mistura prolongada). Esse comportamento foi verificado em pastas de cimento;
- **módulo de elasticidade do concreto:** adicionalmente a resistência à compressão optou-se pela determinação de mais essa propriedade mecânica, por ser uma propriedade associada a deformação da estrutura importante para determinadas fases da obra como, por exemplo, a retirada de escoramento;
- **profundidade de carbonatação** e da **penetração de íons cloretos:** pela necessidade em obterem-se estruturas, além de resistentes aos esforços solicitados, duráveis e que apresentem uma vida útil adequada à finalidade projetada, realizaram-se esses ensaios para estimar a durabilidade do concreto. A verificação realizou-se após um período mínimo de 2 anos de exposição do concreto à condição ambiental;
- análises da microestrutura têm sido cada vez mais necessárias, já que pela microestrutura se pode entender melhor o comportamento macroestrutural. Sendo assim, por fim, observações microestruturais foram realizadas, em pastas de cimento, para verificar possíveis alterações da microestrutura em função dessa extrapolação do tempo máximo de mistura prescrito por norma para utilização do concreto.

Todas essas variáveis de resposta selecionadas podem ser visualizadas na figura 26.

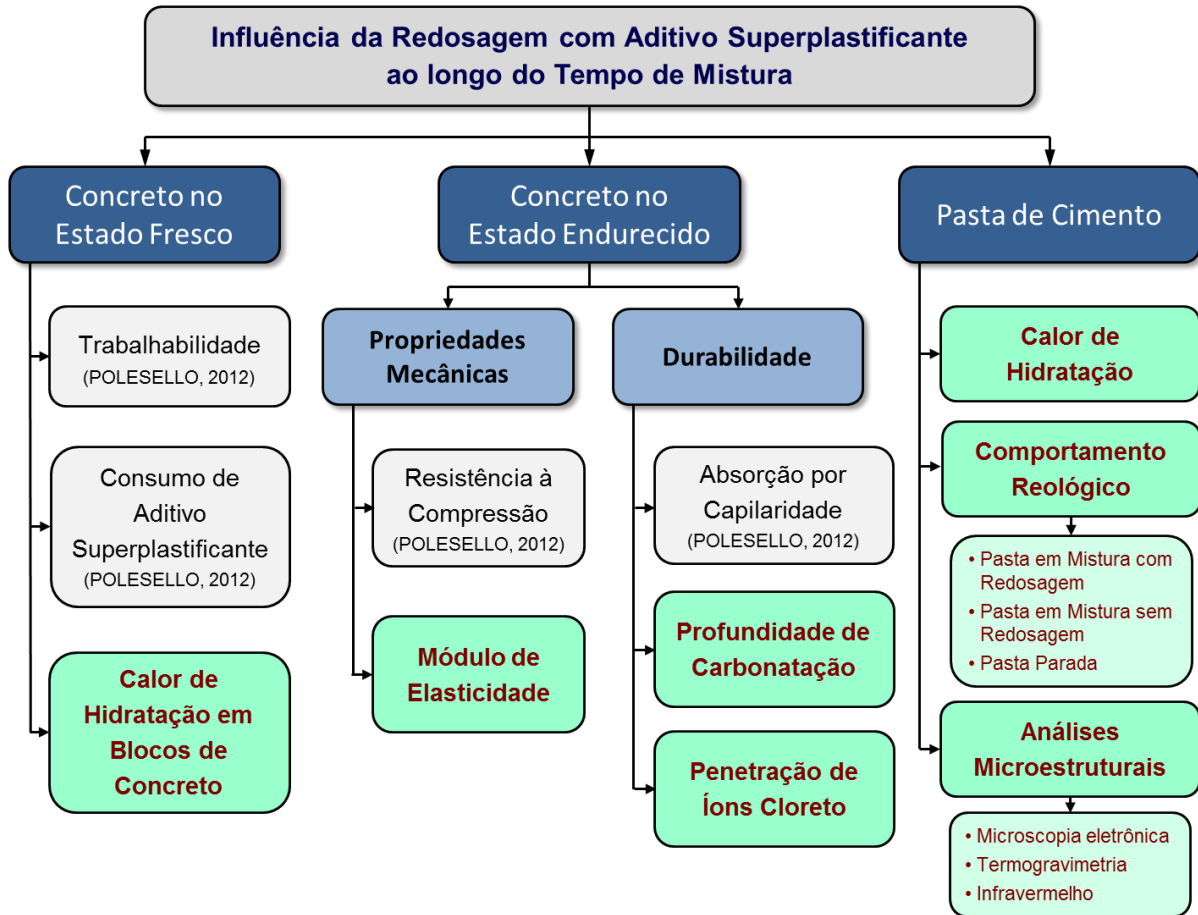


Figura 26: representação esquemática das variáveis dependentes da pesquisa

Como fatores controláveis (variáveis independentes) padronizaram-se o tipo de cimento (2), a relação água/cimento (3) e tempo de mistura do concreto (5).

Os cimentos utilizados na pesquisa são os mais consumidos nas centrais dosadoras de concreto da região de Porto Alegre, e por serem os cimentos empregados na central dosadora onde a pesquisa foi realizada em escala real. Os cimentos utilizados foram o CP II Z 32 (Cimento Portland composto com pozolana) e o CP IV 32 RS (Cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos).

Com a finalidade de avaliar o comportamento em três faixas de resistências distintas, relevante à realidade das resistências de concretos utilizadas na maioria das obras da região de Porto Alegre, definiram-se três relações a/c (água/cimento) com consumos bem diferenciados de cimento.

A definição dos tempos de mistura do concreto para os quais as análises foram realizadas foi baseada no limite máximo de 150 minutos especificado pela norma brasileira NBR 7212

(ABNT, 2012) e diante de possíveis situações limites encontradas em obras e centrais dosadoras de concreto. Com isso, optou-se pelos tempos de mistura do concreto em 0 hora (amostra coletada logo após a mistura do concreto), 2 horas, 4 horas, 5 horas e 6 horas. Optou-se por intervalos de tempos de 2 horas, porém como havia possibilidade de outro tempo adicional, pela disponibilidade de material, foi adotado o tempo de 5 horas e não 3 horas por entender que, quanto maior o tempo de mistura do concreto, maior a probabilidade de ocorrer alteração nas propriedades estudadas e porque os tempos de início de pega dos tipos de cimentos utilizados nessa pesquisa eram superiores ao tempo de 3 horas.

Com a definição de dois tipos de cimento, três relações a/c e cinco tempos de mistura, a matriz desta pesquisa totalizou 30 combinações entre essas variáveis. Porém, como também foi objetivo do estudo sua aplicação em uma situação real numa central dosadora de concreto, ao final, foram consideradas 60 combinações, conforme pode ser visualizado na figura 27.

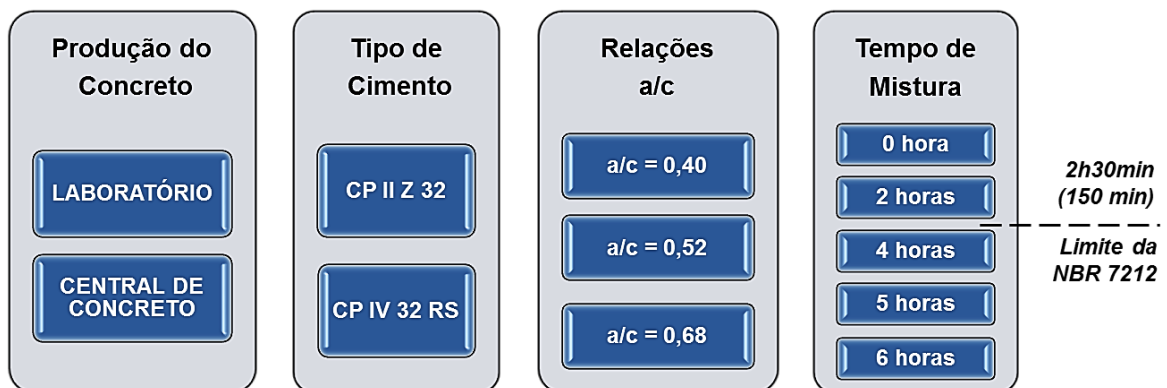


Figura 27: combinações entre as variáveis independentes da pesquisa

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A manutenção da trabalhabilidade do concreto ao longo de um período de 6 horas a partir da mistura inicial dos materiais (onde há o primeiro contato das partículas do cimento com a água) foi realizada através do uso de aditivo superplastificante à base de policarboxilato, seguindo as conclusões apresentadas como resultados da dissertação de mestrado de Polesello (2012).

Para todas as verificações do abatimento ao longo de todo o tempo de mistura avaliado, adotou-se o processo para o restabelecimento do abatimento ilustrado pela figura 28.

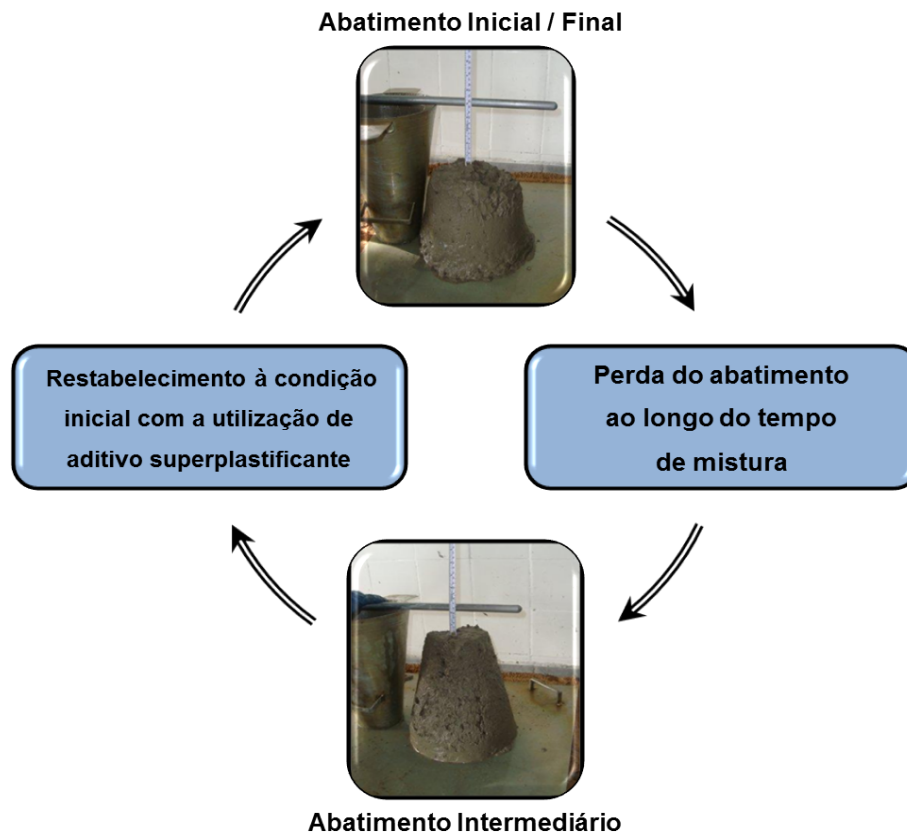


Figura 28: procedimento para manutenção da trabalhabilidade do concreto mantido em mistura prolongada ao longo do tempo

Alguns estudos apresentados (HANAYNEH E ITANI, 1989; KIRCA *et al.*, 2002; ERDOĞDU, 2005) citam o uso do aditivo superplastificante na manutenção do abatimento para mistura prolongada do concreto. Porém, estes estudos foram desenvolvidos em escala de tempo menor que a escala de tempo proposta por esse estudo e, principalmente, realizados em ambiente laboratorial e não em escala real de produção em uma central dosadora de concreto, como, também, realizado na atual pesquisa.

O monitoramento da manutenção do abatimento ao longo das 6 horas do estudo, assim como o consumo de aditivo superplastificante necessário para o restabelecimento à condição inicial, podem ser visualizados nas tabelas 1, 2, 3 e 4, conforme já apresentado por Polesello (2012).

Tabela 1: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido em laboratório com cimento tipo CP IV 32 RS

| TEMPO | Relação a/c = 0,68 | | | Relação a/c = 0,52 | | | Relação a/c = 0,40 | | |
|-------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) |
| 0h | - | - | 115 | - | - | 130 | - | - | 125 |
| 2h | 75 | 0,18 | 130 | 85 | 0,06 | 120 | 75 | 0,07 | 110 |
| 3h | - | 0,18 | - | 75 | 0,13 | 115 | 85 | 0,11 | 110 |
| 4h | 75 | 0,31 | 120 | 70 | 0,23 | 125 | 60 | 0,17 | 130 |
| 5h | 95 | 0,39 | 120 | 80 | 0,31 | 130 | 85 | 0,21 | 120 |
| 6h | 75 | 0,48 | 125 | 75 | 0,36 | 110 | 85 | 0,24 | 125 |

Fonte: POLESSELLO (2012).

Tabela 2: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido em laboratório com cimento tipo CP II Z 32

| TEMPO | Relação a/c = 0,68 | | | Relação a/c = 0,52 | | | Relação a/c = 0,40 | | |
|-------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) |
| 0h | - | - | 120 | - | - | 140 | - | - | 130 |
| 2h | 70 | 0,19 | 115 | 90 | 0,04 | 120 | 70 | 0,08 | 110 |
| 3h | 85 | 0,31 | 125 | 85 | 0,09 | 115 | 85 | 0,14 | 105 |
| 4h | 80 | 0,42 | 115 | 75 | 0,17 | 120 | 75 | 0,23 | 120 |
| 5h | 55 | 0,61 | 120 | 70 | 0,30 | 120 | 65 | 0,31 | 110 |
| 6h | 45 | 0,79 | 105 | 60 | 0,44 | 120 | 50 | 0,40 | 110 |

Fonte: POLESSELLO (2012).

Tabela 3: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido na central dosadora de concreto com cimento tipo CP IV 32 RS

| TEMPO | Relação a/c = 0,68 | | | Relação a/c = 0,52 | | | Relação a/c = 0,40 | | |
|-------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) |
| 0h | - | - | 120 | - | - | 120 | - | - | 105 |
| 2h | 105 | 0,11 | 150 | 105 | 0,03 | 115 | 70 | 0,09 | 110 |
| 3h | 110 | 0,15 | 125 | 95 | 0,06 | 115 | 90 | 0,12 | 115 |
| 4h | 90 | 0,21 | 120 | 90 | 0,09 | 120 | 70 | 0,19 | 90 |
| 5h | 80 | 0,32 | 100 | 95 | 0,16 | 110 | 65 | 0,29 | 90 |
| 6h | 55 | 0,53 | 95 | 60 | 0,38 | 100 | 50 | 0,40 | 85 |

Fonte: POLESSELLO (2012).

Tabela 4: abatimentos obtidos e consumos de aditivo superplastificante necessários para concreto produzido na central dosadora de concreto com cimento tipo CP II Z 32

| TEMPO | Relação a/c = 0,68 | | | Relação a/c = 0,52 | | | Relação a/c = 0,40 | | |
|-------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) | Abat. inicial (mm) | % Super Acumulado | Abat. final (mm) |
| 0h | - | - | 120 | - | - | 125 | - | - | 120 |
| 2h | 80 | 0,08 | 130 | 80 | 0,09 | 110 | 90 | 0,06 | 110 |
| 3h | 80 | 0,16 | 110 | 80 | 0,18 | 120 | 100 | 0,11 | 120 |
| 4h | 80 | 0,28 | 110 | 80 | 0,30 | 110 | 80 | 0,21 | 110 |
| 5h | 50 | 0,56 | 110 | 70 | 0,57 | 110 | 50 | 0,37 | 110 |
| 6h | 40 | 0,97 | 100 | 50 | 0,91 | 100 | 30 | 0,58 | 100 |

Fonte: POLESSELLO (2012).

Para esta mesma matriz de estudo, Polesello (2012) já apresentou os resultados relativos ao efeito na resistência à compressão e na absorção de água por capilaridade na idade de 28 dias, conforme já apresentado no capítulo 2 desta tese.

Cabe salientar que, em função do cronograma e da disponibilidade da central dosadora de concreto onde este estudo foi realizado, toda a preparação e acompanhamento dos concretos produzidos, tanto em laboratório como na central, ocorreu num período com temperatura ambiente relativamente baixa ($\approx 19^{\circ}\text{C}$). Porém, com o intuito de verificar a influência da temperatura ambiente sobre os resultados obtidos com a utilização do procedimento adotado de restabelecimento e manutenção do abatimento com aditivo superplastificante até 6 horas de mistura, Polesello (2012) reproduziu uma das misturas em laboratório em condição oposta, com temperatura ambiente elevada ($\approx 31^{\circ}\text{C}$), e constatou que, como esperado, a alteração na temperatura tem um impacto importante na perda de abatimento e, em função dessa perda, no consumo do aditivo superplastificante necessário para restabelecimento do abatimento à condição inicial, porém não foi registrada interferência no resultado final da resistência à compressão do concreto.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Assim como no caso do cimento, já citado anteriormente, os materiais escolhidos foram os mesmos utilizados pela empresa em que se desenvolveu esta pesquisa. As características de cada um dos materiais selecionados são apresentadas nos itens a seguir.

A caracterização dos agregados e do cimento, aqui apresentados, foi realizada pela Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) do estado do Rio Grande do Sul. Quanto à caracterização química do cimento, foi realizada no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCl).

3.3.1 Cimento Portland

As tabelas 5 e 6 apresentam as características físicas e químicas, respectivamente, dos cimentos utilizados nessa pesquisa.

Tabela 5: características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados na pesquisa

| Características Físicas | | Cimento CP IV 32 RS | | | Cimento CP II Z 32 | | |
|---|------------------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| | | Dados do Fabricante | Valores Obtidos* | NBR 5736 (ABNT, 1999) | Dados do Fabricante | Valores Obtidos* | NBR 11578 (ABNT, 1991) |
| Área Específica - Blaine (cm ² /g) | | 5152 | 4840 | - | 4763 | 4310 | ≥ 2600 |
| Massa Específica (kg/dm ³) | | - | 2,77 | - | 3,02 | 2,96 | - |
| Finura na peneira nº 200 | | - | 0,7% | ≤ 8,0 | 0,9% | 0,4% | ≤ 12,0 |
| Tempo Início de Pega (min) | | 300 | 295 | ≥ 60 | 184 | 185 | ≥ 60 |
| Tempo Fim de Pega (min) | | 420 | 355 | ≤ 720 | 262 | 235 | ≤ 600 |
| Resistência à Compressão (MPa) | 3 dias de idade | 27,5 | 24,6 | ≥ 10,0 | 27,6 | 27,2 | ≥ 10,0 |
| | 7 dias de idade | 32,6 | 31,7 | ≥ 20,0 | 33,2 | 31,0 | ≥ 20,0 |
| | 28 dias de idade | 46,9 | 43,8 | ≥ 32,0 | 41,1 | 43,6 | ≥ 32,0 |

*Ensaio realizado na CIENTEC.

Tabela 6: características químicas dos cimentos utilizados na pesquisa

| Características Químicas | | Cimento CP IV 32 RS | | | Cimento CP II Z 32 | | |
|--------------------------------|--|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| | | Dados do Fabricante | Valores Obtidos* | NBR 5736 (ABNT, 1999) | Dados do Fabricante | Valores Obtidos* | NBR 11578 (ABNT, 1991) |
| SiO ₂ | | 32,44 | 29,92 | - | - | 20,61 | - |
| Fe ₂ O ₃ | | 3,57 | 3,69 | - | - | 3,04 | - |
| CaO | | 38,42 | 40,31 | - | 1,44 | 54,32 | - |
| Al ₂ O ₃ | | 9,84 | 8,92 | - | - | 5,92 | - |
| K ₂ O | | 1,5 | - | - | - | - | - |
| Na ₂ O | | 0,18 | - | - | - | - | - |
| MgO | | 4,71 | 3,33 | ≤ 6,5 | 6,01 | 3,5 | ≤ 6,5 |
| SO ₃ | | 2,77 | 2,06 | ≤ 4,0 | 2,90 | 3,16 | ≤ 4,0 |
| Perda ao Fogo | | 2,82 | 2,4 | ≤ 4,5 | 4,98 | 4,97 | ≤ 6,5 |
| Resíduo Insolúvel | | - | 36,85 | - | - | 12,38 | ≤ 16,0 |
| Cal Livre | | - | 0,82 | - | - | 1,21 | - |

*Ensaio realizado no LTCI.

3.3.2 Agregado Miúdo

A areia utilizada foi uma areia natural quartzosa oriunda do rio Jacuí. Suas características podem ser observadas na tabela 7. O ensaio de composição granulométrica foi realizado segundo procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para determinação da massa específica e da massa unitária adotaram-se os procedimentos da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Tabela 7: características físicas do agregado miúdo

| Determinações | Resultados Obtidos* | | |
|--|--------------------------|-------------------|----------------------|
| | Abertura da Peneira (mm) | % em massa retida | % em massa acumulada |
| Composição Granulométrica | 4,75 | 2 | 2 |
| | 2,36 | 6 | 8 |
| | 1,18 | 10 | 18 |
| | 0,60 | 27 | 45 |
| | 0,30 | 41 | 86 |
| | 0,15 | 9 | 95 |
| | < 0,15 | 5 | 100 |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | | 4,75 | |
| Módulo de Finura | | 2,54 | |
| Massa Específica (kg/dm ³) | | 2,62 | |
| Massa Unitária (kg/dm ³) | | 1,59 | |

* Ensaio realizado na CIENTEC.

3.3.3 Agregado Graúdo

Conforme já citado, reproduziram-se os concretos segundo padrões utilizados pela central dosadora onde o estudo foi reproduzido. Sendo assim, foram utilizados dois agregados graúdos na composição do traço do concreto, nas proporções de 85% de brita 19mm e 15% de brita 9,5mm. As características desses agregados estão apresentadas na tabela 8. O ensaio de composição granulométrica foi realizado segundo procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa específica e a massa unitária foram determinadas segundo procedimentos da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Tabela 8: características físicas do agregado graúdo

| Determinações | Abertura da Peneira (mm) | Resultados* - Brita 19 mm | | Resultados* - Brita 9,5 mm | |
|---|--------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | | % em massa retida | % em massa acumulada | % em massa retida | % em massa acumulada |
| Composição Granulométrica | 25,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 19,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 12,50 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| | 9,50 | 34 | 84 | 0 | 0 |
| | 6,30 | 12 | 96 | 25 | 25 |
| | 4,75 | 2 | 98 | 45 | 70 |
| | < 4,75 | 2 | 100 | 30 | 100 |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | | 19,00 | | 9,50 | |
| Módulo de Finura | | 6,82 | | 5,70 | |
| Material fino passante peneira 75µm (%) | | 1,20 | | 0,60 | |
| Massa Específica (kg/dm ³) | | 2,80 | | 2,82 | |
| Massa Unitária (kg/dm ³) | | 1,45 | | 1,43 | |

* Ensaio realizado na CIENTEC.

3.3.4 Aditivo e Água

A água utilizada foi a fornecida pela rede de abastecimento público. Os aditivos adotados para realização dessa pesquisa foram caracterizados como um aditivo plastificante polifuncional e um superplastificante a base de policarboxilato, para correção e manutenção do abatimento, ambos de pega normal. As principais especificações técnicas dos aditivos utilizados (segundo dados fornecidos pelo fabricante) estão apresentadas na tabela 9.

Tabela 9: especificações técnicas dos aditivos

| Especificações Técnicas | Aditivo Plastificante* | Aditivo Superplastificante* |
|---------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Base Química | Lignossulfonato | Policarboxilato |
| Densidade (g/cm ³) | 1,03 à 1,07 | 1,067 a 1,107 |
| pH | 6,0 à 8,0 | 5,0 a 7,0 |
| Teor de Sólidos (%) | 9,9 à 11,0 | 38,0 a 42,0 |
| Dosagem (% sobre massa cimento) | 0,2 à 1,0 | 0,2 a 1,0 |

*Dados do Fabricante

3.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Conforme proposta dessa pesquisa, a produção dos concretos foi realizada em laboratório e na central, procurando assegurar a maior fidelidade entre os dois processos. O detalhamento do processo utilizado em ambos os casos será apresentado a seguir.

3.4.1 Traços Utilizados

A especificação dos traços de concreto utilizados, assim como as proporções de cada material utilizado nas dosagens, está detalhada na tabela 10.

Tabela 10: proporcionamento dos materiais utilizados nas dosagens dos concretos

| Traço 1 : m | Traço Unitário, em massa | Quantidade dos Materiais por m ³ (kg) | | | | | | Teor de Argamassa (%) | Relação a/c |
|----------------|--------------------------------|--|-------|----------------|---------------|---------------------|------|-----------------------------|----------------|
| | | Cimento | Areia | Brita 9,5mm | Brita 19mm | Aditivo Plastif. | Água | | |
| 1 : 3,2 | 1 : 1,28 : 1,95 | 514 | 660 | 150 | 850 | 3,08 | 206 | 54 | 0,40 |
| 1 : 4,5 | 1 : 1,97 : 2,53 | 395 | 776 | 150 | 847 | 2,37 | 205 | 54 | 0,52 |
| 1 : 6,2 | 1 : 2,90 : 3,32 | 300 | 869 | 149 | 847 | 1,80 | 204 | 54 | 0,68 |

A dosagem do aditivo plastificante foi de 0,6% sobre a massa de cimento. O abatimento para lançamento do concreto foi fixado em 120±20mm. Esse padrão de traços de concreto é produzido na central com cimento CP IV 32 RS. Porém, como na pesquisa foi estabelecido utilizar dois tipos de cimento e, com isso, ter uma abrangência maior frente à realidade das centrais dosadoras de concreto da região de Porto Alegre, foram também reproduzidos os mesmos traços, tanto para condição de laboratório quanto na central dosadora, substituindo-se apenas o cimento CP IV 32 RS pelo cimento CP II Z 32.

3.4.2 Produção em Laboratório

A produção dos traços em laboratório foi feita em betoneira de eixo inclinado, usual de obra, com capacidade máxima de 320 litros. A sequência de colocação dos materiais obedeceu a seguinte ordem: agregados graúdos + parte da água (mistura) + cimento (mistura) + aditivo plastificante (mistura) + agregado miúdo (mistura) + água final (mistura). O aditivo foi adicionado à mistura antes da colocação do agregado miúdo, para que seu efeito fosse mais eficaz sobre os grãos de cimento.

Após a colocação dos materiais aguardou-se por um tempo de mistura de cinco minutos. A verificação da trabalhabilidade foi realizada de acordo com prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Com o abatimento inicial determinado e atendendo à especificação de 120±20mm, procedeu-se à moldagem dos corpos de prova, que permaneceram em local protegido, cobertos com lona plástica, durante as primeiras 24 horas para evitar a evaporação da água de amassamento, quando então foram desmoldados e devidamente identificados. Após identificação foram colocados em um tanque de água saturada com cal a uma temperatura de 23±2°C, em câmara climatizada para sua cura até a idade de ensaio (28 dias) conforme

prescreve a norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Essa sequência de operações está ilustrada na figura 29.



Figura 29: procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova: (a) moldagem dos corpos de prova, (b) cura inicial, (c) identificação e (d) cura final

Após a verificação do abatimento do concreto recém-misturado (0h), padronizaram-se ciclos de descanso e agitação do concreto na betoneira em períodos de 15 e 5 minutos, respectivamente, até o tempo de 360 minutos (6h). Tal procedimento foi adotado, pois não foi possível deixar a betoneira em baixa rotação simulando a situação real que ocorre no caminhão betoneira.

Ao longo dos ciclos de descanso e agitação do concreto, nos tempos de 120 (2h), 180 (3h), 240 (4h), 300 (5h) e 360 (6h) minutos, foi determinado o abatimento da mistura. Depois de verificado, através da incorporação de aditivo superplastificante, adotou-se o procedimento do restabelecimento do abatimento à condição inicial de mistura (120 ± 20 mm). O aditivo superplastificante foi adicionado em pequenas quantidades, até que o abatimento desejado fosse alcançado, por observação visual e confirmação pelo teste do abatimento pelo tronco de cone. Esse processo está ilustrado na figura 30, referente a uma das concretagens realizadas em laboratório.

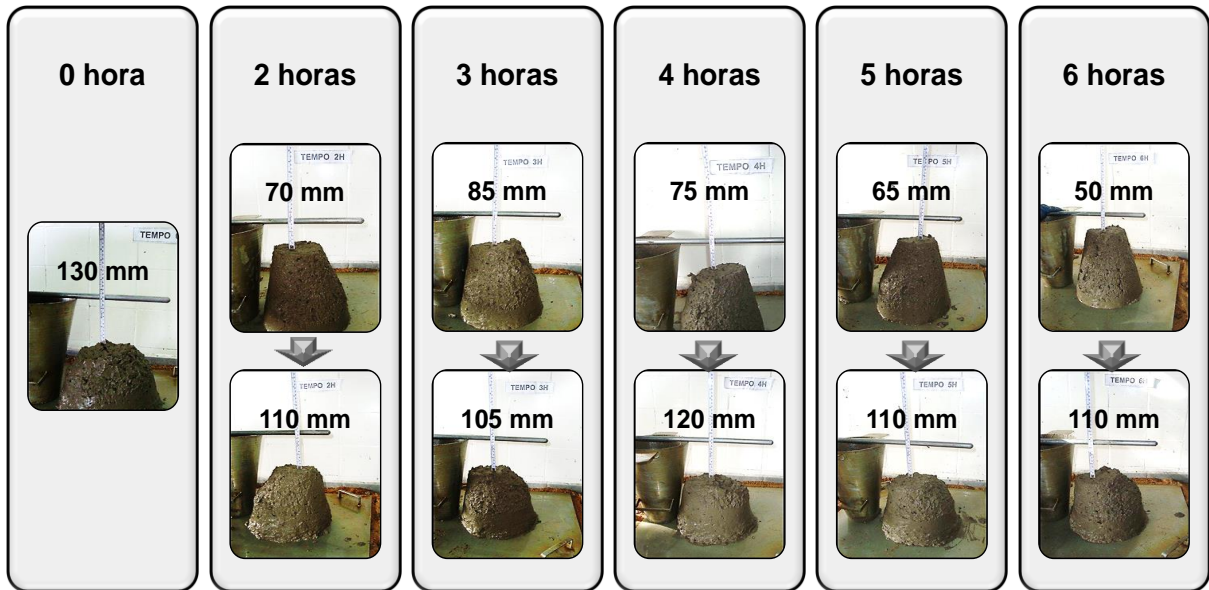


Figura 30: verificação e restabelecimento do abatimento à condição inicial (120+-20mm) com a incorporação de aditivo superplastificante à mistura durante o período de 6 horas

Os corpos de prova para cada etapa do processo foram moldados após a adição do aditivo superplastificante, quando o abatimento já havia sido restabelecido à condição equivalente ao padrão inicial adotado.

3.4.3 Produção na Central Dosadora de Concreto

Para a produção dos concretos em escala real em uma central dosadora de concreto, alguns cuidados foram adotados como verificação das condições internas do balão do caminhão utilizado, principalmente em relação ao estado das pás, garantindo boa mistura. Para a produção de todos os traços utilizou-se sempre o mesmo caminhão e o mesmo motorista, buscando minimizar a interferência desses fatores no comportamento da mistura. Pelo fato dos agregados na central ficarem armazenados a céu aberto, corrigiu-se a quantidade de água total calculada para o traço em função da umidade presente na areia.

O procedimento de mistura dos materiais difere um pouco do utilizado no laboratório, em função do sistema de pesagem da central. Os agregados são pesados em uma mesma balança com pesagens cumulativas, enquanto que, para o cimento, aditivo e água, existem balanças específicas. Para o processo de carregamento do caminhão inicia-se, em média, com 85% da quantidade total de água (o restante fica como margem para dosagem final no dosador) juntamente com o aditivo plastificante. Posteriormente, libera-se a balança com os

agregados (britas e areia) e, assim que inicia a entrada dos agregados no caminhão, procede-se ao carregamento do cimento, para que entre no caminhão impulsionado pela entrada dos agregados, evitando perdas. Esse processo pode ser visualizado na figura 31.

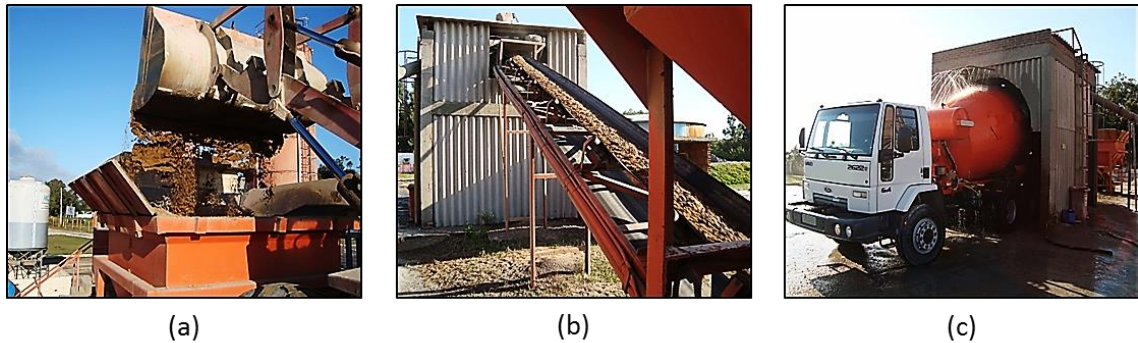


Figura 31: processo de carregamento do concreto na central dosadora: (a) carregamento dos agregados, (b) transporte dos agregados e (c) carregamento do caminhão

Após o carregamento, com a entrada total dos materiais, o caminhão dirige-se ao dosador para lavagem da calha/funil e ajuste do abatimento. Nessa etapa deve-se ter um controle rigoroso da quantidade de água adicionada, tendo a certeza de que não exceda a margem que ficou estipulada no momento do carregamento, evitando, com isso, a alteração da relação a/c da dosagem original. Nesse momento é possível verificar (visualmente) a homogeneidade do concreto (figura 32).

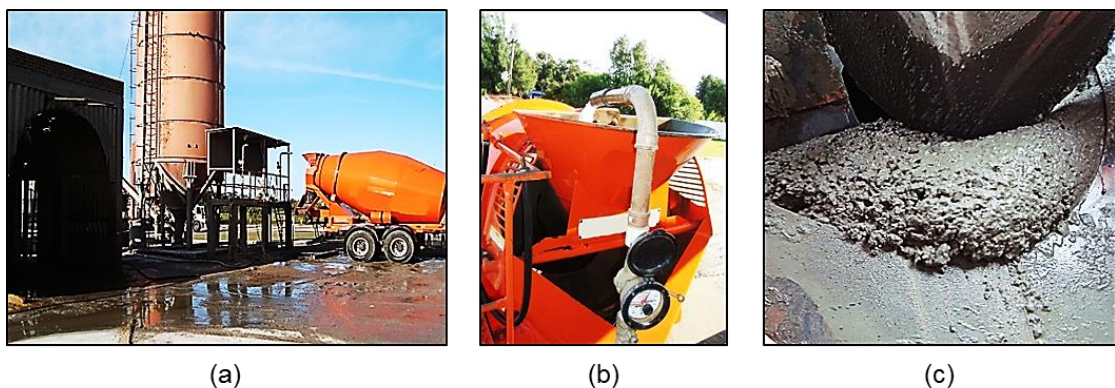


Figura 32: processo de dosagem final do concreto na central dosadora: (a) dosador, (b) água final e (c) aspecto final do concreto

Concluído o processo de carregamento e dosagem final do concreto, verificou-se o abatimento do concreto recém-misturado, considerado como tempo de mistura 0 hora. Após realizou-se a moldagem dos corpos de prova, conforme procedimento já detalhado. Assim como realizado em laboratório, o caminhão também foi mantido pelo período de 6 horas com o concreto, ao longo do qual foi verificado o abatimento nos tempos de 120 (2h), 180 (3h), 240 (4h), 300 (5h) e 360 (6h) minutos. Para cada tempo, quando necessário, o abatimento foi corrigido ao padrão inicial ($120\pm 20\text{mm}$) com a utilização do aditivo superplastificante, processo ilustrado pela figura 30.

O período entre os ciclos de verificação do abatimento diferiu do adotado com a betoneira, pois o caminhão não pode ficar muito tempo carregado com concreto sem que o balão esteja em movimento, conforme especificado no seu manual de instruções. Adotou-se, simulando situação real de obra, para os intervalos de descanso, que o caminhão ficasse girando em rotação baixa de 2 rotações/minuto, e antes da verificação do abatimento, em cada tempo analisado, o concreto permanecia por 5 minutos em rotação máxima de 16 rotações/minuto.

Não foi possível, assim como em laboratório, imediatamente observar o comportamento do superplastificante no concreto e adicioná-lo bem no meio da mistura, dissipando-o uniformemente por toda massa de concreto. Desta forma, para garantir bom desempenho, utilizou-se, para a colocação do aditivo, um tubo adaptado com um bocal, garantindo uma adequada dispersão do aditivo na massa de concreto, como apresentado na figura 33.

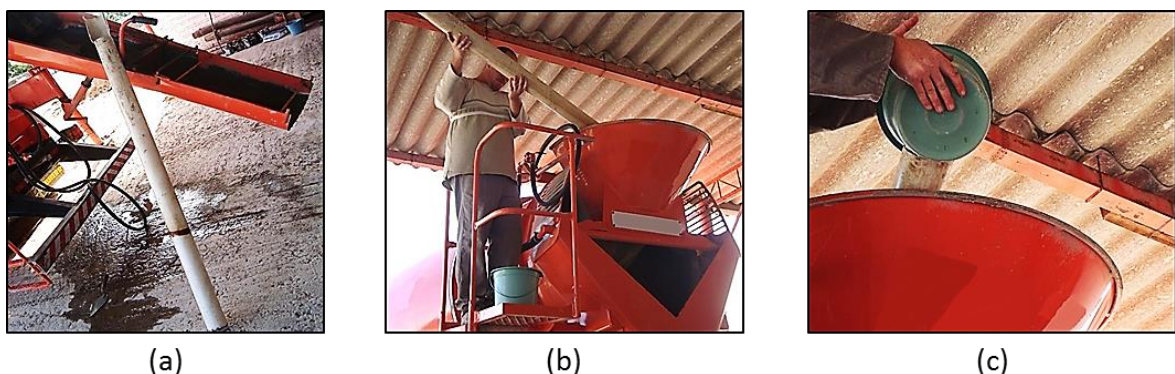


Figura 33: adição do superplastificante ao concreto: (a) cano de pvc adaptado para colocação do aditivo, (b) posicionamento do cano e (c) adição do aditivo ao concreto

Após a adição do superplastificante e restabelecimento do abatimento à condição inicial ($120\pm 20\text{mm}$), nos tempos de 2h, 4h, 5h e 6h, houve a moldagem dos corpos de prova.

Para essa condição de produção em escala real, pela disponibilidade de uma quantidade expressiva de concreto em todos os tempos de mistura estudados, executou-se a concretagem de blocos maciços de concreto simulando, com isso, o lançamento e adensamento do concreto semelhante à condição que ocorreria durante uma etapa de concretagem em obra. As dimensões dos blocos utilizados foram de (50x50x100)cm, totalizando um volume de concreto de 0,25m³ para cada bloco. Para facilitar a posterior desmoldagem dos blocos, a fôrma utilizada foi projetada com encaixes de fácil manuseio, conforme ilustra a figura 34.

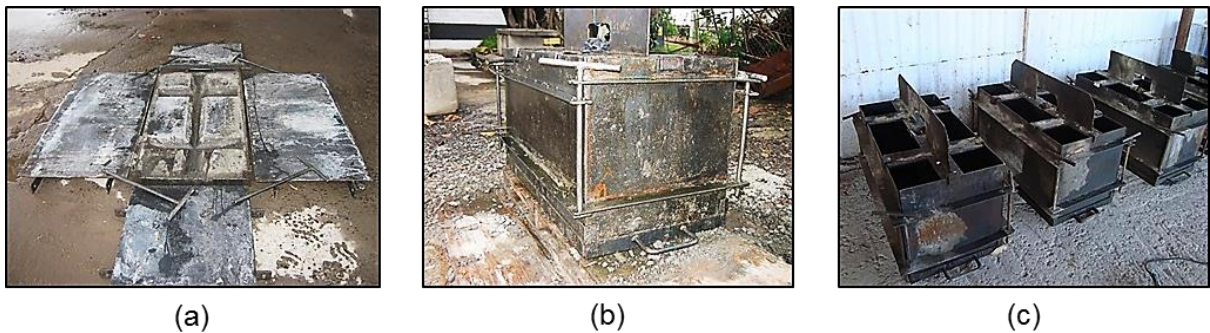


Figura 34: modelo de fôrmas para produção dos blocos de concreto: (a) detalhe das partes da fôrma (b) detalhe dos encaixes e (c) fôrmas prontas para concretagem

Durante a concretagem dos blocos executou-se, cuidadosamente, o processo de vibração, garantindo um adequado adensamento do concreto. O processo de concretagem dos blocos pode ser visualizado na figura 35.

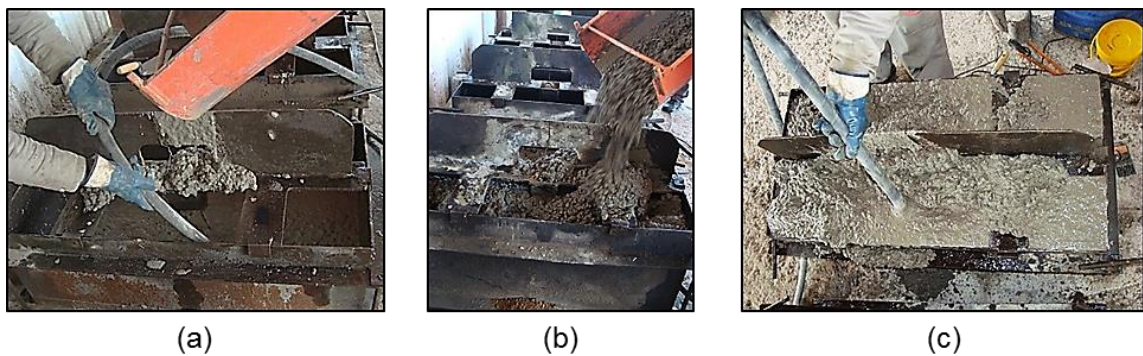


Figura 35: concretagem dos blocos de concreto: (a) concretagem de meio bloco e vibração, (b) concretagem de todo o bloco e (c) vibração final do concreto

Ao final totalizou-se a produção de 30 blocos de concreto, correspondendo cada bloco a um ponto de estudo da matriz proposta. Após 72 horas, os blocos foram deformados e devidamente identificados. Decorridos 28 dias de idade, foram usados na construção da parede de um compartimento para armazenamento de agregados na central dosadora, localizada na RS-030 na entrada da cidade de Tramandaí/RS, ao lado da lagoa e a 4000 metros do mar. Com isso, os blocos permaneceram sujeitos às condições ambientais, reproduzindo uma condição real caso o concreto fosse utilizado em uma obra. A parede construída e sua localização em relação ao mar, podem ser visualizadas na figura 36.



Figura 36: (a) parede construída com os blocos e (b) localização da parede em relação ao mar (disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>)

A execução dessa estrutura, contemplando todos os pontos da matriz estudada nesta pesquisa, possibilitou a realização de vários ensaios posteriores para análise das propriedades do concreto exposto à condição real no ambiente contribuindo, assim, para o melhor entendimento no comportamento do concreto, quando submetido ao processo de redosagem com aditivo superplastificante ao longo de um tempo de até 360 minutos.

3.5 ENSAIOS REALIZADOS

Conforme já citado na revisão bibliográfica, Polesello (2012) mostrou, para esta mesma matriz de estudo, que o concreto produzido, tanto em laboratório como na central dosadora, mantém, comprovando estatisticamente, sua resistência à compressão e a absorção de

água por capilaridade quando o procedimento de restabelecimento de seu abatimento, ao nível inicial, ao longo do tempo é feito com aditivo superplastificante à base policarboxilato.

No entanto, pela necessidade de uma análise mais detalhada do comportamento perante esse procedimento utilizado, detalham-se outros ensaios realizados que contribuem no entendimento das propriedades do concreto nas condições propostas pela pesquisa. Realizaram-se ensaios no concreto produzido em laboratório, no concreto produzido na central dosadora, e, ainda, foram feitos ensaios em pastas de cimento reproduzidas com os mesmos parâmetros utilizados para a dosagem do concreto, conforme detalha a figura 37.

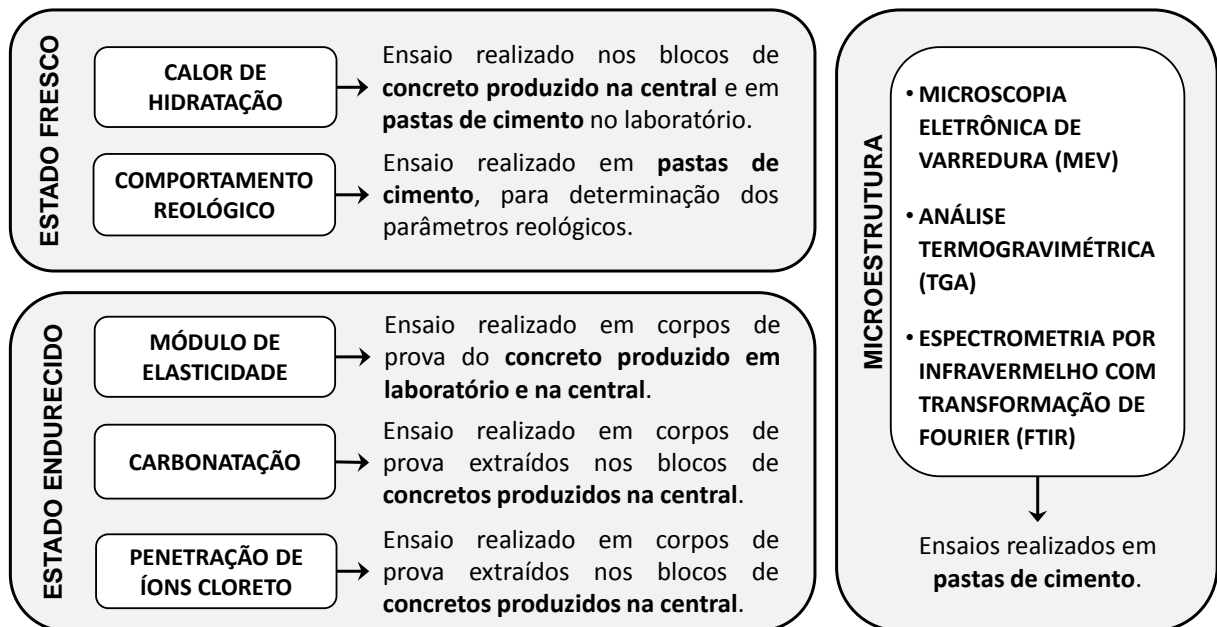


Figura 37: detalhamento dos ensaios realizados na pesquisa

3.5.1 Calor de Hidratação

O monitoramento do calor de hidratação do cimento ao longo do tempo é importante para a tecnologia do concreto, pois pode ser desfavorável em determinadas situações (na execução de estruturas com concreto massa) e favorável em outras (em concretagens quando as temperaturas ambientes estiverem muito baixas por fornecer energia de ativação para as reações de hidratação). Além disso, os dados de estudo do calor de hidratação podem ser usados para caracterizar os comportamentos de pega e endurecimento dos cimentos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Primeiramente, realizou-se a verificação do calor de hidratação para as dosagens da pesquisa ao longo da hidratação do concreto quando executada a concretagem dos blocos durante a produção do concreto na central dosadora. Posteriormente com o uso de um calorímetro, em pastas, reproduzindo toda matriz em estudo, conforme detalhado a seguir.

3.5.1.1 Calor de hidratação em blocos de concreto

Pelas dimensões dos blocos produzidos (50x50x100cm), o monitoramento do calor de hidratação foi realizado através da medição da temperatura no centro de cada bloco tendo, assim, uma camada de pelo menos 20 cm até a face externa, minimizando, com isso, a influência da temperatura ambiente.

Imediatamente após a concretagem dos blocos, introduziu-se no centro da massa de concreto do bloco um sensor de temperatura (termopar¹⁵), conforme ilustrado pela figura 38, que, conectado a um instrumento de leitura (figura 39a), permite o registro da temperatura durante a hidratação do cimento, ao longo do tempo.



Figura 38: (a) modelo de termopar utilizado, (b) posicionamento do termopar no centro do bloco de concreto e (c) proteção do termopar e acabamento final do bloco

Buscando um melhor controle na temperatura interna dos blocos, a parte superior de cada bloco foi protegida com uma camada de poliestireno expandido, minimizando, assim, a

¹⁵ Termopar é um sensor de temperatura simples, constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade formam um circuito fechado. O termopar desta maneira gera uma Força Eletro-Motriz (FEM), que quando conectada a um Instrumento de Leitura consegue ler a temperatura do processo.

perda de calor para o ambiente. Utilizaram-se corpos de prova de concreto como peso para garantir que não houvesse movimentação no posicionamento das placas de isolamento térmico (figura 39b). Depois de concluída a colocação do termopar no bloco, realizou-se a primeira leitura da temperatura do concreto, conforme ilustrado na figura 39c.

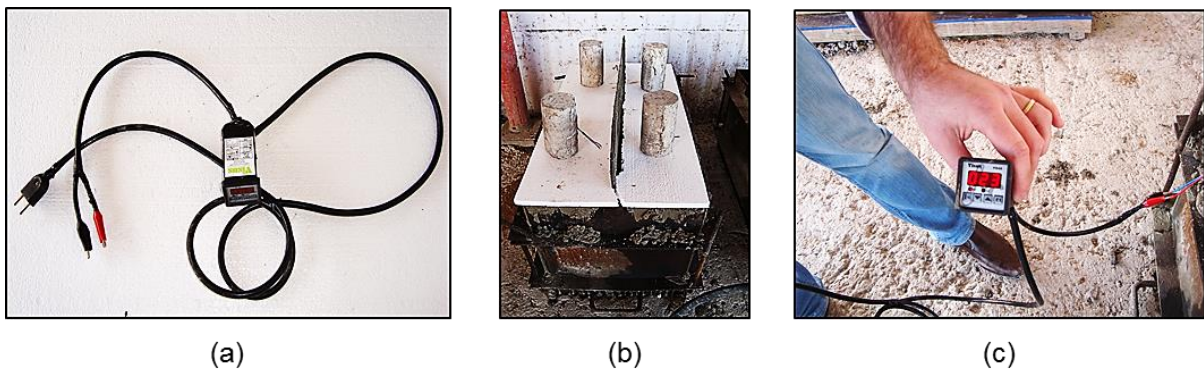


Figura 39: (a) instrumento utilizado para leitura, (b) proteção superior dos blocos com placa de poliestireno expandido, e (c) leitura da temperatura nos blocos de concreto

Procedeu-se as leituras da temperatura dos blocos a cada hora, durante um período de 30 horas. A partir desses registros foi possível estabelecer uma curva do calor de hidratação liberado em cada bloco para cada tempo de mistura do concreto.

3.5.1.2 Calor de hidratação em pastas

Um dos testes comparativos que se tem utilizado para monitoramento do calor de hidratação pelo tempo é o teste do calorímetro. Para Sandberg e Benini (2008), na medida em que um sistema isotérmico ou adiabático “perfeito” é difícil de ser obtido sem o uso de equipamento de alto custo, o uso de um calorímetro semi-adiabático apresenta-se como uma aproximação adequada para fins práticos de aplicação. A figura 40 apresenta uma curva típica obtida em um calorímetro semi-adiabático e a representação do fenômeno físico associado à hidratação do cimento.

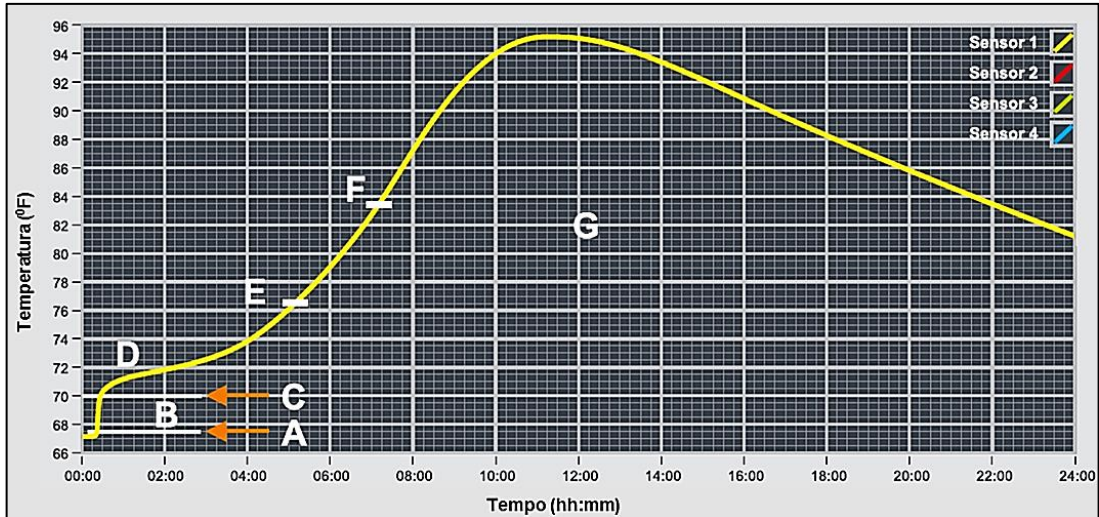


Figura 40: curva típica de um calorímetro semi-adiabático (SANDBERG; BENINI, 2008)

É possível, de uma forma geral, interpretar a curva de hidratação da amostra, verificando os pontos assinalados acima, como:

- A - início do ensaio, coleta da amostra e adição no porta-amostras;
- B - ajustes iniciais de equalização da temperatura do concreto comparado a temperatura do equipamento;
- C - temperatura do concreto;
- D - período de dormência, estado fresco (é possível a identificação de reação de pega instantânea quando existe deficiência no teor de SO_3 disponível);
- E - corresponde aproximadamente ao tempo de início de pega;
- F - corresponde aproximadamente ao tempo de fim de pega;
- G - hidratação dos silicatos responsáveis pelo desenvolvimento da resistência.

Com a disponibilidade do calorímetro semi-adiabático, ilustrado na figura 41, realizou-se a calorimetria em pastas de cimento, com as mesmas relações a/c usados para o concreto, adotando o procedimento proposto pela pesquisa de manutenção do sistema em mistura prolongada por um período de até 6 horas com a incorporação de aditivo superplastificante à base de policarboxilato.

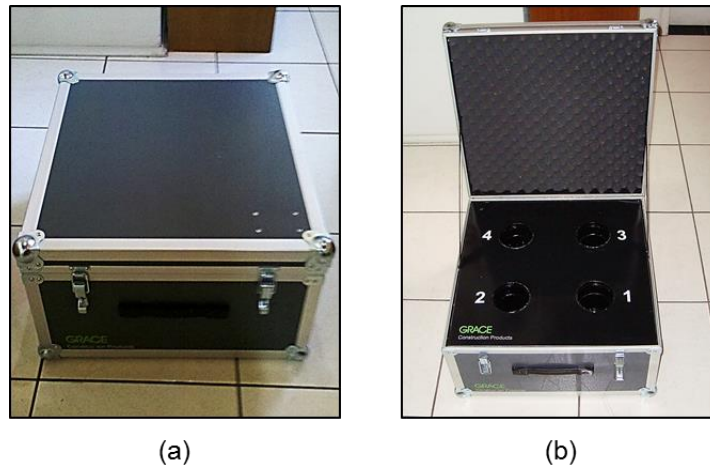


Figura 41: (a) calorímetro semi-adiabático utilizado no ensaio e (b) detalhe dos pontos de leitura do aparelho

O ensaio foi realizado em ambiente com temperatura controlada $22\pm 2^{\circ}\text{C}$. Adotou-se, como procedimento padrão, após o primeiro contato do cimento com a água, ciclos de mistura e descanso das pastas de 1 e 15 minutos, respectivamente, até o tempo de mistura final especificado. Baseando-se nos resultados apresentados por Polesello (2012) e para evitar que ocorresse segregação da mistura, optou-se em padronizar a dosagem total utilizada do aditivo superplastificante para manter a pasta em mistura por até 6 horas, em 0,40%.

Assim como na produção dos concretos, para as pastas também a incorporação do aditivo superplastificante à mistura foi feita a cada hora, a partir do tempo de mistura de 2 horas, até o tempo limite especificado de 6 horas. Em cada um dos tempos de mistura especificados para incorporação do aditivo foi dosada uma quantidade de 0,08% da massa de cimento da mistura. Após a incorporação do superplastificante e mistura da pasta por 1 minuto, a amostra correspondente ao respectivo tempo de mistura era introduzida no calorímetro para iniciar o monitoramento do calor de hidratação, conforme detalhado pela figura 42.

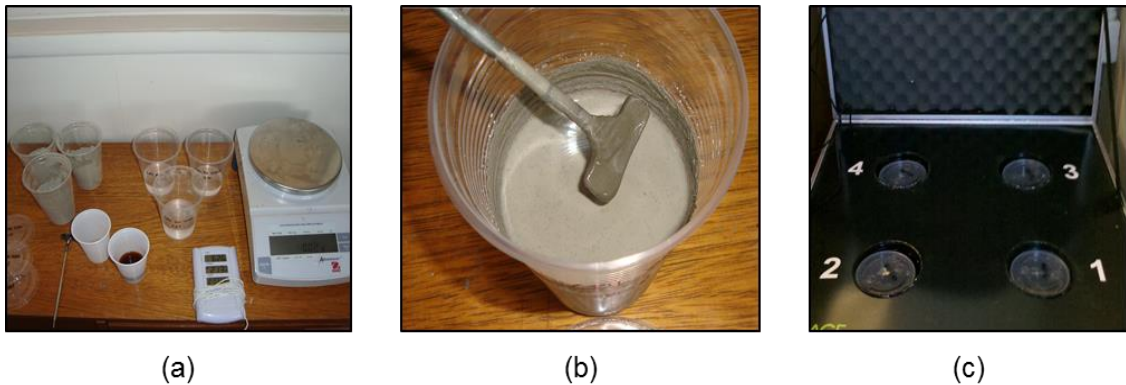


Figura 42: preparo das pastas para ensaio no calorímetro: (a) preparo e pesagem dos materiais, (b) incorporação do superplastificante e mistura da pasta e (c) introdução das pastas no calorímetro para ensaio

O monitoramento da leitura do calor de hidratação no aparelho iniciou no momento em que a primeira pasta, no tempo de 0 hora, foi introduzida. A cada tempo de mistura o aparelho era aberto e a pasta correspondente era introduzida iniciando, então, sua leitura. As leituras foram feitas por um período de até 72 horas com o objetivo de realmente registrar todo o desenvolvimento da curva do calor de hidratação gerada. Os valores das leituras eram registrados por programa específico do aparelho gerando, ao final do ensaio, dados em planilhas eletrônicas que permitiram a plotagem das curvas do calor de hidratação. Além das pastas com as dosagens especificadas pela pesquisa, realizou-se a leitura do calor de hidratação para uma pasta de referência somente de cimento, sem a presença de qualquer aditivo, no tempo 0 hora.

3.5.2 Caracterização Reológica

Para caracterização reológica das misturas foi utilizado o reômetro Brookfield R/S Plus de geometria do tipo cilíndricos coaxiais com diâmetro de 25 mm (CC25), ilustrado na figura 43, do LAMTAC/NORIE-UFRGS.

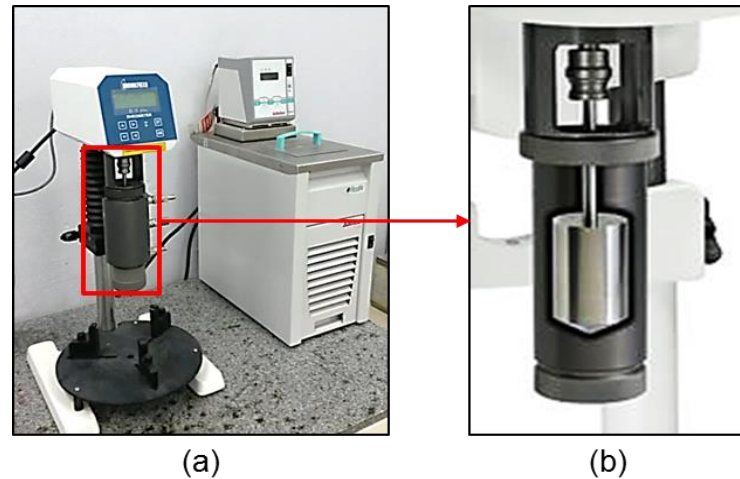


Figura 43: reômetro Brookfield R/S Plus: (a) modelo utilizado na pesquisa e (b) detalhe do cilindro interno utilizado para mistura das amostras durante ensaio

O ensaio de caracterização reológica consiste em submeter as misturas a ciclos de cisalhamento em escada, variando a velocidade de rotação. Através deste ensaio são geradas curvas de cisalhamento que permitem verificar a eficiência na dispersão das partículas e o comportamento reológico das misturas pelo ajuste das curvas de cisalhamento por modelos reológicos (CASTRO, 2007).

O presente estudo adotou o esquema de velocidades de rotação apresentado por Taleiro *et al.* (2013). Após estudos com várias configurações, os referidos autores propõem um esquema de medição projetado com estágios de 10 segundos, para três velocidades de rotação diferentes (45 rad/s ou 429,7 rpm, 27 rad/s ou 257,8 rpm e 9 rad/s ou 85,9 rpm) contemplando incrementos de aceleração e de desaceleração, conforme diagrama ilustrado pela figura 44 e estágios detalhados na tabela 11.

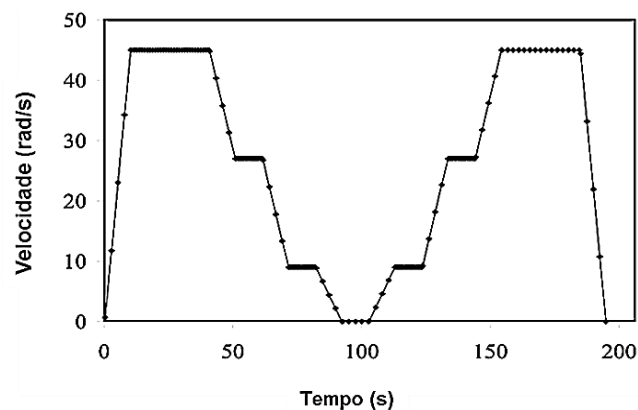


Figura 44: programa de medição utilizado para o ensaio reológico (TALERO *et al.*, 2013)

Tabela 11: estágios de medições realizados no ensaio reológico

| Estágio | Tempo (s) | Velocidade (rad/s) | Estágio | Tempo (s) | Velocidade (rad/s) | Estágio | Tempo (s) | Velocidade (rad/s) |
|---------|-----------|--------------------|---------|-----------|--------------------|---------|-----------|--------------------|
| I | 0 a 10 | 0,0 a 45,0 | VI | 70 a 80 | 9,0 | XI | 120 a 130 | 9,0 a 27,0 |
| II | 10 a 40 | 45,0 | VII | 80 a 90 | 9,0 a 0,0 | XII | 130 a 140 | 27,0 |
| III | 40 a 50 | 45,0 a 27,0 | VIII | 90 a 100 | 0,0 | XIII | 140 a 150 | 27,0 a 45,0 |
| IV | 50 a 60 | 27,0 | IX | 100 a 110 | 0,0 a 9,0 | XIV | 150 a 180 | 45,0 |
| V | 60 a 70 | 27,0 a 9,0 | X | 110 a 120 | 9,0 | XV | 180 a 190 | 45,0 a 0,0 |

Para o ensaio reológico foram reproduzidas em laboratório, com o auxílio de uma argamassadeira, pastas de cimento caracterizadas com os mesmos parâmetros (relações a/c, tipos de cimento, tempos de misturas) usados para a produção dos concretos. O ensaio foi realizado em ambiente com temperatura controlada $22\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Assim como adotado para as pastas no ensaio de calorimetria, após o primeiro contato do cimento com a água, padronizaram-se ciclos de mistura e descanso das pastas de 1 e 15 minutos, respectivamente, até o tempo de mistura final especificado de 6 horas. A dosagem de aditivo superplastificante foi fixada em 0,40%, com base nos resultados apresentados por Polesello (2012), a fim de evitar segregação da mistura. Durante o período de descanso a argamassadeira foi protegida para evitar perda de água por evaporação, conforme ilustra a figura 45.

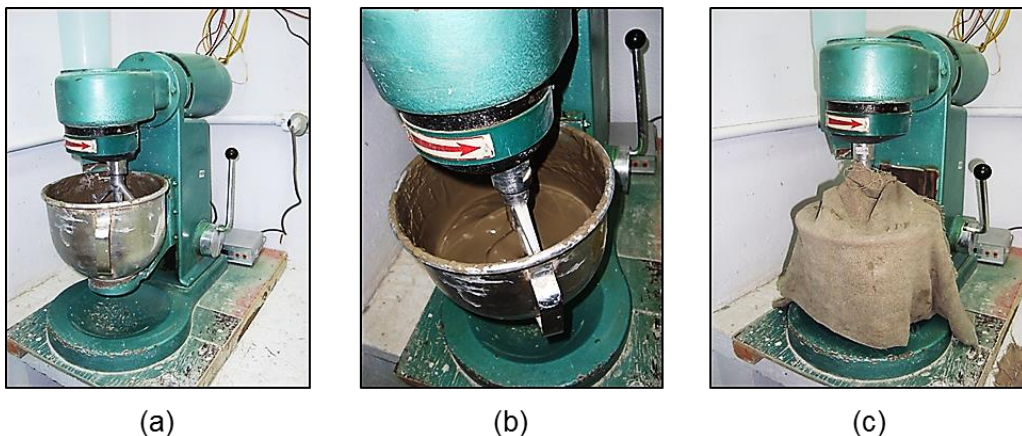


Figura 45: (a) argamassadeira utilizada, (b) processo de mistura das pastas e (c) descanso das pastas de cimento

A partir do tempo de mistura de 2 horas, a cada hora uma quantidade de 0,08% de aditivo superplastificante sobre a massa de cimento era incorporada à mistura. A coleta das amostras para verificação do comportamento reológico foi realizada, além do tempo inicial (0 hora – recém-misturado), a cada hora até o período final analisado de 6 horas, sendo a coleta da amostra realizada após a incorporação e homogeneização do aditivo superplastificante à mistura.

As determinações das curvas de cisalhamento e dos parâmetros reológicos, para cada ponto da mistura estudado, foram obtidas através dos dados fornecidos pelo programa específico do equipamento utilizado, segundo resultados gerados em tabelas no programa Excel.

3.5.3 Módulo de Elasticidade

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que o módulo de elasticidade a ser especificado em projeto e controlado em obra é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}) obtido aos 28 dias de idade. Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante. Seu resultado é obtido, segundo prescrições da NBR 8522 (ABNT, 2008).

Realizou-se o ensaio do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) com auxílio de dois medidores LVDT¹⁶ em posições diametrais opostas, sendo que o valor médio é utilizado para o cálculo dos deslocamentos. O ensaio foi realizado utilizando uma máquina servo controlada Shimadzu de 2.000 KN, a uma velocidade de aplicação de tensão de 0,45 MPa/s, que foi mantida constante durante todo o ensaio, conforme ilustra a figura 46.

¹⁶ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) são sensores que medem deslocamentos lineares.

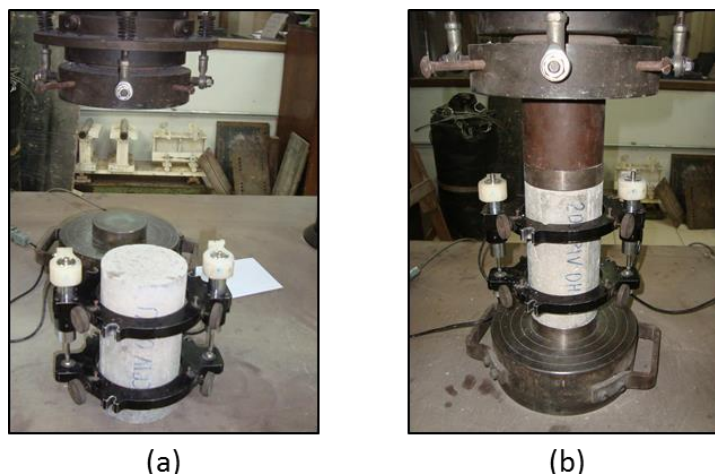


Figura 46: ensaio do módulo de elasticidade secante (E_{cs}): (a) preparo do corpo de prova e (b) execução do ensaio

O módulo foi determinado para os tempos de mistura de 0 hora, 4 horas e 6 horas, sendo que, para cada um dos tempos, foram moldados 3 corpos de prova, totalizando 9 corpos de prova por mistura estudada. O preparo das bases dos corpos de prova, buscando garantir a planicidade e perpendicularidade entre elas, foi realizado através de processo de retificação no dia anterior ao ensaio. O ensaio foi realizado na idade de 28 dias.

3.5.4 Durabilidade do Concreto

Uma das características mais importantes do concreto é sua durabilidade, pois é essencial que ele seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado ao longo da vida da estrutura (NEVILLE e BROOKS; 2013). Os procedimentos adotados nos ensaios para a verificação da profundidade de carbonatação e da penetração de íons cloreto realizados para a análise da durabilidade dos concretos estão detalhados a seguir.

3.5.4.1 Carbonatação

Nesta pesquisa foi realizada a verificação da carbonatação natural do concreto, que é um fenômeno que acontece naturalmente nas estruturas de concreto, sendo a sua avaliação conduzida por meio de exposição do concreto ao ambiente natural. O ensaio foi realizado em corpos de prova extraídos dos blocos utilizados na construção da parede apresentada na figura 36.

A verificação da profundidade de carbonatação dos concretos foi determinada através da face do corpo de prova que ficou exposta ao ambiente natural após um período de 2 anos. Os corpos de prova depois de extraídos, quando necessário, foram cortados na face interna para padronizar os tamanhos, facilitando o rompimento por compressão diametral e, com isso, possibilitar a verificação da profundidade de carbonatação. A figura 47 apresenta esta etapa.

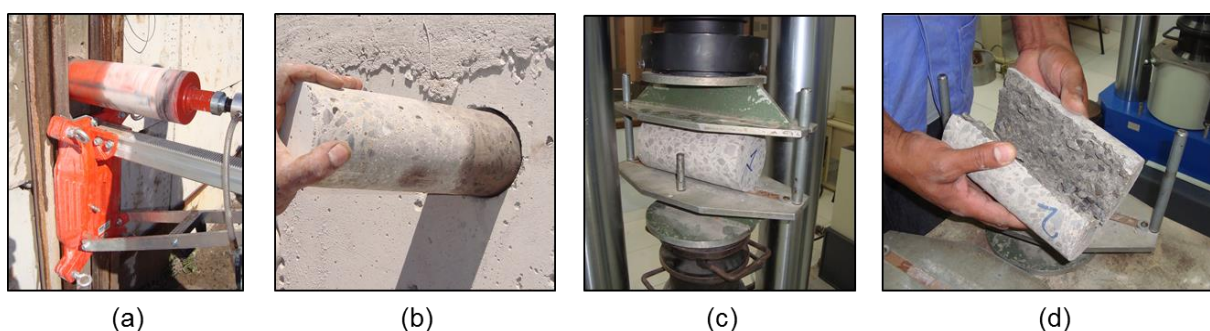


Figura 47: (a) extração de corpos de prova, (b) corpo de prova extraído, (c) ensaio de compressão diametral e (d) corpos de prova para ensaio de carbonatação

O ensaio para verificação da carbonatação foi realizado segundo prescrição da RILEM-CPC-18 (1988), para ensaio de laboratório ou de concreto em obras. O ensaio consiste na aspersão de uma solução, composta com 1% de fenolftaleína, em 70% de álcool etílico e 29% de água destilada, sobre a superfície dos corpos de prova ou estruturas inspecionadas. Na região não carbonatada, observa-se uma coloração rosada. Essa metodologia, de aspersão de fenolftaleína, para analisar as zonas do concreto carbonatadas é uma prática consolidada na literatura (NEVILLE, 2014; YE *et al.*, 2016; HUANG *et al.*, 2016; CHANG *et al.*, 2018). Após aproximadamente uns 20 minutos¹⁷, realizaram-se as leituras da profundidade de carbonatação com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,01mm. Esse processo de verificação da profundidade de carbonatação do concreto está ilustrado na figura 48.

¹⁷ Adotou-se esse tempo, pois, observando visualmente, a região do concreto carbonatada já se apresentava muito bem definida para realização das leituras.

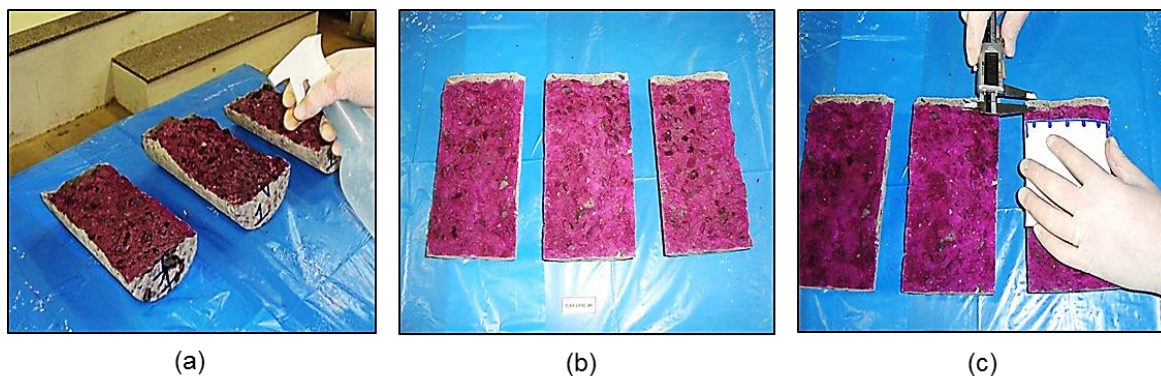


Figura 48: ensaio de carbonatação do concreto: (a) aspersão de fenolftaleína, (b) aspecto das amostras e (c) leituras da profundidade de carbonatação com auxílio de um gabarito para indicar sempre a mesma posição de leitura

O ensaio foi realizado para os concretos com tempos de mistura de 0h, 2h, 4h e 6h. Para cada um desses tempos foram extraídos três corpos de prova, sendo realizadas cinco medidas de profundidade de carbonatação em cada corpo de prova, sendo a profundidade de carbonatação para cada corpo de prova especificada pela média dessas cinco medidas. Por fim, como foram retirados três corpos de prova para cada bloco (cada tempo de mistura), considerou-se a carbonatação final para cada tempo de mistura a média das médias obtidas em cada um dos três corpos de prova.

3.5.4.2 Penetração de Íons Cloreto

Para determinação da penetração de íons cloreto no concreto, também foram analisadas amostras dos blocos que permaneceram em condições naturais de exposição, simulando uma condição real de penetração de cloretos em estruturas quando expostas a ambientes naturalmente agressivos como, por exemplo, regiões próximas ao mar. A metodologia de ensaio utilizada nesta pesquisa é aplicada, especificamente, para determinação do teor de cloretos solúveis em água.

As amostras para o ensaio foram coletadas nos blocos utilizados para a construção da parede apresentada na figura 36. Trata-se de uma região com ambiente agressivo em relação à presença de cloretos, por ser uma cidade litorânea com orla marítima e forte incidência de vento. Segundo Mustafa e Yusof (1994), as razões para estas condições agressivas incluem combinação de altos níveis de concentração de cloreto, altas temperaturas, ciclos de tempo seco e úmido e concreto de alta permeabilidade. Para Meira

et al. (2006), o vento é, de longe, a variável climatológica mais importante no processo de geração e transporte dos cloretos presentes no ar em regiões litorâneas.

A coleta de amostras para a verificação da penetração de íons cloreto nos concretos foi realizada em duas idades de exposição do concreto, após períodos de 2 e 6 anos, e as amostras foram coletadas na forma de material pulverulento (pó) com o auxílio de uma furadeira industrial da marca Makita, modelo HR2455, com broca de 12 mm. O comportamento do concreto foi analisado em três profundidades em relação à sua superfície exposta ao ambiente, especificadas em 5, 15 e 25 mm, buscando-se, com isso, traçar um perfil de penetração de cloretos em função da profundidade. Um plástico transparente (garrafa pet) auxiliou para coleta das amostras em forma de pó. Como o ensaio exige uma quantidade de 3 gramas do material, para todas as amostras coletaram-se quantidades, no mínimo, duas vezes maiores ao exigido para o ensaio. O material coletado foi armazenado em sacos plásticos, devidamente lacrados e identificados, onde permaneceu até o momento da realização do ensaio (figura 49).

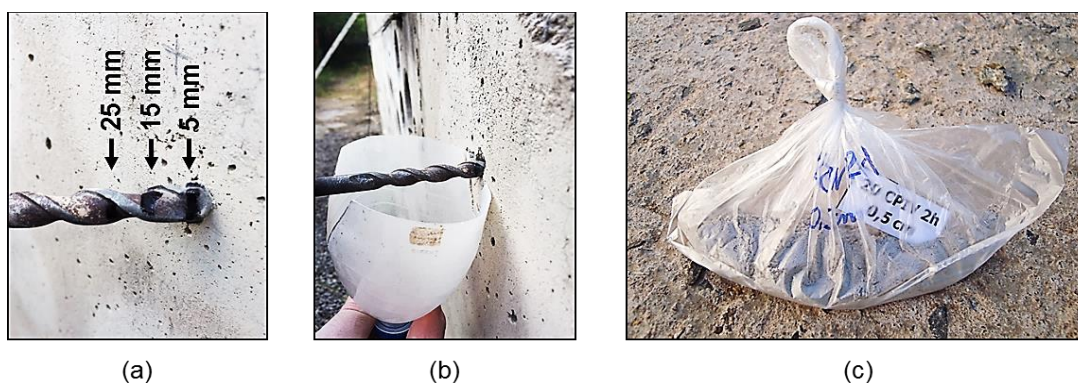


Figura 49: coleta das amostras: (a) marcação das profundidades de perfuração, (b) coleta do pó e (c) armazenamento das amostras

O ensaio para análise das amostras foi realizado no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído – LAMTAC/NORIE/UFRGS, com a utilização de um laboratório portátil especificado como CL-3000 de ensaio de cloretos para uso em obras da NDT James Instruments, contendo:

- contador eletrônico acionado por bateria com circuitos para compensação de temperatura e um microprocessador para conversão direta a percentual de cloretos;
- conjunto de frascos com líquidos padrões para calibração do equipamento;
- eletrodo com sensor de temperatura e balança para pesagem das amostras.

O equipamento fornece direto o percentual de cloretos por massa de concreto, sendo necessária fazer a conversão para o percentual de cloretos por massa de cimento. Para fazer essa transformação foi utilizada a equação 4 apresentada por Helene (1993), conforme detalhada a seguir:

$$Cl_{concreto} = \frac{Cl_{cimento} * C}{\gamma_c} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

C – consumo de cimento utilizado no concreto (kg/m^3)

γ_c – massa específica do concreto (kg/m^3)

Antes de iniciar o procedimento das leituras em cada amostra, para aplicação do método, há a necessidade de calibração do equipamento através das concentrações de cloretos fornecidas com o equipamento, padronizadas em 0,005%; 0,010%; 0,050%; 0,100% e 0,300%. O eletrodo é introduzido na solução e permanece até a estabilização da leitura e verificação dada pelo equipamento. O procedimento de calibração pode ser visualizado na figura 50.

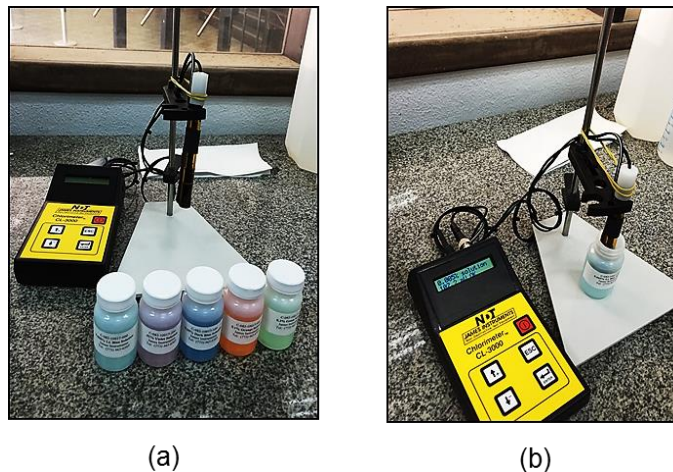


Figura 50: (a) equipamento e concentrações padrão para calibração e (b) calibração

As leituras foram realizadas conforme procedimento detalhado a seguir e ilustrado pela figura 51.

- pesam-se 3 gramas da amostra do pó extraído;
- dilui-se a amostra em 20 ml de água deionizada;

- mistura-se a solução por um período de 2 minutos em um agitador centrífugo;
- a mistura permanece em descanso por mais um período de 2 minutos, conforme especificação do equipamento;
- insere-se o eletrodo na solução, esperando por um período de 1 minuto para estabilizar e realizar a leitura;
- para uma nova análise, lava-se o eletrodo com água deionizada e seca-se com um papel toalha.

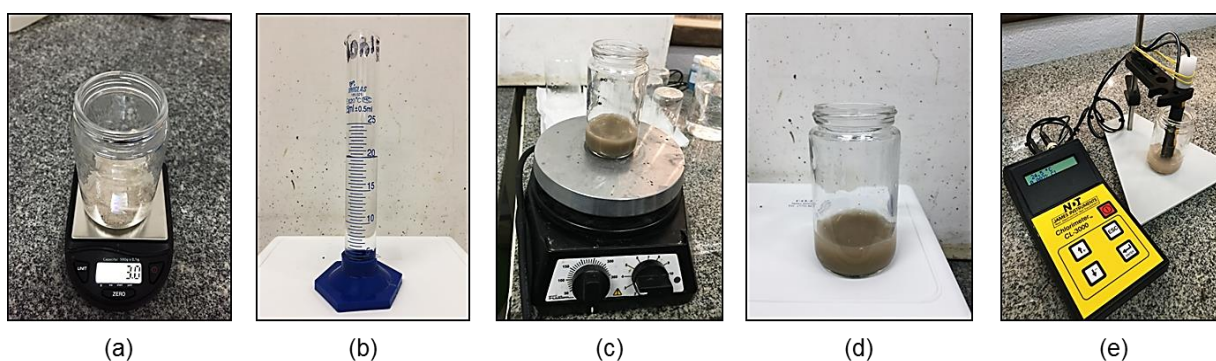


Figura 51: procedimento de ensaio: (a) pesagem 3g da amostra, (b) medição 20 ml de água, (c) agitação mecânica, (d) descanso da mistura e (e) leitura do % de cloretos

3.5.5 Análise Microestrutural

Adicionalmente às propriedades analisadas, detalhadas anteriormente, buscando um melhor entendimento do efeito que o procedimento adotado, manutenção do abatimento do concreto com a utilização de aditivo superplastificante por até 6 horas de mistura, causa sobre o comportamento final do concreto, foram utilizadas algumas técnicas experimentais para analisar o comportamento microestrutural das misturas estudadas. A análise da microestrutura exerce um papel importante pela possibilidade de relacionar esses resultados, de alguma forma, com as propriedades físicas e mecânicas do concreto.

Sendo assim, reproduziu-se em laboratório, com o auxílio de uma argamassadeira, uma das pastas já produzidas para verificação do calor de hidratação e ensaio reológico, caracterizada com uma relação a/c de 0,40 e utilização de cimento CP II Z 32, com a mesma dosagem total de aditivo superplastificante de 0,40%, com a incorporação do mesmo à mistura feita a cada hora, a partir do tempo de mistura de 2 horas até o tempo de mistura de 6 horas, e em cada um dos tempos de mistura especificados foi dosado uma quantidade de 0,08%. Foi adotado o mesmo procedimento realizado nas pastas para o

ensaio do comportamento reológico onde, após o primeiro contato do cimento com a água, a pasta passou por ciclos de mistura e descanso de 1 e 15 minutos, respectivamente, até o tempo de mistura a ser analisada.

As amostras para as análises foram coletadas nos tempos de mistura de 0 hora, 2 horas, 4 horas e 6 horas, sendo que para o tempo de 2 horas duas amostras foram coletadas, uma antes da primeira adição do aditivo à mistura e outra após sua incorporação e homogeneização. A hidratação da pasta de cimento pode ser interrompida por diluição e remoção da água presente nos poros da pasta de cimento por um solvente (LOTHENBACH *et al.*, 2016). Desta forma, a amostra, após coletada da argamassadeira, foi espalhada sobre uma superfície plástica (utilizou-se com 2mm) e lavada com álcool isopropílico, para induzir a remoção da água livre dos capilares com o objetivo de interromper a hidratação do cimento. Após o processo de secagem, com o auxílio de um ventilador, as amostras permaneceram espalhadas por aproximadamente 30 minutos, até que visualmente não se identificasse mais umidade, conforme pode ser observado na figura 54.

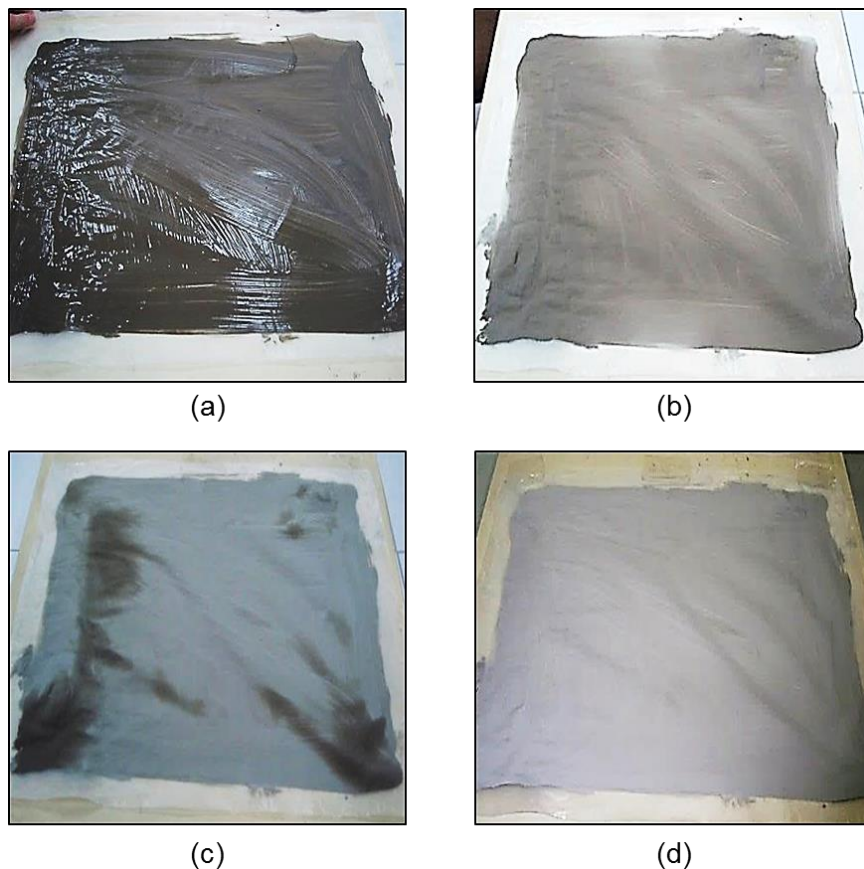


Figura 52: processo de secagem das amostras após lavagem com álcool isopropílico em (a) 1 minuto, (b) 10 minutos, (c) 20 minutos e (d) 30 minutos

O uso do álcool isopropílico para interromper o processo de hidratação já é uma prática utilizada por outros autores e apresentada em estudos anteriores (SILVA e LIBÓRIO, 1999; KISAR, 2005; MITCHELL e MARGESON, 2006; DWIVEDI *et al.*, 2008). Após esse processo as amostras foram armazenadas por mais um período de 4 horas em uma estufa a cerca de 50° para retirada total da umidade. Por fim, foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados na presença de sílica gel, permanecendo nesta condição até o momento da realização de ensaios microestruturais.

A microscopia eletrônica é uma técnica muito adequada para estudar a microestrutura de materiais cimentícios, comumente utilizada para avaliar, por exemplo, como a microestrutura evolui ao longo do tempo de hidratação do cimento (LOTHENBACH *et al.*, 2016). A análise em microscópio eletrônica de varredura (MEV) para as amostras avaliadas foi realizada em equipamento modelo JSM-6510LV, marca JEOL, acoplado com sonda de espectroscopia por dispersão de energia (EDS), marca ThermoScientific, do Laboratório de Estudos Avançados em Materiais da Universidade Feevale.

Outra técnica utilizada no estudo foi a termogravimetria (TG), caracterizada como uma técnica de análise térmica bastante empregada, pela qual através do aquecimento controlado da amostra, a uma taxa geralmente constante, permite registrar quantitativamente a matéria volatilizável expressa por uma curva de perda de massa ao longo do aquecimento da amostra. A análise termogravimétrica foi feita no Laboratório de Cerâmica (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com o uso de analisadores térmicos DTA-TG marca METTLER, as quais as amostras foram aquecidas a um índice de 10°C/min, gás nitrogênio, com fluxo de 40ml/min.

Por fim, as amostras também foram analisadas por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). O espectrômetro de infravermelho FTIR ABB BOMEM MB 102, localizado na Central Analítica da Universidade Feevale, foi o equipamento utilizado nesta análise. Os espectros foram traçados no intervalo de comprimento de onda entre 4000 a 400 cm^{-1} e a intensidade expressa em transmitância (%T).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos relativos às propriedades analisadas para os concretos mantidos em mistura prolongada, com o restabelecimento do abatimento pela incorporação do aditivo superplastificante à mistura por um período de até 6 horas, segundo o planejamento experimental definido no capítulo anterior desta tese.

Os resultados encontrados, sempre que possível, foram analisados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA). Através da análise estatística é possível afirmar se a influência das variáveis de controle é, ou não, significativa sobre a propriedade analisada. Considerou-se um nível de confiança de 95% e foi utilizado para o cálculo o *software* Excel 2010.

4.1 CALOR DE HIDRATAÇÃO

A hidratação dos compostos do cimento é uma reação exotérmica, sendo esse processo acompanhado pela liberação de energia em forma de calor, que depende da finura do cimento, da composição das fases do clínquer e do tipo e quantidade de adições minerais no cimento (BARAN e PICHNIARCZYK, 2017).

Essa liberação de calor foi monitorada durante o período de pega e endurecimento em pastas de cimento com as relações a/c propostas nesta pesquisa, assim como no concreto produzido na central dosadora. O procedimento proposto da manutenção do concreto em mistura prolongada ao longo do tempo com a incorporação de aditivo superplastificante também foi adotado para as pastas, conforme detalhado no capítulo anterior. As curvas do calor de hidratação obtidas estão apresentadas a seguir.

4.1.1 Calor de Hidratação em Pastas

As figuras 53 a 56, apresentadas a seguir, mostram o registro das curvas do calor de hidratação para as pastas, realizado através da utilização do calorímetro semi-adiabático, produzidas com ambos os cimentos CP II Z 32 e CP IV 32 RS.

Primeiramente, a figura 53 mostra as curvas calorimétricas obtidas para as pastas produzidas com cimento CP II Z 32 e, para melhor visualizar o comportamento dessas curvas, a figura 54 apresenta o pico máximo de temperatura registrado e o momento (tempo) em que o mesmo ocorreu. Da mesma forma, os mesmos resultados referentes às pastas produzidas com cimento CP IV 32 RS, curva calorimétrica e os picos de temperatura com respectivos tempos em que foram registrados, estão representados nas figuras 55 e 56, respectivamente.

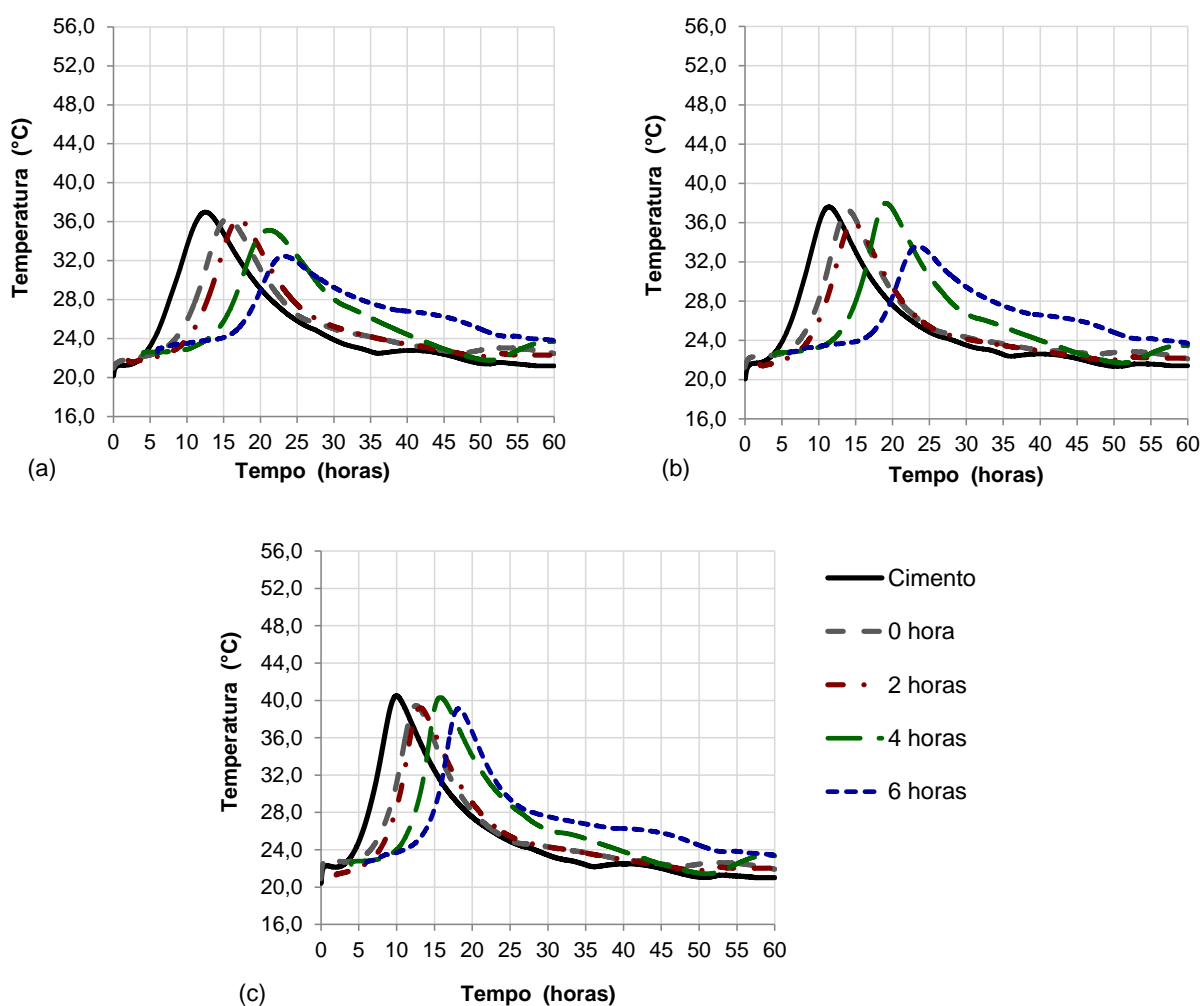


Figura 53: calorimetria semi-adiabática das pastas com cimento tipo CP II Z 32 para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$

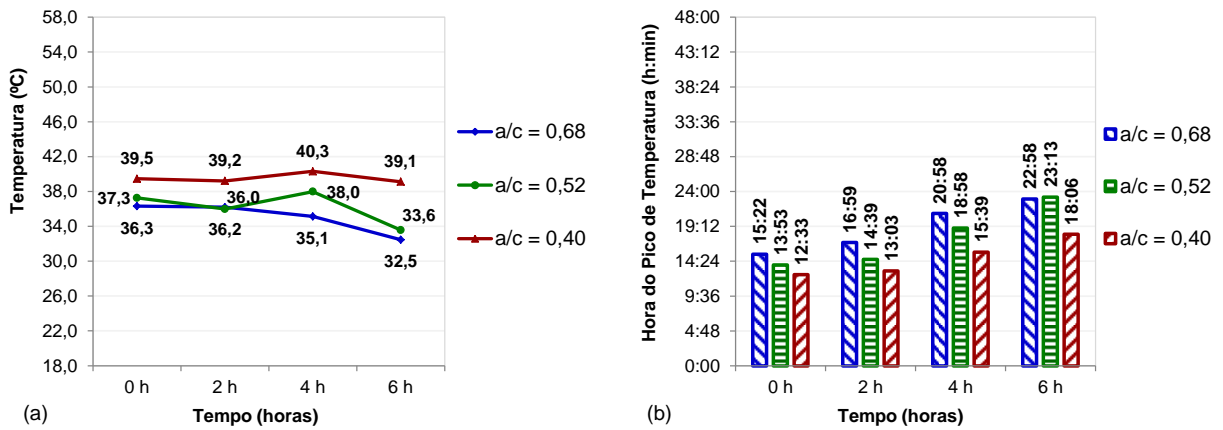


Figura 54: (a) temperatura máxima registrada na hidratação das pastas com cimento tipo CP II Z 32 e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor para cada pasta

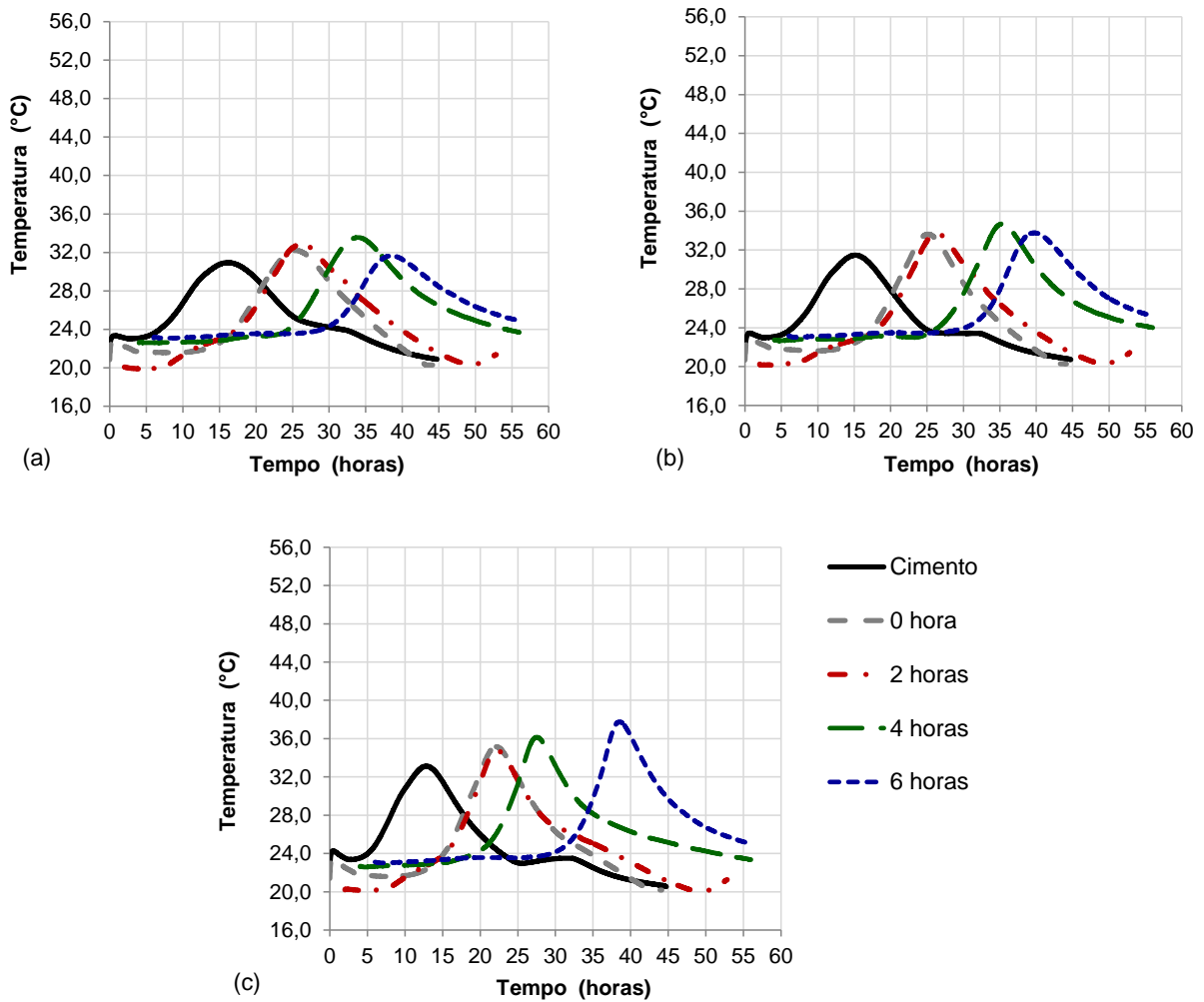


Figura 55: calorimetria semi-adiabática das pastas com cimento tipo CP IV 32 RS para as relações (a) a/c=0,68 (b) a/c=0,52 e (c) a/c=0,40

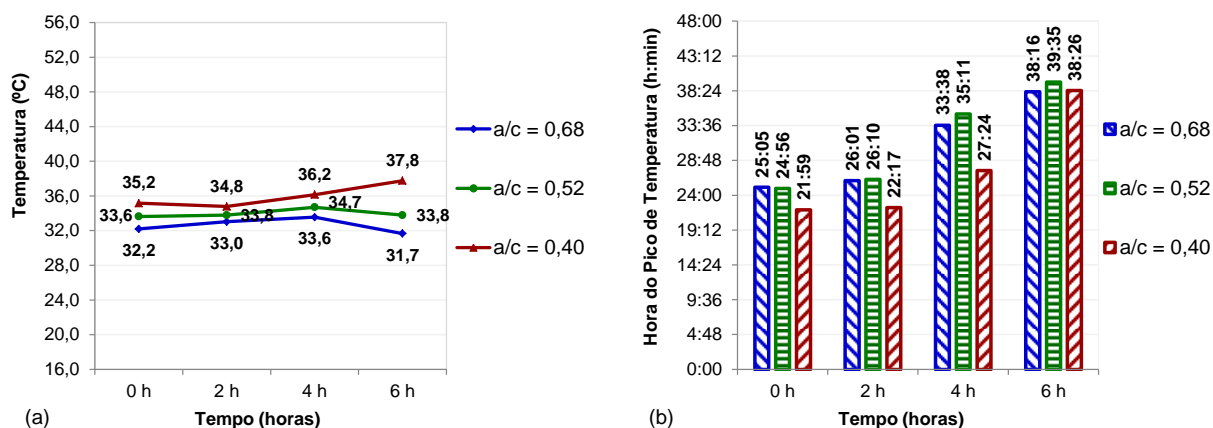


Figura 56: (a) temperatura máxima registrada na hidratação das pastas com cimento tipo CP IV 32 RS e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor para cada pasta

Através da análise das curvas calorimétricas das pastas de cimento, apresentadas pelas figuras 53 e 55, é possível verificar a influência da presença do aditivo em relação aos tempos de início de pega, onde, à medida que o tempo de mistura da pasta aumenta, há um deslocamento da curva para a direita o que significa retardo no início das reações de hidratação do cimento. As curvas calorimétricas mostram um retardo muito maior em relação ao início das reações para pastas produzidas com cimento CP IV 32 RS quando comparadas às com cimento CP II Z 32. Tal comportamento condiz com os resultados dos ensaios de início e fim de pega da caracterização desses cimentos, de 295 minutos para o cimento CP IV 32 RS e 185 minutos para o CP II Z 32.

Contribuindo para o entendimento pelo qual as curvas do calor de hidratação referente às pastas com cimento CP IV apresentaram um retardo muito maior, Neville (2014) destaca que os superplastificantes não afetam de maneira significativa o tempo de pega, exceto quando utilizados com cimentos contendo baixos teores de C_3A , situação em que pode ocorrer um retardo elevado. Situação observada nas pastas produzidas com cimento CP IV, pois o cimento utilizado é caracterizado como resistente a sulfatos, sendo assim, apresenta baixo teor de C_3A em sua composição.

Analisando as curvas calorimétricas é possível observar, pelas máximas temperaturas registradas em cada curva, que há uma redução dessas temperaturas para as pastas produzidas com cimento CP IV 32 RS. Schackow *et al.* (2016) salientam que o cimento pozolânico, além de aumentar a trabalhabilidade do concreto e reduzir seu módulo de elasticidade, reduz o calor de hidratação gerado. Ao analisar amostras de concreto submetidas a diferentes condições de exposição constatou-se, por exemplo, que uma

mesma amostra apresentou 12,6% de redução em sua temperatura quando produzida com cimento CP IV quando comparada ao cimento CP II, mostrando um melhor comportamento do cimento pozolânico em relação ao cimento composto quando analisado o calor de hidratação gerado. Essa redução da temperatura pode ser observada nos resultados obtidos, conforme apresentado pelas figuras 54a e 56a.

Percebe-se, no geral, que há uma manutenção com pequena tendência de redução das temperaturas máximas registradas ao longo do tempo de mistura (figuras 54a e 56a), e o retardo do início das reações pela presença do aditivo fica evidente com o aumento no tempo em que ocorreram as temperaturas máximas de cada mistura, conforme ilustrado pelas figuras 54b e 56b. Esse retardo em pastas pela presença do aditivo superplastificante também já foi registrado em outros estudos (PUERTAS e VÁZQUEZ, 2001; LYRA, 2010). A correlação entre a dosagem de aditivo e sua influência no retardo das reações (avaliando o tempo em que houve o registro do pico máximo de temperatura) pode ser observada na figura 57, para ambos os tipos de cimentos. As respectivas equações de correlação entre as variáveis estão apresentadas da relação a/c igual a 0,68 até a relação 0,40 de cima para baixo, respectivamente.

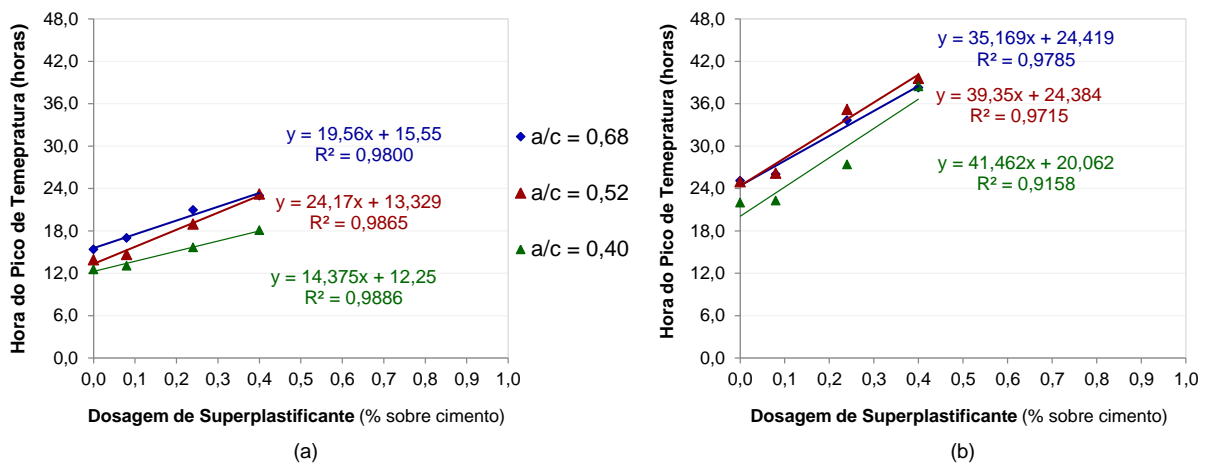


Figura 57: influência da dosagem do aditivo superplastificante sobre o momento em que ocorre a máxima temperatura registrada nas curvas calorimétricas das pastas estudadas para (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

Para a verificação do calor de hidratação das pastas, a dosagem do aditivo foi fixada em 0,40% sobre a massa de cimento, sendo incorporada à mistura 0,08% a cada hora de mistura, a partir do tempo de 2h de mistura até 6h, conforme detalhado na metodologia

adotada. Pela figura 57 é possível observar que há uma correlação entre o percentual de aditivo incorporado à mistura em relação ao momento em que ocorre a máxima temperatura registrada nas curvas calorimétricas. Avaliando o nível de correlação linear entre variáveis, quanto mais próximo a 1 for o coeficiente de correlação, melhor é a correlação entre as variáveis, mostrando que o modelo é adequado para expressar e explicar os valores apresentados. Caracteriza-se, normalmente, que para coeficiente de correlação menor que 0,2 não há correlação, entre 0,2 e 0,4 há uma fraca correlação, de 0,4 a 0,7 uma moderada correlação, entre 0,7 e 0,9 pode-se considerar uma correlação bastante forte e acima de 0,9 existe uma correlação muito forte, para o modelo adotado, entre as variáveis analisadas (BARAN e PICHNIARCZYK, 2017). Desta maneira, pode-se dizer que há uma correlação muito forte entre a dosagem de aditivo superplastificante utilizada e o momento em que ocorre a máxima temperatura da curva do calor de hidratação gerado, já que os coeficientes de correlação mínimos obtidos foram entre $R^2 = 0,9158$ e $R^2 = 0,9800$ para pastas produzidas com cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS, respectivamente. Essa mesma correlação linear muito forte entre a dosagem de aditivo e o tempo em que ocorreu a máxima temperatura da curva de hidratação de pastas de cimento também foi verificada por Puertas e Vásquez (2001), que registraram um $R^2 = 0,9657$.

Assim como destacado por Lyra (2010) e registrado nesta pesquisa, o perfil típico da curva de calor de hidratação do cimento manteve-se com a presença do aditivo, porém há apenas um retardo nas reações de hidratação em função do teor de aditivo. Comportamento atribuído pela adsorção do aditivo sobre as partículas de cimento atuando como uma barreira física (efeito estérico) e pela interação química do aditivo com o cimento (efeito eletroestático). No entanto, esses efeitos impactam na taxa de reação, resultando em consideráveis diferenças nos tempos de início e fim de pega, não indicando impacto nenhum nas características de materiais sob solicitação de fluxo.

4.1.2 Calor de Hidratação em Blocos de Concreto

O registro da temperatura do calor gerado durante a hidratação dos blocos de concreto, onde a leitura foi realizada a cada hora durante as primeiras 30 horas, estão ilustrados nas figuras 58 e 60, respectivamente, para concretos produzidos com cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS. Assim como apresentando para as pastas, o pico máximo de temperatura registrado no calor de hidratação gerado nos blocos de concreto e o momento (tempo) em que o mesmo ocorreu, podem ser visualizados nas figuras 59 e 61.

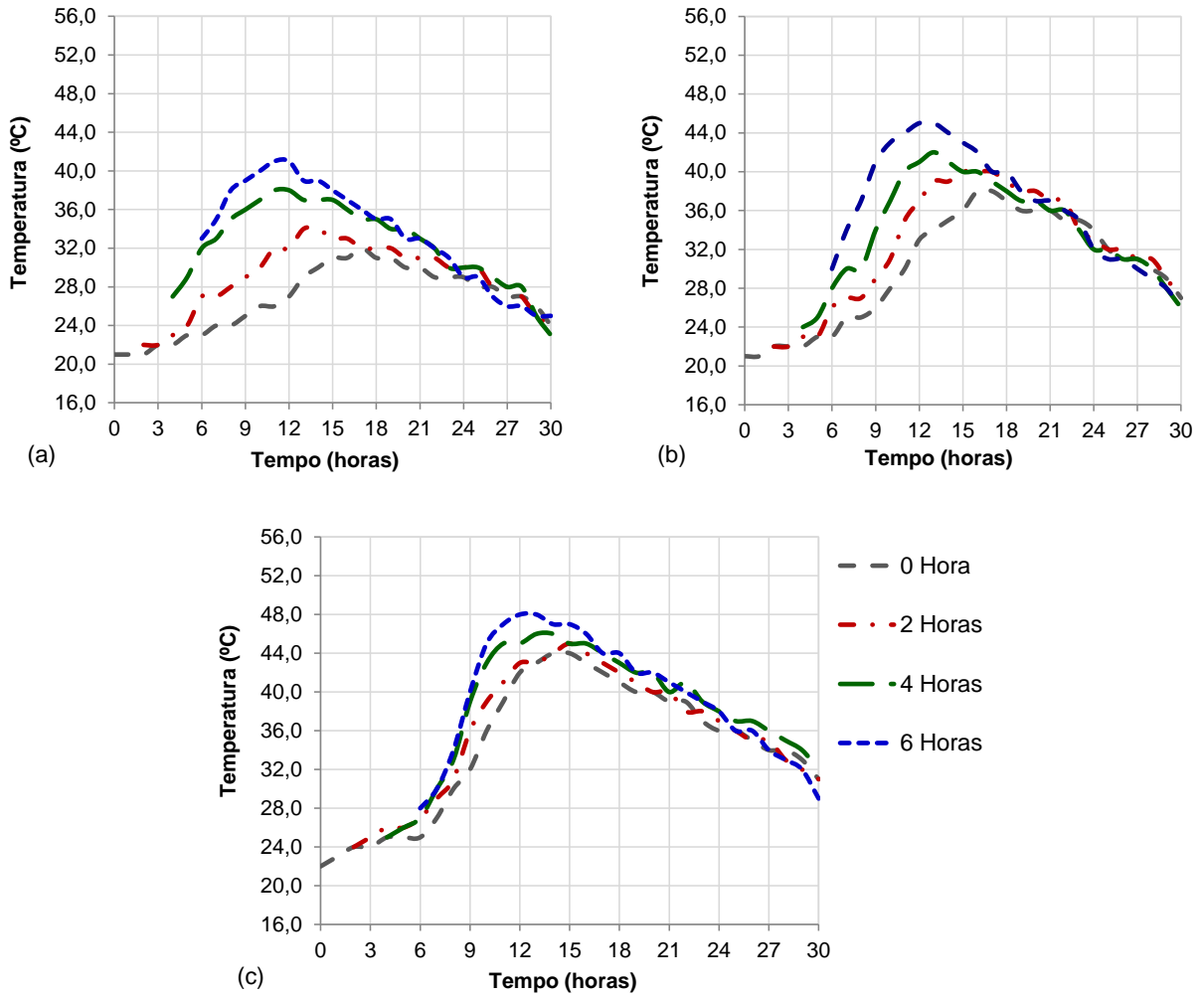


Figura 58: calor de hidratação dos blocos de concreto produzidos com cimento tipo CP II Z 32 para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$

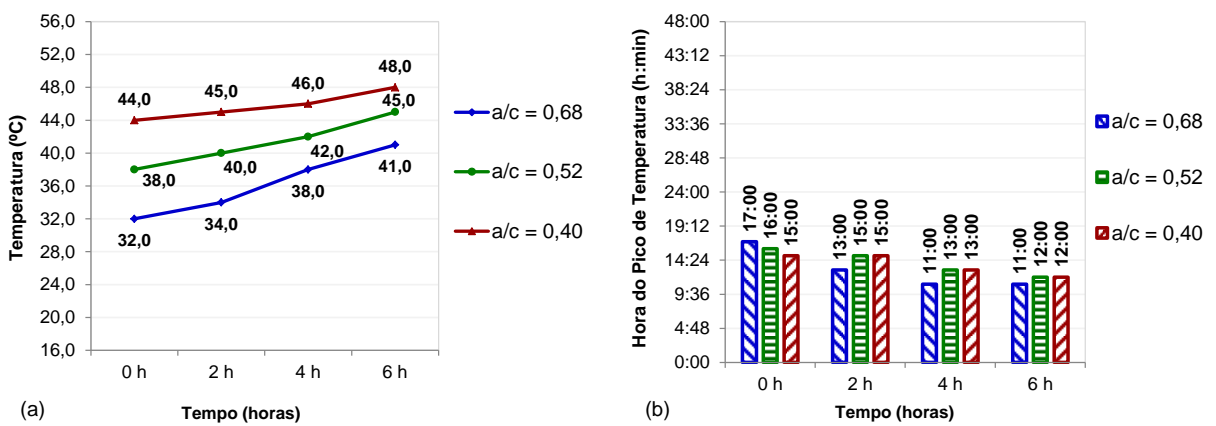


Figura 59: (a) temperatura máxima registrada na hidratação dos blocos produzidos com cimento tipo CP II Z 32 e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor em cada bloco

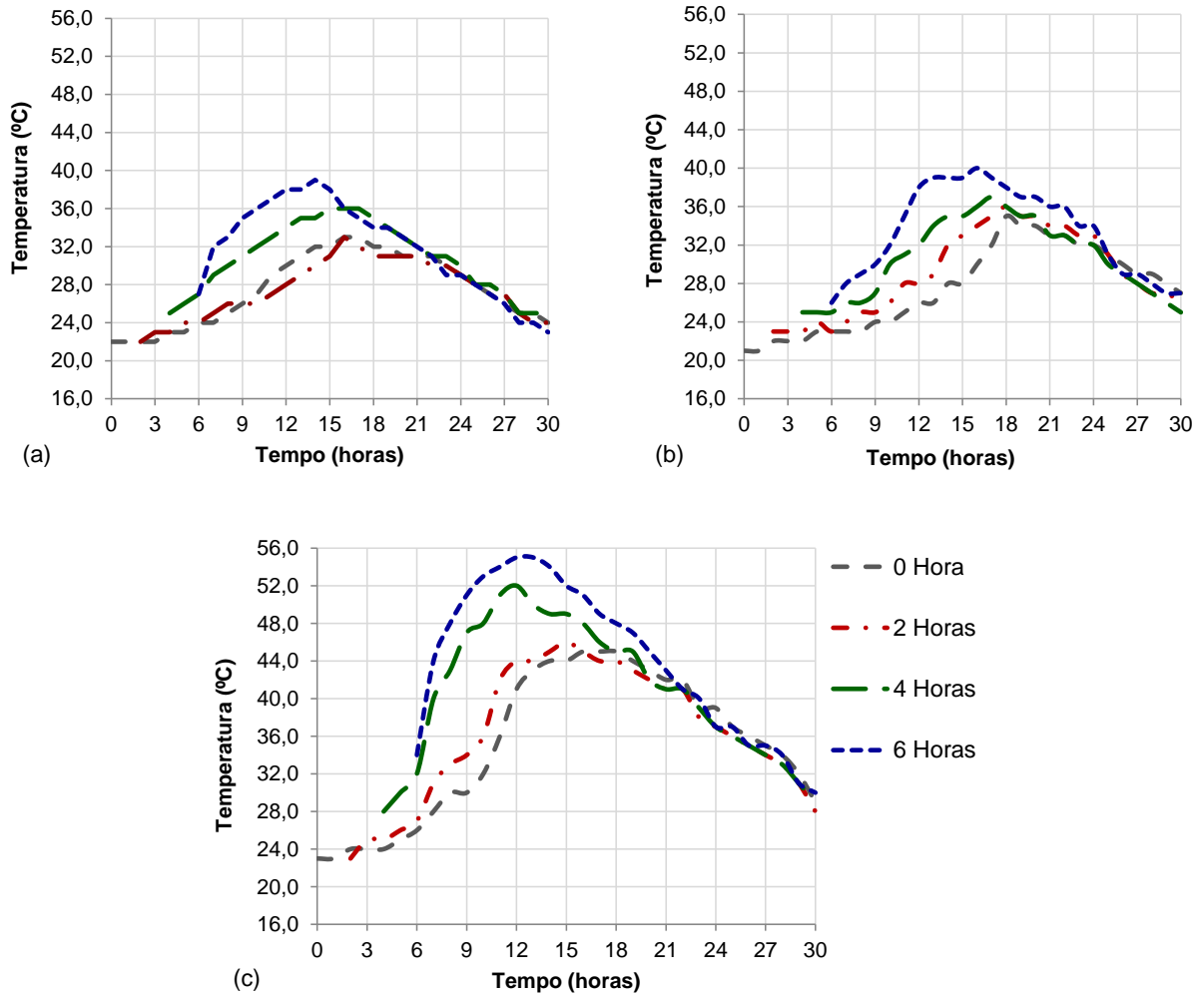


Figura 60: calor de hidratação dos blocos de concreto produzidos com cimento tipo CP IV 32 RS para as relações (a) $a/c=0,68$ (b) $a/c=0,52$ e (c) $a/c=0,40$

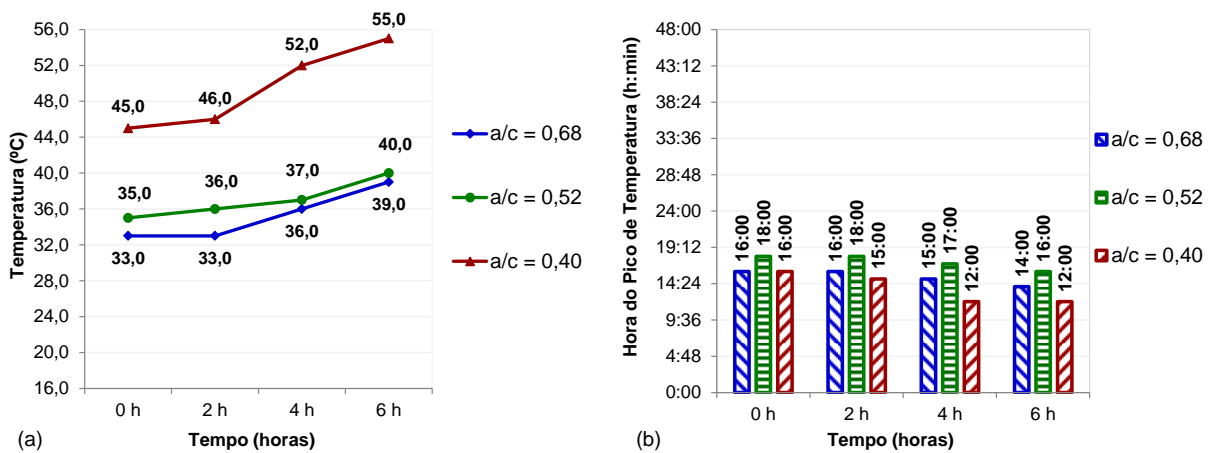


Figura 61: (a) temperatura máxima registrada na hidratação dos blocos produzidos com cimento tipo CP IV 32 RS e (b) tempo em que ocorreu esse pico de calor em cada bloco

A influência do consumo de cimento no calor de hidratação gerado pode ser observada pelas figuras 59a e 61a, através da máxima temperatura registrada pelas curvas calorimétricas. Conforme esperado, para maiores consumos de cimento e menor relação a/c, o calor liberado pelas reações de hidratação é mais acentuado. Porém, contrariamente ao observado com as pastas, percebe-se que ao longo do tempo de mistura há um aumento do calor de hidratação gerado pelo concreto. Adicionalmente, as figuras 59b e 61b mostram que, com o passar do tempo de mistura, esse pico máximo de temperatura ocorre em período mais curto de tempo.

Essa influência direta que há do aumento da temperatura, em função das reações de hidratação do cimento com a aceleração das reações, pode ser observada na figura 62, onde estão correlacionados os percentuais de aumento dessa temperatura com o percentual de aceleração das reações, analisando a redução do momento (horário) em que foi registrada a máxima temperatura gerada nas curvas calorimétricas do concreto.

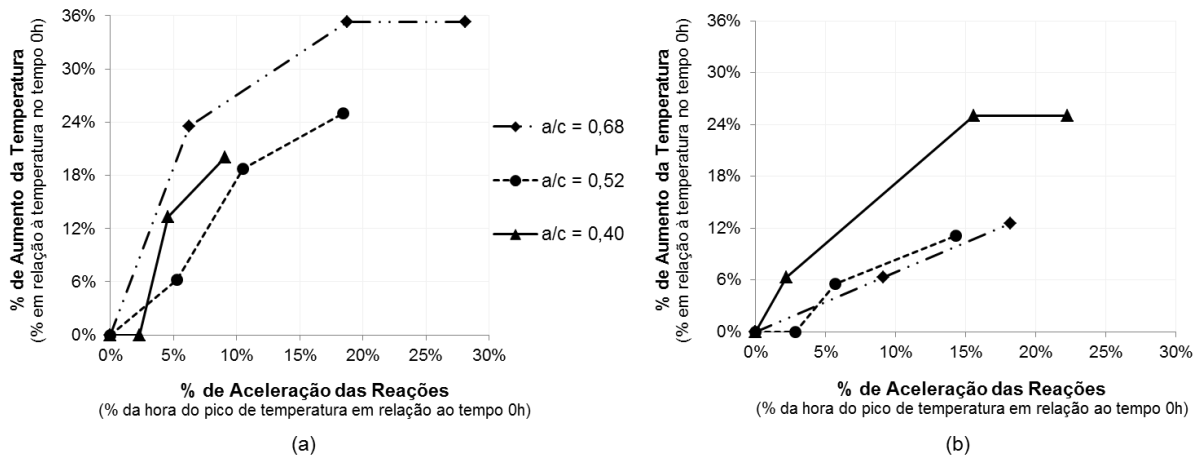


Figura 62: comportamento do aumento da temperatura gerada pelo calor de hidratação com a aceleração das reações para (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

A figura 62 mostra o comportamento da temperatura ao longo do tempo de mistura avaliado na pesquisa, os percentuais apresentados correlacionam à temperatura em cada tempo avaliado (2h, 4h e 6h) em relação à temperatura no tempo 0h. Conforme esperado, maiores percentuais de aumento na temperatura tendem a apresentar um percentual de aceleração das reações maior, já que as reações de hidratação são exotérmicas, onde essa liberação de calor monitora a velocidade em que a reação acontece.

Há uma considerável diferença no volume de material utilizado para monitorar o calor de hidratação no concreto em relação às pastas. Maiores volumes de concreto, em função do processo de hidratação do cimento, acabam aumentando consideravelmente a temperatura interna do concreto, o que pode ser claramente exemplificado, por exemplo, na concretagem de uma estrutura de barragem. Desta forma, justifica-se a diferença registrada no comportamento das pastas, para as quais se utilizou um volume de 200 ml de material em um equipamento hermeticamente fechado, em relação aos blocos de concreto, com um volume de 250 litros dispostos em ambiente natural. A temperatura do ar e a liberação de calor da hidratação do cimento aumentam o calor do concreto, ativando as reações do processo de hidratação.

O comportamento do calor de hidratação de um concreto está diretamente relacionado à composição do cimento utilizado, particularmente em função das adições minerais utilizadas durante sua fabricação. Baran e Pichniarczyk (2017) correlacionam essas adições presentes no cimento com a quantidade de calor gerada e a resistência dos mesmos, apresentando modelos que estimam a resistência do cimento com base no calor de hidratação verificado através de processo semi-adiabático. Relatam que, à medida que aumenta a quantidade de adições minerais no cimento observa-se uma redução na quantidade de calor de hidratação e o registro de menor resistência à compressão após 2 dias de endurecimento, em comparação com o cimento Portland sem adições.

Por se ter utilizado, nesta pesquisa, dois cimentos com percentuais de adições de material pozolânico diferentes que, segundo normas brasileiras, devem respeitar os limites entre 6 a 14% para o cimento tipo CP II Z (NBR 11578/1991) e 15 a 50% para o cimento tipo CP IV (NBR 5736/1991), assim como no estudo apresentado acima, foi possível verificar essa relação entre os cimentos utilizados com o calor de hidratação gerado e respectiva resistência à compressão obtida nos concretos produzidos.

A figura 63, analisando os concretos correspondentes ao primeiro (0 hora) e último (6 horas) tempo de mistura estudados, mostra uma menor resistência à compressão para os concretos produzidos com o cimento que tem maior teor de adição. Porém, em alguns casos, os valores obtidos são próximos, isso porque a análise da resistência foi realizada aos 28 dias, idade mais avançada à apresentada no estudo de Baran e Pichniarczyk (2017). Por outro lado, o comportamento em relação ao calor de hidratação gerado não foi bem definido em relação ao tipo de cimento utilizado. Atribui-se tal comportamento ao fato que os cimentos utilizados são de fabricantes diferentes, e por ser cimentos que, regionalmente, apresentam variações em seu comportamento ao longo no tempo em função da adição presente, principalmente para o cimento tipo CP IV.

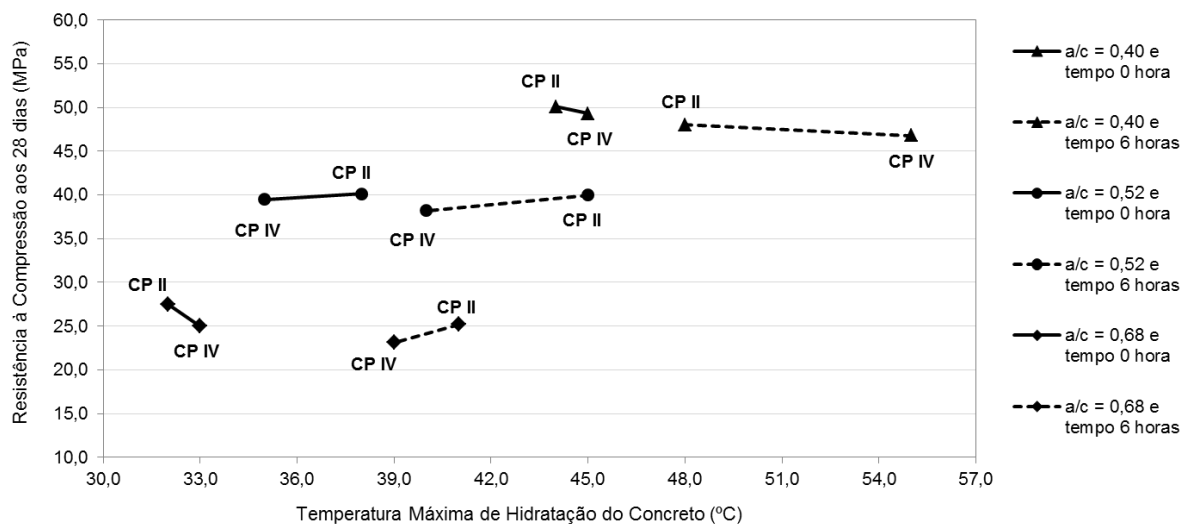


Figura 63: comportamento do concreto, avaliando o calor de hidratação com a resistência à compressão aos 28 dias, em função do tipo de cimento

De uma forma geral, os tempos de início e fim de pega diminuem na medida em que a temperatura de cura aumenta o que, obviamente, está relacionado com o aumento da taxa de hidratação do cimento com a temperatura (SOROKA e RAVINA, 1998; HEIKAL *et al.*, 2005; MAJDI e ABBAS, 2017). Sendo assim, como a produção do concreto ocorreu na central dosadora em caminhão betoneira que, segundo especificações técnicas, não pode ficar carregado sem que esteja com o balão girando, a permanência do concreto em processo de mistura contínuo aliado ao grande volume e a um ambiente propício no interior da betoneira do caminhão onde há um confinamento desse calor gerado, fez com que a ativação das reações de hidratação fosse acelerada, conforme pode ser observado na temperatura inicial do ensaio para cada tempo de mistura do concreto (figuras 58 e 60).

Como resultado dessa aceleração das reações de hidratação as temperaturas máximas ocorreram em períodos menores quanto maiores os tempos de mistura do concreto. Devido a isso, maiores consumos percentuais de aditivo foram precisos para manutenção do abatimento ao longo do tempo, apresentando uma correlação entre a dosagem de aditivo e a temperatura máxima registrada mais moderada quando comparado às pastas de cimento, para ambos os tipos de cimento, conforme comportamento apresentado pela figura 64 (assim como citado anteriormente as equações estão dispostas conforme ordem da legenda). Esse comportamento da influência do aumento na temperatura do concreto sobre reações de hidratação também foi registrado no estudo apresentado por Basham (1992).

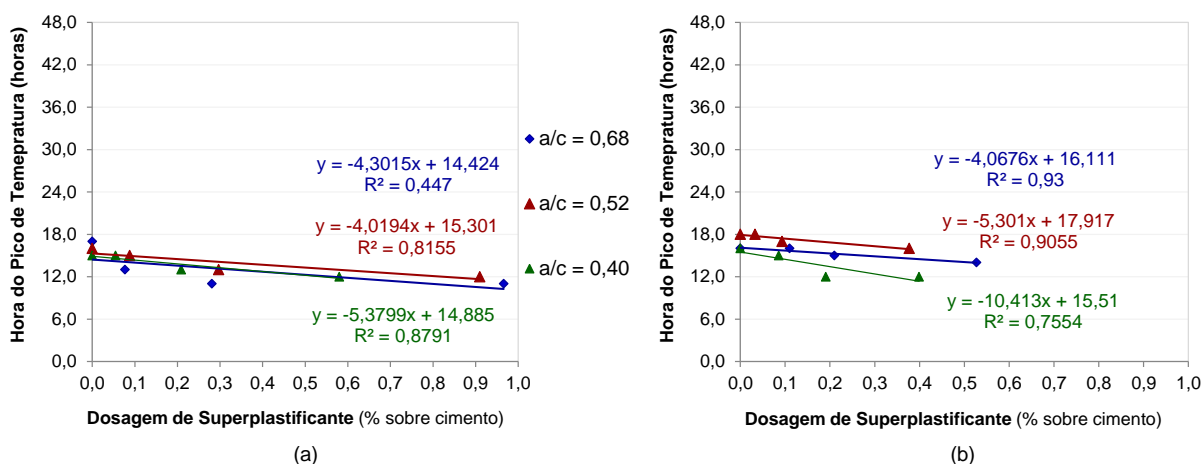


Figura 64: influência da dosagem do aditivo superplastificante sobre o momento em que ocorre a máxima temperatura registrada nas curvas calorimétricas do concreto produzido na central dosadora para (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

4.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

O comportamento reológico foi analisado em pastas de cimento. Pelas limitações do equipamento disponível, no entanto, foram adotados os mesmos parâmetros utilizados nos concretos produzidos na pesquisa: relações a/c, tipos de cimentos, tempos de misturas e processo de redosagem ao longo do tempo de mistura com aditivo superplastificante de base policarboxilato. O comportamento do fluxo da pasta é importante, pois controla o comportamento do fluxo do concreto, portanto sua processabilidade (STRUBLE e SUN, 1995). A seguir será apresentado e analisado o comportamento obtido, para todos os pontos da matriz de estudo, proposta na metodologia.

4.2.1 Curvas de Cisalhamento

Os resultados das curvas de cisalhamento obtidas, para cada relação a/c considerada, estão apresentados nas figuras 65 a 67, para pastas produzidas com cimento CP II Z 32, e nas figuras 68 a 70, para pastas produzidas com cimento CP IV 32 RS.

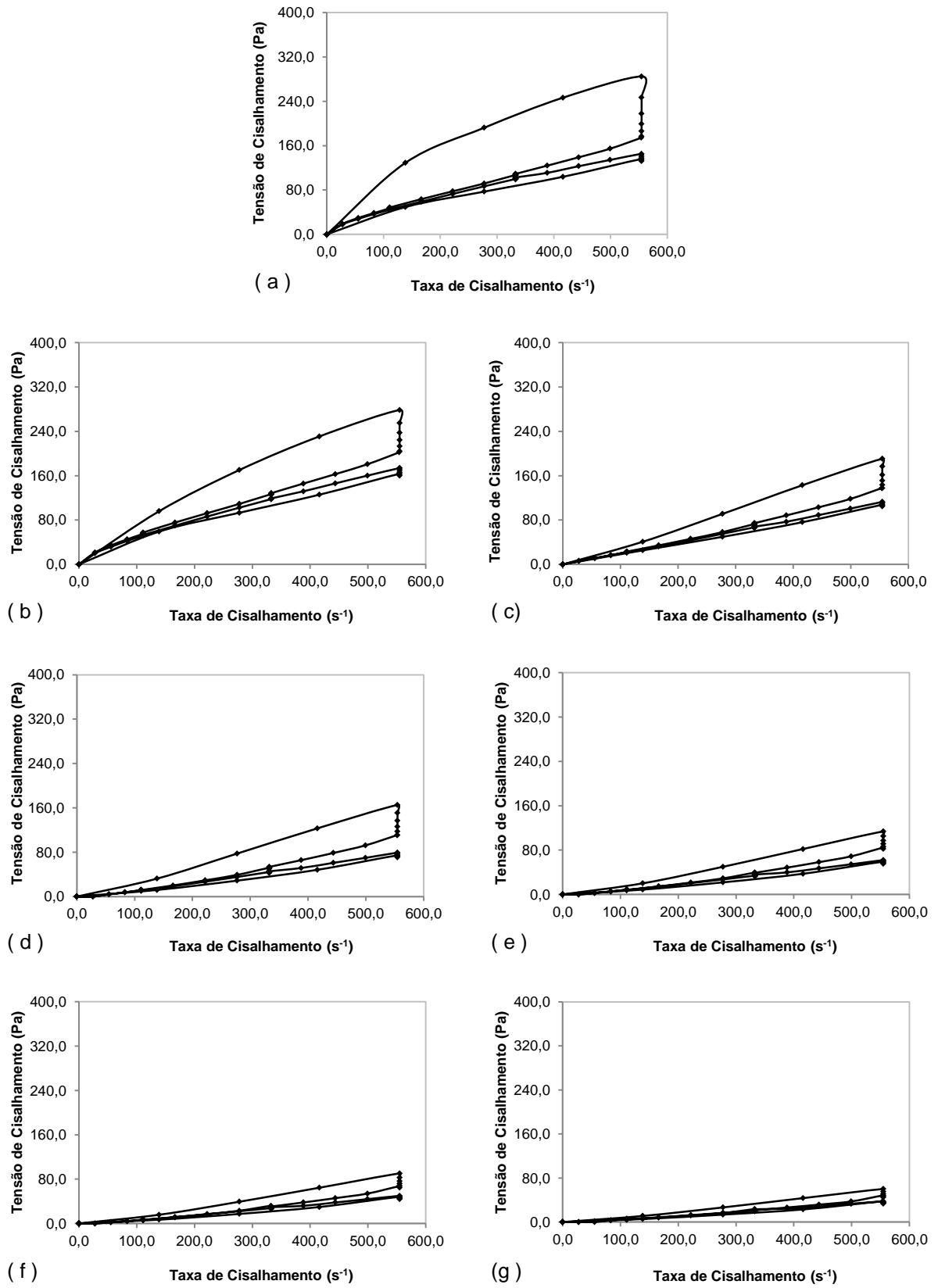


Figura 65: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,40, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

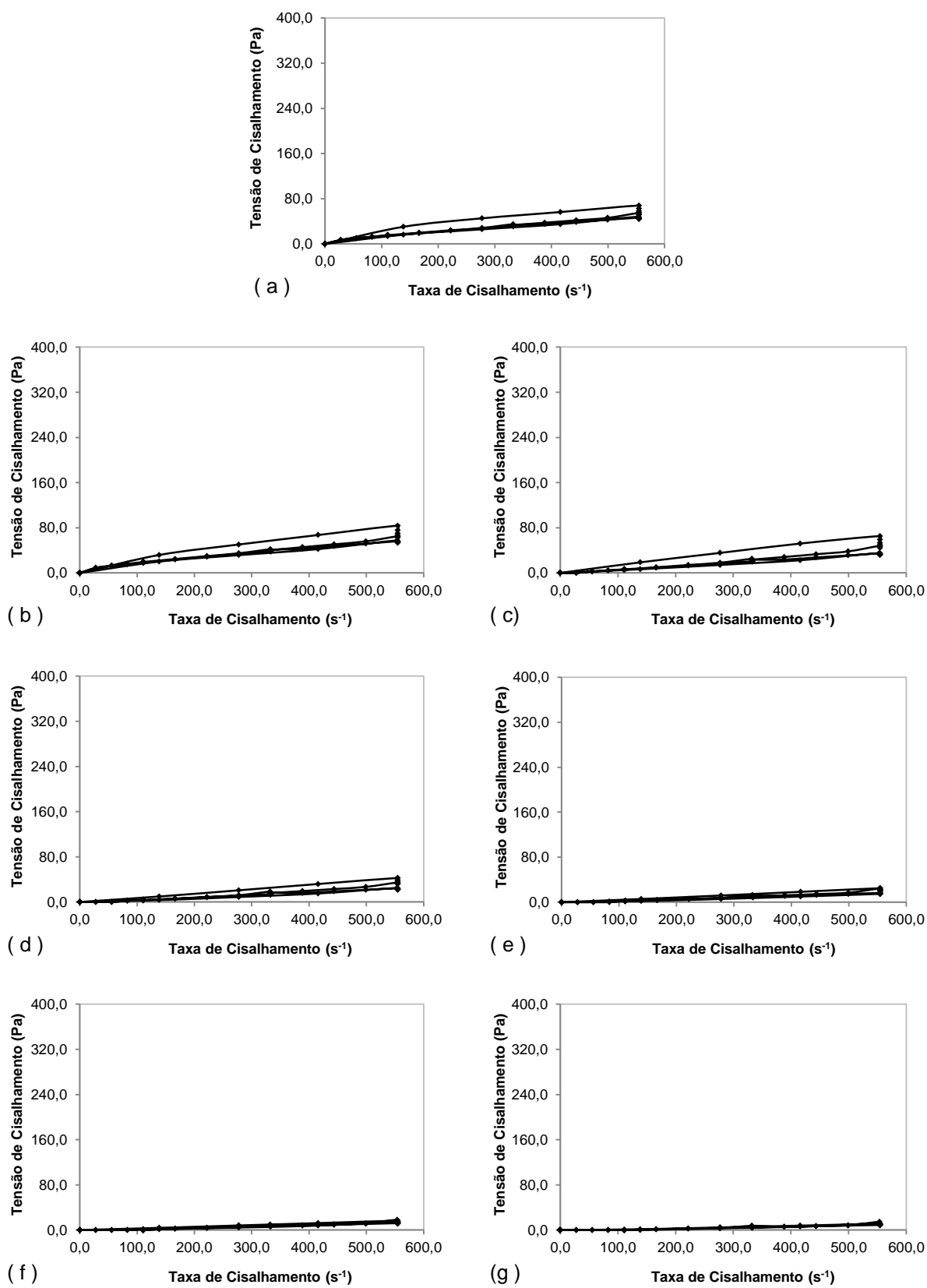


Figura 66: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,52$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

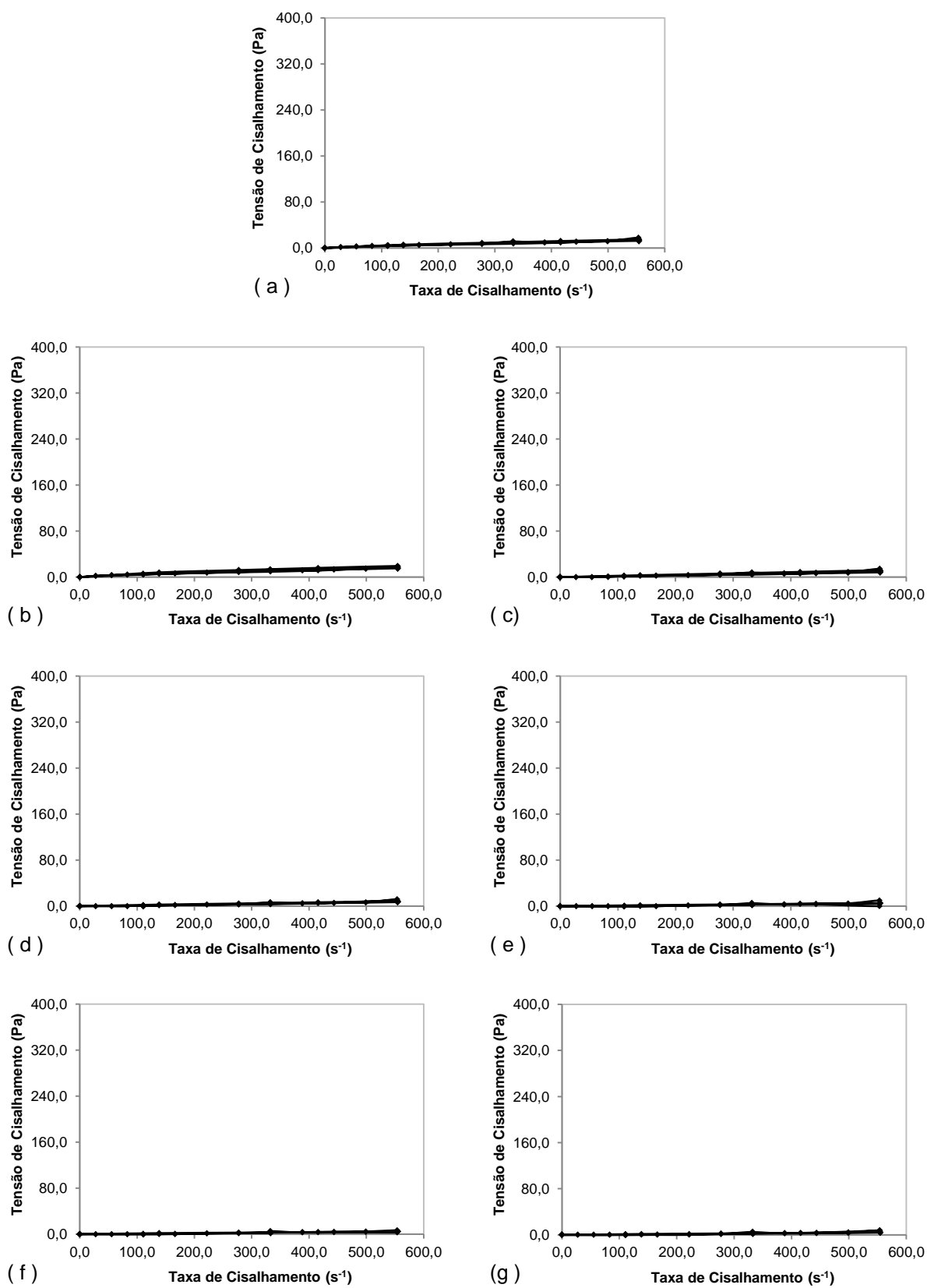


Figura 67: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,68$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

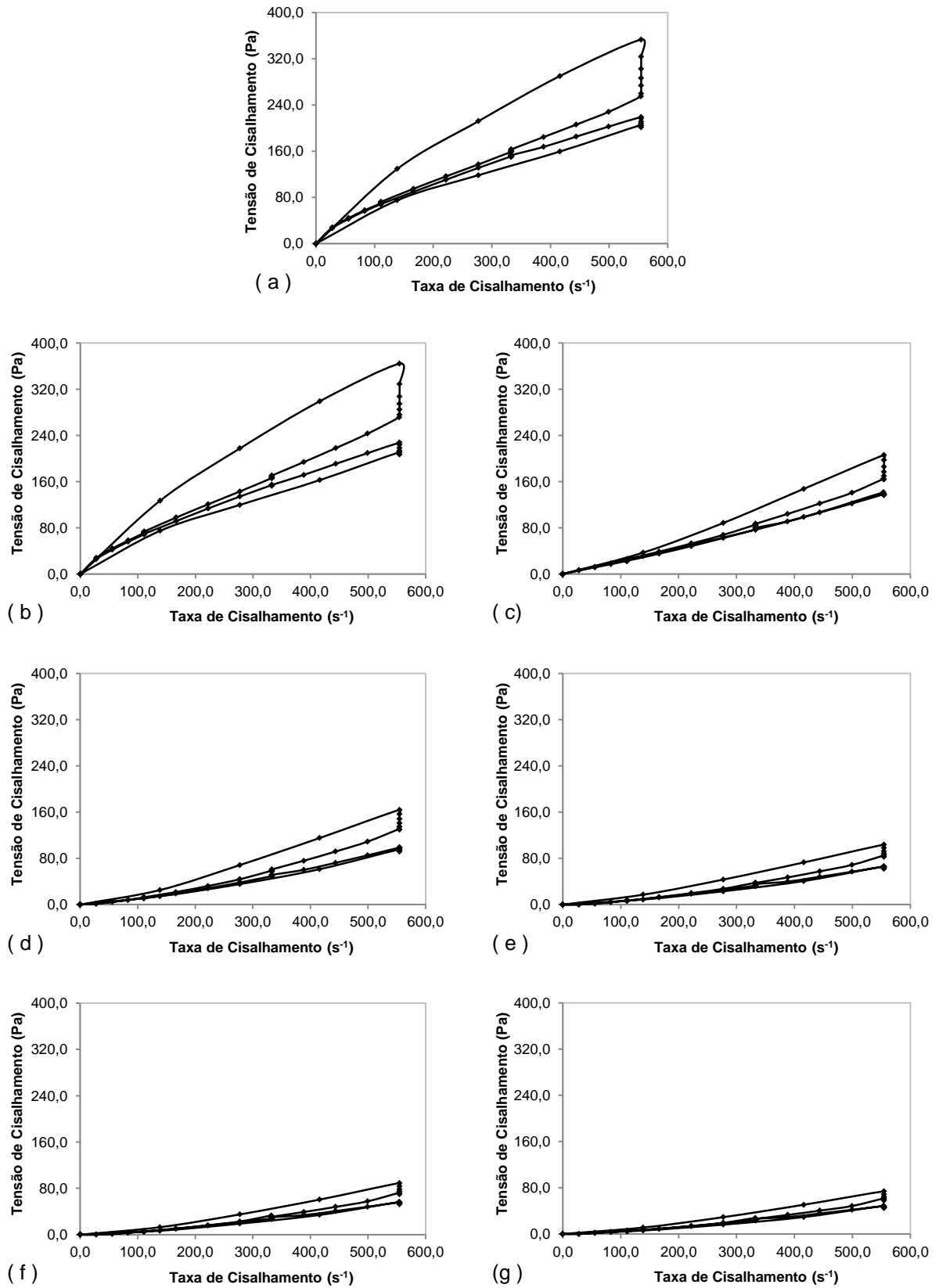


Figura 68: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,40$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

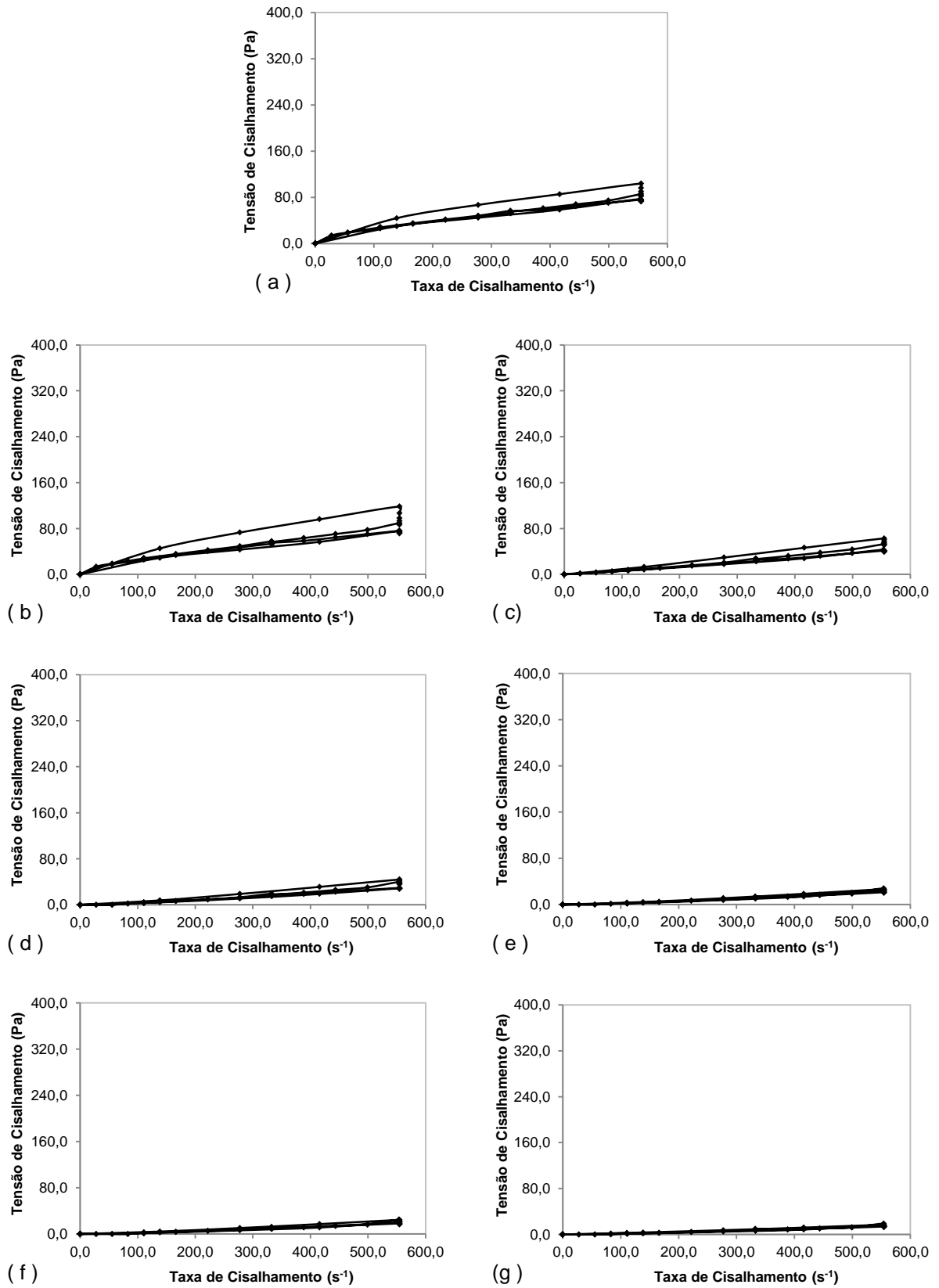


Figura 69: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

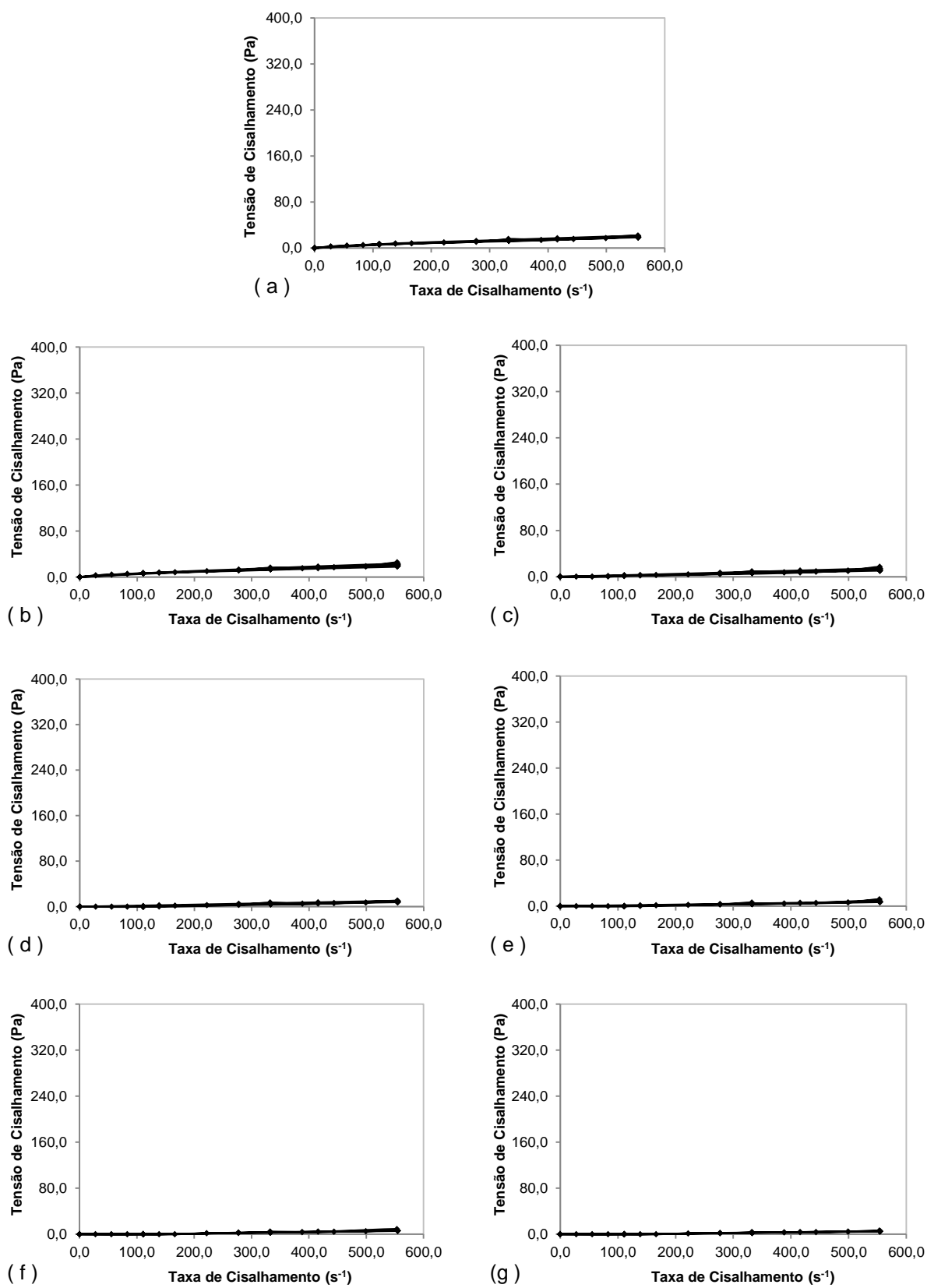


Figura 70: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação $a/c=0,68$, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

Várias dificuldades experimentais são reconhecidas ao fazer medições reológicas. Um problema comum com as suspensões é a segregação. As partículas tendem a se depositar no fundo durante o experimento, especialmente propensas as partículas maiores. A segregação é menos provável em suspensões floculadas e em concentrações muito altas, o que limita a amplitude de concentração em alta relação a/c (STRUBLE e JI, 2001).

Pelas curvas de cisalhamento apresentadas pelas figuras 65 a 70, principalmente para relações a/c menores, observa-se que a partir da incorporação do aditivo superplastificante à mistura (tempo de 2 horas), há uma redução da tensão de escoamento e da área gerada pela diferença das curvas ascendente e descendente do ensaio. É importante salientar também que para as relações a/c mais altas, tensões de escoamento muito baixas foram registradas e, em função de uma possível segregação das partículas, as curvas não apresentam perfis de cisalhamento muito bem definidos.

Para analisar melhor o impacto da mistura prolongada e da redosagem com aditivo superplastificante ao longo do tempo, duas misturas adicionais para cada tipo de cimento foram ensaiadas, considerando:

- após a mistura e homogeneização, a pasta permaneceu parada em um recipiente e, ao longo do tempo, foi sendo verificado seu comportamento reológico;
- após a mistura e homogeneização, a pasta sofreu o mesmo processo de mistura prolongada ao longo do tempo, assim como realizado a todas as misturas da matriz estudada, porém não sofreu o processo de redosagem com o aditivo superplastificante nesse período.

Optou-se pela relação a/c igual a 0,52 por ser a relação intermediária entre as definidas para a pesquisa. As curvas de cisalhamento obtidas para as pastas que permaneceram sem processo de mistura (paradas) podem ser observadas pelas figuras 71 e 72, produzidas com cimento CP II Z 32 e cimento CP IV 32 RS, respectivamente. As figuras 73 e 74 apresentam as curvas obtidas para as pastas que sofreram o processo de mistura, porém sem a redosagem com aditivo superplastificante ao longo do tempo, produzidas com cimento CP II Z 32 e cimento CP IV 32 RS, respectivamente.

Através de ensaios de reologia, o comportamento do fluxo das misturas pode melhor ser caracterizado, analisando a área de histerese formada pelas curvas de cisalhamento e determinando os parâmetros reológicos: tensão de escoamento e viscosidade plástica. Nos itens a seguir, cada uma dessas variáveis será analisada mais detalhadamente.

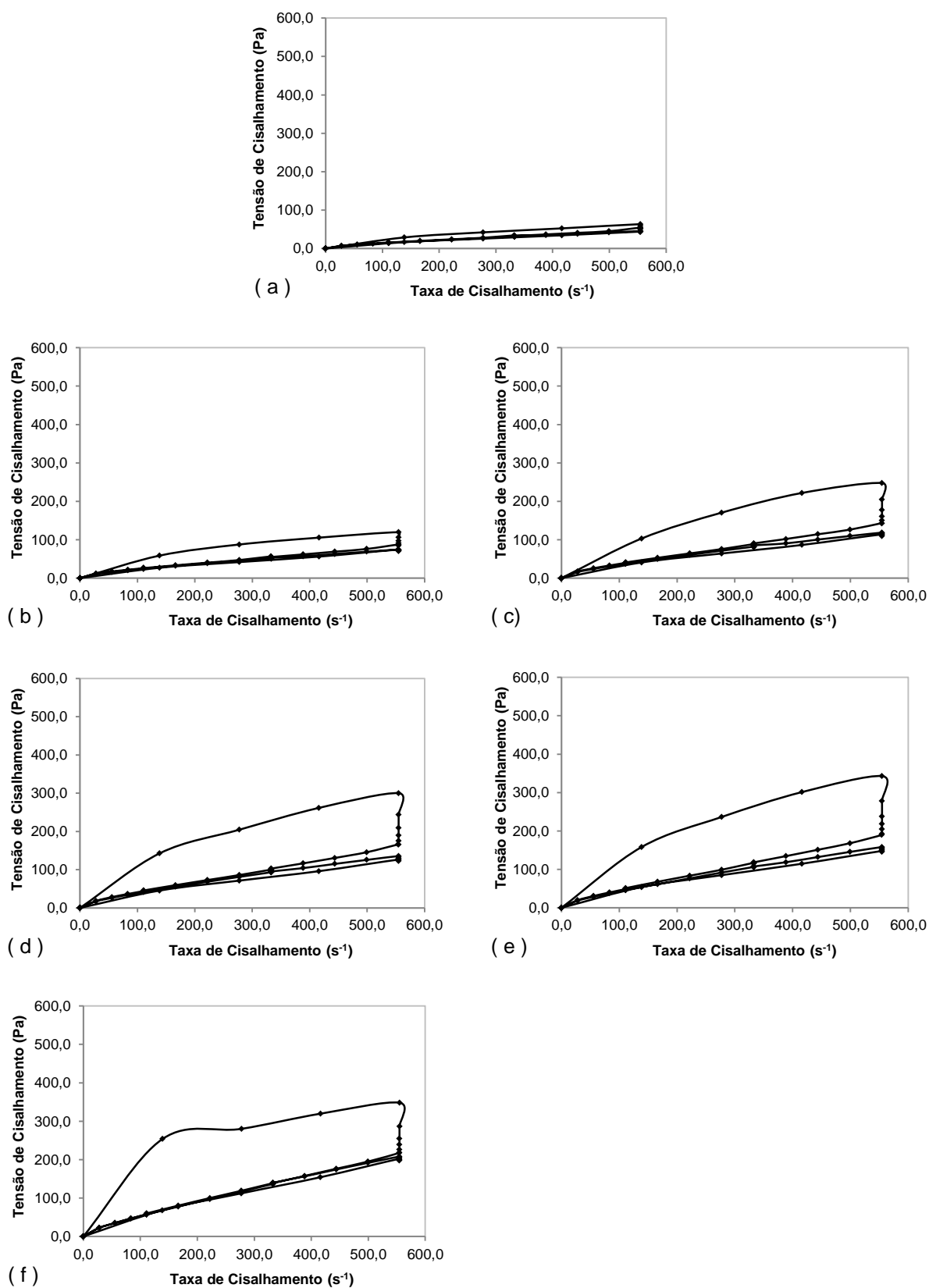


Figura 71: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,52$, mantida sem mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas e f) 5 horas

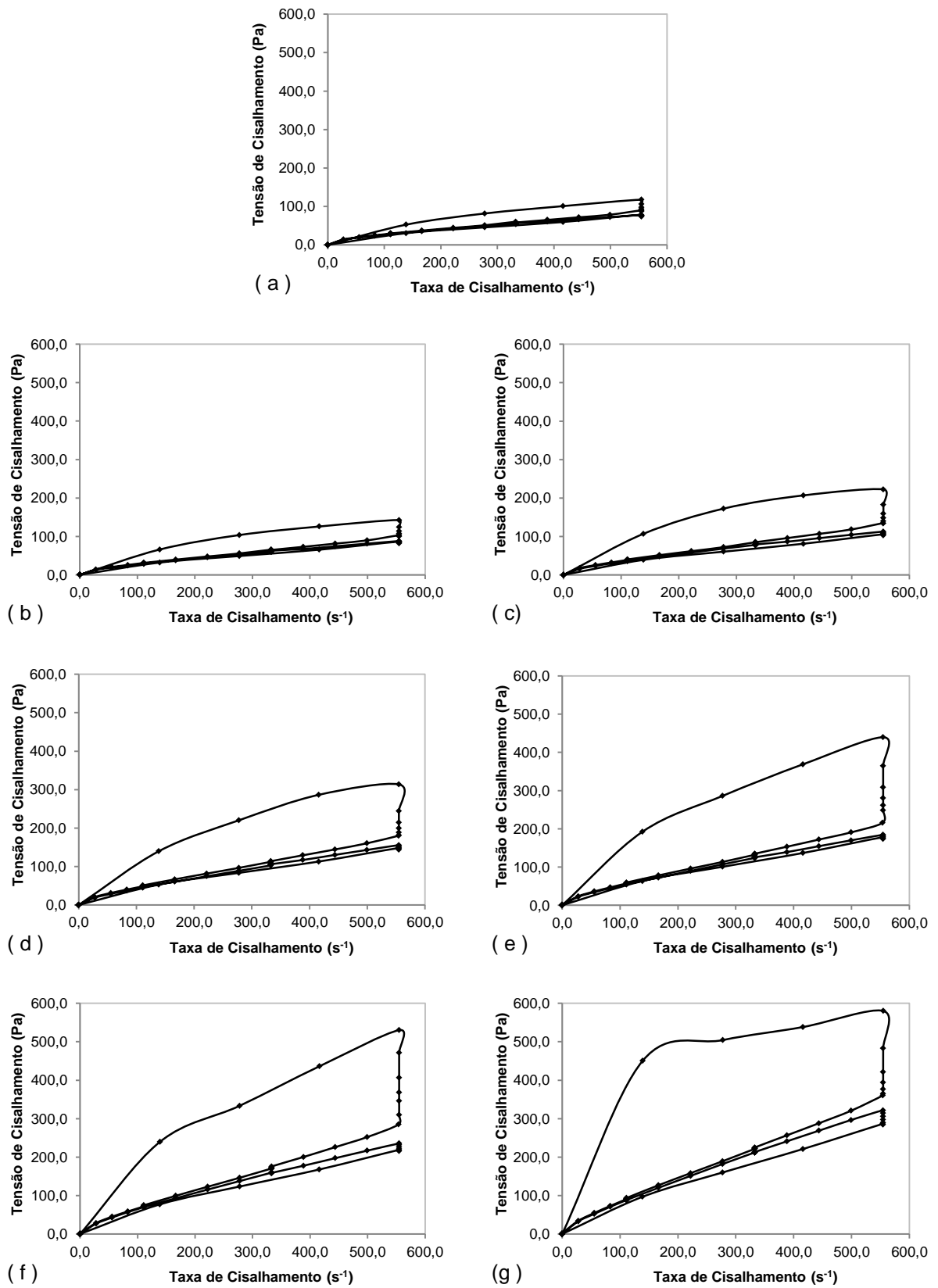


Figura 72: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,52, mantida sem mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

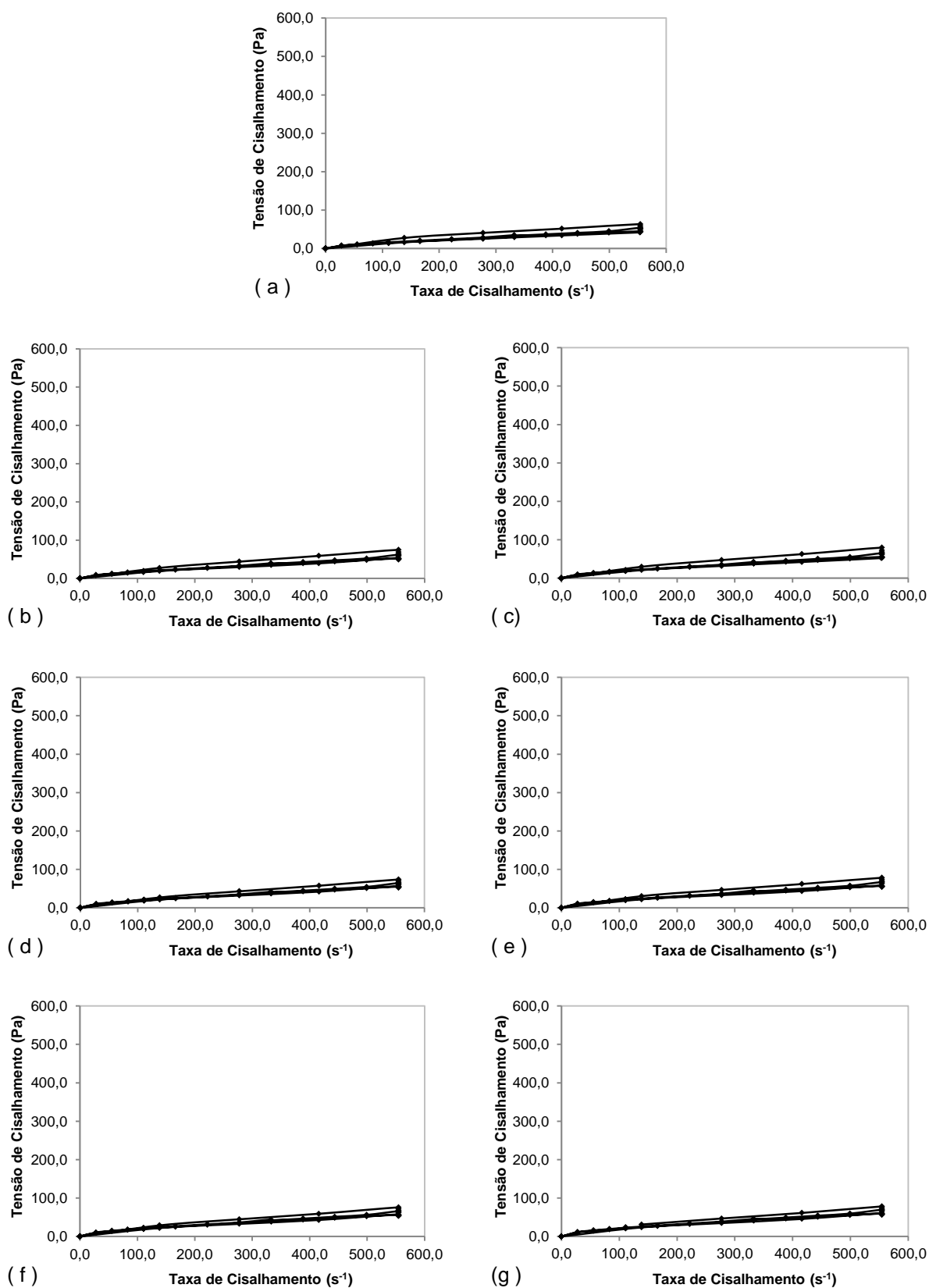


Figura 73: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação $a/c=0,52$, mantida em mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

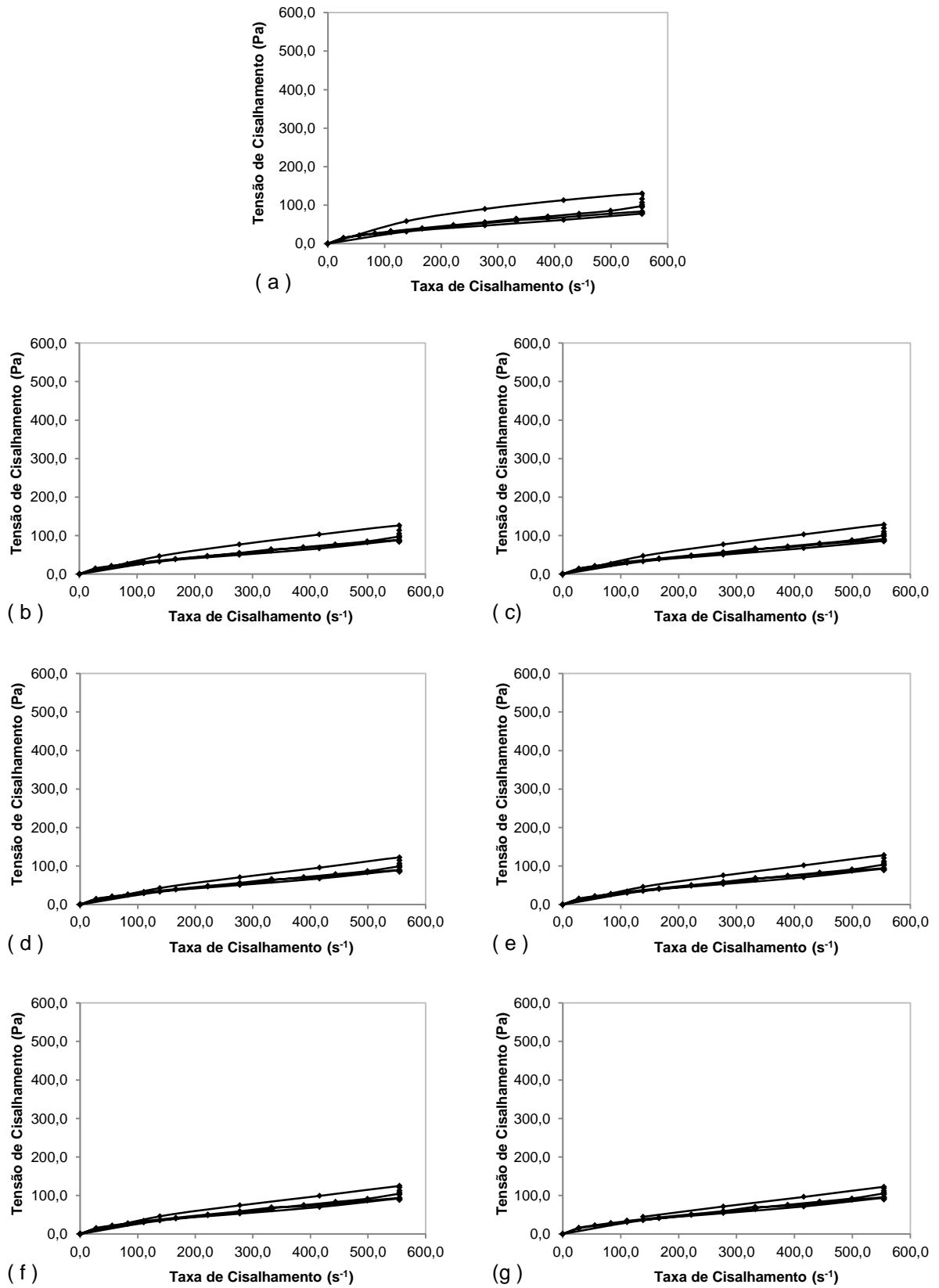


Figura 74: curvas de cisalhamento para a pasta produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,52, mantida em mistura e sem redosagem, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

4.2.2 Áreas de Histerese

Conforme citado por Schramm (2006), as áreas de histerese caracterizam o trabalho para quebrar alguma das ligações inicialmente presentes na mistura. Sendo assim, para determinação das áreas de histerese considerou-se o primeiro ciclo gerado nas curvas de cisalhamento, registradas no item anterior. Tal ciclo é caracterizado pelo período desde a mistura inicial com aumento gradual até a velocidade máxima e posterior redução da mesma, em três etapas, até seu retorno a zero, contemplando os estágios de I a VII, detalhados pela tabela 11 que está apresentada na metodologia adotada.

O ajuste das curvas, ascendente e descendente, de cisalhamento foi feito através de polinômios de segundo grau. A área de histerese foi determinada pela diferença entre a área obtida, por integração da função, na curva ascendente em relação à curva descendente. Todas as curvas consideradas, assim como seus respectivos coeficientes de ajuste, estão detalhadas no Apêndice A. A tabela 12 apresenta os valores obtidos da área de histerese para cada ponto da matriz estudada na pesquisa, assim como para as condições adicionais analisadas onde a pasta foi mantida em mistura, porém sem redosagem, e sem mistura (parada) e sem redosagem, referente à relação a/c igual a 0,52, conforme já detalhado.

Tabela 12: Áreas de histerese das curvas de cisalhamento

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | ÁREAS DE HISTERESE (Pa.s ⁻¹) | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 48.837,12 | 29.077,62 | 16.680,19 | 18.742,07 | 10.341,08 | 8.106,03 | 4.976,09 |
| | 0,52 | | 7.518,54 | 7.535,42 | 8.243,34 | 4.111,40 | 1.943,09 | 1.310,40 | 307,25 |
| | 0,68 | | 444,66 | 1.344,05 | 611,26 | 512,54 | 207,94 | 157,94 | 12,09 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 5.507,31 | 5.296,31 | 5.733,85 | 3.851,16 | 4.739,41 | 3.957,02 | 3.834,29 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 6.224,16 | 17.873,10 | 44.889,47 | 58.609,31 | 66.813,43 | 80.253,96 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 37.345,40 | 36.180,95 | 11.297,37 | 11.535,54 | 7.662,98 | 6.074,13 | 4.875,43 |
| | 0,52 | | 8.614,86 | 11.453,57 | 4.096,24 | 2.628,34 | 874,48 | 1.300,78 | 825,25 |
| | 0,68 | | 696,54 | 461,36 | 587,52 | 774,84 | 181,47 | 53,43 | 4,29 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 15.890,47 | 10.738,41 | 10.164,51 | 7.536,81 | 8.411,71 | 7.547,61 | 6.031,66 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 13.595,60 | 20.978,31 | 44.352,09 | 59.815,38 | 86.672,63 | 96.683,71 | 147.577,85 |

Através das figuras 75a e 75b é possível observar, respectivamente, para o cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS, o comportamento das áreas de histerese determinadas ao longo do tempo de mistura estudado.

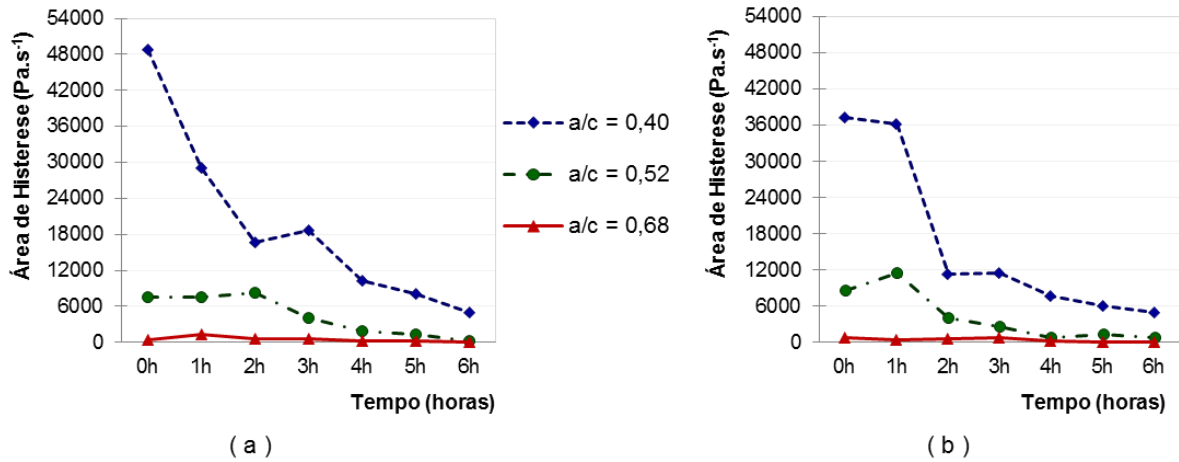


Figura 75: comportamento das áreas de histerese obtido pelas curvas de cisalhamento nas pastas produzidas com (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

Para analisar o efeito da mistura ao longo do tempo e da redosagem com aditivo superplastificante, as figuras 76a e 76b apresentam o comportamento da área de histerese para relação a/c igual a 0,52 considerando o monitoramento de três processos distintos: mistura da pasta e redosagem com aditivo ao longo do tempo, mistura da pasta sem a redosagem com aditivo e pasta parada sem a redosagem com aditivo.

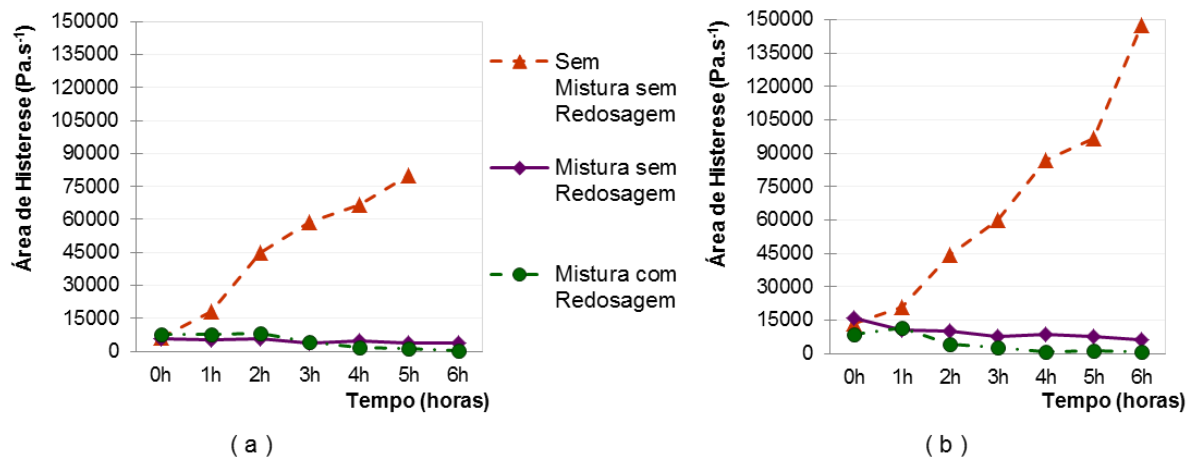


Figura 76: comportamento das áreas de histerese obtido pelas curvas de cisalhamento para pastas produzidas com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

Durante os ciclos de cisalhamento, quanto mais eficiente é o processo de mistura, maior é a homogeneização e dispersão das partículas do sistema, impondo uma menor resistência ao cisalhamento (FRANÇA *et al.*, 2012). As áreas de histerese obtidas e apresentadas pelas figuras 75 e 76, mostram que o fato de permanecer com o material em processo de mistura ao longo do tempo reflete uma melhor dispersão e homogeneização das partículas, mesmo quando não há a incorporação do aditivo superplastificante.

O processo de mistura prolongada do material apresentou-se, tanto para a condição de redosagem com aditivo superplastificante quanto sem esse procedimento, eficiente por demandar baixa energia para quebra de ligações inicialmente presentes na mistura. Pileggi *et al.* (2001) destacam que baixas áreas de histerese caracterizam alta eficiência na fragmentação de aglomerados da mistura.

4.2.3 Parâmetros Reológicos

Como a proposta do estudo é o restabelecimento da trabalhabilidade com a incorporação de aditivo superplastificante, o qual proporciona uma sensível alteração no comportamento da mistura, não foi utilizado para ajuste das curvas de cisalhamento o modelo de Bingham, como, geralmente, indicado pela literatura para o comportamento de concretos. Ferraris *et al.* (2001) também observam que para algumas misturas, por exemplo um concreto auto adensável, onde há incorporação de aditivo superplastificante, o comportamento não segue a função linear descrita por Bingham pois, através desta equação, pelo cálculo seria obtida uma tensão de escoamento negativa. Em misturas com esse comportamento utiliza-se a equação de Herschel-Bulkey (HB) para descrever o fluxo dessas suspensões (FERRARIS *et al.*, 2001; YAHIA e KHAYAT, 2003).

Sendo assim, o ajuste das curvas de cisalhamento, obtidas nas pastas através da utilização do reômetro, foi feito através da equação de Herschel-Bulkey (HB) que fornece uma relação da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento com base em uma função de potência, podendo ser expressa por $\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}^n$. Segundo Yahia e Khayat (2003), esse modelo descreve uma relação não linear entre a tensão (τ) e taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de um fluido com uma tensão de escoamento (τ_0), sendo “K” a consistência e “n” um índice que representa o desvio de um comportamento binghamiano. Quando “n” é igual a 1, tem-se um fluido com comportamento newtoniano (se apresentar tensão de escoamento caracteriza-se como binghamiano), para “n” maior que 1, exibe um comportamento de fluido dilatante e quando menor que 1 caracteriza um fluido com comportamento pseudoplástico.

Com essas considerações, obteve-se um modelo matemático para cada ponto da matriz em estudo. Todas as curvas analisadas, com suas equações definidas, assim como seus respectivos coeficientes de ajuste, estão detalhadas no Apêndice B.

Pela tabela 13 é possível verificar a caracterização obtida, quanto ao comportamento da mistura para cada ponto estudado, assim como para as misturas adicionais realizadas para verificar o comportamento da pasta mantida em mistura, porém sem redosagem, e sem mistura (parada) e sem redosagem, referente à relação a/c igual a 0,52.

Tabela 13: caracterização do comportamento reológico das misturas

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA MISTURA | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,68 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | - |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,68 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano |

Conforme pode ser observado pela tabela 13, a partir do momento (2 horas) em que há a incorporação do aditivo superplastificante à base de policarboxilato para manutenção da trabalhabilidade ao longo do tempo, proposta da pesquisa, há mudança no comportamento da mistura, deixando de ter um comportamento binghamiano e passando a se comportar como um fluido dilatante.

Com os modelos definidos, a partir das leituras realizadas pelo reômetro, foi possível determinar as tensões de escoamento e as viscosidades plásticas para todas as misturas estudadas.

4.2.3.1 Tensão de Escoamento

Com a obtenção das equações de ajustes para as curvas de cisalhamento, foi determinada a tensão de escoamento para cada ponto estudado, analisando seu comportamento em relação à manutenção da trabalhabilidade com a incorporação do aditivo superplastificante. Um detalhamento de todas as equações finais adotadas está apresentado no Apêndice B.

Os valores obtidos para a tensão de escoamento estão detalhados na tabela 14, para todos os tempos de mistura analisados pelo estudo.

Tabela 14: Tensão de escoamento das curvas de cisalhamento

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | TENSÃO DE ESCOAMENTO (Pa) | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 10,62 | 12,03 | 1,58 | 0,31 | 0,11 | 0,05 | 0,01 |
| | 0,52 | | 4,03 | 5,21 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,68 | | 1,09 | 1,30 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 4,60 | 5,08 | 5,85 | 6,02 | 6,59 | 6,63 | 7,34 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 4,32 | 7,51 | 9,45 | 10,19 | 10,11 | 15,34 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 16,13 | 15,35 | 2,05 | 0,75 | 0,05 | 0,01 | 0,11 |
| | 0,52 | | 8,96 | 8,12 | 0,37 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,68 | | 1,86 | 1,78 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 10,43 | 9,09 | 8,93 | 8,97 | 9,30 | 9,42 | 9,72 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 9,54 | 8,90 | 10,76 | 11,13 | 9,47 | 11,43 | 24,53 |

Para melhor visualizar o comportamento observado da tensão de escoamento ao longo do tempo de mistura, apresentam-se os valores em forma de gráficos pelas figuras 77a e 77b, respectivamente, para o cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS.

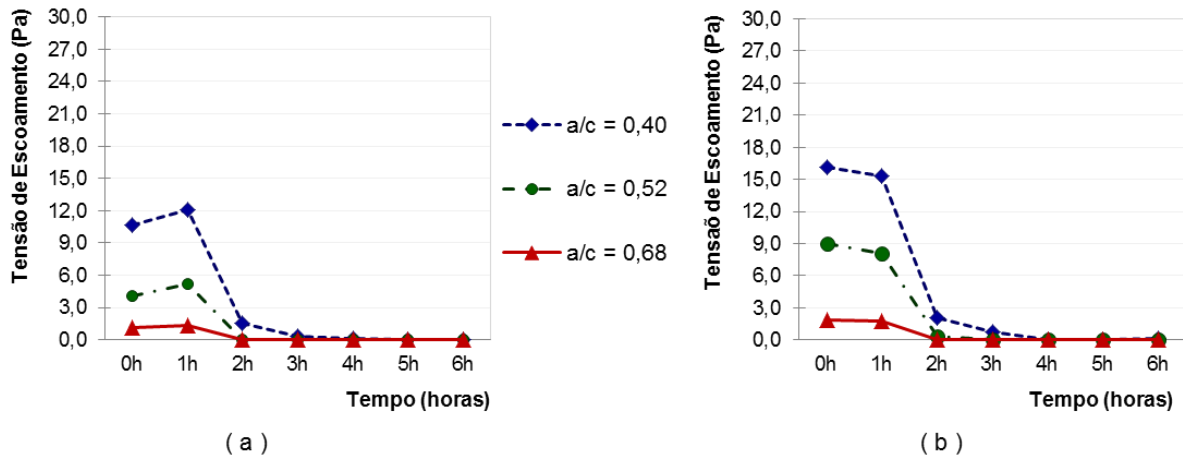


Figura 77: comportamento da tensão de escoamento obtido pelas curvas de cisalhamento nas pastas produzidas com (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

No comportamento do fluxo do concreto, assim como da pasta de cimento, as propriedades reológicas, como a tensão de escoamento e a viscosidade, são influenciadas pela relação a/c. Esse comportamento, já citado por outros autores (STRUBLE e XI, 2001), foi observado no estudo, aumentando-se a relação a/c há uma redução nessas propriedades reológicas.

Analisando os diferentes processos, as figuras 78a e 78b apresentam o comportamento da tensão de escoamento, respectivamente, com o cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS, para relação a/c igual a 0,52 considerando: mistura da pasta e a redosagem com aditivo ao longo do tempo; mistura da pasta sem a redosagem com aditivo; e, pasta parada sem a redosagem com aditivo.

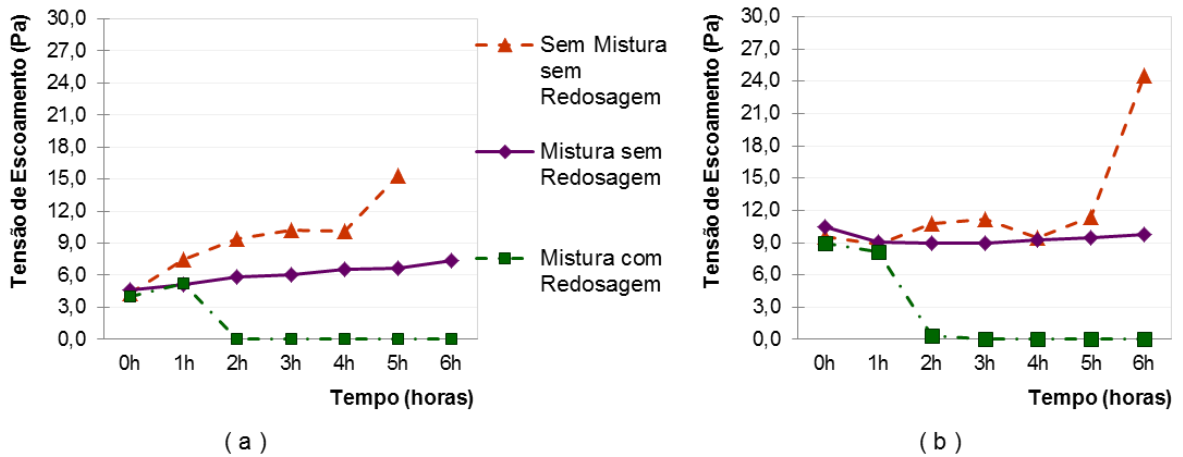


Figura 78: comportamento da tensão de escoamento obtido pelas curvas de cisalhamento para pastas produzidas com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

A presença de aditivo superplastificante proporciona sensível aumento na fluidez, onde a tensão de escoamento é significativamente reduzida, comportamento atribuído à defloculação das partículas de cimento (CASTRO *et al.*, 2011). Tal comportamento ficou claro nos ensaios de reologia das pastas realizados na pesquisa, que, a partir do momento em que houve a incorporação do aditivo (tempo de 2 horas), determinou redução da tensão de escoamento, como pode ser observado na figura 78, na qual houve o processo de redosagem, assim como no comportamento das diferentes relações a/c apresentado na figura 77.

Observa-se, pela figura 78, que o comportamento da tensão de escoamento no material mantido em mistura, porém sem a redosagem com aditivo superplastificante, permaneceu praticamente constante ao longo do tempo. Comportamento semelhante ao observado na verificação das áreas de histerese ilustrado na figura 76. O comportamento esperado, quando associado ao comportamento obtido no concreto em relação à perda de abatimento, era de que uma alteração mais sensível seria observada na tensão de escoamento da pasta quando não utilizado o aditivo superplastificante no processo de redosagem.

O comportamento do fluxo de um concreto fresco segue o mesmo padrão observado em uma pasta de cimento e depende da concentração de partículas presentes, que se apresentam em uma variação de tamanho muito grande, desde partículas de cimento de tamanhos submicrométricos até agregados com tamanhos em centímetros. Uma diferença importante para avaliar concretos é que as taxas utilizadas são bastante baixas, na ordem de 0 a 10 s^{-1} , refletindo a baixa taxa dos concretos em aplicações reais (por exemplo, durante mistura, transporte e acabamento), enquanto que em pastas de cimento geralmente é maior, estendendo-se até a 1000 s^{-1} (STRUBLE e XI, 2001). Castro *et al.* (2011) ressaltam que dependendo das particularidades de cada suspensão e da magnitude da taxa de cisalhamento aplicada, um ou mais fatores pode prevalecer e comandar o comportamento reológico do fluido.

Com base no exposto, um dos fatores atribuídos ao comportamento da tensão de escoamento em se manter quase constante ao longo do tempo de mistura, sem a redosagem com o superplastificante, está nessa diferença entre as taxas de cisalhamento aplicadas nos concretos em relação às pastas de cimento. Durante o ensaio de reologia as velocidades de rotação foram praticamente de 430 RPM, enquanto que no concreto, conforme detalhado na metodologia, o valor máximo foi de 16 RPM. Baixas velocidades de rotação são adotadas em ensaios reológicos em concretos, como exemplo pode-se citar o estudo de Castro (2007), que adota velocidades de rotação variando de 5 RPM a 80 RPM.

Mesmo não avaliando a tensão de escoamento nos ensaios do concreto, pelo comportamento da perda de abatimento, sabe-se que há aumento na tensão de escoamento. Cabe salientar também que as pastas foram submetidas a taxas de cisalhamento muito maiores, gerando uma energia de mistura maior, para uma quantidade de material muito menor, quando comparado ao concreto.

As propriedades reológicas do concreto são influenciadas pela presença dos agregados, principalmente por suas quantidades e granulometrias. Parâmetros reológicos aumentam com o teor de agregados (STRUBLE e XI, 2001). Isso ocorre porque em um concreto típico, pelo menos 50% em volume é na forma de agregado que resiste às tensões aplicadas sem deformação, conseqüentemente, a tensão de escoamento é maior, aumentando com o aumento da quantidade de agregado (BANFILL, 2006).

Outro importante fator a ser considerado, para entender essa diferença de comportamento da pasta com o concreto, é que no concreto, além das partículas de cimento em suspensão na mistura, há a presença dos agregados. A manutenção da tensão de escoamento, observada no ensaio de reologia para pasta em mistura sem redosagem, demanda um estudo mais detalhado abordando a real influência que a ausência de agregados e uma maior velocidade de rotação podem causar sobre os parâmetros reológicos de uma pasta quando comparada a um concreto. Conforme descrito pela literatura observa-se uma relação direta entre o comportamento do abatimento com a tensão de escoamento (CASTRO, 2007; LARRARD e SEDRAN, 2002). Tal comportamento também foi registrado neste estudo conforme apresentado nas figuras 79 a 81.

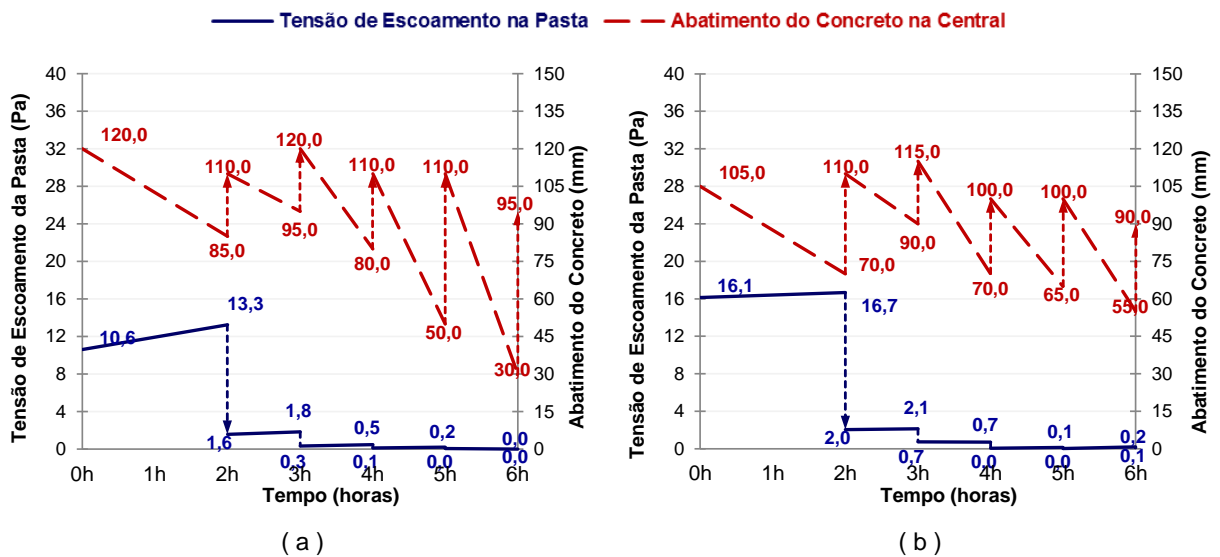


Figura 79: comportamento do abatimento do concreto e da tensão de escoamento da pasta produzidos com relação a/c igual a 0,40 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

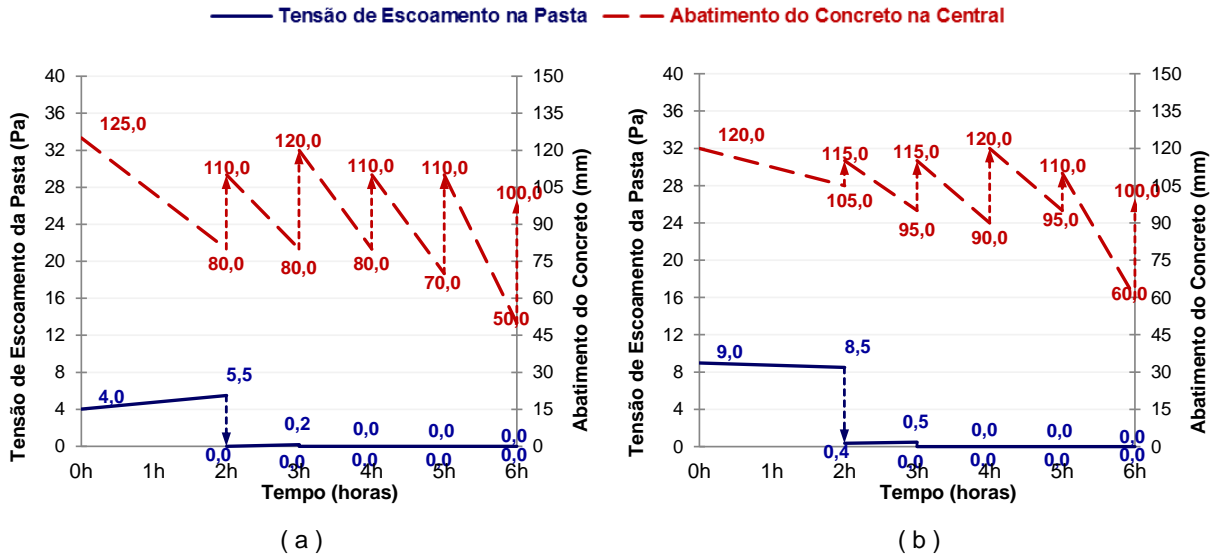


Figura 80: comportamento do abatimento do concreto e da tensão de escoamento da pasta produzidos com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

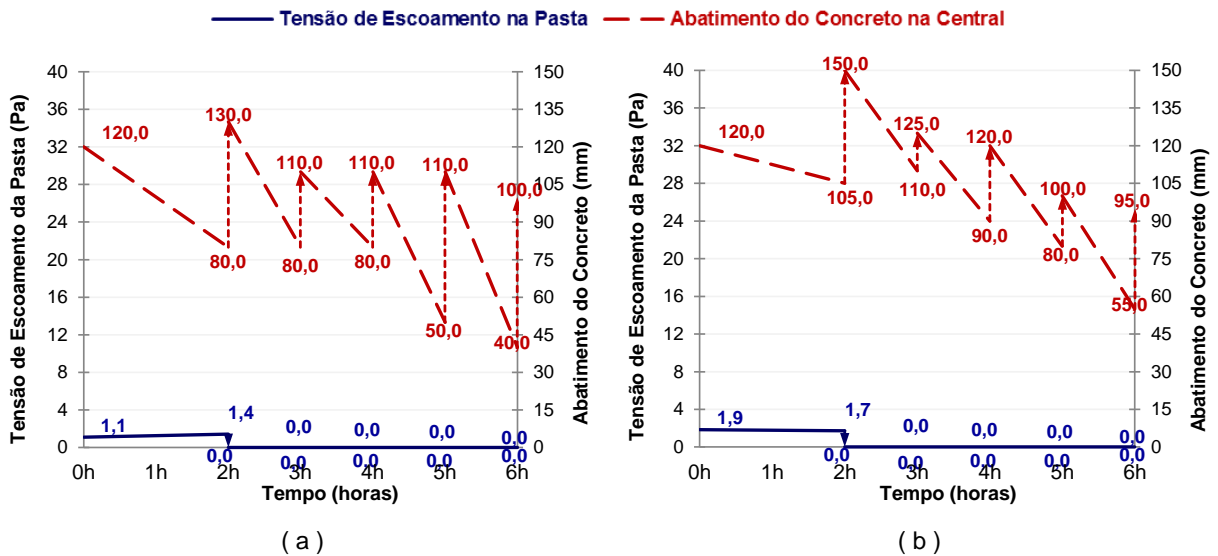


Figura 81: comportamento do abatimento do concreto e da tensão de escoamento da pasta produzidos com relação a/c igual a 0,68 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

Esse ganho do abatimento e diminuição da tensão de escoamento, em misturas à base de cimento Portland, quando adicionado aditivo superplastificante à base de policarboxilato, também foi relatado por Adjoudj *et al.* (2014) ao analisarem argamassas com uma relação a/c de 0,55. Os autores registraram ganhos no abatimento de 63 mm com a adição de 0,2% do aditivo e 90 mm com 0,4% de aditivo, chegando a um abatimento final de 150mm. Enquanto que, para a tensão de escoamento, registraram uma variação significativa que

seguiu uma tendência de diminuição linear, analisando a mistura sem a adição do aditivo em relação às misturas com 0,3 e 0,4% de adição.

4.2.3.2 Viscosidade Plástica

A determinação da viscosidade plástica, através da equação de Herschel-Bulkey, não é obtida diretamente como quando o comportamento da mistura é regido pela equação de Bingham. Para determinar a viscosidade plástica, além dos parâmetros “ K ” e “ n ” já apresentados, é considerada uma taxa de cisalhamento máxima “ $\dot{\gamma}_{máx}$ ” obtida no teste de reologia, sendo a viscosidade plástica dada pela expressão $\mu = (3 * K/n + 2) * \dot{\gamma}_{máx}^{n-1}$ (FERRARIS *et al.*, 2001). Quando o comportamento é caracterizado como binghamiano, “ n ” é igual a 1, a viscosidade é diretamente determinada pelo valor de “ K ”.

Nos ensaios de reologia realizados neste trabalho diferentes patamares de velocidades foram adotados, conforme metodologia proposta por Taleiro *et al.* (2013). Desta forma verificou-se a viscosidade para três diferentes taxas de cisalhamentos. O detalhamento das equações de ajustes adotadas está apresentado no Apêndice B. A figura 82, apresentada a seguir, mostra o comportamento da viscosidade para toda a matriz estudada, para três diferentes taxas consideradas, especificadas por:

- V01 – Taxa de Cisalhamento de $110,95 \text{ s}^{-1}$ – Velocidade de 9 rad/s (85,9 rpm)
- V02 – Taxa de Cisalhamento de $332,86 \text{ s}^{-1}$ – Velocidade de 27 rad/s (257,8 rpm)
- V03 – Taxa de Cisalhamento de $554,77 \text{ s}^{-1}$ – Velocidade de 45 rad/s (429,7 rpm)

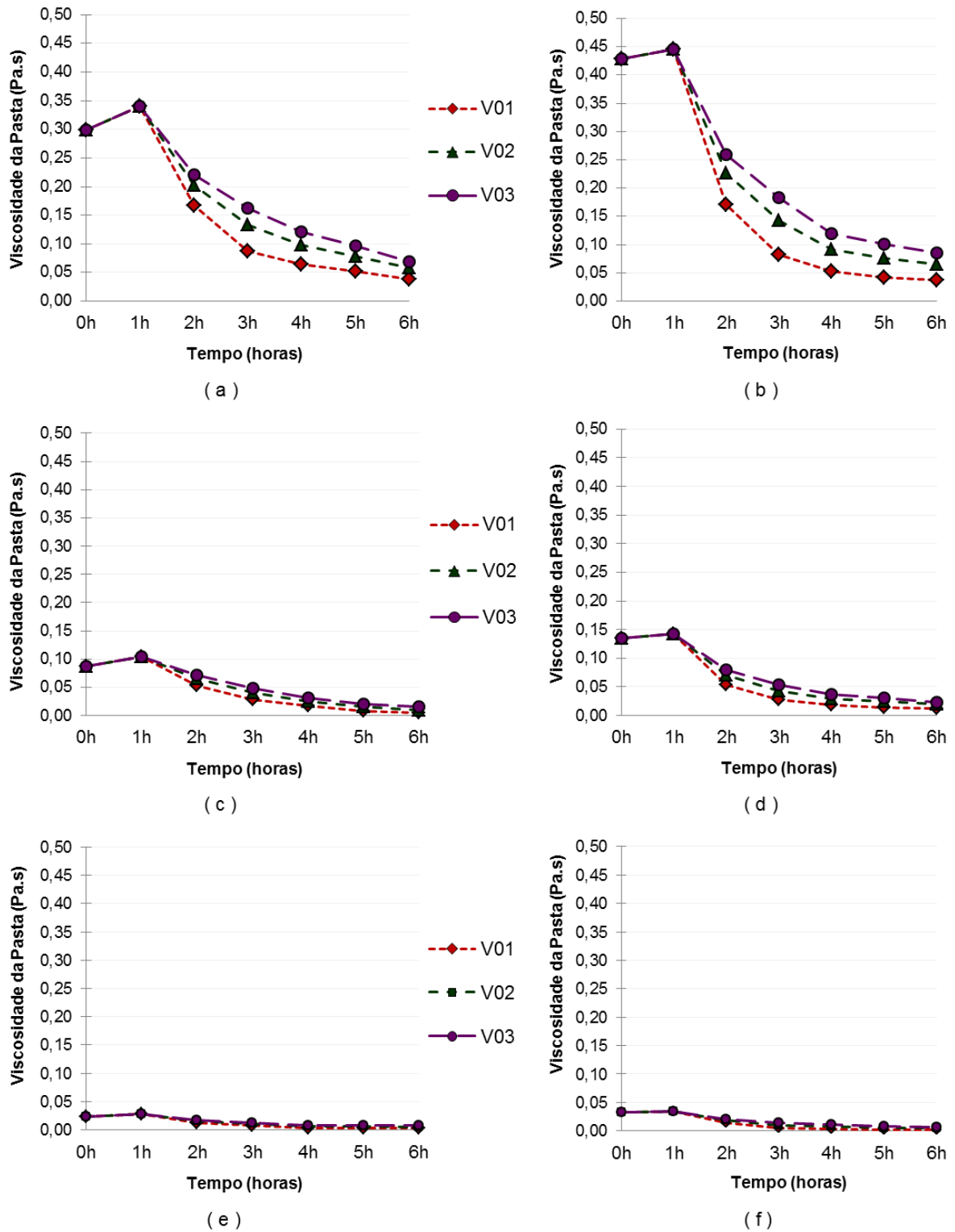


Figura 82: comportamento da viscosidade obtido pelas curvas de cisalhamento nas pastas em estudo para (a) relação $a/c=0,40$ com cimento CII Z 32, (b) relação $a/c=0,40$ com cimento CP IV 32 RS, (c) relação $a/c=0,52$ com cimento CII Z 32, (d) relação $a/c=0,52$ com cimento CP IV 32 RS, (e) relação $a/c=0,68$ com cimento CII Z 32 e (f) relação $a/c=0,68$ com cimento CP IV 32 RS

Quando o fluido é caracterizado como binghamiano, a mudança na taxa de cisalhamento não altera a viscosidade, já que o modelo é definido por uma reta, sendo a viscosidade a inclinação dessa reta. Nos resultados obtidos, é possível observar claramente esse comportamento binghamiano para os pontos nos quais ainda não havia sido adicionado aditivo superplastificante, a viscosidade não muda com o aumento da taxa de cisalhamento aplicada, porém, a partir do tempo de mistura de 2 horas, em que é incorporado o aditivo para correção da trabalhabilidade, o fluido passa a caracterizar-se como dilatante, conforme já apresentado. Observa-se que, com o aumento da taxa de cisalhamento aplicada há um aumento na viscosidade da mistura.

Uma vez que partículas sólidas em um líquido geralmente se comportam como um fluido, aumentar a fração volumétrica dos sólidos na mistura provoca um aumento da viscosidade (STRUBLE e JI, 2001). Tal comportamento pode ser observado nos resultados de viscosidade obtidos, para relações a/c menores, em que há uma maior quantidade de partículas de cimento na mistura, resultam viscosidades maiores ao se comparar com relações a/c maiores, conforme ilustra a figura 82.

Outro ponto observado é que misturas com cimento tipo CP IV apresentaram maiores viscosidades plásticas que as misturas com cimento CP II, assim como para a tensão de escoamento, comportamento atribuído a maior superfície específica que o cimento CP IV apresenta. Banfill (2006) relata que a interface água-cimento reflete o comportamento do sistema e, para pastas, a viscosidade plástica e tensão de escoamento aumentam à medida que o cimento fica mais fino. O efeito da influência do tamanho das partículas em pastas se dá pela área superficial dos grãos, enquanto que para o concreto esse efeito é percebido pelo volume dos grãos mais grossos.

As figuras 83a e 83b apresentam o comportamento da viscosidade para relação a/c igual a 0,52 avaliando os efeitos dos processos realizados: mistura prolongada com a redosagem proposta, mistura sem redosagem com aditivo superplastificante e para condição de permanência da pasta parada.

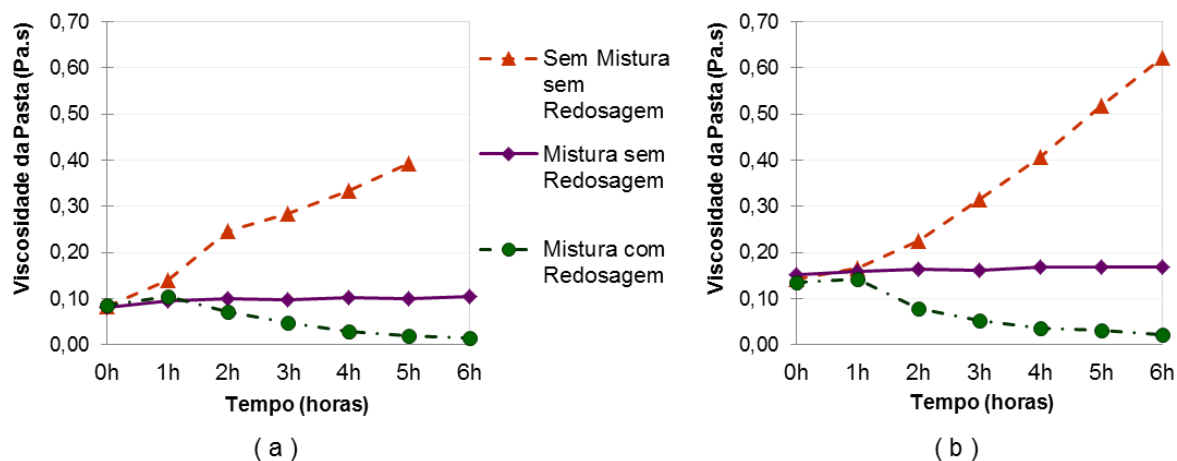


Figura 83: comportamento da viscosidade V03 obtido pelas curvas de cisalhamento para pastas produzidas com relação a/c igual a 0,52 e (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

Observa-se que, para o processo de mistura sem redosagem com aditivo, há uma manutenção no valor da viscosidade. Comportamento atribuído aos fatores já listados na análise da tensão de escoamento, porém, salienta-se a necessidade de maiores estudos.

4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Após processo de cura e acabamento das faces com retífica, conforme já detalhado, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio para determinação do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade. Para cada tempo analisado foram moldados 6 corpos de prova, destes 3 foram ensaiados à resistência à compressão e 3 corpos de prova para ensaio do módulo. Os resultados de resistência à compressão já foram apresentados por Polesello (2012) e estão citados no capítulo dois deste trabalho.

Com os resultados individuais dos corpos de prova ensaiados para o módulo de elasticidade, foi feita uma análise estatística para comprovar as tendências de comportamento.

4.3.1 Concretos Produzidos em Laboratório

Os resultados para o módulo aos 28 dias, dos concretos produzidos em laboratório com cimento tipo CP II Z 32 e CP IV 32 RS, assim como os desvios padrão e respectivos coeficientes de variação, estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Módulo de elasticidade secante médio, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 dias, do concreto produzido em laboratório

| | | CIMENTO CP II | | | CIMENTO CP IV | | |
|-------------------|----------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | | 0 h | 4 h | 6 h | 0 h | 4 h | 6 h |
| a/c = 0,68 | Média (GPa) | 30,5 | 30,1 | 28,6 | 27,6 | 26,8 | 26,6 |
| | Desvio (GPa) | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,0 | 1,9 | 0,8 |
| | Coef. Var. (%) | 3,0% | 3,8% | 4,2% | 3,5% | 7,0% | 3,0% |
| a/c = 0,52 | Média (GPa) | 34,7 | 35,9 | 34,8 | 33,4 | 32,9 | 32,5 |
| | Desvio (GPa) | 1,5 | 0,6 | 2,3 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |
| | Coef. Var. (%) | 4,4% | 1,7% | 6,6% | 2,8% | 2,4% | 2,0% |
| a/c = 0,40 | Média (GPa) | 36,4 | 36,9 | 36,9 | 34,7 | 34,8 | 34,1 |
| | Desvio (GPa) | 1,4 | 0,8 | 1,7 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| | Coef. Var. (%) | 3,8% | 2,2% | 4,5% | 4,0% | 4,0% | 4,2% |

Os resultados individuais foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) para verificar estatisticamente a influência do tipo de cimento, da relação a/c e do tempo de mistura, assim como das interações dessas variáveis sobre os resultados obtidos para o módulo de elasticidade, conforme apresentado na tabela 16.

Tabela 16: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos produzidos em laboratório

| FONTE | SQ | GDL | MQ | TESTE F | PROB. | SIGNIFICÂNCIA |
|---------------------|---------------|-----------|--------|---------|--------|---------------|
| A: Relação a/c | 542,31 | 2 | 271,16 | 179,73 | 0,00% | S |
| B: Tipo de Cimento | 81,72 | 1 | 81,72 | 54,17 | 0,00% | S |
| C: Tempo de Mistura | 4,13 | 2 | 2,07 | 1,37 | 26,30% | NS |
| AB | 1,83 | 2 | 0,92 | 0,61 | 54,85% | NS |
| AC | 4,43 | 4 | 1,11 | 0,73 | 57,30% | NS |
| BC | 2,51 | 2 | 1,25 | 0,83 | 44,14% | NS |
| ABC | 3,63 | 4 | 0,91 | 0,60 | 66,34% | NS |
| Erro | 54,31 | 36 | 1,51 | | | |
| TOTAL | 694,88 | 53 | | | | |

SQ - Soma Quadrada GDL - Graus de Liberdade MQ - Média Quadrada TESTE F - Valor calculado de F
 PROB. - Nível de Significância associado ao valor calculado de F S - Significativo NS - Não Significativo

Os resultados da ANOVA mostram que há influência estatisticamente significativa sobre o resultado do módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, com a mudança na relação a/c e no tipo de cimento, conforme ilustrado na figura 84. No entanto, para o tempo de mistura do concreto, assim como para as interações dessas variáveis, verifica-se que não houve influência estatisticamente significativa no resultado do módulo.

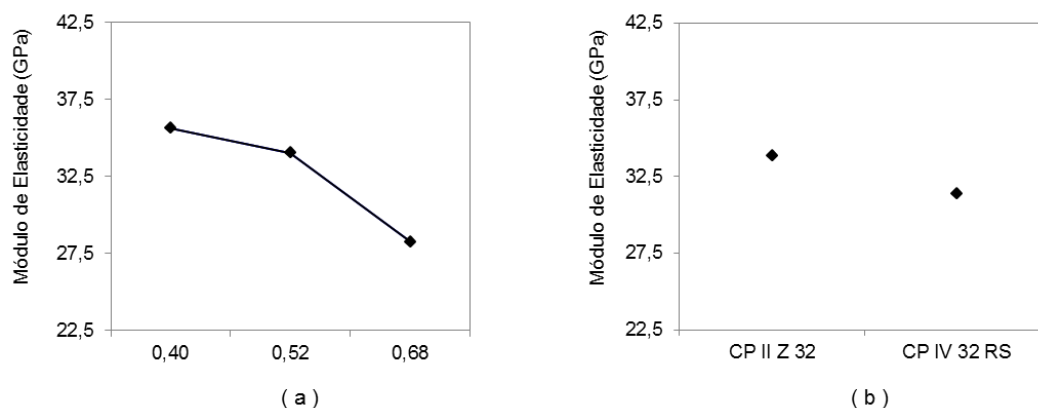


Figura 84: comportamento do concreto produzido em laboratório quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias em função de: (a) relação água/cimento e (b) tipo de cimento

Pelos resultados obtidos foi possível verificar estatisticamente que, quando produzidos em laboratório, o módulo de elasticidade do concreto verificado aos 28 dias de idade se mantém sem alterações quando o concreto é mantido em processo de mistura por um período de até 6 horas, com redosagem ao longo do tempo pela incorporação do aditivo superplastificante.

4.3.2 Concretos Produzidos na Central de Concreto

Os resultados para os concretos produzidos na central dosadora estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17: Módulo de elasticidade secante médio, desvio padrão e coeficiente de variação, aos 28 dias, do concreto produzido na central dosadora

| | | CIMENTO CP II | | | CIMENTO CP IV | | |
|-------------------|----------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | | 0 h | 4 h | 6 h | 0 h | 4 h | 6 h |
| a/c = 0,68 | Média (GPa) | 31,8 | 28,5 | 28,3 | 26,2 | 25,3 | 25,8 |
| | Desvio (GPa) | 1,9 | 0,5 | 1,9 | 0,4 | 0,6 | 0,9 |
| | Coef. Var. (%) | 6,1% | 1,7% | 6,6% | 1,6% | 2,2% | 3,4% |
| a/c = 0,52 | Média (GPa) | 35,1 | 34,2 | 33,9 | 30,6 | 30,7 | 30,4 |
| | Desvio (GPa) | 0,5 | 0,4 | 1,9 | 0,9 | 0,5 | 1,1 |
| | Coef. Var. (%) | 1,5% | 1,3% | 5,7% | 2,9% | 1,7% | 3,5% |
| a/c = 0,40 | Média (GPa) | 36,2 | 36,6 | 34,7 | 32,9 | 33,2 | 32,5 |
| | Desvio (GPa) | 1,8 | 2,6 | 2,0 | 0,6 | 1,8 | 2,6 |
| | Coef. Var. (%) | 5,0% | 7,1% | 5,8% | 1,7% | 5,5% | 8,0% |

A influência do tipo de cimento, da relação a/c e do tempo de mistura sobre os resultados obtidos, assim como para os resultados do concreto produzido em laboratório, foi verificada estatisticamente através de uma análise de variância (ANOVA), conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18: Resultados da ANOVA para o módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos produzidos na central dosadora

| FONTE | SQ | GDL | MQ | TESTE F | PROB. | SIGNIFICÂNCIA |
|---------------------|---------------|-----------|--------|---------|--------|---------------|
| A: Relação a/c | 429,29 | 2 | 214,64 | 97,90 | 0,00% | S |
| B: Tipo de Cimento | 166,04 | 1 | 166,04 | 75,73 | 0,00% | S |
| C: Tempo de Mistura | 13,23 | 2 | 6,61 | 3,02 | 5,74% | NS |
| AB | 1,95 | 2 | 0,97 | 0,44 | 64,35% | NS |
| AC | 9,65 | 4 | 2,41 | 1,10 | 36,60% | NS |
| BC | 7,20 | 2 | 3,60 | 1,64 | 20,34% | NS |
| ABC | 3,09 | 4 | 0,77 | 0,35 | 84,15% | NS |
| Erro | 78,93 | 36 | 2,19 | | | |
| TOTAL | 709,37 | 53 | | | | |

SQ - Soma Quadrada GDL - Graus de Liberdade MQ - Média Quadrada TESTE F - Valor calculado de F
 PROB. - Nível de Significância associado ao valor calculado de F S - Significativo NS - Não Significativo

Assim como verificado para os concretos produzidos em laboratório, os resultados da ANOVA mostram que há influência significativa sobre o resultado do módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, com a mudança na relação a/c e no tipo de cimento, conforme ilustrado na figura 85. Para o tempo de mistura do concreto, assim como para as interações das variáveis, verifica-se que não houve influência estatisticamente significativa no resultado do módulo.

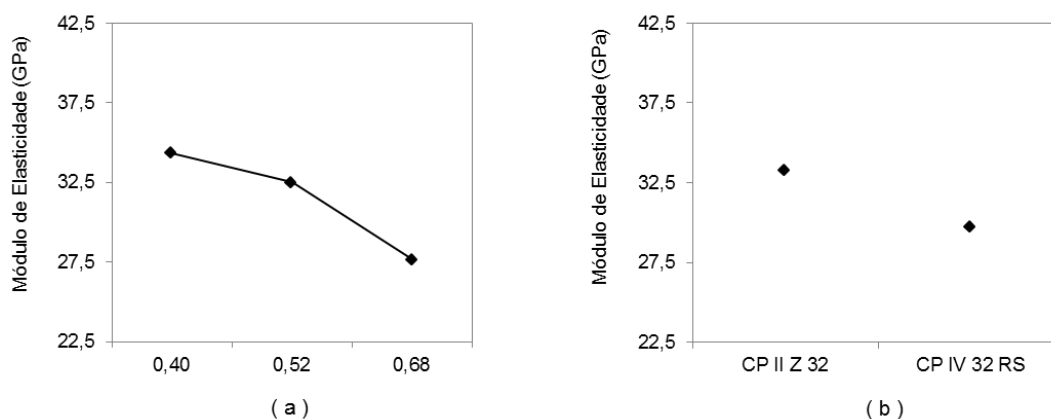


Figura 85: comportamento do concreto produzido na central quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias em função de: (a) relação água/cimento e (b) tipo de cimento

4.3.3 Análise dos Resultados do Módulo de Elasticidade

Para concretos que sofrem processos de redosagem com aditivo superplastificante ao longo do tempo e permanecem em mistura prolongada por até 6 horas, procedimento adotado nesta pesquisa, foi possível comprovar estatisticamente, tanto para condição de laboratório quanto para condição de produção em escala real em uma central dosadora de concreto, que há uma manutenção no desempenho do concreto em relação ao módulo de elasticidade verificado aos 28 dias de idade. Comportamento semelhante, de manutenção do módulo de elasticidade para um concreto em que houve redosagem com aditivo superplastificante, porém, ao final de 120 minutos com redosagem do concreto aos 60 minutos, também foi registrado por Hanayneh e Itani (1989).

Em relação ao comportamento do concreto produzido em laboratório quando comparado ao concreto produzido na central, é observada uma leve redução nos valores médios do módulo para o concreto produzido na central dosadora, conforme ilustra a figura 86. Analisando a resistência à compressão no início, no final e em mais três trechos intermediários durante a descarga de um caminhão betoneira de concreto, Mascolo *et al.* (2013) verificaram que as amostras coletadas no início e final da descarga do caminhão apresentam uma concentração de agregado graúdo maior em relação aos pontos intermediários da carga. É importante observar que o módulo de elasticidade do concreto é influenciado, além da resistência à compressão, pelo módulo de elasticidade do agregado e pela proporção volumétrica do agregado no concreto (NEVILLE, 2014; JUROWSKI e GRZESZCZYK, 2015). Sendo assim, essa redução do módulo para concretos produzidos na central dosadora, observada na figura 86, pode estar atrelada ao teor de agregado graúdo da amostra coletada para moldagem dos corpos de prova, já que foram seguidas as

prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015), que determina a coleta da amostra no terço médio da carga. Além do mais, ensaios de laboratório, normalmente, apresentam um melhor controle durante a execução.

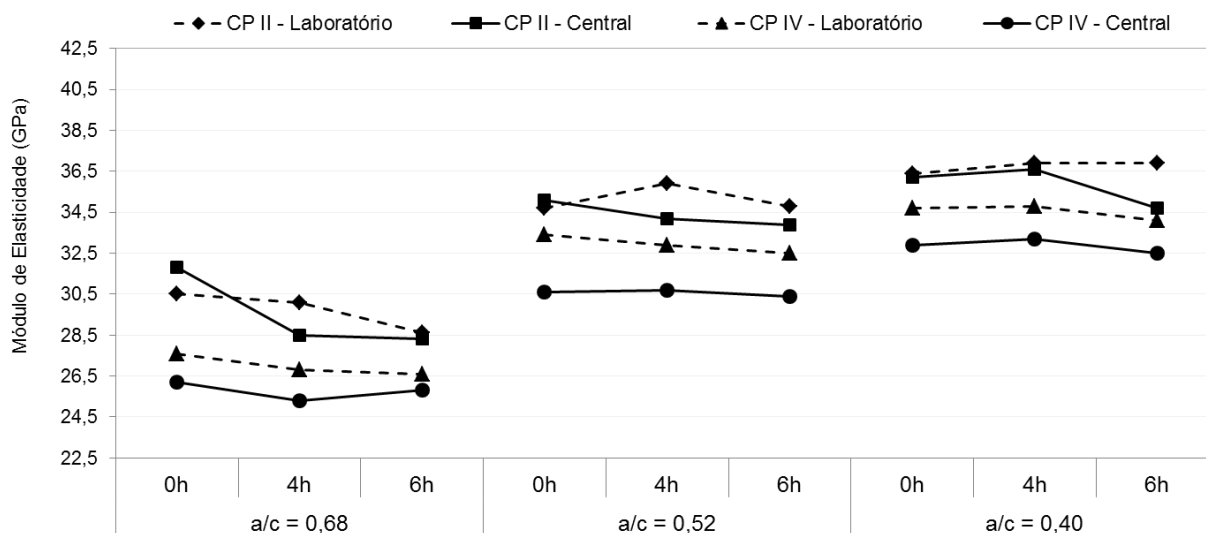


Figura 86: comportamento do concreto produzido em laboratório quanto ao módulo de elasticidade aos 28 dias em relação ao produzido na central

O módulo de elasticidade tem seu comportamento diretamente relacionado com a relação a/c da mistura conforme observado e verificado, através da análise de variância, mostrando-se estatisticamente significativo com a alteração da relação a/c (tabelas 16 e 18), tanto para o concreto produzido em laboratório como na central dosadora. Segundo Mehta e Monteiro (2008), esta correlação é válida porque o comportamento em relação à tensão-deformação dos três componentes do concreto (agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição) seria estabelecido por suas resistências individuais estando, por sua vez, ligadas à resistência última do concreto.

As equações para correlacionar o módulo de elasticidade (E_c) com a resistência à compressão (f_c), de modo geral, são expressas por $E_c = k_1 * f_c^{k_2}$, onde o valor de k_1 será uma constante determinada pelo produto de parâmetros relativos às variáveis do concreto consideradas nas expressões e k_2 varia entre 0,3 e 0,5 (SHEHATA, 2011). Segundo esse autor, dados demonstram que o valor de $k_2 = 0,5$ oferece melhor correlação entre essas propriedades para concretos que apresentem faixas de resistências à compressão menores,

enquanto que uma melhor correlação para resistências maiores pode ser conseguida com k_2 próximo de 0,3.

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014), o módulo de elasticidade tangente inicial, para concretos com resistências à compressão entre 20,0MPa e 50,0MPa, pode ser estimado pela expressão $E_{ci} = \alpha_E * 5600 * f_{ck}^{0,5}$, sendo o coeficiente α_E em função do tipo de agregado, para o agregado de origem basáltico usado nesse estudo considera-se igual a 1,20. A norma prevê o módulo de elasticidade secante como sendo 85% do valor do módulo de elasticidade tangente inicial ($E_{cs} = 0,85 * E_{ci}$).

Sendo assim, é possível mostrar o comportamento da correlação entre essas duas propriedades pelos resultados médios obtidos na pesquisa para todas as relações a/c e todos os tempos de mistura avaliados, para o concreto produzido em laboratório e na central dosadora de concreto. A figura 87 ilustra a nuvem de pontos dos resultados, para cada condição de produção do concreto, com suas respectivas equações e o coeficiente de determinação do modelo adotado, assim como, a curva dos valores estimados segundo equações propostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

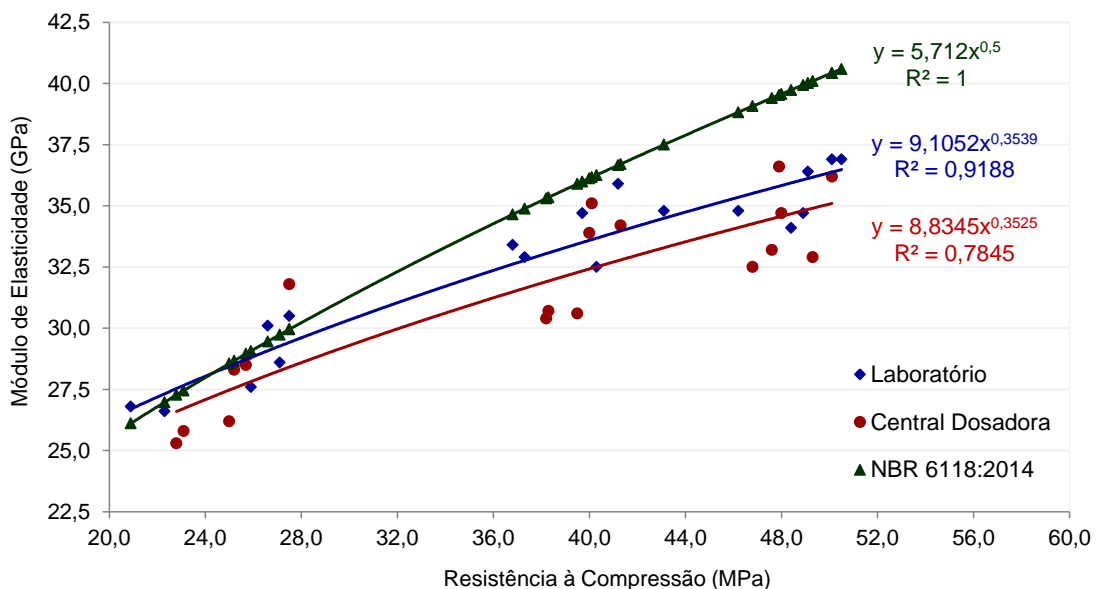


Figura 87: comportamento do módulo de elasticidade em relação à resistência à compressão do concreto

Observa-se uma melhor precisão para o concreto produzido em laboratório, onde há um melhor controle no processo de produção, em relação à central dosadora, na determinação

das curvas de ajuste. Porém, os valores de R^2 apresentados refletem um adequado comportamento para o processo avaliado. Analisando-se a figura 87, nota-se que os valores obtidos pela equação proposta pela norma para resistências à compressão maiores, com base nas resistências médias obtidas no estudo, conduzem a valores superestimados quando comparados aos obtidos experimentalmente na pesquisa, tanto para os concretos de laboratório como para a central dosadora. Shehata (2011) observa que o expoente 0,5, adotado na equação da norma para concretos com resistências inferiores a 50,0MPa, é adequado para menores resistências enquanto que para resistências maiores um valor mais adequado é próximo a 0,3.

Cabe salientar que a norma é de abrangência nacional, sendo assim, pelos resultados apresentados, percebe-se a necessidade de realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade para as condições e materiais específicos com os quais está se trabalhando. A verificação adequada das propriedades mecânicas do concreto contribui para uma melhor análise quanto ao comportamento em relação à durabilidade ao longo de seu tempo de exposição.

4.4 DURABILIDADE DO CONCRETO

A durabilidade está relacionada à resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos, tais como agentes externos relacionados à penetração de íons cloreto e dióxido de carbono (AİTCIN, 2000). A análise da durabilidade dos concretos mantidos em mistura por até 6 horas, já apresentados e detalhados nesta pesquisa, foi feita através da verificação da resistência desses concretos em relação à carbonatação e à penetração de íons cloreto, conforme se detalha a seguir.

4.4.1 Carbonatação

Devido à carbonatação do concreto em ambiente natural se caracterizar por um processo lento, em que é interessante fazer referência para um período de anos, optou-se pela verificação da profundidade de carbonatação na idade de 2 anos após a produção dos concretos em estudo. Com o objetivo de identificar a influência do tempo de mistura do concreto em relação à carbonatação, a verificação foi realizada, além do concreto no tempo 0 hora (recém-misturado), para os tempos de 2, 4 e 6 horas de mistura.

Nas figuras 88 e 89 podem ser visualizadas as amostras dos concretos após aspersão da fenolftaleína, para os concretos com cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS, respectivamente. A face exposta ao ambiente natural, onde foi verificada a carbonatação do concreto, corresponde a parte superior de cada uma das imagens.

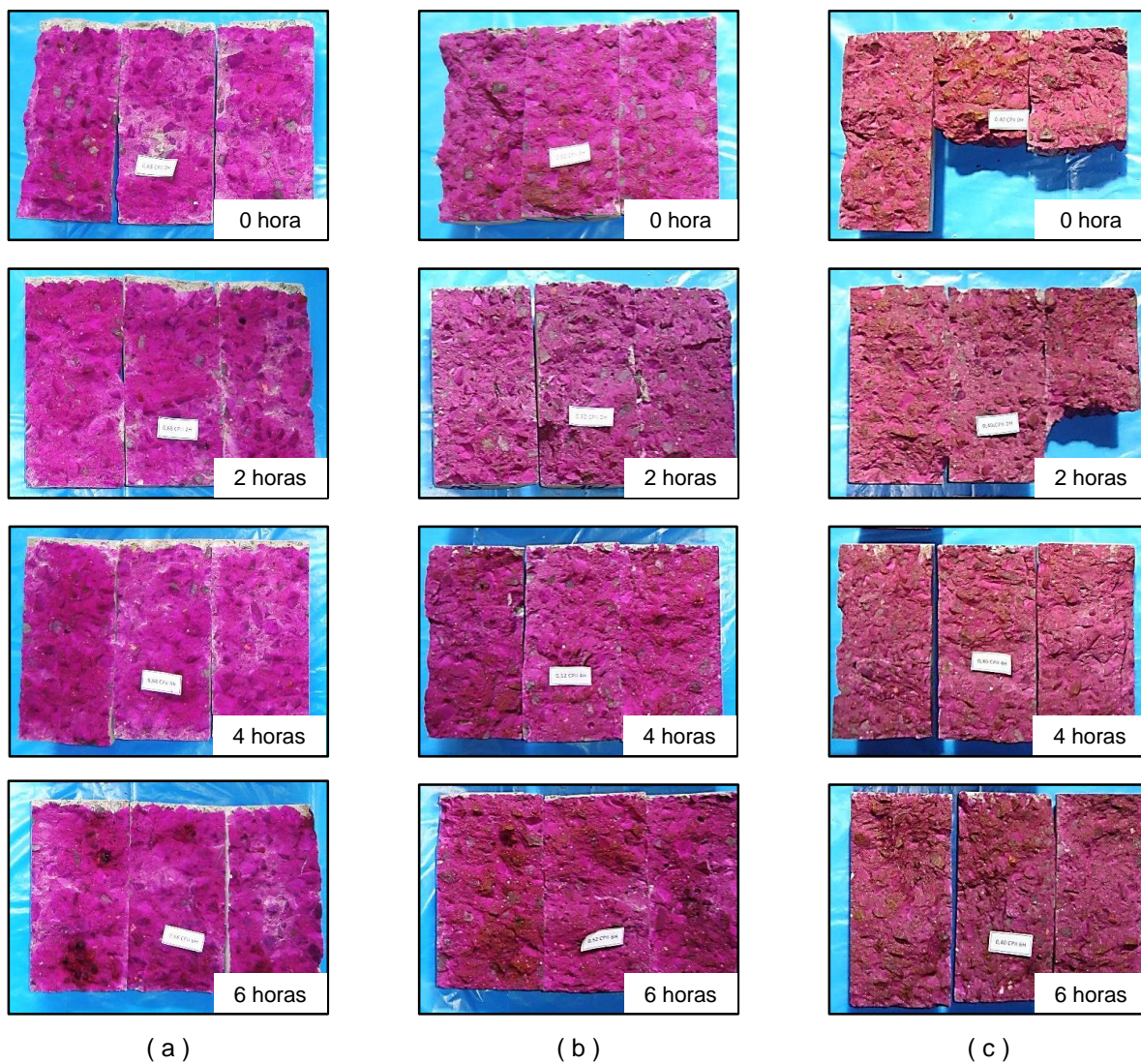


Figura 88: aspecto da carbonatação nas amostras extraídas dos blocos de concreto produzido com cimento CP II Z 32 para relação a/c igual a (a) 0,68, (b) 0,52 e (c) 0,40

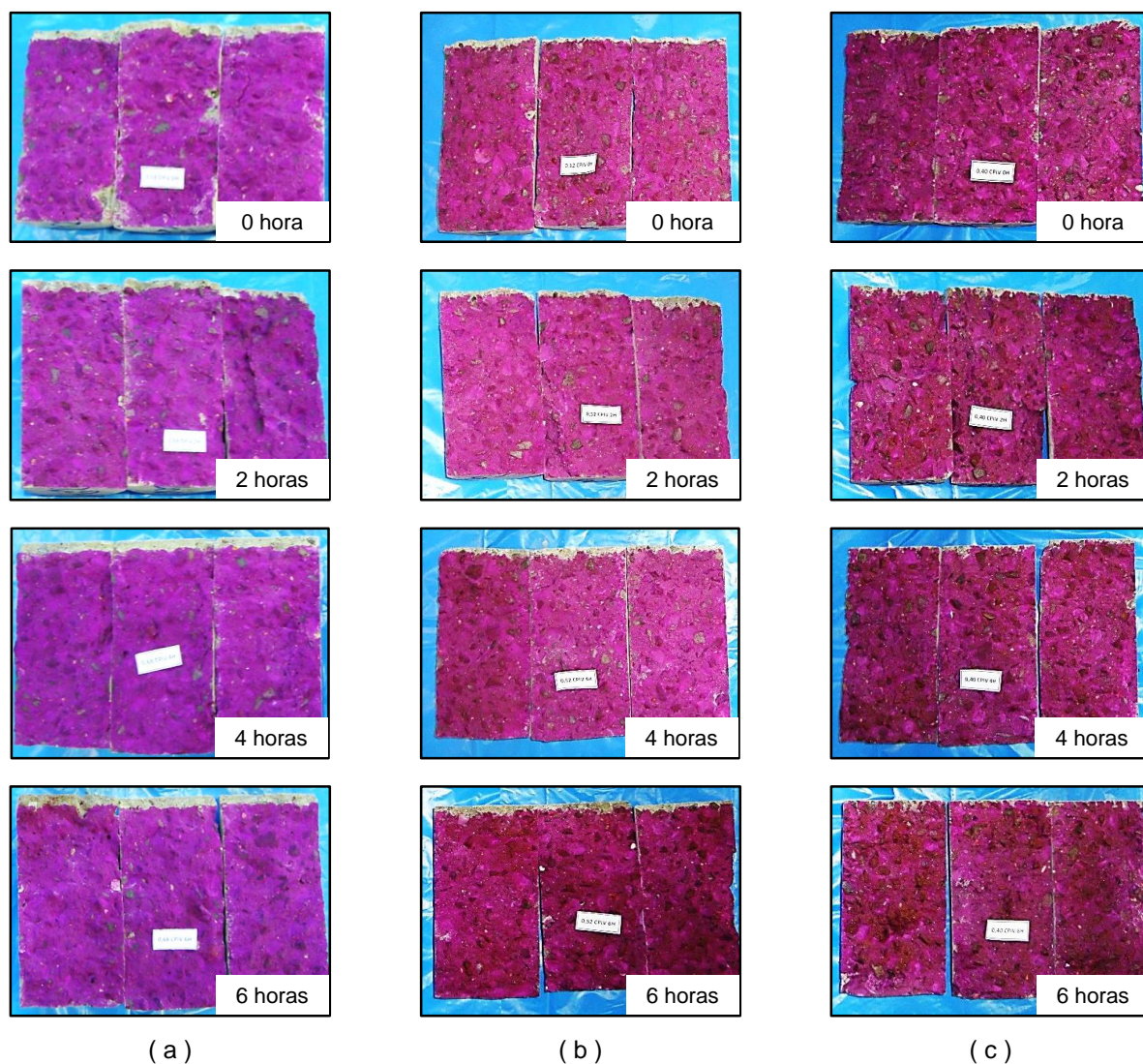


Figura 89: aspecto da carbonatação nas amostras extraídas dos blocos de concreto produzido com cimento CP IV 32 RS para relação a/c igual a (a) 0,68, (b) 0,52 e (c) 0,40

Pelas figuras 88 e 89 nota-se que, para todas as relações a/c e para todos os tempos de misturas, a frente de carbonatação, definida na face superior de cada amostra, correspondente a face exposta do bloco de concreto ao ambiente natural, permitiu fácil leitura. As profundidades de carbonatação médias obtidas dessas medidas estão apresentadas nas figuras 90a e 90b, respectivamente, para os concretos com cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS.

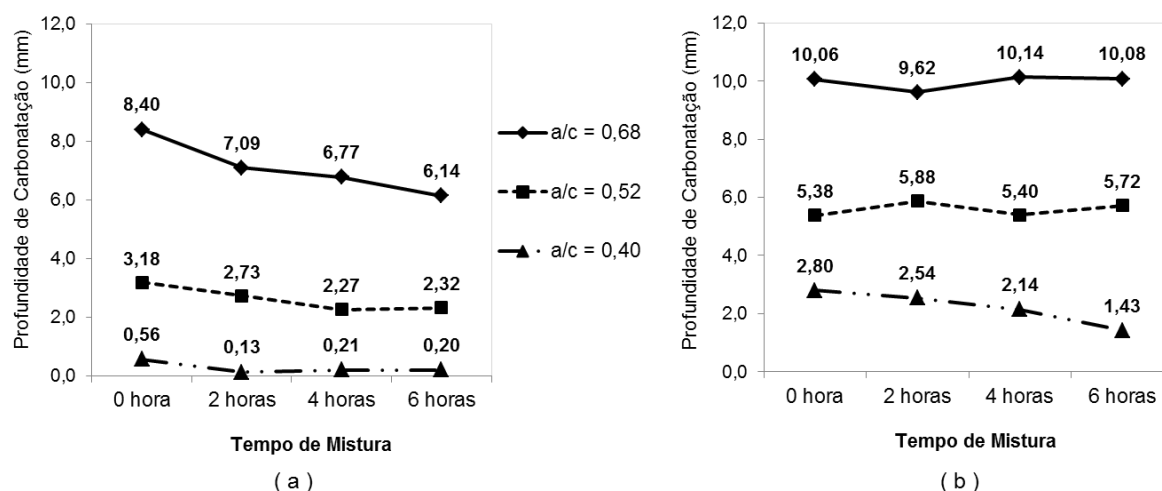


Figura 90: valores médios observados de profundidade de carbonatação para os concretos produzidos com: (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

De uma forma geral, as curvas de comportamento apresentadas nas figuras 90a e 90b mostram que a profundidade de carbonatação não aumentou ao longo do tempo de mistura. Para melhor avaliar esse comportamento, realizou-se uma análise mais apurada dos fatores que envolvem o estudo através da análise de variância (ANOVA), conforme apresentado na tabela 19.

Tabela 19: Resultados da ANOVA para a profundidade de carbonatação aos 2 anos de idade dos concretos produzidos na central dosadora

| FONTE | SQ | GDL | MQ | TESTE F | PROB. | SIGNIFICÂNCIA |
|---------------------|---------------|-----------|--------|---------|--------|---------------|
| A: Relação a/c | 647,32 | 2 | 323,66 | 989,33 | 0,00% | S |
| B: Tipo de Cimento | 121,44 | 1 | 121,44 | 371,19 | 0,00% | S |
| C: Tempo de Mistura | 5,57 | 3 | 1,86 | 5,67 | 0,15% | S |
| AB | 3,83 | 2 | 1,91 | 5,85 | 0,45% | S |
| AC | 1,88 | 6 | 0,31 | 0,96 | 45,97% | NS |
| BC | 1,99 | 3 | 0,66 | 2,03 | 11,75% | NS |
| ABC | 4,95 | 6 | 0,83 | 2,52 | 2,85% | S |
| Erro | 15,70 | 48 | 0,33 | | | |
| TOTAL | 802,68 | 71 | | | | |

SQ - Soma Quadrada GDL - Graus de Liberdade MQ - Média Quadrada TESTE F - Valor calculado de F
 PROB. - Nível de Significância associado ao valor calculado de F S - Significativo NS - Não Significativo

Os resultados da ANOVA mostram que há influência significativa sobre a profundidade de carbonatação do concreto avaliado na idade de 2 anos, quando há mudança na relação a/c,

no tipo de cimento, assim como no tempo de mistura. A figura 91 ilustra esse comportamento em função da influência isolada de cada uma dessas variáveis.

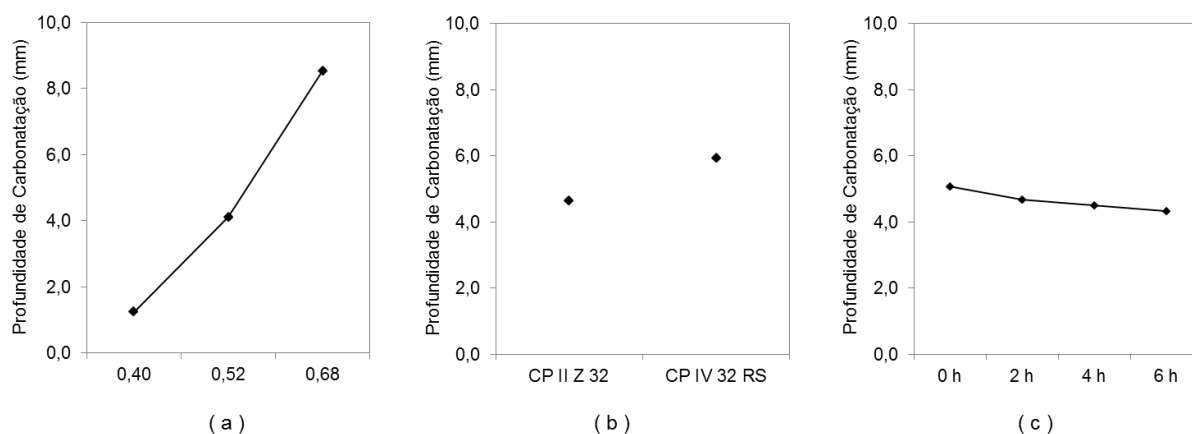


Figura 91: comportamento do concreto produzido na central quanto à verificação da profundidade de carbonatação aos 2 anos de idade em função (a) relação a/c, (b) tipo de cimento e (c) tempo de mistura

A figura 91b mostra que a carbonatação média do cimento tipo CII Z 32 é de 4,60mm enquanto que para o cimento CIV 32 RS é de 5,90mm, o que indica que para o concreto produzido com CIV os concretos carbonataram, em média, 1,28 vezes mais que quando utilizado CII na sua produção. Segundo Tasca (2012), uma menor profundidade de carbonatação foi verificada para um concreto de referência quando comparado com concretos com adições, fato associado a maior quantidade de hidróxido de cálcio e aos demais álcalis que o cimento Portland proporciona, porque contém quantidade de hidróxido de cálcio mais alta para ser consumida pelo CO_2 nas reações de carbonatação.

Compreende-se, também, que ocorre aumento da profundidade de carbonatação em concretos com adições minerais tipo pozzolânica (AHMED e BENHARZALLAH, 2017), porque as reações pozzolânicas consomem o hidróxido de cálcio, diminuindo seus teores na solução dos poros do concreto e, com isso, há aumento da profundidade de carbonatação, pois a difusão do CO_2 nos poros é mais rápida. Isso ocorre por conta da menor quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reagir, devido ao menor conteúdo de cimento que se origina da inclusão de pozzolanas nos traços que se realizam por substituição em igualdade de massa de cimento Portland. Outros estudos (PAPADAKIS, 2000; PAULETTI, 2004) também relatam que cimentos com adições pozzolânicas geralmente proporcionam maiores profundidades de carbonatação em relação a cimentos sem adições. Com isso, há uma coerência nos resultados apresentados onde a profundidade de carbonatação foi maior para

o cimento que possui mais adição de pozolana na sua fabricação (CP IV) em relação ao com menor quantidade de pozolana (CP II Z), como pode ser visualizado na figura 89b.

Quanto ao efeito da relação a/c, já há um conhecimento consolidado e, como era esperado, este se mostrou estatisticamente significativo, conforme apresenta a tabela 19. Com o aumento da relação a/c de 0,40 para 0,52 há um incremento na profundidade de carbonatação, em média, de 3,29 vezes, e, quando passamos de uma relação a/c de 0,52 para 0,68 esse aumento é, em média, de 2,08 vezes.

Segundo Neville (2014), o principal fator para controlar a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento endurecida, sendo função do sistema de poros da pasta enquanto ocorre a difusão do CO_2 , sendo assim, a relação água/cimento é relevante para o comportamento final. Há um consenso na literatura que quanto maior a relação a/c (ou relação água/aglomerante) do concreto maior a velocidade de carbonatação, devido ao aumento da porosidade que facilita a penetração de CO_2 , conforme constatado por muitos pesquisadores (PAULETTI, 2004; TASCA, 2012; RODRIGUES, 2017, entre outros). Essa correlação entre a relação a/c e a profundidade de carbonatação mostra-se aproximadamente linear, conforme já apresentado por outros autores e apresentado na figura 92, que registra, também, o comportamento para os concretos analisados nessa pesquisa, corroborando com essa citação.

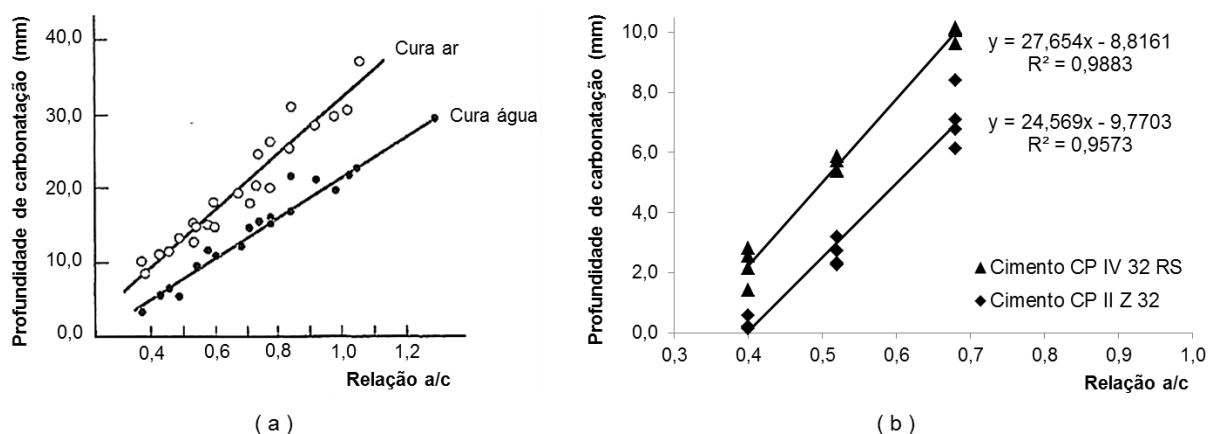


Figura 92: influência da relação a/c na profundidade de carbonatação: (a) estudo de Salta¹⁸ (1996) apud Rodrigues (2017) e (b) resultados da atual pesquisa

¹⁸ Salta, M., *Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas, Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*, Seminário Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1996.

Quando se observa o efeito do tempo de mistura, com a manutenção do abatimento ao longo do tempo através da incorporação de aditivo superplastificante, constata-se que esse efeito também exerce influência significativa sobre a profundidade de carbonatação, estatisticamente comprovado conforme ilustra a tabela 19. Porém, cabe salientar que o efeito causado pelo tempo de mistura foi benéfico, melhorando o comportamento do concreto em relação à sua resistência ao efeito da carbonatação. Após 2 horas de mistura, com a primeira incorporação do aditivo superplastificante para restabelecimento do abatimento à condição inicial, a profundidade de carbonatação reduziu em 7,9% em relação ao concreto recém-misturado; e ao longo do tempo continuou reduzindo, sendo essa redução de 3,8% de 2 para 4 horas de mistura e de 3,8% de 4 para 6 horas de mistura. Ao final das 6 horas de mistura do concreto registrou-se uma redução na profundidade de carbonatação de 14,8% em relação ao concreto recém-misturado (0 hora). Essa diminuição da profundidade de carbonatação pode estar relacionada a uma diminuição no tamanho dos cristais formados pela presença do aditivo superplastificante e da agitação contínua, conforme já identificado por outros estudos (POURCHET *et al.*, 2006; POLESELLO, 2012), onde há uma maior resistência à penetração de agentes externos devido a essa densificação da matriz.

Pina (2009) ressalta ainda a influência da quantidade de cimento utilizada na produção do concreto, sendo a velocidade de carbonatação inversamente proporcional ao consumo de cimento utilizado. A quantidade de cimento mensura a quantidade de Ca(OH)_2 disponível na solução para reagir com o CO_2 e produzir o carbonato de cálcio, sendo assim, maior concentração de Ca(OH)_2 atrasa a penetração de gás carbônico e a formação do carbonato de cálcio e o avanço da frente de carbonatação para o interior do concreto. Tal comportamento foi claramente observado, como pode ser visto pela figura 93.

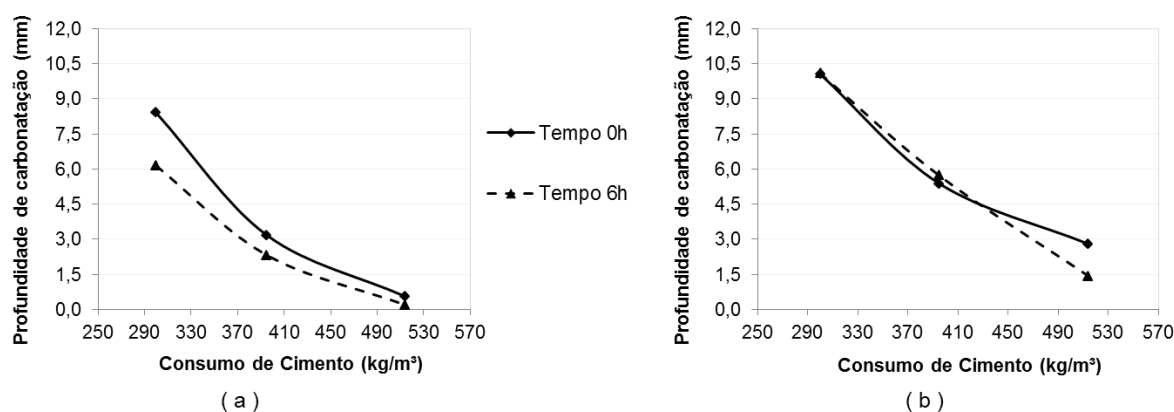


Figura 93: comportamento carbonatação do concreto em relação à dosagem de cimento utilizada nos traços produzidos com (a) cimento CP II Z 32 e (b) cimento CP IV 32 RS

Conforme citado, o sistema de poros da pasta influencia diretamente no comportamento do concreto em relação à carbonatação. Essa porosidade tem um impacto direto também sobre a absorção de água por capilaridade no concreto, conforme já apresentado por Polesello (2012) para essa mesma matriz de estudo. Desta forma, pela figura 94 pode-se observar coerência na correlação entre os resultados obtidos, onde o efeito físico da porosidade nas misturas mostra que os concretos que apresentam maior absorção por capilaridade também apresentam maiores profundidades de carbonatação, para ambos os cimentos utilizados.

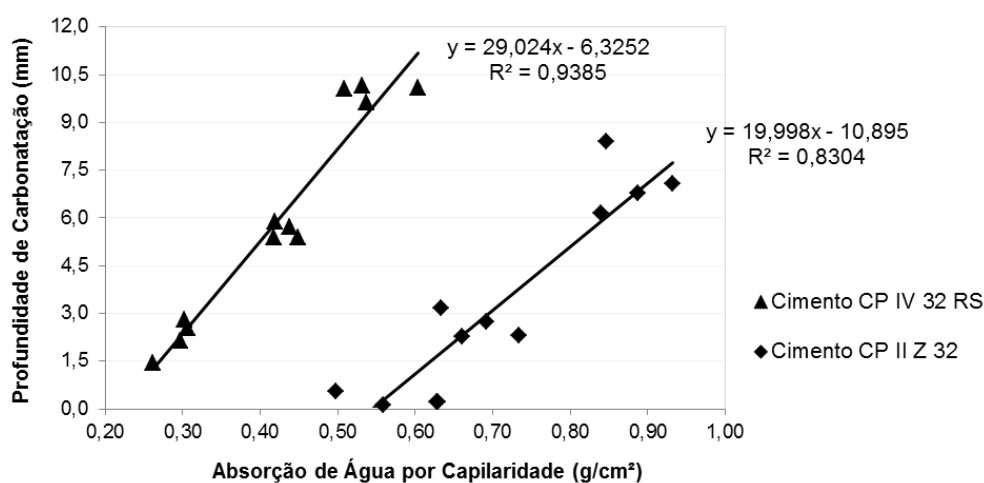


Figura 94: comportamento da carbonatação em relação à absorção de água por capilaridade do concreto

4.4.2 Penetração de Íons Cloreto

Assim como para a carbonatação, a verificação da penetração de íons cloretos no concreto exposto ao ambiente natural se caracteriza por um processo lento, mostrando-se interessante a análise após um período de anos de exposição.

Estruturas em contato com água do mar ficam extremamente sujeitas a ataque de sais, no entanto, Neville (2014) destaca que a deterioração ocorre também pelo transporte de sais pelo ar que se depositam sobre as estruturas de concreto, os quais serão dissolvidos pelo orvalho, seguindo-se a evaporação. Parte dos sais dissolvidos é deixada na forma de cristais, principalmente sulfatos, que se reidratam e aumentam de tamanho com a molhagem subsequente, exercendo uma força de expansão sobre a pasta de cimento endurecida circundante.

Para este estudo, foram produzidos blocos de concreto, com todos os pontos da matriz da pesquisa, que permaneceram expostos em uma região litorânea, próxima ao mar, por ser um ambiente agressivo em relação à presença de cloretos no ambiente. Essa análise foi realizada em dois períodos de exposição, após 2 e 6 anos de exposição, buscando melhor entendimento desse comportamento ao longo do tempo.

Como o objetivo é identificar a influência do tempo de mistura do concreto em relação à penetração de íons cloretos, as leituras foram feitas, além do concreto no tempo 0 hora (recém-misturado), também nos tempos de 2, 4 e 6 horas de mistura. Para uma melhor caracterização, realizaram-se três leituras para cada uma das amostras analisadas e, através da média desses três resultados foram gerados perfis de penetração de cloretos em função do teor de concentração de cloretos e da profundidade analisada em relação à superfície (face exposta ao ambiente) do concreto, considerando o tempo de mistura, a relação a/c e o tipo de cimento utilizado. Através das figuras 95 e 96 apresentam-se os perfis de cloretos obtidos para os concretos produzidos com cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS, respectivamente, para uma idade de exposição ao ambiente de 2 anos.

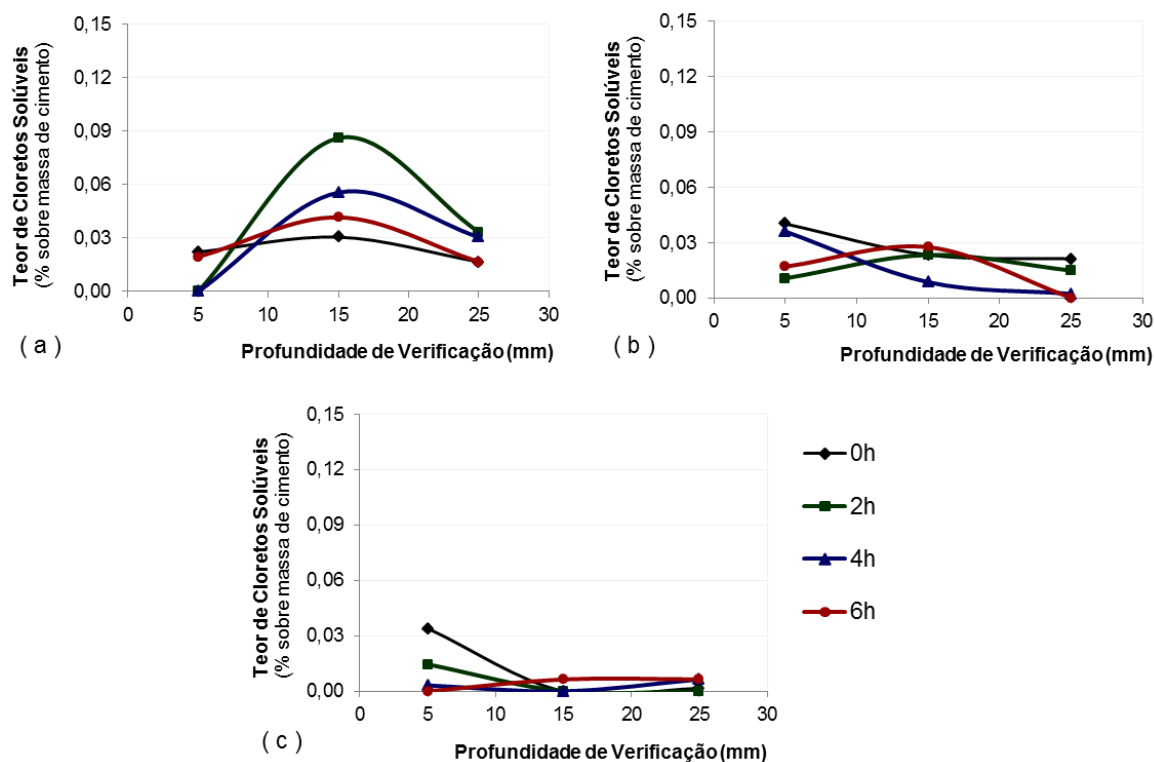


Figura 95: perfis de cloretos, aos 2 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP II Z 32 para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40

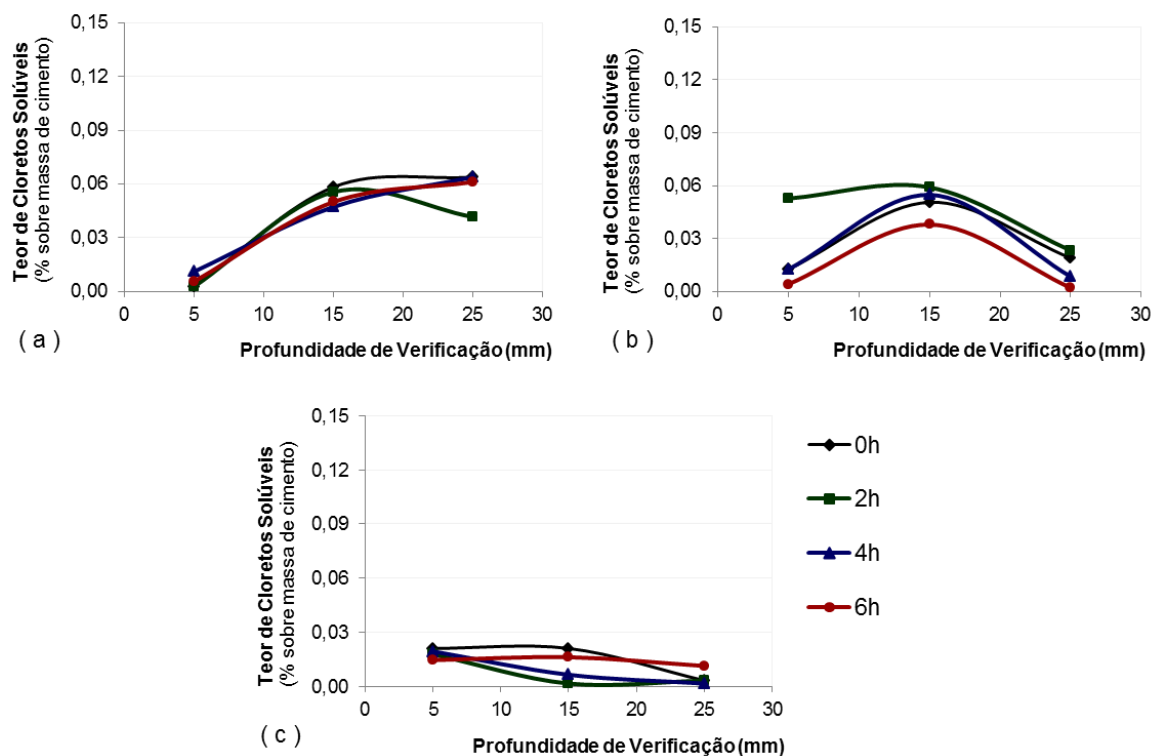


Figura 96: perfis de cloretos, aos 2 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP IV 32 RS para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40

Constata-se, em relação a esses resultados médios obtidos, a clássica tendência da incidência de menores concentrações de cloretos para os concretos com menores relações a/c, corroborando ao entendimento que menores relações a/c resultam em concretos mais densos, menos porosos. Segundo Hong e Hooton (2000), concretos com melhor qualidade, por apresentarem menores relações a/c produzindo, desta forma, uma estrutura de poros mais fina e mais descontínua, retardam a taxa de entrada para penetração de cloretos.

Gao *et al.* (2017) analisando concretos produzidos com relações a/c entre 0,40 e 0,60 e cimento Portland, também registraram menores concentrações de cloretos para as amostras com menores relações a/c, após a exposição por um período de 480 dias em ambiente natural. Quando avaliada a distância da estrutura em relação à posição do mar, para 10, 100, 200 e 500 m, Meira *et al.* (2008) também registraram um decréscimo típico na concentração de cloretos com a diminuição da relação a/c, para três diferentes relações a/c, em todos os pontos avaliados.

Para melhor analisar esse comportamento, avaliando os efeitos das variáveis estudadas na penetração de íons cloreto no concreto, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), conforme apresentada na tabela 20.

Tabela 20: Resultados da ANOVA para penetração de cloretos no concreto com exposição ao ambiente natural por 2 anos

| FONTE | SQ | GDL | MQ | TESTE F | PROB. | SIGNIFICÂNCIA |
|--|--------------------------|------------|---------------------|---------|--------------------------------|---------------|
| A: Relação água/cimento | 0,0231 | 2 | 0,0116 | 32,53 | 0,00% | S |
| B: Tipo de Cimento | 0,0035 | 1 | 0,0035 | 9,85 | 0,21% | S |
| C: Tempo de Mistura | 0,0013 | 3 | 0,0004 | 1,26 | 29,16% | NS |
| D: Profundidade | 0,0105 | 2 | 0,0052 | 14,75 | 0,00% | S |
| AB | 0,0002 | 2 | 0,0001 | 0,27 | 76,61% | NS |
| AC | 0,0024 | 6 | 0,0004 | 1,11 | 35,89% | NS |
| AD | 0,0245 | 4 | 0,0061 | 17,23 | 0,00% | S |
| BC | 0,0001 | 3 | 0,0000 | 0,06 | 98,27% | NS |
| BD | 0,0025 | 2 | 0,0013 | 3,55 | 3,11% | S |
| CD | 0,0010 | 6 | 0,0002 | 0,49 | 81,56% | NS |
| ABC | 0,0042 | 6 | 0,0007 | 1,97 | 7,33% | NS |
| ABD | 0,0070 | 4 | 0,0018 | 4,93 | 0,09% | S |
| ACD | 0,0054 | 12 | 0,0004 | 1,25 | 25,21% | NS |
| BCD | 0,0046 | 6 | 0,0008 | 2,14 | 5,24% | NS |
| ABCD | 0,0040 | 12 | 0,0003 | 0,94 | 50,88% | NS |
| Erro | 0,0512 | 144 | 0,0004 | 1,00 | 0,5 | NS |
| TOTAL | 0,1455 | 215 | | | | |
| SQ - Soma Quadrada | GDL - Graus de Liberdade | | MQ - Média Quadrada | | TESTE F - Valor calculado de F | |
| PROB. - Nível de Significância associado ao valor calculado de F | | | S - Significativo | | NS - Não Significativo | |

Pelos resultados da ANOVA observa-se que, para a idade de exposição ao ambiente natural aos 2 anos, há influência significativa na penetração de cloretos quando é alterada a relação a/c, o tipo de cimento ou a profundidade avaliada em relação à superfície do concreto, assim como para algumas das interações dessas variáveis principais. Porém, conforme se observa na tabela 20, o tempo de mistura do concreto, definido como tempos de redosagem, de acordo com procedimento adotado nesta pesquisa, para possibilitar a utilização do concreto por até seis horas, não se apresenta como estatisticamente significativo no resultado de penetração de cloretos. A figura 97 ilustra o comportamento isolado de cada uma dessas variáveis principais da pesquisa, assim como para as interações entre essas variáveis, que se mostraram estatisticamente significativas.

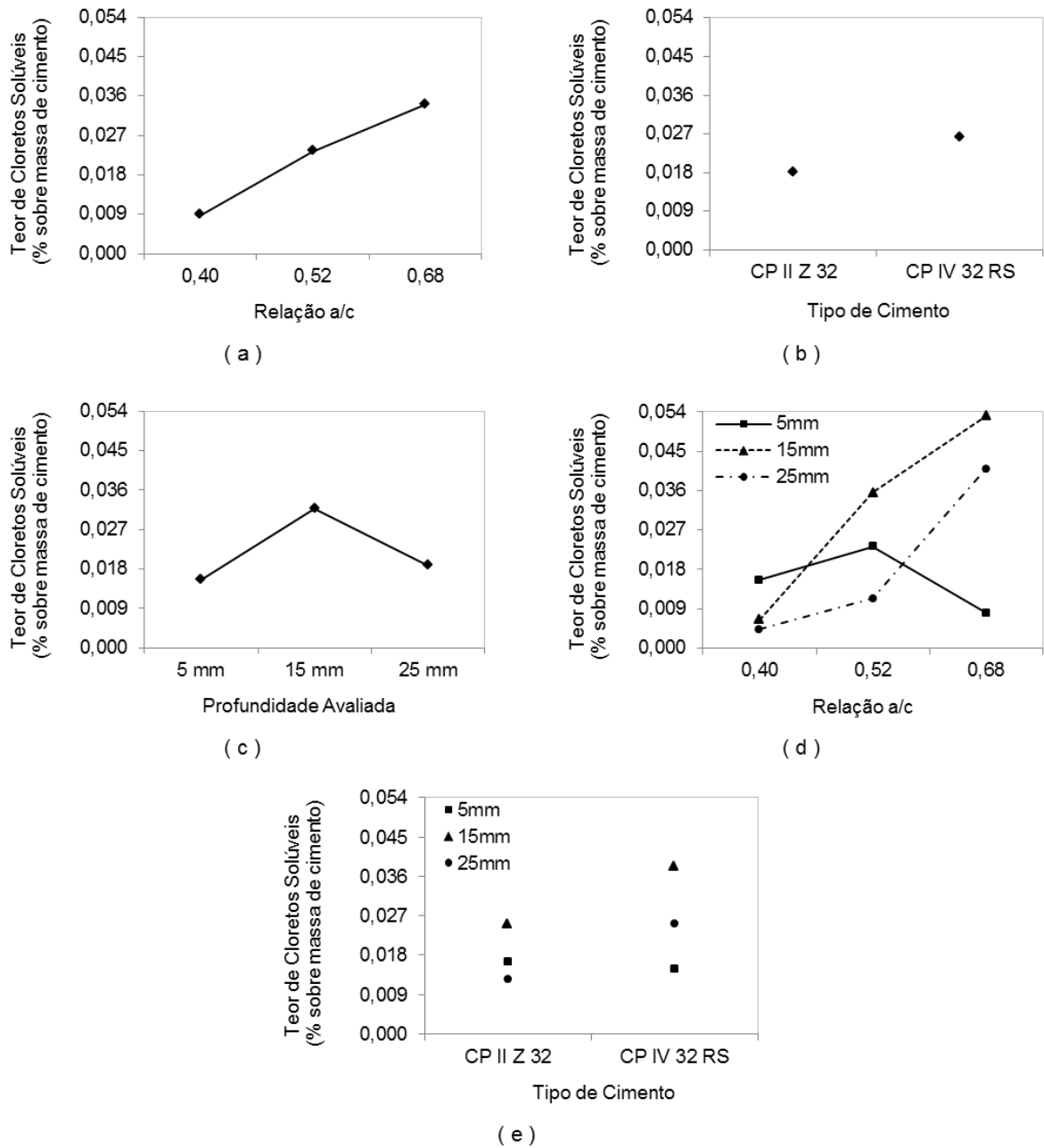


Figura 97: comportamento do concreto quanto à penetração de cloretos avaliado para um período de exposição ao ambiente natural de 2 anos em função (a) da relação a/c, (b) do tipo de cimento, (c) da profundidade de verificação, (d) interação da relação a/c com a profundidade de verificação e (e) interação entre o tipo de cimento com a profundidade de verificação

Relações a/c menores apresentam menores teores de cloretos, conforme comportamento apresentado na figura 97a e já explicado anteriormente. Em relação ao tipo de cimento utilizado, o cimento com maior percentual, em sua composição, de pozolana apresentou maiores teores de concentração de cloretos. Esse comportamento em relação ao tipo de cimento explica-se pelo fato de ter sido utilizado um cimento resistente a sulfatos. Page *et*

al. (1986), analisando a influência do tipo de cimento em relação à penetração de íons cloreto, observaram que adições minerais incorporadas ao cimento, verificando para a escória e cinza volante, apresentam menor difusividade de cloretos, melhorando o comportamento do cimento quando comparado a um cimento puro; no entanto, ao analisar um cimento resistente a sulfatos (que apresenta baixo teor, 1,9%, de C_3A) resultou em significativo aumento dessa difusão. Cimentos com baixos teores de aluminato tricálcico possuem pouca capacidade de imobilizar os íons cloreto, por meio da formação de um sal complexo insolúvel, o cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel), que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto (PAUL *et al.*, 2015). Avaliando vários teores de C_3A , Rasheeduzzafar *et al.* (1990) mostram que um desempenho muito superior é obtido para os cimentos que apresentam maiores teores desse composto. Na atual pesquisa utilizaram-se cimentos com adição de pozzolana em sua fabricação, porém, um dos cimentos é caracterizado como resistente a sulfatos (CP IV 32 RS). Os resultados encontrados são coerentes com o comportamento apresentado pela literatura.

É possível observar que, para ambos os tipos de cimento utilizados, há um aumento na concentração de cloretos, quando comparada as profundidades analisadas de 5 mm e 15mm, principalmente para relação a/c de 0,68, conforme pode-se visualizar nas figuras 95a e 96a, e representado no comportamento geral ilustrado na figura 97c. Esse comportamento, principalmente para relações a/c maiores onde há uma maior porosidade do concreto, pode ser associado à movimentação da água e dos sais durante o período de secagem da estrutura. Dependendo do período de secagem, é possível que a maior parte da água da região externa do concreto evapore, de modo que a água remanescente fique saturada com sais, precipitando o excesso de sais na forma de cristais. Sendo assim, através de um novo ciclo de molhagem com água salgada mais sais serão trazidos para solução presente nos poros capilares. Com isso, o gradiente de concentração de sais é diminuído do interior para o exterior a partir de um pico de concentração a uma determinada profundidade da superfície do concreto (NEVILLE. 2014). Corroborando com isso, Costa e Appleton (1999) salientam que a importância relativa desses mecanismos de penetração é determinada pelas condições de exposição, pelo teor de umidade relativa e pela estrutura dos poros do concreto. Em função disso, pelo impacto direto da estrutura dos poros no mecanismo de penetração dos íons de cloretos, para relações a/c maiores, que apresentam mais poros na sua matriz, há uma tendência maior do movimento de cloretos para o interior do concreto.

O depósito de cloretos sobre a estrutura ocorre continuamente ao longo do tempo. Como o concreto da face exposta fica submetido a ciclos de secagem e molhagem, em função das condições ambientais, isso permite que ocorra a entrada desses cloretos através dos poros, estando estes totalmente ou parcialmente preenchidos com água. Este mecanismo leva a um acúmulo de cloretos na zona de superfície e também pode dar origem a picos de concentração na parte mais interna do concreto que tende a progredir para o interior ao longo do tempo (COSTA e APPLETON, 1999). Enquanto os poros estiverem saturados, a difusão de cloreto para o interior do concreto continuará a atuar, transportando mais cloretos em direção a regiões onde a concentração é inferior. (HONG e HOOTON, 2000).

Analisando a interação entre a relação a/c e a profundidade de verificação no comportamento do concreto em relação ao teor de cloretos (figura 97d), observa-se que com o aumento da relação a/c há um aumento no teor de íons cloreto para as profundidades de verificação de 15mm e 25mm. No entanto, quando a relação a/c aumenta de 0,52 para 0,68 para a profundidade de 5mm há uma redução do teor de íons cloreto, fato atribuído e conforme citado anteriormente, à movimentação de água e dos sais, pela maior porosidade, durante o período de secagem da estrutura (efeito de pele do concreto). Observando a figura 97e, que apresenta a interação entre o tipo de cimento e a profundidade de verificação em relação ao teor de penetração de íons cloreto, verifica-se que para profundidades de 15mm e 25mm há uma aumento do teor de íons cloreto quando utilizado o cimento tipo CPIV 32 RS em relação ao cimento CPII Z 32, enquanto que para a profundidade de 5mm há uma leve redução, comportamento também atribuído ao efeito de pele que ocorre no concreto.

Importante salientar que, estatisticamente comprovado (tabela 20), o tempo de mistura não representa influência significativa no comportamento do teor de penetração de íons cloreto ao longo do tempo de mistura, evidenciando que o procedimento adotado por esta pesquisa não interfere na qualidade do concreto avaliando mais esta propriedade.

O ensaio para leitura de penetração de cloretos no concreto foi, novamente, realizado após o concreto atingir 6 anos de exposição ao ambiente natural. Nas figuras 98 e 99 podem ser observados os perfis de cloretos obtidos para os concretos produzidos com cimento CP II Z 32 e CP IV 32 RS, respectivamente.

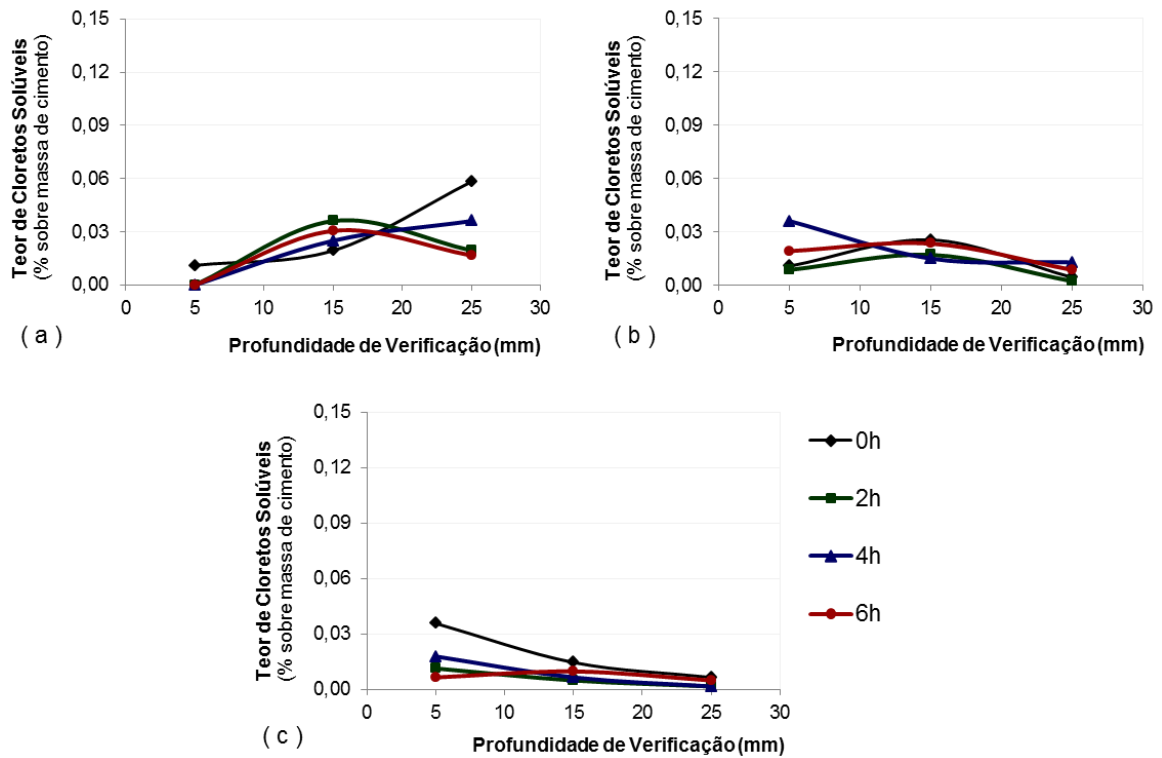


Figura 98: perfis de cloretos, aos 6 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP II Z 32 para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40

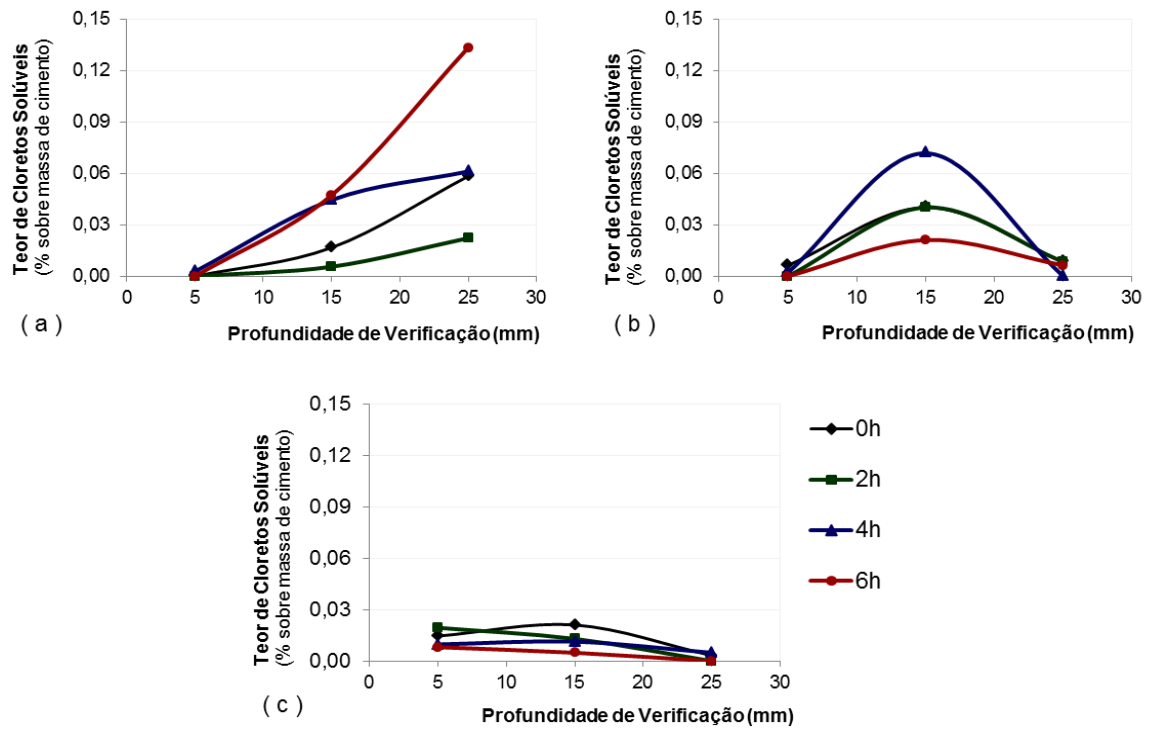


Figura 99: perfis de cloretos, aos 6 anos de exposição, para concretos produzidos com cimento CP IV 32 RS para relações a/c igual a: a) 0,68; b) 0,52 e c) 0,40

Para melhor analisar o comportamento dos efeitos das variáveis estudadas na penetração de cloretos realizou-se, novamente, a análise de variância (ANOVA), conforme apresentada na tabela 21.

Tabela 21: Resultados da ANOVA para penetração de cloretos no concreto com exposição ao ambiente natural por 6 anos

| FONTE | SQ | GDL | MQ | TESTE F | PROB. | SIGNIFICÂNCIA |
|--|--------------------------|------------|---------------------|--------------------------------|--------|---------------|
| A: Relação água/cimento | 0,0106 | 2 | 0,0053 | 11,22 | 0,00% | S |
| B: Tipo de Cimento | 0,0010 | 1 | 0,0010 | 2,05 | 15,47% | NS |
| C: Tempo de Mistura | 0,0023 | 3 | 0,0008 | 1,66 | 17,91% | NS |
| D: Profundidade | 0,0084 | 2 | 0,0042 | 8,86 | 0,02% | S |
| AB | 0,0016 | 2 | 0,0008 | 1,68 | 18,95% | NS |
| AC | 0,0049 | 6 | 0,0008 | 1,71 | 12,18% | NS |
| AD | 0,0317 | 4 | 0,0079 | 16,80 | 0,00% | S |
| BC | 0,0012 | 3 | 0,0004 | 0,86 | 46,26% | NS |
| BD | 0,0039 | 2 | 0,0019 | 4,13 | 1,81% | S |
| CD | 0,0031 | 6 | 0,0005 | 1,08 | 37,44% | NS |
| ABC | 0,0079 | 6 | 0,0013 | 2,81 | 1,30% | S |
| ABD | 0,0070 | 4 | 0,0017 | 3,70 | 0,68% | S |
| ACD | 0,0050 | 12 | 0,0004 | 0,89 | 56,20% | NS |
| BCD | 0,0045 | 6 | 0,0008 | 1,59 | 15,37% | NS |
| ABCD | 0,0076 | 12 | 0,0006 | 1,35 | 19,95% | NS |
| Erro | 0,0679 | 144 | 0,0005 | 1,00 | 0,5 | NS |
| TOTAL | 0,1686 | 215 | | | | |
| SQ - Soma Quadrada | GDL - Graus de Liberdade | | MQ - Média Quadrada | TESTE F - Valor calculado de F | | |
| PROB. - Nível de Significância associado ao valor calculado de F | | | S - Significativo | NS - Não Significativo | | |

Para o tempo de exposição de 6 anos, os resultados da ANOVA mostram que não há influência estatisticamente significativa quando há mudança no tipo de cimento ou no tempo de mistura do concreto. Porém, essa influência é significativa quando é alterada a relação a/c e a profundidade de verificação avaliada em relação à superfície do concreto. A figura 100 mostra esse comportamento das variáveis principais, assim como das interações entre essas variáveis, que se mostraram estatisticamente significativas.

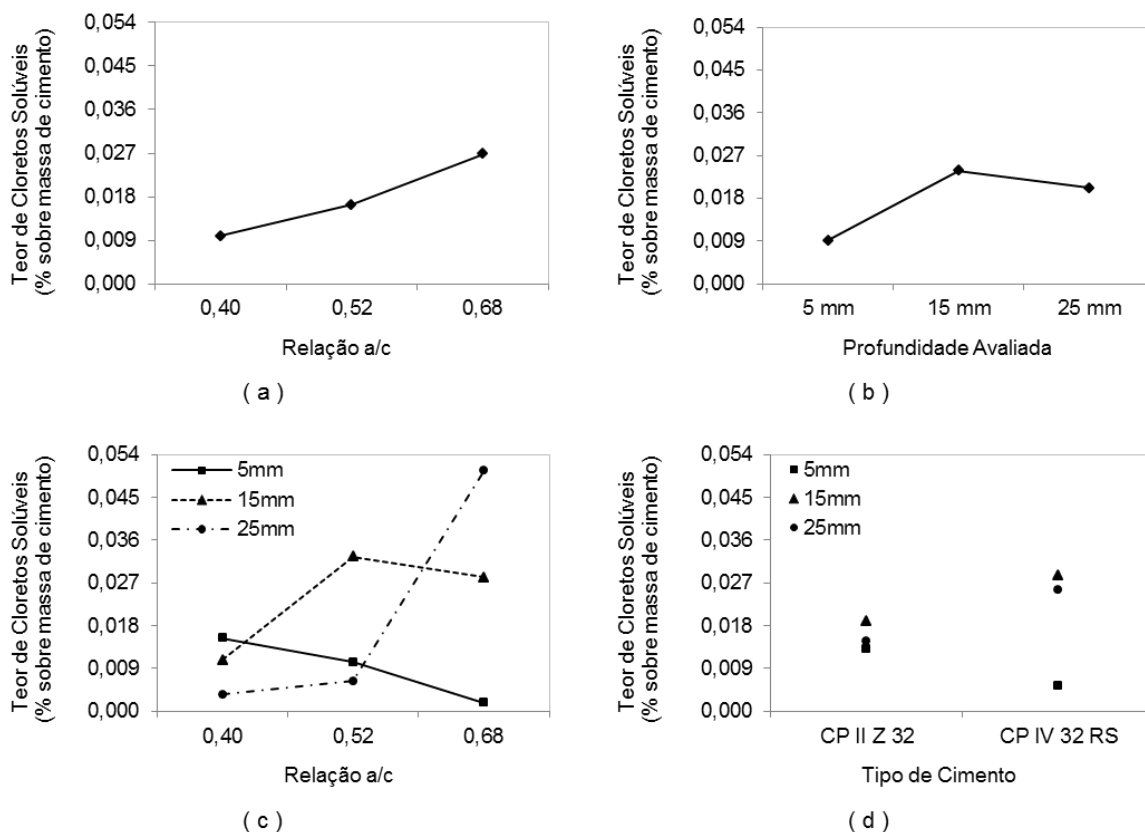


Figura 100: comportamento do concreto quanto à penetração de cloretos avaliado para um período de exposição ao ambiente natural de 6 anos em função (a) da relação a/c, (b) da profundidade de verificação, (c) interação da relação a/c com a profundidade de verificação e (d) interação entre o tipo de cimento com a profundidade de verificação

Pelos resultados obtidos no período de exposição de 6 anos, observa-se o aumento significativo da penetração de íons cloreto com o aumento da relação a/c, mesmo comportamento registrado, e já discutido, para período de exposição de 2 anos.

Em relação à profundidade analisada, novamente observa-se o efeito de pele do concreto, onde há um pico de concentração de cloretos em uma camada um pouco abaixo da camada superficial, principalmente observado em relações a/c maiores, onde o concreto apresenta maior porosidade, maior tendência de migração do cloreto em decorrência dos ciclos de secagem e molhagem que a superfície do concreto é solicitada pelo ambiente onde está exposto. Em concordância com esse comportamento, Xi *et al.* (1994) ressaltam que no concreto tanto a umidade como a difusividade dependem da estrutura dos poros, que está relacionada com os parâmetros básicos do material, tais como a relação a/c, tempo de cura, temperatura e tipo de cimento. Mostram que concretos com elevada relação a/c são afetados pelos ciclos de molhagem e secagem em camadas mais profundas, devido à facilidade de transferência de umidade em poros maiores.

Assim como registrado para 2 anos de exposição, as interações entre a relação a/c e o tipo de cimento com a profundidade de verificação em relação à superfície do concreto (figuras 100c e 100d), também mostram em seus resultados o efeito de pele sobre a penetração de íons cloreto, quando analisada a profundidade de 5mm. Ao contrário das profundidades de 15mm e 25mm, há uma redução do teor de cloretos com o aumento da relação a/c, assim como, quando avaliado os resultados para o cimento CPIV 32 RS em comparação com o cimento CPII 32 RS. Observa-se que, para a profundidade de 5mm, a redução do teor de cloretos para o cimento CPIV 32 RS foi muito mais expressiva na idade de 6 anos se comparada aos resultados obtidos em 2 anos, resultado que colabora para o resultado da análise estatística, mostrando que não há diferença significativa em relação a penetração de íons cloreto quando há mudança no tipo de cimento.

A influência da porosidade do concreto sobre suas propriedades foi, também, observada nos resultados obtidos em relação à penetração de íons cloreto, conforme pode ser visualizado na figura 101. Porém, os coeficientes de correlação entre as variáveis não são tão elevados, pois, além do efeito físico, a penetração de íons cloreto também vincula seu comportamento ao efeito químico gerado na mistura, conforme já comentado anteriormente.

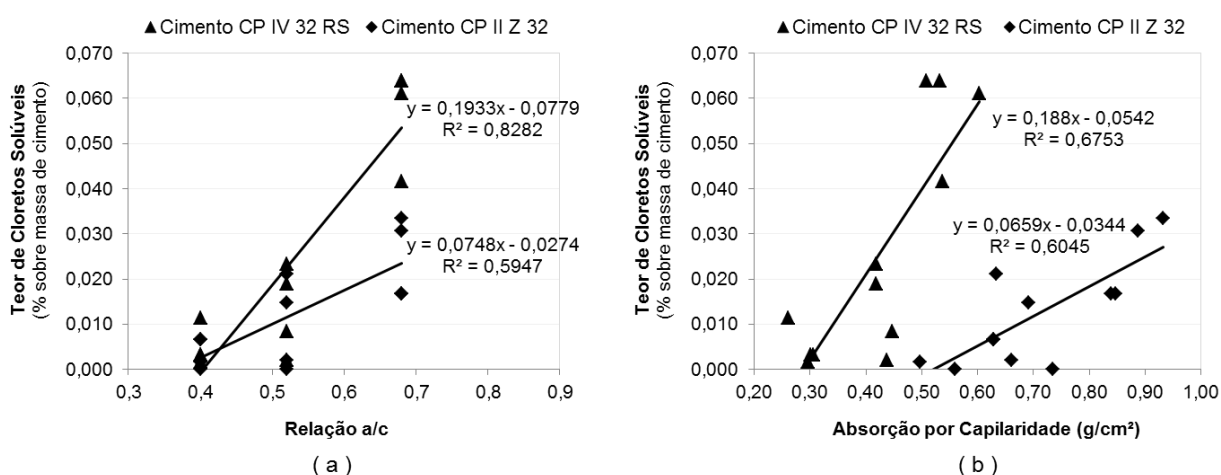


Figura 101: influência quanto ao % cloretos solúveis no concreto, aos 2 anos de exposição, em comparação com (a) relação a/c e (b) absorção de água por capilaridade

Gao *et al.* (2017) relatam que quando o concreto é exposto em ambientes onde fica submetido a ciclos de secagem e molhagem, como se caracteriza um ambiente marítimo, o transporte de íons cloretos no concreto não ocorre apenas por difusão, mas envolve também a convecção. Essa região que envolve a difusão e a convecção de íons de cloreto é

frequentemente chamada de zona de convecção e, normalmente, é uma camada muito fina da superfície de exposição ao local, sujeito à ação cíclica de secagem e molhagem, onde se apresenta um pico na concentração de cloretos (YE *et al.*, 2016), conforme demonstram na figura 102.

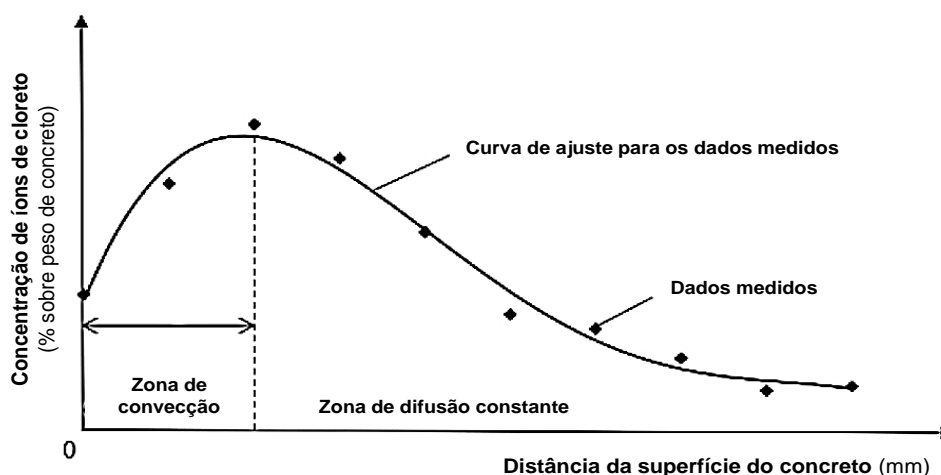


Figura 102: distribuição típica de cloretos livres (HONG e HOOTON, 2000).

Chang *et al.* (2018) também associam esse pico de concentração à liberação, sob condições de molhagem e secagem, do cloreto encapsulado (sal de Freidel). No processo de molhagem os cloretos liberados são transportados a certa profundidade por sucção capilar formando, com a repetição dos ciclos, um acúmulo contínuo de íons cloreto e, eventualmente, tornam-se superiores aos dois lados caracterizando esse piso, independente do processo de difusão.

O efeito do transporte de cloretos formando picos de concentração em camadas mais internas do concreto ficou claramente observado no comportamento geral dos resultados obtidos, conforme pode ser observado nas figuras 97c e 100c. Tal comportamento é atribuído, principalmente, aos perfis referentes às maiores relações a/c por apresentarem maior porosidade que, diretamente, facilita a penetração de cloretos presentes no ambiente. Comportamento esse também apresentado no estudo de Meira *et al.* (2008). Hong e Hooton (2000) relatam que em alguns casos os cloretos da superfície podem ser lavados quando o concreto fica exposto diretamente à chuva, registrando que a profundidade dessa área de lavagem ou convecção é de aproximadamente 7mm para concretos com cimento Portland. Gao *et al.* (2017), analisando concretos com e sem adição de cinzas volantes, registraram uma profundidade dessa zona de convecção de 4mm a 6mm.

Para Ye *et al.* (2016), o principal motivo que caracteriza essa zona de convecção é que a profundidade de influência da umidade é limitada na superfície de exposição, tipicamente variando entre 5mm e 15mm. Para medidas acima dessa profundidade da zona convectiva, a umidade é menos sensível às alterações das condições ambientais externas e, portanto, o processo de difusão governa a penetração de íons cloreto no concreto, conforme ilustrado na figura 102. Os autores destacam, ainda, que a carbonatação do concreto representa uma influência significativa sobre os perfis de cloreto livre, sugerindo que o efeito da carbonatação influencia o aparecimento da zona de convecção.

Um concreto carbonatado não terá a mesma capacidade de combinar cloretos quando comparado a um concreto não-carbonatado. A influência da carbonatação no transporte de cloretos se manifesta tanto fisicamente, devido à redução da porosidade total e redistribuição dos poros, quanto quimicamente, com base na liberação de íons aprisionados pelo composto cloroaluminato (especialmente pelo sal de Freidel) na solução do poro devido à condição de secagem e molhagem, porém, essas influências demandam maior investigação. É provável que o efeito combinado da carbonatação e da sucção capilar, com evaporação da umidade, leve à formação do pico de concentração de cloretos (CHANG *et al.*, 2018). No resultado dos ensaios da atual pesquisa, a máxima profundidade de carbonatação registrada foi inferior a 15mm, desta forma, das amostras ensaiadas à penetração de cloretos somente amostras coletadas na profundidade de 5mm caracterizam-se como carbonatadas. A figura 103 compara os resultados médios obtidos para cada relação a/c (considerando os quatro tempos medidos), aos 2 anos de exposição, da profundidade de carbonatação em relação à penetração de íons cloreto.

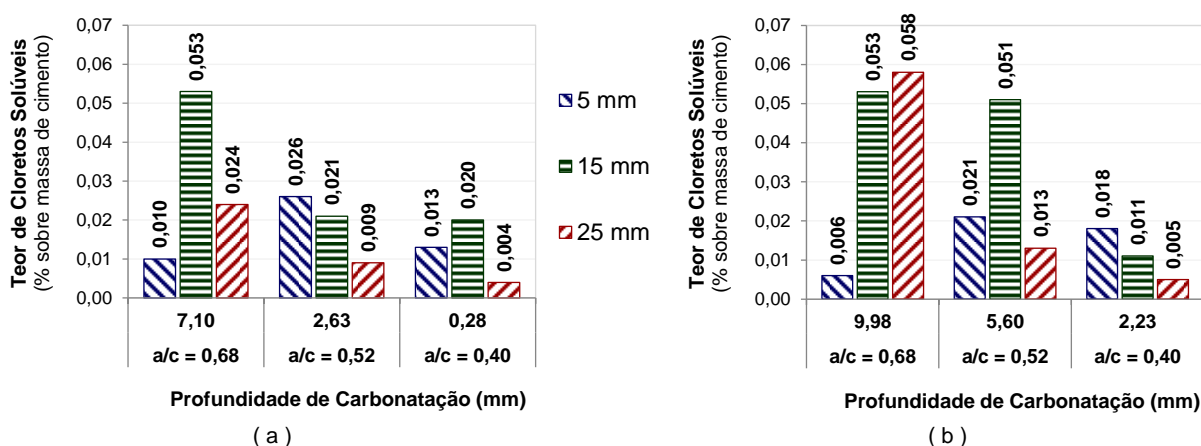


Figura 103: comportamento do concreto quanto ao % cloretos solúveis em comparação com a carbonatação para concreto com cimento (a) CP II Z 32 e (b) CP IV 32 RS

Ao analisar a figura 103, observa-se que as amostras totalmente carbonatadas são as relacionadas à profundidade de 5mm referentes à relação a/c de 0,68 para ambos os tipos de cimentos e à relação 0,52 para o cimento CP IV 32 RS. Como comportamento geral é possível visualizar que para as amostras não carbonatadas, tanto para as profundidades de 15mm como 25mm, há uma redução da penetração de íons cloreto a medida em que há a diminuição da relação a/c, enquanto que, para as amostras referentes a 5mm a penetração de íons cloreto aumenta, por exemplo, quando a relação a/c passa de 0,68 para 0,40 para ambos os cimentos analisados. E, quando comparadas essas mesmas relações a/c (0,68 e 0,40), porém com diferentes cimentos e mesmas condições de carbonatação das amostras (ambas carbonatadas ou ambas não carbonatadas), foi registrado um aumento da penetração de íons cloreto para as amostras não carbonatadas (relação a/c de 0,40) e uma redução para as amostras carbonatadas (relação a/c de 0,68). A presente análise objetiva avaliar a influência da carbonatação sobre o comportamento de penetração de íons cloreto, porém, conforme apresentado pela literatura e pelo exposto acima, percebe-se que a carbonatação pode influenciar no comportamento da mistura em relação a cloretos, no entanto, necessitam-se de estudos mais detalhados com este foco para avaliar melhor essa correlação entre as propriedades.

Por fim, cabe salientar que a manutenção do concreto em mistura com redosagem ao longo do tempo, pela incorporação de aditivo superplastificante à base de policarboxilato, foco desta pesquisa, tanto para verificação aos 2 anos de exposição ao ambiente natural, quanto após um período de 6 anos de exposição, mostra-se satisfatória, não apresentando, estatisticamente, diferença significativa em relação à penetração de cloretos no concreto ao longo do tempo estudado.

4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise do comportamento da microestrutura exerce um papel importante pela possibilidade de relacionar seus resultados, de alguma forma, com as propriedades físicas e mecânicas do concreto. Para contribuir com o entendimento do comportamento da mistura prolongada pela redosagem com aditivo superplastificante ao longo do tempo, amostras de uma pasta produzida com relação a/c igual a 0,40 e cimento CP II Z 32, preparadas segundo procedimento detalhado na metodologia, foram submetidas às análises microestruturais apresentadas a seguir.

4.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras foram submetidas a uma análise microestrutural qualitativa por microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários. As imagens obtidas estão apresentadas na figura 104.

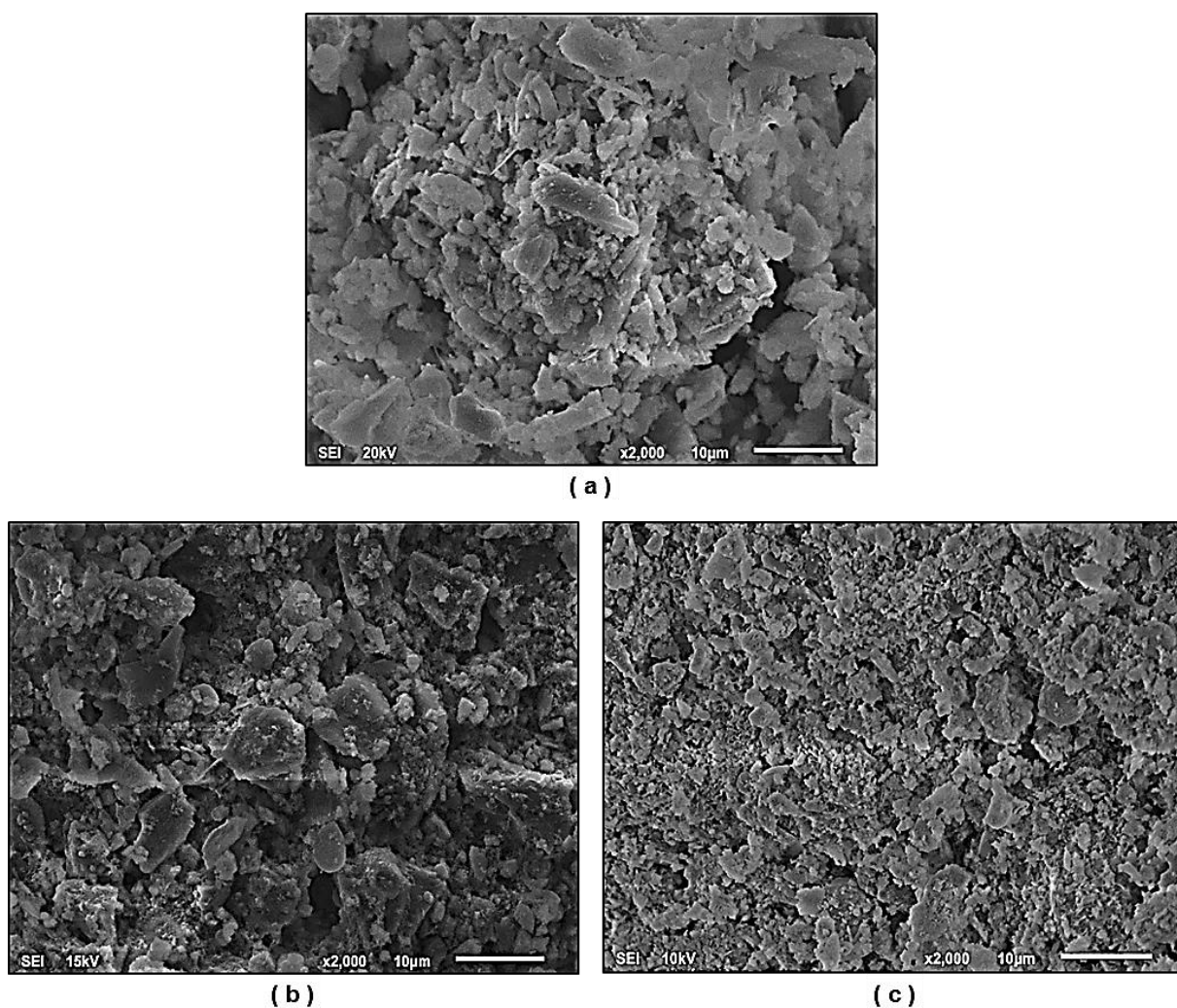


Figura 104: MEV por elétrons secundários para pasta com cimento CP II Z 32 e relação a/c de 0,40 nos tempos de mistura de a) 0 hora, b) 4 horas e c) 6 horas. Magnificação: 2000 X

Pelas imagens é possível verificar que há uma densificação na matriz ao longo do tempo de mistura. Tal comportamento é atribuído à presença do superplastificante à base de policarboxilato e ao próprio processo de mistura prolongado na quebra de cristais mais fracos formados pelo processo de hidratação do cimento nas primeiras idades. Tal comportamento já foi observado em amostras de concreto, avaliadas aos três dias de idade,

conforme apresentado na primeira etapa desta pesquisa (POLESELLO, 2012) e referenciado na revisão da literatura apresentada nesta tese.

Pourchet *et al.* (2006) também registram que a presença do policarboxilato retarda a precipitação da etringita e, considerando que o aditivo pode diminuir a taxa de dissolução do C_3A , ele atua principalmente no crescimento da etringita, dando origem a menores tamanhos dos cristais de etringita formados.

Através de uma magnificação maior, imagens obtidas, comparando os tempos de 4 e 6 horas de mistura, corroboram com a constatação feita na mudança microestrutural observada ao longo do tempo de mistura (figura 105).

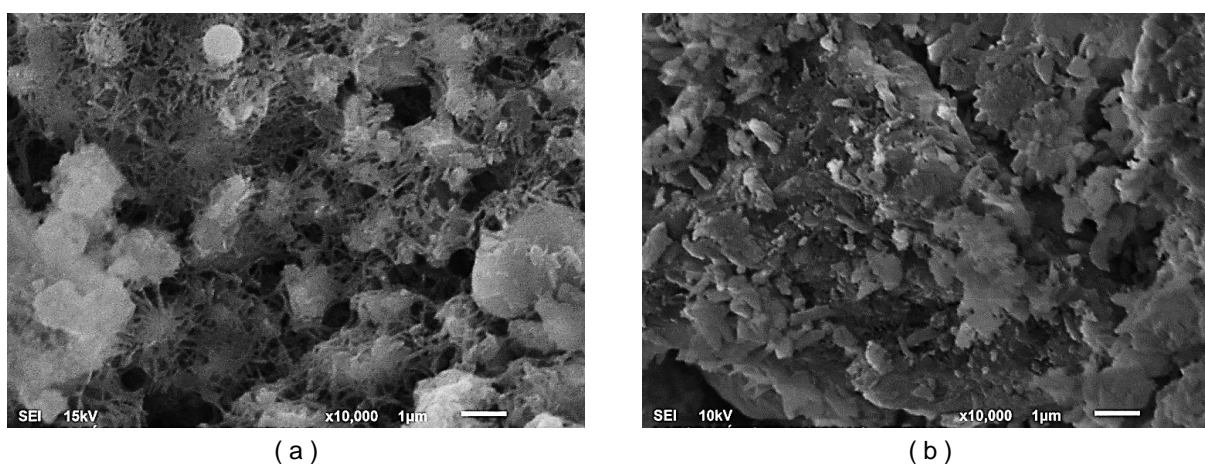


Figura 105: MEV por elétrons secundários para pasta com cimento CP II Z 32 e relação a/c de 0,40 nos tempos de mistura de a) 4 horas e b) 6 horas. Magnificação: 10000 X

Essa densificação da matriz da mistura, com redução da porosidade, foi citada no estudo de Mangane *et al.* (2018) onde, também, claramente observou-se pelas imagens apresentadas no estudo das amostras analisadas por microscópio eletrônico de varredura.

A fim de investigar essa influência do aditivo superplastificante na estrutura dos poros da argamassa do concreto, Huang *et al.* (2016) verificaram, por porosimetria por intrusão de mercúrio, que as argamassas (produzidas de acordo com as misturas dos concretos utilizados no estudo) com aditivo superplastificante à base policarboxilato apresentaram porosidade inferior às produzidas com superplastificante à base polinaftaleno, registrando uma maior fração de poros entre 10nm e 100nm e menor fração de poros acima de 100nm, quando utilizado aditivo superplastificante à base policarboxilato em relação ao

polinaftaleno. Adicionalmente os tamanhos de poros críticos das estruturas de poros nas argamassas com policarboxilato foram menores em relação ao polinaftaleno, sendo que quanto maior o tamanho de poro crítico mais permeável é o concreto. Como resultado de uma menor porosidade, concreto mais denso, os resultados encontrados por Huang *et al.* (2016) em relação à carbonatação, penetração de água e de cloretos comprovam um melhor desempenho do concreto em relação à sua durabilidade.

Pelas imagens apresentadas na figura 104 é possível observar que ao longo do tempo de mistura, com a incorporação do aditivo superplastificante à base de policarboxilato, ocorre uma densificação da matriz. Atribuído a essa mudança microestrutural, a durabilidade do concreto, avaliada em função da absorção de água por capilaridade, profundidade de carbonatação e penetração de íons cloreto, não foi afetada pelo procedimento adotado. Isso pode ser observado pelo comportamento obtido em relação a essas propriedades e apresentado na figura 106, para absorção de água por capilaridade e carbonatação. Quando analisadas estatisticamente, a absorção de água por capilaridade mostra que não há mudança significativa ao longo do tempo de mistura, enquanto que, para a carbonatação a análise apresenta diferença significativa com o tempo de mistura, porém essa diferença ocorre em função da redução da profundidade de carbonatação, melhorando o comportamento final do concreto.

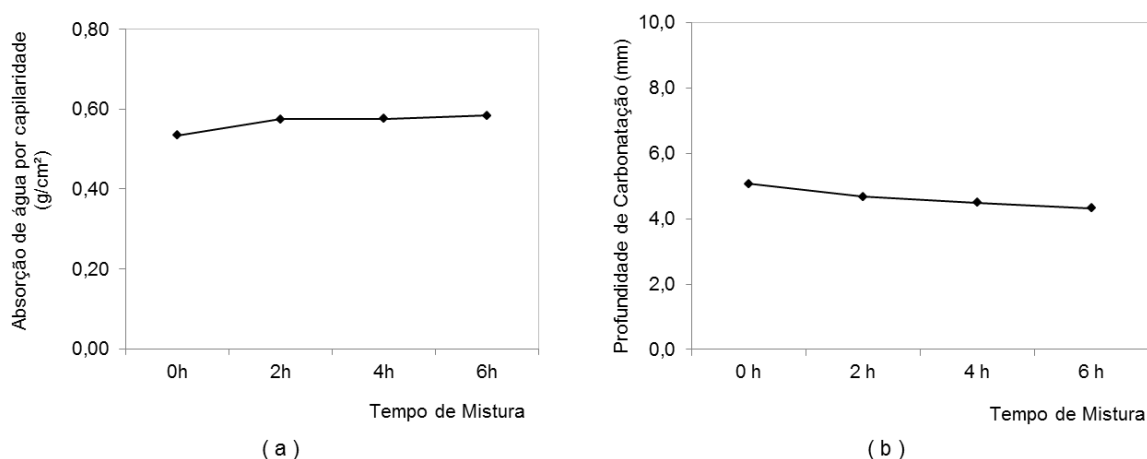


Figura 106: comportamento do concreto produzido na central dosadora em relação à sua durabilidade avaliada em função: a) da absorção de água por capilaridade (POLESELLO, 2012) e b) da profundidade de carbonatação aos 2 anos de exposição

Corroborando com esses resultados, a figura 107 apresenta o comportamento quanto à penetração de íons cloreto para as duas idades de exposição verificadas. Novamente, a

análise estatística dos resultados comprova que não há diferença significativa da propriedade em relação ao tempo de mistura do concreto.

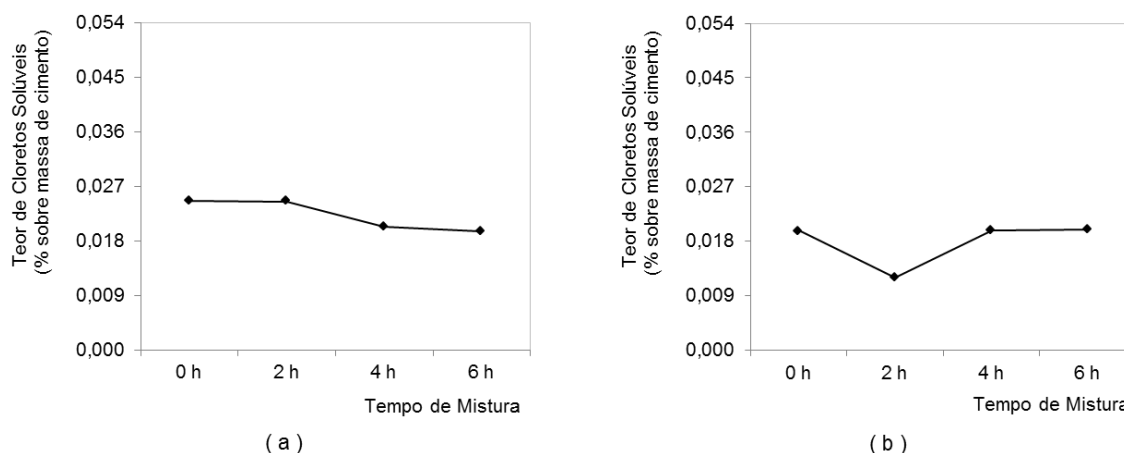


Figura 107: comportamento do concreto produzido na central dosadora em relação à sua durabilidade avaliada em função: a) da penetração de íons cloreto aos 2 anos de exposição e b) da penetração de íons cloreto aos 6 anos de exposição

4.5.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

Alterações de origem térmica que minerais e hidratos podem sofrer (desidroxilação, descarbonatação, oxidação, decomposição, transição de fase ou derretimento) são geralmente associadas a mudanças de massa com liberação de calor, sendo que esses processos ocorrem em temperaturas típicas para cada mineral ou hidrato. Através da análise termogravimétrica (TGA) a amostra é aquecida e a perda de massa é registrada. A diferenciação dos dados termogravimétricos (TG) permite uma melhor identificação de perdas de massa consecutivas: termogravimetria derivada ou termogravimetria diferencial (DTG). Nos sistemas a base de cimento, a perda de massa, até aproximadamente 600°C, geralmente está relacionada à perda de água e, acima de 600°C, principalmente à liberação de CO₂ (LOTHENBACH *et al.*, 2016).

A termogravimetria também foi utilizada para avaliar a redosagem, ao longo do tempo de mistura até 6 horas, conforme proposto pela atual pesquisa, com aditivo superplastificante para uma pasta de cimento produzida com CP II Z 32 e relação a/c igual a 0,40. Os perfis obtidos para cada amostra analisada estão apresentados na figura 108 e, para melhor visualização e análise do comportamento em função da redosagem ao longo do tempo, objetivo da pesquisa, as figuras 109 e 110 apresentam a sobreposição das curvas TG e

DTG, respectivamente, para a pasta no tempo 0h, sem adição de superplastificante, e nos tempos 2h, 4h e 6h após a incorporação do aditivo.

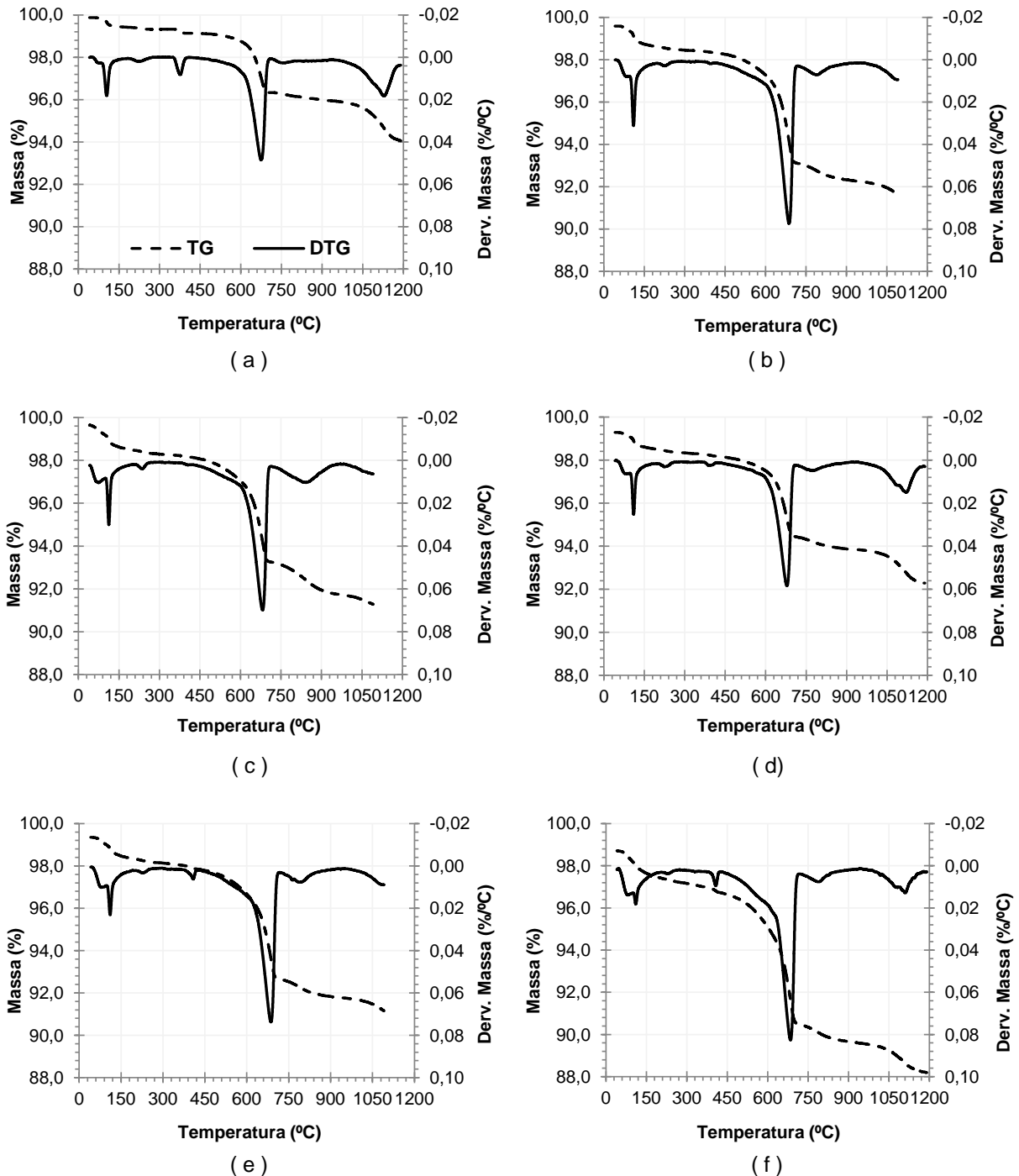


Figura 108: Perfis de TG e DTG da pasta de cimento redosada com aditivo superplastificante à base policarboxilato para: a) cimento, e para os tempos de mistura de: b) 0h, c) 2h antes da adição do aditivo, d) 2h após adição do aditivo, e) 4h após adição do aditivo e f) 6h após adição do aditivo

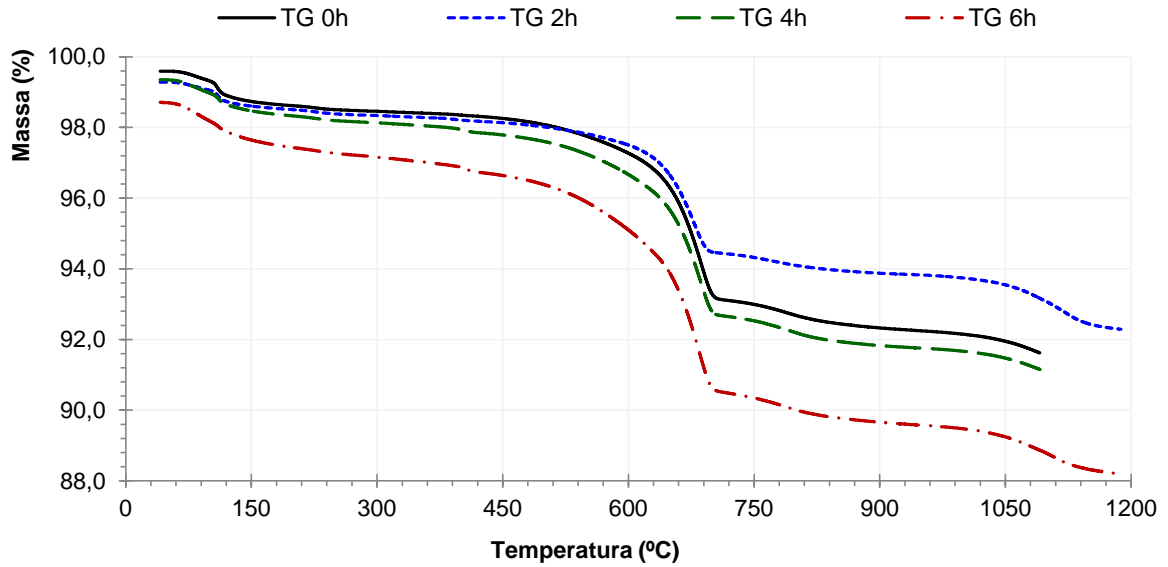


Figura 109: Perfis de TG da pasta de cimento para o tempo de mistura 0h e para as pastas redosadas com aditivo superplastificante à base policarboxilato nos tempos 2h, 4h e 6h

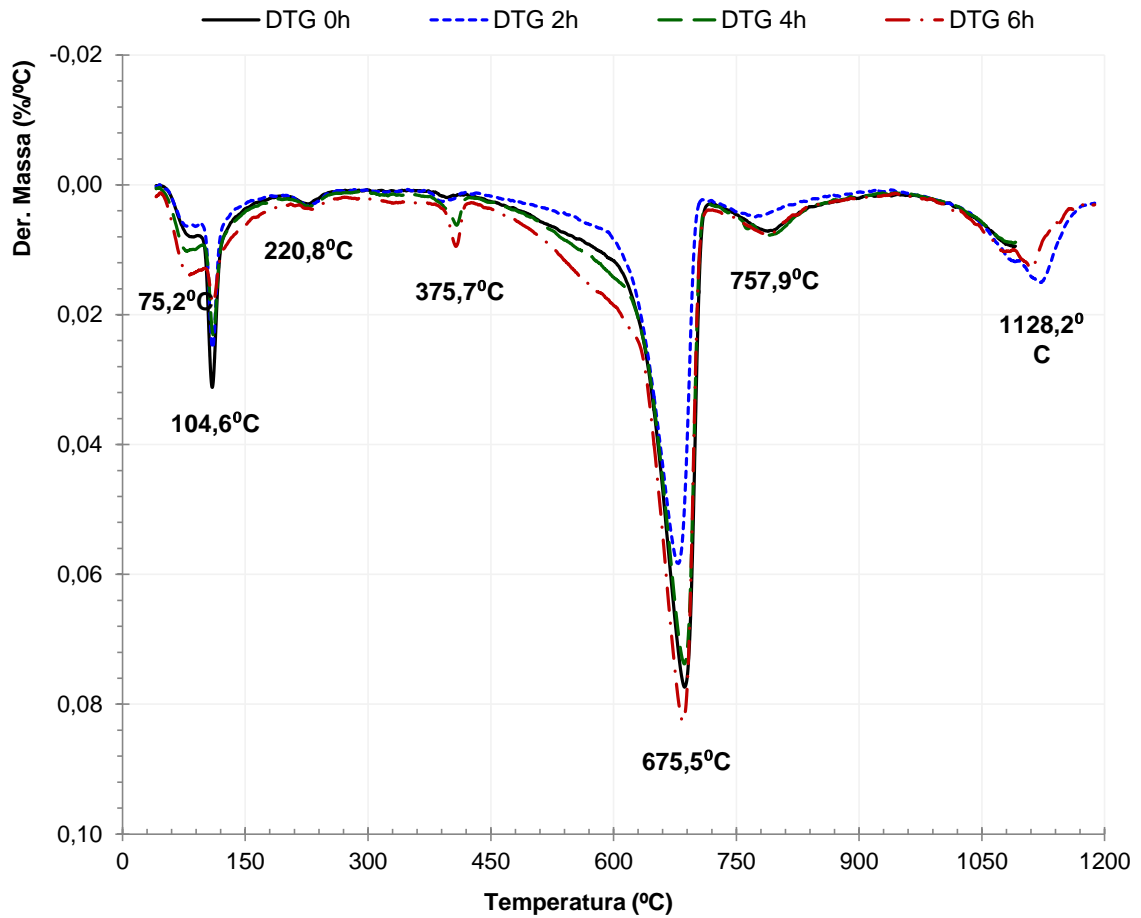


Figura 110: Perfis de DTG da pasta de cimento para o tempo de mistura 0h e para as pastas redosadas com aditivo superplastificante à base policarboxilato nos tempos 2h, 4h e 6h

Em relação aos picos gerados nos perfis, Lothenbach *et al.* (2016) destacam que a taxa de aquecimento e o tipo de vaso influenciam a posição dos picos de desidratação, registrando que taxas de aquecimento mais elevadas levam a picos mais definidos e mais estreitos, mas também são observadas temperaturas de desidratação e desidroxilação mais elevadas, uma vez que a pressão do vapor de água sobre a amostra é maior se a amostra for aquecida mais rapidamente. Os autores destacam ainda, com base nos resultados apresentados, que fica evidente que muitos hidratos, particularmente C-S-H, etringita e monossulfato, perdem parte de sua água quimicamente combinada abaixo de 105°C, enquanto que a perda de massa atribuída à decomposição de carbonatos é associada ao intervalo de 105°C a 1000°C.

Gonçalves *et al.* (2006), utilizando a termogravimetria, ao analisarem o cimento CP II F 32 observaram um pico na curva entre 350°C e 450°C, o qual foi atribuído à perda de água de hidratação precoce, que pode ter acontecido tanto no transporte quanto na estocagem ou durante o manuseio para uso. Registraram outro pico bem definido entre 650°C e 750°C, caracterizado pela perda de gás carbônico (CO₂) devido ao processo de decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃), presente na composição do cimento utilizado. Como a pasta analisada na atual pesquisa foi produzida com cimento tipo CP II Z 32, que segundo NBR 11578 (ABNT, 1991) pode conter em sua composição até 10% de material carbonático, observou-se, também, a presença de um pico bem definido entre 650°C e 750°C associado a essa perda de gás carbônico pela decomposição do carbonato de cálcio, conforme pode ser visualizado na figura 110.

Na análise termogravimétrica a faixa de temperatura de 20°C a 300°C caracteriza a perda de água combinada da etringita e gipsita, além de outras fases, como o monossulfato (AFm), silicatos e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Sendo assim torna-se difícil analisar separadamente estas fases pela perda de massa (SOUZA, 2006). Romano *et al.* (2016) registram que até a temperatura de 350°C os resultados da análise térmica referem-se à decomposição dos produtos hidratados dos silicatos, sulfatos, aluminatos e compostos de magnésio, e ainda, que na maioria das vezes a quantidade de portlandita é quantificada entre 360°C e 480°C. Segundo Taylor (1990), o C-S-H perde água combinada da temperatura ambiente até 600°C, a portlandita em uma faixa de temperatura menor, entre 400°C e 460°C e as fases etringita (AFt) podem apresentar perda de massa da temperatura ambiente até 650°C.

Conforme citado, pela dificuldade de quantificar separadamente cada fase na faixa de temperatura até 300°C, que contempla a perda de água combinada da etringita e gipsita juntamente com outras fases hidratadas como o C-S-H, a figura 111 apresenta o

comportamento das amostras avaliadas na TGA quantificando a água combinada até a temperatura de 300°C.

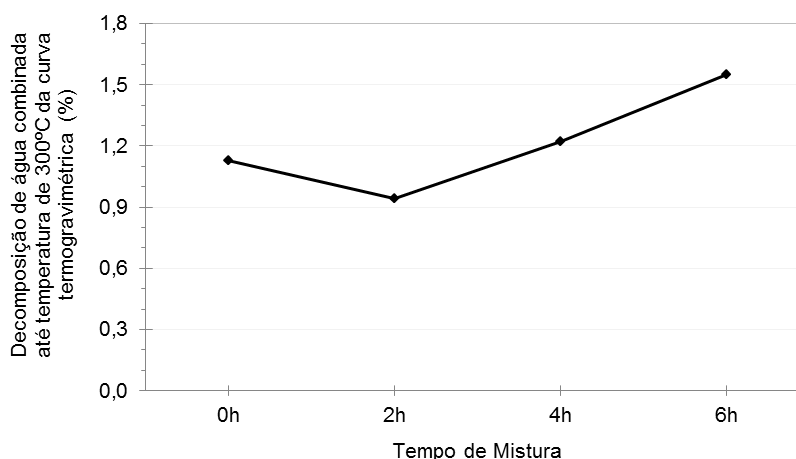


Figura 111: Decomposição da água combinada para as pastas analisadas ao longo do tempo de mistura, pela curva termogravimétrica para uma faixa de temperatura até 300°C

Huang *et al.* (2016), por meio de termogravimetria (TG) e calorimetria de varredura diferencial (DSC), analisaram a influência de superplastificantes em pastas de cimento, apresentando perfis que mostram picos em faixas de temperatura distintas, representando decomposições de diferentes componentes na pasta de cimento analisada. Com base nos dados dos testes TG, os autores atribuem que a perda de massa da pasta de cimento observada nas temperaturas entre 145°C e 420°C foi causada principalmente pela desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), entre 420°C e 530°C devido à decomposição do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e nas temperaturas entre 600°C e 1000°C em função da decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3). Registraram que as pastas com superplastificante à base policarboxilato possuem percentuais maiores de C-S-H, revelando que existem mais produtos de hidratação apresentando, portanto, microestruturas mais densas, o que melhora o desempenho em relação à durabilidade.

Pela figura 111, observa-se que há uma tendência de aumento no percentual de água combinada ao longo do tempo de mistura analisado, quando verificado pela análise termogravimétrica até uma faixa de 300°C. Pelas reações de hidratação do cimento, ocorre a formação das fases hidratadas, como a formação do C-S-H. O aumento observado da perda de água ao longo do tempo (figura 111) induz que há uma maior quantidade de C-S-H formado e, assim como observado no estudo apresentado por Huang *et al.* (2016), uma

maior quantidade de produtos de hidratação gera microestruturas mais densas, contribuindo no desempenho em relação à durabilidade, comportamento observado nas análises realizadas, e já detalhadas anteriormente (figuras 106 e 107).

Com o aumento da temperatura, a dissolução do cimento anidro e a precipitação dos hidratos são mais rápidas. Em concordância com esses dados da análise termogravimétrica, é possível verificar o comportamento do concreto produzido na central dosadora analisando o momento em que ocorre a máxima temperatura de cada tempo de mistura, ao serem comparados com o tempo registrado para a mistura 0h, conforme ilustrado na figura 112.

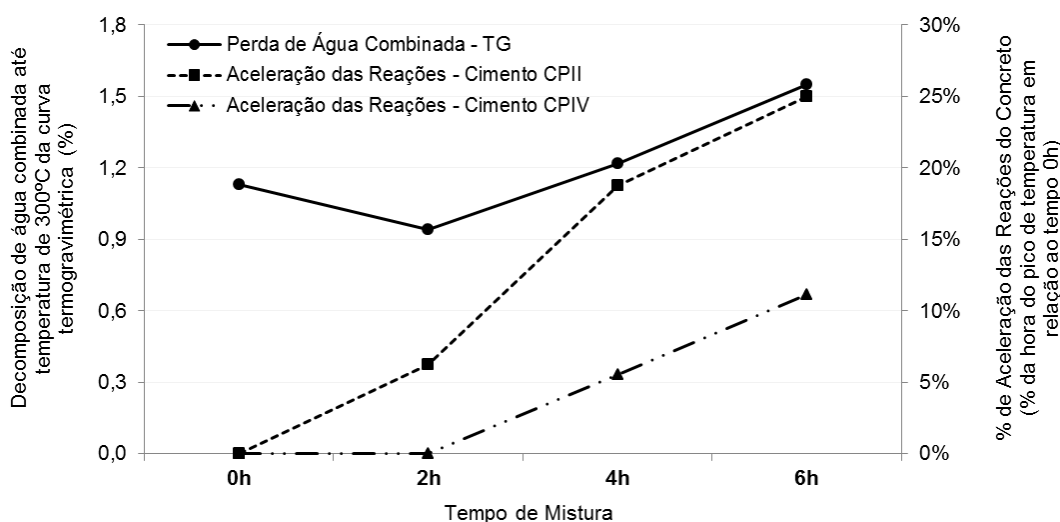


Figura 112: comportamento da decomposição de água combinada, até a temperatura de 300°C em relação a hora do pico máximo de temperatura registrado no calor de hidratação dos concretos produzidos na central dosadora, para relação a/c igual a 0,52

4.5.3 Espectrometria por Infravermelho com Transformação de Fourier (FTIR)

Outra técnica utilizada para avaliar o acompanhamento da hidratação do cimento em pastas ao longo do tempo de mistura até 6 horas, conforme proposto pela atual pesquisa, foi espectrometria por infravermelho com transformação de Fourier (FTIR). Os espectros obtidos desse comportamento estão ilustrados na figura 113.

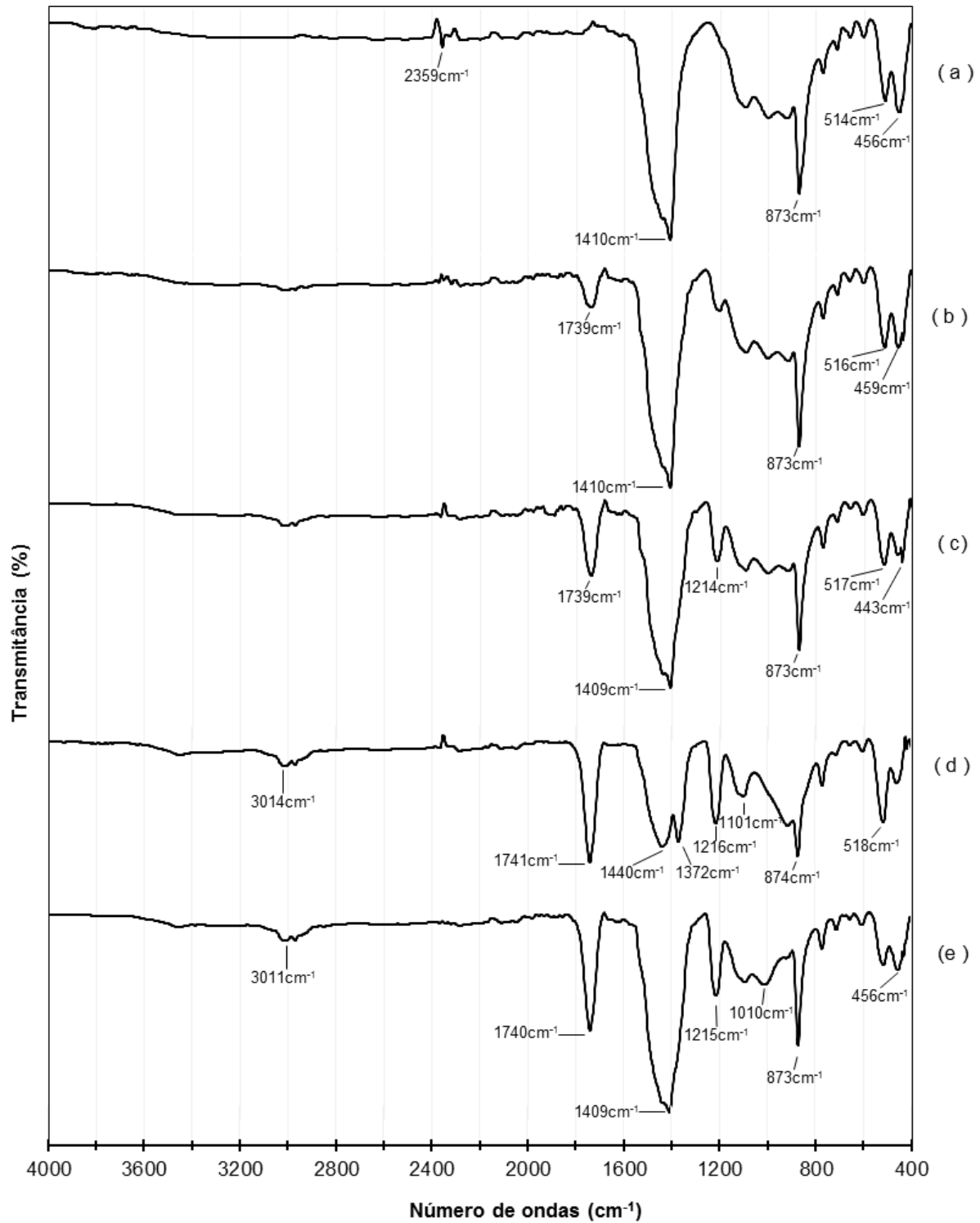


Figura 113: Espectro FTIR a) do cimento anidro, e para os tempos de mistura de: b) 0h, c) 2h após adição do aditivo, d) 4h após adição do aditivo e e) 6h após adição do aditivo

Através da análise dos espectros, alguns valores de absorção característicos podem ser observados: portlandita (estiramento da vibração O-H em 3646cm^{-1}), sulfatos (gipsita para

cimento anidro em 1120 e 1144cm^{-1} e etringita em suspensões hidratadas em 1115cm^{-1}), aluminatos (C_3A , no cimento anidro com a banda 742cm^{-1} , atribuído a AlO_4) e carbonato de cálcio (CO_3 , para bandas 1420 - 1480cm^{-1} , 840 - 860cm^{-1} e 712cm^{-1}) (PUERTAS *et al.*, 2005). Silva e Ramon (2002), analisando pastas de cimento Portland aditivadas com polímeros, registraram, através da análise por infravermelho, que independente do teor ou tipo de polímero adicionado, algumas bandas foram claramente observadas para todas as misturas. Relacionando as bandas referentes ao hidróxido de cálcio (3642cm^{-1}), à água combinada e adsorvida nas fases C-S-H, AFm e AFt (3440 - 3446cm^{-1}), à água molecular (3440 - 3446cm^{-1} e 1640 - 1654cm^{-1}), às fases carbonáticas (1424 - 1436cm^{-1} , 874 - 880cm^{-1} e 704 - 712cm^{-1}), às fases sulfáticas (1116 - 1118cm^{-1}) e aos silicatos de cálcio anidros (920cm^{-1} , 526 - 536cm^{-1} e 458 - 464cm^{-1}) e hidratados (970 - 986cm^{-1}).

Analisando a figura 112 é possível observar as bandas relacionadas ao carbonato de cálcio, com picos muito bem definidos (1409 - 1410cm^{-1} e 873 - 874cm^{-1}). Observa-se que as bandas 3011 - 3014cm^{-1} e 1740cm^{-1} se intensificam nas pastas com aditivo, comportamento atribuído ao alongamento assimétrico de C-H do grupo metilo característico do polímero (MA *et al.*, 2011).

Puertas *et al.* (2005) registram que, para vários percentuais de dosagem do aditivo superplastificante à base de policarboxilato adicionados às pastas de cimento, todas as pastas hidratadas, após dois dias, confirmam a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H gel) pela banda observada em 900cm^{-1} para o cimento e entre 969 - 967cm^{-1} nas pastas hidratadas. Segundo o autor, a presença do aditivo não induz a diferença representativa na composição mineralógica da pasta analisada para a idade de dois dias.

Mesmo observando algumas alterações nos espectros apresentados na figura 112, induzidas pela presença do policarboxilato, os resultados obtidos nas propriedades analisadas mostram que não houve mudanças representativas no comportamento macroestrutural das misturas, contribuindo inclusive, em alguns casos, positivamente na melhora do comportamento final analisado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo principal verificar o comportamento do concreto quando mantido em mistura prolongada e utilizado acima do tempo limite especificado pela norma NBR 7212 (ABNT, 2012), de 150 minutos, restabelecendo o abatimento ao longo do tempo, à condição inicialmente definida, com a incorporação de aditivo superplastificante à base de policarboxilato.

Sua concepção ocorreu em função de real necessidade encontrada em obras e centrais dosadoras de concreto, justificando uma melhor investigação em relação à possibilidade de utilização de concretos com tempo superior ao máximo prescrito pela norma. Como grande contribuição, além da ampla abrangência de diferentes tipos de concreto (concretos com relações a/c bem distintas, produzidos com dois tipos de cimentos com grande demanda de uso), este estudo não somente foi desenvolvido em ambiente laboratorial, como também em escala real de produção em uma central dosadora de concreto. Com isso, os resultados e análises apresentadas refletem, segundo a metodologia adotada, o real comportamento de concretos utilizados com até 6 horas de mistura.

Em relação à resistência à compressão e à absorção de água por capilaridade, para idade de 28 dias, os resultados obtidos mostraram que essas propriedades foram mantidas ao longo do tempo de mistura, quando utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilato para manutenção da trabalhabilidade do concreto, resultado comprovado estatisticamente. O que não ocorreu no período inicial até 2 horas de mistura, onde foi constatada uma leve queda, porém esse tempo ainda está contemplado no limite especificado pela norma (POLESELLO, 2012).

Além dessas duas propriedades já citadas, avaliadas na primeira etapa desta pesquisa, avaliou-se, nesta segunda etapa, o comportamento do concreto em relação ao calor de hidratação gerado, no concreto produzido na central e também em pastas de cimento, o comportamento reológico em pastas de cimento produzidas com as mesmas relações a/c adotadas para o concreto, o módulo de elasticidade e a durabilidade do concreto frente à

profundidade de carbonatação e penetração de íons cloreto pela exposição à condição natural, considerando o procedimento proposto de manutenção do abatimento com a incorporação de aditivo superplastificante até um período de 6 horas. Análises microestruturais em pastas de cimento auxiliaram para entendimento dos resultados obtidos.

Apresentando um panorama geral da matriz proposta para estudo nesta pesquisa, a tabela 22 resume os resultados médios obtidos para o concreto produzido com ambos os tipos de cimentos analisados, CP II Z 32 e CP IV 32 RS, ao longo do processo de redosagem proposto no estudo.

Tabela 22: Resumo dos resultados obtidos na pesquisa para as propriedades analisadas nos os concretos produzidos na central dosadora

| | | | f_{ck} (MPa) | Abs (%) | E_{cs} (GPa) | $CH_{máx}$ (°C) | Carb (mm) | $Cl_{2\text{ anos}}$ (%) | $Cl_{6\text{ anos}}$ (%) |
|---------------------|------------|----|-------------------|------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Cimento CP II Z 32 | a/c = 0,40 | 0h | 50.1 | 1.08 | 32.9 | 44.0 | 0.56 | 0.002 | 0.006 |
| | | 2h | 48.3 | 1.23 | - | 45.0 | 0.13 | 0.000 | 0.002 |
| | | 4h | 47.9 | 1.39 | 33.2 | 46.0 | 0.21 | 0.006 | 0.002 |
| | | 6h | 48.0 | 1.40 | 32.5 | 48.0 | 0.20 | 0.006 | 0.005 |
| | a/c = 0,52 | 0h | 40.1 | 1.38 | 30.6 | 38.0 | 3.18 | 0.021 | 0.004 |
| | | 2h | 40.8 | 1.53 | - | 40.0 | 2.73 | 0.015 | 0.002 |
| | | 4h | 41.3 | 1.45 | 30.7 | 42.0 | 2.27 | 0.002 | 0.013 |
| | | 6h | 40.0 | 1.62 | 30.4 | 45.0 | 2.32 | 0.000 | 0.008 |
| | a/c = 0,68 | 0h | 27.5 | 1.86 | 26.2 | 32.0 | 8.40 | 0.017 | 0.058 |
| | | 2h | 26.4 | 2.07 | - | 34.0 | 7.09 | 0.033 | 0.019 |
| | | 4h | 25.7 | 1.97 | 25.3 | 38.0 | 6.77 | 0.031 | 0.036 |
| | | 6h | 25.2 | 1.91 | 25.8 | 41.0 | 6.14 | 0.017 | 0.017 |
| Cimento CP IV 32 RS | a/c = 0,40 | 0h | 49.3 | 0.64 | 36.2 | 45.0 | 2.80 | 0.003 | 0.003 |
| | | 2h | 46.2 | 0.65 | - | 46.0 | 2.54 | 0.003 | 0.000 |
| | | 4h | 47.6 | 0.63 | 36.6 | 52.0 | 2.14 | 0.002 | 0.005 |
| | | 6h | 46.8 | 0.57 | 34.7 | 52.0 | 1.43 | 0.011 | 0.000 |
| | a/c = 0,52 | 0h | 39.5 | 0.92 | 35.1 | 35.0 | 5.38 | 0.019 | 0.008 |
| | | 2h | 38.4 | 0.91 | - | 36.0 | 5.88 | 0.023 | 0.008 |
| | | 4h | 38.3 | 1.00 | 34.2 | 37.0 | 5.40 | 0.008 | 0.000 |
| | | 6h | 38.2 | 0.99 | 33.9 | 40.0 | 5.72 | 0.002 | 0.006 |
| | a/c = 0,68 | 0h | 25.0 | 1.10 | 31.8 | 33.0 | 10.06 | 0.064 | 0.058 |
| | | 2h | 23.8 | 1.10 | - | 32.0 | 9.62 | 0.042 | 0.022 |
| | | 4h | 22.8 | 1.17 | 28.5 | 36.0 | 10.14 | 0.064 | 0.061 |
| | | 6h | 23.1 | 1.35 | 28.3 | 39.0 | 10.08 | 0.061 | 0.133 |

Abs - Absorção por capilaridade; E_{cs} - Módulo de Elasticidade; $CH_{máx}$ - Calor de hidratação máximo; Carb - Profundidade de Carbonatação; $Cl_{2\text{ anos}}$ - Teor de Cloretos em 2 anos de exposição; $Cl_{6\text{ anos}}$ - Teor de Cloretos em 6 anos de exposição.

Com base em todos os resultados obtidos para o concreto, tanto para a condição de produção em laboratório como para a situação real em central dosadora, e, com as análises realizadas em pastas de cimento, apresentam-se, a seguir, algumas conclusões.

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, para os materiais que foram utilizados, em relação ao comportamento quanto do concreto ao calor de hidratação, comportamento reológico, módulo de elasticidade, carbonatação e penetração de íons cloreto, corroboram com os resultados já apresentados em relação à resistência à compressão e à absorção de água por capilaridade (POLESELLO, 2012) de que é possível utilizar concretos com tempo de mistura e transporte acima do máximo estabelecido pela NBR 7212 (ABNT, 2012), por até 6 horas, desde que, a trabalhabilidade seja mantida até o momento do lançamento do concreto, com a incorporação de aditivo superplastificante à base de policarboxilato, e o concreto permaneça em processo de mistura. Com base nos resultados obtidos, algumas conclusões podem ser listadas:

- ao se analisar o calor de hidratação gerado nas misturas, foi possível verificar, através de um estudo em pastas, a influência da utilização do aditivo superplastificante em relação aos tempos de início e fim de pega pelo registro das curvas geradas. Conforme esperado, esse impacto foi muito mais acentuado no cimento CP IV 32 RS se comparado ao cimento CP II Z 32. Há uma correlação linear muito forte quando avaliada a dosagem de aditivo utilizada e o tempo em que ocorre a máxima temperatura da mistura, registrando-se fatores de correlação (R^2) entre 0,9158 e 0,9886. Porém, esse comportamento não pode ser visualizado quando a análise do calor de hidratação foi realizada em blocos de concreto, o que demandou percentuais de aditivo maiores para a correção do abatimento do concreto, resultando em uma correlação menor entre a dosagem de aditivo e a temperatura máxima registrada.
- através dos ensaios reológicos realizados em pastas de cimento é possível observar que, primeiramente, registrou-se a eficiência na dispersão das partículas de cimento na mistura pela sensível redução na área de histerese com tempo quando a pasta é mantida em processo de mistura. Cabe salientar, que esse comportamento foi observado tanto para as pastas redosadas com aditivo quanto para aquelas que somente permaneceram em processo de mistura sem a redosagem ao longo do

tempo, mostrando o efeito do processo de mistura na quebra das ligações inicialmente presentes na mistura. Com a melhor dispersão das partículas proporcionada pela incorporação do aditivo superplastificante, houve uma redução considerável na tensão de escoamento, proporcionando um sensível aumento na trabalhabilidade, deixando a mistura com alta fluidez. Com a redução da tensão de escoamento, o abatimento do concreto foi restabelecido, garantindo os resultados nas propriedades finais do concreto no estado endurecido, conforme pôde ser verificada nas demais análises realizadas.

- foi constatado, estatisticamente, que há uma manutenção nos resultados do módulo de elasticidade ao longo do tempo de mistura analisado, com resultados médios apresentando baixos coeficientes de variação. Esse comportamento foi registrado tanto para o concreto produzido em laboratório quanto para concreto produzido na central dosadora.
- pela análise realizada para verificar a profundidade de carbonatação, o tempo de mistura influencia na carbonatação do concreto, conforme verificado estatisticamente, porém, é importante observar que este efeito foi benéfico, reduzindo a profundidade de carbonatação com o tempo de mistura. No comportamento final observado após 2 horas de mistura, redução média de 7,9% na profundidade de carbonatação em relação ao concreto recém-misturado foi registrada. Esse comportamento continuou sendo identificado ao longo do tempo de mistura, sendo que ao final das 6 horas de mistura a redução média da profundidade de carbonatação foi de 14,8% em relação ao concreto recém-misturado (0 hora). Para melhor caracterizar a durabilidade dos concretos, a penetração de íons cloreto foi analisada em estruturas (blocos) executadas com os concretos produzidos e expostos por um período de 2 e 6 anos ao ambiente natural. Observou-se, principalmente para relações a/c mais altas com maior porosidade, a influência dos ciclos de secagem e molhagem do ambiente na camada superficial do concreto, onde o pico de concentração de cloretos ocorreu em camada mais interna, caracterizando bem a zona de convecção e o efeito de lavagem na camada superficial. Os resultados mostram que, estatisticamente, o tempo de mistura não representa influência significativa em relação à penetração de cloretos, evidenciando que o procedimento adotado por esta pesquisa não interfere na qualidade do concreto.

- adicionalmente, registrou-se a possível formação de mais produtos de hidratação, como o C-S-H, pelo aumento da perda de água combinada na termogravimetria para uma temperatura de até 300°C, contribuindo, também, para justificar a microestrutura mais densa observada através das imagens por microscopia eletrônica de varredura, ao longo do tempo de mistura. Essa densificação da matriz impactou diretamente no desempenho, quando avaliada a durabilidade do concreto pela profundidade de carbonatação e penetração de íons cloreto. No entanto, é importante destacar que a análise microestrutural foi realizada em apenas um ponto específico da matriz experimental.
- avaliando os tempos de início de pega apresentado pelos cimentos utilizados, o estudo mostrou que o concreto pode ser utilizado mesmo após seu início de pega, desde que permaneça, ao longo do tempo de aplicação, em condições adequadas para lançamento e adensamento, utilizando, para tal, um processo de redosagem com aditivo superplastificante à base de policarboxilato.

As conclusões aqui listadas dizem respeito aos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. Cabe salientar, que a eficiência do procedimento adotado está muito vinculada ao desempenho do aditivo superplastificante utilizado, que reflete diretamente sobre os resultados obtidos e apresentados neste trabalho.

Por fim, o objetivo principal desta pesquisa foi apresentar uma alternativa técnica e viável, em relação à especificação do tempo máximo de utilização do concreto através de processo de redosagem com aditivo superplastificante, capaz de minimizar problemas reais enfrentados pelas construtoras e centrais dosadoras de concreto, contribuindo diretamente na redução de impactos negativos relativos, por exemplo, a custos, cronograma de obras e, principalmente, agressão ao meio ambiente no descarte de resíduos de centrais dosadoras. Frente aos resultados apresentados e discutidos, percebe-se que o objetivo proposto foi atendido, porém, algumas sugestões de trabalhos futuros são pertinentes para melhor consolidar a análise realizada.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em virtude, ainda, da escassez de trabalhos apresentados na literatura que abordam o comportamento de concretos com tempos de mistura acima do especificado por norma, principalmente para a condição de produção real em central dosadora de concreto, e por

perceber a falta de conhecimento do meio técnico, o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o assunto faz-se necessário. Assim sendo, são feitas a seguir algumas propostas de pesquisas futuras:

- ampliar o estudo para diferentes materiais, avaliando o desempenho final para outros tipos de cimentos e, principalmente, aditivos utilizados na manutenção do abatimento pelo processo de redosagem;
- verificar o comportamento reológico do concreto quando mantido em mistura prolongada com o restabelecimento do abatimento com adição de superplastificante, para comparar os resultados em relação ao comportamento obtido pela reologia em pastas.
- analisar o comportamento referente aos parâmetros reológicos no ensaio onde a pasta se mantém em processo de mistura, porém sem a utilização do aditivo superplastificante. Pelo comportamento observado na perda de abatimento, esperava-se que no estudo da pasta sem a redosagem com o aditivo haveria certa influência nos parâmetros reológicos.
- aprofundar as análises microestruturais, avaliando todos os pontos da matriz proposta, e com isso melhor entender essa influência do processo de mistura e da redosagem com aditivo nas misturas ao longo do tempo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJOUDJ, M.; EZZIANE, K.; KADRI, E. H.; HGO, T.; KACI, A. **Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer**. Construction and Building Materials, 70, 549-559, 2014.

AGULLÓ, L.; TORALLES-CARBONARI, B.; GETTU, R.; AGUADO, A. **Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizers – A study based on the Marsh cone test**. Materials and Structures, Vol 32 (221), 479-485, 1999.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo. Pini, 2000.

ALHOZAIMY, A. M. **Effect of retempering on the compressive strength of ready-mixed concrete in hot-dry environments**. Cement & Concrete Composites 29, 124-127, 2007.

ALMUSALLAM, A. A. **Effects of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete**. Cement & Concrete Composites 23, 353-361, 2001.

AHMED, M.; BENHARZALLAH, K. **Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete**. Construction and Building Materials, 148, 874-886, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C114-09. Standart Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement**. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto**. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto> > 2013. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM - ABESC. **Concreto em Destaque**. Disponível em: < <http://www.abesc.org.br> >. Acesso em: 16 de agosto de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 5p.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9p.

_____ **NBR 6118:** Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238p.

_____ **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 11p.

_____ **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 16p.

_____ **NBR 7584:** Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 10p.

_____ **NBR 8802:** Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013 8p.

_____ **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16p.

_____ **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5 p.

_____ **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 19 p.

_____ **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8p.

_____ **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8p.

_____ **NBR NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6p.

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

BARAN, T.; PICHNIARCZYK, P. **Correlation factor between heat of hydration and compressive strength of common cement.** Construction and Building Materials, 150, 321–332, 2017.

BARBOZA, L. S.; GONÇALVES, E. C.; SANTOS, T. M. S.; SARTORI, A. L. **Influência do tempo máximo de mistura e transporte especificado pela ABNT NBR 7212:2012 na resistência a compressão de concretos usinados.** Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 4, n. 2, p. 20-33, dez. 2017.

BASHAM, KD. **Hot weather affects fresh concrete.** Concrete Construction 1992.

BASKOCA, A.; OZKUL, M. H.; ARTIRMA, S. **Effect of chemical admixtures on workability and strength properties of prolonged agitated concrete.** Cement and Concrete Research, 28 (5), 737–747, 1998.

BASSIONI, G. **The influence of cement composition on superplasticizers' efficiency.** International Journal of Engineering (IJE), Volume 3, 577-587, 2010.

BENTZ, D. P.; COVENEY, P. V.; GARBOCZI, E. J.; KLEYN, M. F.; STUTZMAN, P.E. **Cellular automaton simulations of cement hydration and microstructure development.** Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 2, 783-808, 1994.

BISHOP, M.; BOTT, S. G.; BARRON, A. R. **A new mechanism for cement hydration inhibition: solid-state chemistry of calcium nitrilotris (methylene) triphosphonate.** Chem. Mater. 15, 3074-3088, 2003.

BOGAS, J. A.; GOMES, M. G.; GOMES, A. **Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method.** Ultrasonics. 53, 962-972, 2013.

BRITISH STANDARD – BS 5328 : **Part 3 : Specification for the procedures to be used in producing and transporting concrete.** 1990.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J.. **Mechanisms of cement hydration.** Cement and Concrete Research 41, 1208-1223, 2011.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** (Tese de Doutorado) Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2007.

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

CHANDRA, S., BJÖRNSTRÖM, J. **Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars – Part II.** Cement and Concrete research 32, 1613-1619, 2002.

CHANG, H.; MU, S.; FENG, P. **Influence of carbonation on “maximum phenomenon” in surface layer of specimens subjected to cyclic drying-wetting condition.** Cement and Concrete Research, 103, 95-109, 2018.

COLLEPARDI, M.; COPPOLA, L.; CERULLI, T.; FERRARI, G.; PISTOLESI, C.; ZAFFARONI, P.; QUEK, F. **Zero slump loss superplasticized concrete.** Proceedings of the Congress “Our World in Concrete and Structures”, Singapore, pp 73-80, 1993.

COLLEPARDI, M. **Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete.** Cement & Concrete Composites 20, 103-112, 1998.

COLLERPADI, M. **Admixtures-enhancing concrete performance.** 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, U.K. July 2005.

COSTA, A.; APPLETON, J. **Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration.** Materials and Structures, Vol 32, 252-259, 1999.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. **Mixture-proportioning of high-performance concrete.** Cement and Concrete Research 32, 1699-1704, 2002.

DEWAR, J.D.; ANDERSON, R. **Manual of ready mixed concrete.** Blackie Academic and Professional, second ed., Glasgow, UK, 1992.

DWIVEDI, V. N.; DAS, S. S.; SINGH, N. B.; RAI, S.; GAJBHIYE, N. S. **Portland Cement Hydration in the Presence of Admixtures – Black Gram Pulse and Superplasticizer.** Materials Research, Vol 11 (4), 427-431, 2008.

CSI: WBCSD Cement Sustainability Initiative. **Cement Industry Energy and CO₂ Performance.** 2009

EMMONS, P. H. **Concrete repair and maintenance illustrated.** Kingston: R. S. Means Company, 295p. 1993.

ERDOĞDU, S. **Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing.** Cement & Concrete Research 35, 907-912, 2005.

ERDOĞDU, S.; ARSLANTÜRK, C.; KURBETCI, S. **Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating.** Construction and Building Materials, 25, 1277–1281, 2011.

FERRARIS, C. F. **Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report.** Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol 104 (5), 461-478, 1999.

FERRARIS, C.; De LARRARD, F.; MARTYS, N. **Fresh concrete rheology: recent developments.** Materials Science of Concrete VI, Ed. Sidney Mindess and Jan Skalny, The American Ceramic Society, 735 Ceramic Place, Westerville, OH 43081, 215-241, 2001.

FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R.G. **Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional.** Revista Ambiente Construído, vol 12, n. 2, 165-174, 2012.

GAO, Y.; ZHANG, J.; ZHANG, S.; ZHANG, Y. **Probability distribution of convection zone depth of chloride in concrete in a marine tidal environment.** Construction and Building Materials, 140, 485-495, 2017.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica.** Ambiente Construído, v. 6, n. 4, 83-94, Porto Alegre, 2006.

HANAYNEH, B. J.; ITANI, R. Y. **Effect of retempering on the engineering properties of superplasticized concrete.** Materials and Structures 22, 212-219, 1989.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilato destinados a concretos de cimento Portland.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo: EPUSP, 2003.

HARTMANN, C. T.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H.. **Aditivos químicos para concretos e cimento.** Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. Geraldo C. Isaia. IBRACON, São Paulo, 2011.

HEIKAL, M.; MORSY, M. S.; AIAD, I. **Effect of treatment temperature on the early hydration characteristics of superplasticized silica fume blended cement pastes.** Cement & Concrete Research 35, 680-687, 2005.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** (Tese de Doutorado) Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HONG, K.; HOOTON, R. D. **Effects of fresh water exposure on chloride contaminated concrete.** Cement and Concrete Research 30, 1199-1207, 2000.

HOPPE FILHO, J.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Técnicas de caracterização reológica de concretos.** In: Revista Concreto & Construções, Ed. IBRACON, n.47, São Paulo, p. 108-124, 2007.

HSU, K.-C.; CHIU, J.-J.; CHEN, S.-D.; TSENG, Y.-C. **Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability.** Cement & Concrete Composites 21, 425-430, 1999.

HUANG, H.; QIAN, C.; ZHAO, F.; QU, J.; GUO, J.; DANZINGER, M. **Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete.** Construction and Building Materials, 110, 293-299, 2016.

IRASSAR, E. F. **Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review.** Cement and Concrete Research, 39, 241-254, 2009.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M-A. **Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physic-chemical concepts.** Cement & Concrete Composites 20, 87-101, 1998.

JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. **The influence of concrete composition on Young's modulus.** Procedia Engineering, 108, 584-591, 2015.

KAZAZ, A.; ULUBEYLI, S.; ER, B.; ARSLAN, V.; ARSLAN, A.; ATICI, M. **Fresh ready-mixed concrete waste in construction projects: a planning approach.** Creative Construction Conference 2015 (CCC2015), Procedia Engineering, 123, 268-275, 2015.

KISHAR, E. A. **Hydration Reaction of Tricalciumaluminate in different Systems**. Cement and Concrete Research, Vol 35, 1638-1640, 2005.

KIRCA, Ö.; TURANLI, L.; ERDOĞAN, T. **Effects of retempering on consistency and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing**. Cement & Concrete Research 32, 441-445, 2002.

KIRCHHEIM, A. P. **Aluminatos tricálcico cúbico e otorrômbo: análise da hidratação *in situ* e produtos formados**. (Tese de Doutorado) Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

KULKARNI, D. K.; PRAKASH, K. B. **Effects of Addition of More than two Chemical Admixtures on properties of Retempered Concrete**. New Building Materials & Construction World, pg. 6, Agosto 2007.

LOTHENBACH, B.; DURDZINSKI, P.; WEERDT, K. **Thermogravimetric analysis**. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Ed. Karen Scrivener, Ruben Snellings and Barbara Lothenbach, 2016.

LYRA, J. S. **Estudo da influência de policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico-química de superfície do cimento**. (Dissertação de Mestrado) Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MA, H.; TIAN, Y.; LI, Z. **Interactions between Organic and Inorganic Phases in PA- and PU/PA-Modified-Cement-Based Materials**. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(10), 1412-1421, 2011.

MAJDI, H. S.; ABBAS, Z. H. **Study of Heat of Hydration of Portland Cement Used in Iraq**. Case Studies in Construction Materials, 7, 154-162, 2017.

MANGANE, M. B. C.; ARGANE, R.; TRAUCHESSEC, R.; LECOMTE, A.; BENZAAZOUA, M. **Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill**. Minerals Engineering, 116, 3-14, 2018.

MARANHÃO, F. L.; REGATTIERI, C. E. X. Produção e controle de concreto dosado em central. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed., vol 1, p. 501-536, IBRACON, São Paulo, 2011.

MASCOLO, R.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto usinado: análise da variação da resistência à compressão e de propriedades físicas ao longo da descarga do caminhão betoneira**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, IBRACON, Vol. 6, No 2, 194-210, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIRA, G. R.; BORBA JR, J. C.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Penetração de cloretos em estruturas de concreto em zona de atmosfera marinha – resultados de quatro anos de**

exposição natural no Nordeste do Brasil. VII Seminário em Engenharia Oceânica , Rio Grande, 2008.

MELLO, K. A.; MARTINS, V. C.; REPETTE, W. L. **Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água.** Ambiente Construído, vol 9 (1), 45-56, Porto Alegre, 2009.

MITCHELL, L. D.; MARGESON, J. C. **The effects of solvents on C-S-H as determined by thermal analysis.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol 86 (3), 591-594, 2006.

MUSTAFA, M. A.; YUSOF, K. M. **Atmospheric chloride penetration into concrete in semi-tropical marine environment.** Cement and Concrete Research 24, 661-670, 1994.

NELSON, E. B. **Well Cementing.** Schlumberger Educational Services, Texas, 1990

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto.** Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.

OGBONNA, J. **The secondary effects of lignosulfonate cement retarder on cement slurry properties.** Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 4 (9), Novembro 2009.

OLDER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement.** In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition), 241-297, 2003.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. **The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel.** Cement and Concrete Research, 16, 79-86, 1986.

PALACIOS, M.; PUERTAS, F. **Estabilidad de aditivos superplastificantes y reductores de la retracción em medios fuertemente básicos.** Materiales de Construcción, Vol. 54, nº 276. Espanha, 2004.

PAPADAKIS, V. G. **Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress.** Cement and Concrete Research, 30, 291-299, 2000.

PAPAYIANNI, I.; TSOHOS, G.; OIKONOMOU, N.; MAVRIA P. **Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures.** Cement & Concrete Composites, 27, 217-222, 2005.

PAUL, G.; BOCCALERI, E.; BUZZI, L.; CANONICO, F.; GASTALDI, D. **Friedel's salt formation in sulfoaluminate cements: A combined XRD and Al MAS NMR study.** Cement and Concrete Research, 67, 93-102, 2015.

PAULETTI, C. **Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação.** (Dissertação de Mestrado) Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PEDRAJAS, C.; RAHHAL, V.; TALERO, R. **Determination of characteristic rheological parameters in Portland cement pastes.** Construction and Building Materials, 51, 484–491, 2014.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland.** 14. ed. São Paulo: Globo, 2005.

PHARANDE, S. B.; JADHAV, H. S.; KULKARNI, D. K. **Effect of retempering on the property of concrete subjected to sulphate attack.** International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 3, Março, 2014.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; GALLO, J.; PANDOLFELLI, V. C. **How mixing affects the rheology of refractory castables.** American Ceramic Society Bulletin, Estados Unidos, v. 80, n. 6, p. 27-42, 2001.

PINA, F. B. C. **Resistência à carbonatação de argamassas de reparação para estruturas em betão armado.** (Dissertação de Mestrado) Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

POLESELLO, E. **Avaliação da Resistência à Compressão e da Absorção de Água de Concretos Utilizados após o Tempo Máximo de Mistura e Transporte Especificado pela NBR 7212.** (Dissertação de Mestrado) Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

POLESELLO, E.; ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. **Proposta para Utilização Total dos Resíduos Gerados pelas Usinas Dosadoras de Concreto.** XIII Encontro Nacional do Ambiente Construído – ENTAC. Canela, 2010.

POURCHET, S.; COMPARET, C.; NONAT, A.; MAITRASSE, P. **Influence of three types of superplasticizers on tricalciumaluminate hydration in presence of gypsum.** International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, Sorrento – Italia, 2006.

PRINCE, W.; ESPAGNE, M.; AÏTCIN, P.-C. **Ettringite formation: a crucial step in cement superplasticizer compatibility.** Cement and Concrete Research, 33, 635-641, 2003.

PUERTAS, F.; SANTOS, H.; PALACIOS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.. **Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes.** Advances in Cement Research, Vol. 17, nº 2, 77-89, 2005.

PUERTAS, F.; VÁZQUEZ, T. **Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes.** Materiales de Construcción, Vol. 51, nº 262. Espanha, 2001.

RAMACHANDRAN, V. S. **Effect of retarders / water reducers on slump loss in superplasticized concrete.** American Concrete Institute Special Publication 68, 393-407, 1981.

RAMACHANDRAN, V. S. **Influence of superplasticizers on the hydration of cement.** 3rd International Congress on Polymers in Concrete 13, 1071-1081, 13-15 May 1981.

RAMACHANDRAN, V. S. **Use of superplasticizers in concrete.** II Cimento Vol. 84, nº 3, 273-298, July-September 1987.

RAMACHANDRAN, V. S. **Admixture interactions in concrete.** Concrete Admixture Handbook (Second Edition), pg. 95-136, 1996.

RASHEEDUZZAFAR, et al.. **Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete.** Cement and Concrete Research, 20, 723-738, 1990.

RAVINA, D.; SOROKA, I. **Slump loss and compressive strength of concrete made with WRR and HRWR admixtures and subjected to prolonged mixing.** Cement and Concrete Research, 24, 1455-1462, 1994.

RILEM. Recommendations of CPC-18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth.** Materials and Structures, 1988.

RIXOM, R. **The economic aspects of admixture use.** Cement and Concrete Composites, 20, 141-147, 1998.

RODRIGUES, J. J. A. **Proteção e reabilitação de estruturas de betão armado.** (Dissertação de Mestrado) Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2017.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. **Propriedades do concreto no estado fresco.** Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. Geraldo Cechella Isaia, IBRACON, São Paulo, 2011.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita.** Cerâmica, 62, 215-223, 2016.

SANDBERG, P.; BENINI, H. **O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais.** Revista Concreto & Construções, 51, 22-26, IBRACON, 2008.

SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; GOMES, I. R.; PATRUNI, I. Z.; VICENZI, F.; KRAMEL, C.. **Temperature variation in concrete samples due to cement hydration.** Applied Thermal Engineering, 103, 1362-1369, 2016.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos.** Editora Artliber, São Paulo, 2006, 240 p.

SHEHATA, L. C. D.. **Propriedades elasto-plásticas do concreto.** Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. Geraldo C. Isaia. IBRACON, São Paulo, 2011.

SILVA, D. A.; ROMAN, H. R. **Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA.** Ambiente Construído. V.2, n.2, 31-46. Porto Alegre. 2002.

SILVA, I. J.; LIBÓRIO, J. B. L. **A Estrutura Porosa de Pasta, Argamassa e Concreto de Cimento Portland e sua Influência na Durabilidade do Concreto.** 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis-SC. 1999.

SILVA, N. G.; SNEFF, L.; KATO R. B.; REPETTE W. L. **Avaliação do desempenho de aditivos plastificantes e superplastificantes na manutenção da fluidez.** 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Curitiba-PR, IBRACON, 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. Disponível em: <http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp> Acesso em: 30 de março de 2017.

SOBHANI, J.; NAJIMI, M.; POURKHORSHIDI, A. R. **Effects of retempering methods on the compressive strength and water permeability of concrete.** Scientia Iranica A, 19 (2), 211-217, 2012.

SOROKA, I.; RAVINA, D. **Hot weather concreting with admixtures.** Cement and Concrete Composites, 20, 129-136, 1998.

SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado.** (Dissertação de Mestrado) Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

STARK, J. **Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis.** Cement and Concrete Research, 41, 666-678, 2011.

STRUBLE, L. J.; JI, X. **Viscosity of Portland Cement Paste as a Function of Concentration** – Advanced Cement Based Materials, 2, 62-69, Nova York, 1995.

STRUBLE, L. J.; SUN, G.K. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology** – Cap. 9 – Edited by V.S. Ramachandran and James J. Beaudoin, Nova York, 2001.

TASCA, M. **Estudo da Carbonatação Natural de Concretos com Pozolanas: Monitoramento em Longo Prazo e Análise da Microestrutura.** (Dissertação de Mestrado) Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TALERO, R.; PEDRAJAS, C.; RAHHAL, V. **Performance of Fresh Portland Cement Pastes – Determination of Some Specific Rheological Parameters.** Rheology - New Concepts, Applications and Methods, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** London, 1990.

TEIXEIRA, R. B.; PELISSER, F. **Análise da perda de resistência à compressão do concreto com adição de água para correção da perda de abatimento ao longo do tempo.** Revista de Iniciação Científica da UNESC, Vol. 5, No 1, 2007.

TORALLES-CARBONARI, B. M.; CAVALARO, S. H.; CASTANHA, J. C. M.; GUACELLI, PA A. G.; SILVA, C. C. **Utilização do método ultra-sônico para avaliação da performance**

do concreto de alto desempenho. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, IBRACON, Vol. 3, No 4, 494-511, 2010.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. **The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture.** Cement and Concrete Research, 27 (1), 37-50, 1997.

VIEIRA, L. B. P. **Causas e custos do desperdício de concreto.** 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis-SC, IBRACON, 2011.

WEIDMANN, D. F.; OLIVEIRA, A. L.; SOUZA, J.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; BIACHINI, M. **Avaliação do desempenho de aditivos redutores de água para o uso em centrais de concreto: estudo de caso,** 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves-RS, IBRACON, 2007.

YAHIA, A.; KHAYAT, K. H. **Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture.** Materials and Structures, vol 36 , 402-412, 2003.

YAMADA, K.; TAKAHASHI, T.; HANEHARA, S.; MATSUHISA, M. **Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer.** Cement and Concrete Research, 30, 197-207, 2000.

YE, H.; JIN, X.; FU, C.; JIN, N.; XU, Y.; HUANG, T. **Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation.** Construction and Building Materials, 112, 457-463, 2016.

XI Y.; BAZANT, Z. P.; JENNINGS, H. M. **Moisture Diffusion in Cementitious Materials.** Advanced Cement Based Materials, vol 1 , 248-257, 1994.

APÊNDICE A – Áreas de Histerese obtidas pelo ensaio de Reologia em Pastas

Neste apêndice serão apresentadas as áreas de histerese obtidas pelas curvas de cisalhamento, a cada hora de mistura até o tempo de 6 horas (definido na metodologia), em pastas para todas as dosagens estudadas nesta pesquisa.

O ajuste dessas curvas de cisalhamento (ascendente e descendente) foi feito através de um polinômio de segunda ordem. A área de histerese é obtida para as curvas de cisalhamento, por integração, pela relação (diferença) entre a curva ascendente e a curva descendente, para um ponto da matriz, conforme demonstrado na figura A1.

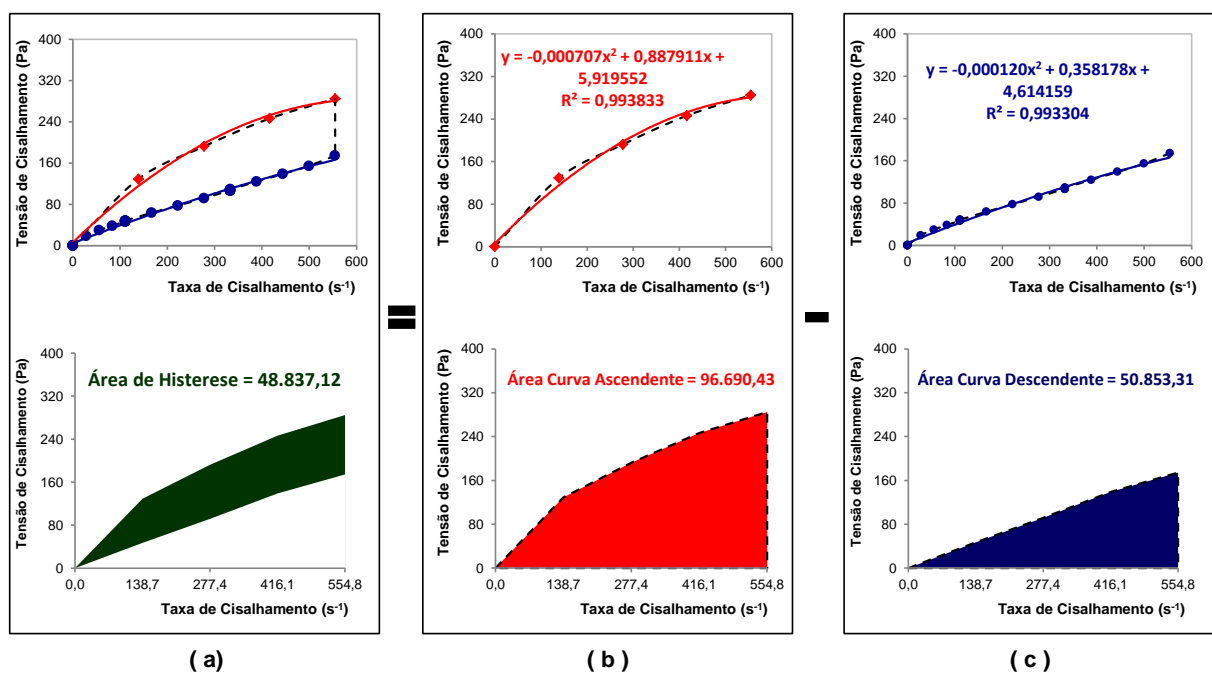


Figura A1: a) detalhamento da área de histerese para pasta produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,40 pela relação entre b) curva ascendente e c) curva descendente

As equações correspondentes a cada curva, com seus respectivos coeficientes de ajuste, estão registradas nas figuras A2 até A11. Um resumo com todas as áreas de histerese determinadas pelas curvas de cisalhamento de toda a matriz estudada está apresentado na tabela A1.

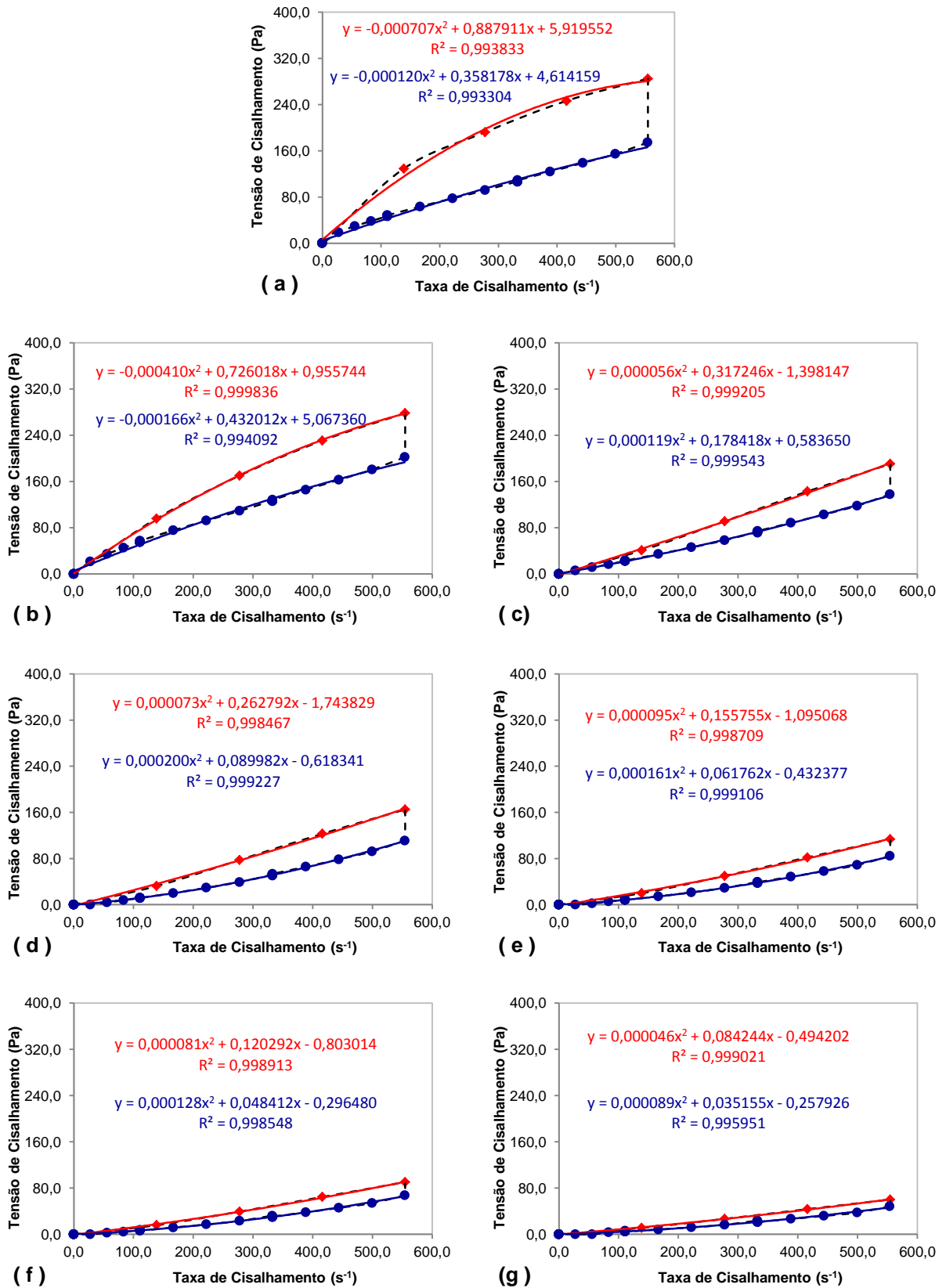


Figura A2: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,40, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

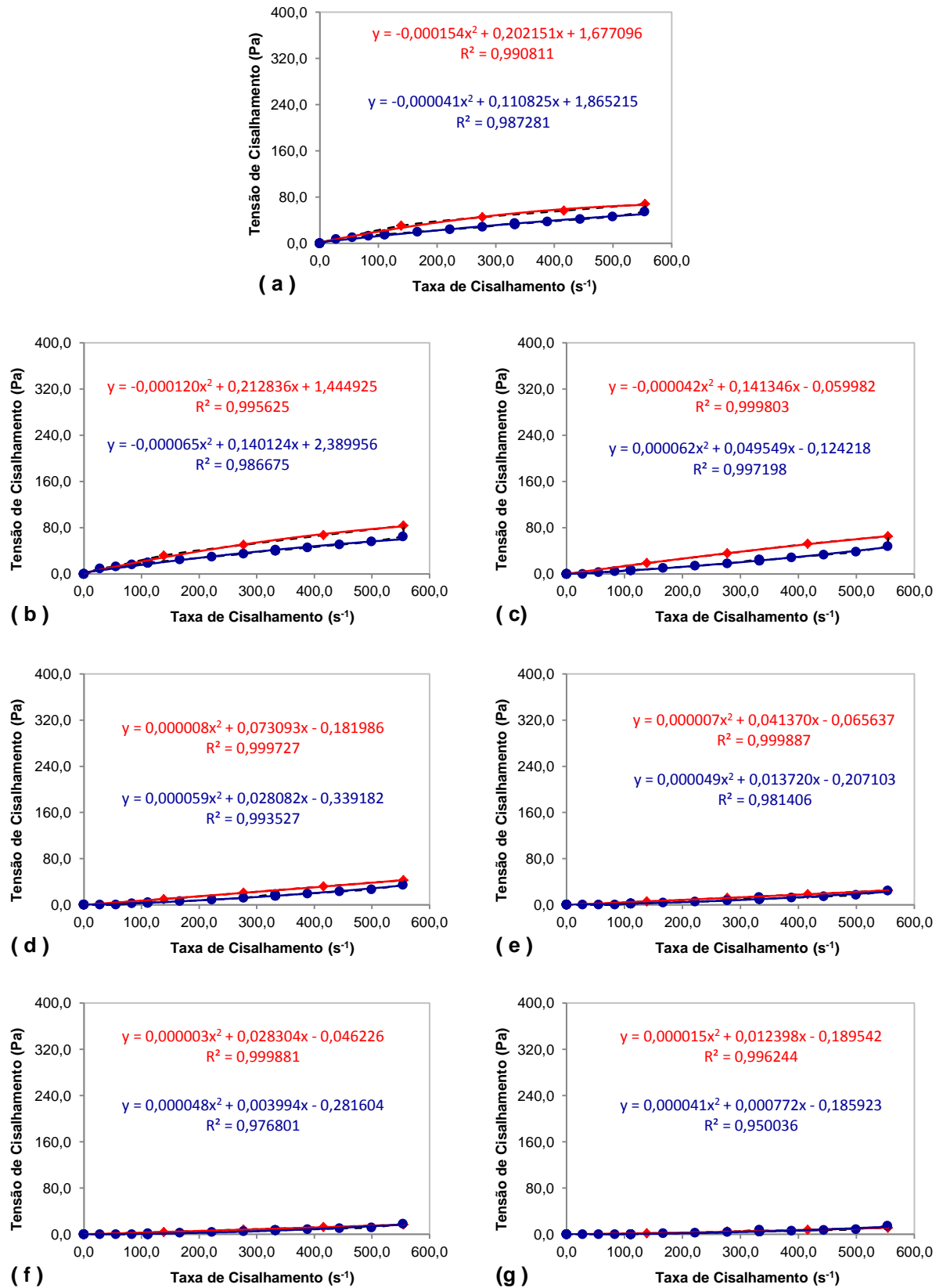


Figura A3: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

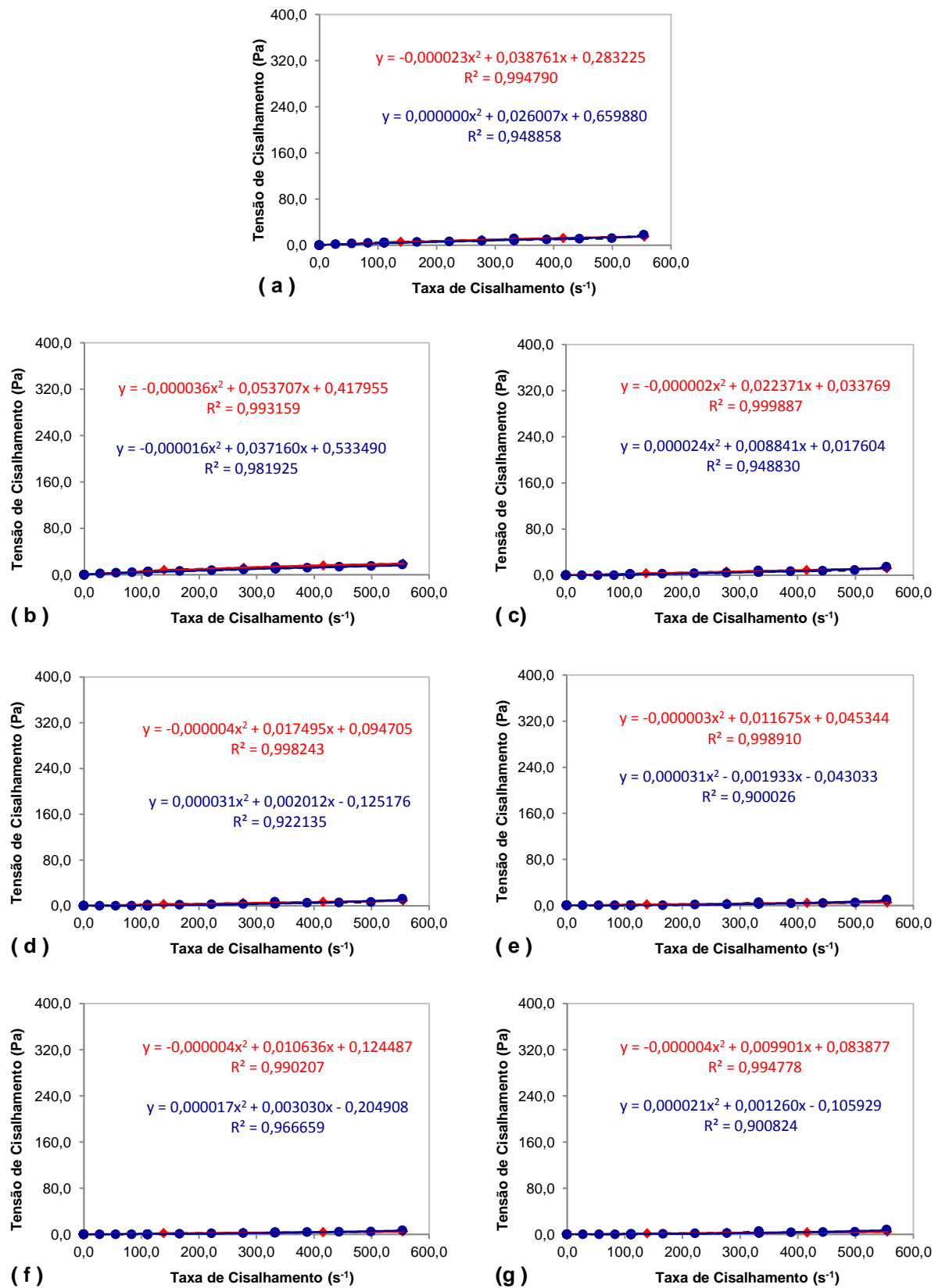


Figura A4: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,68, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

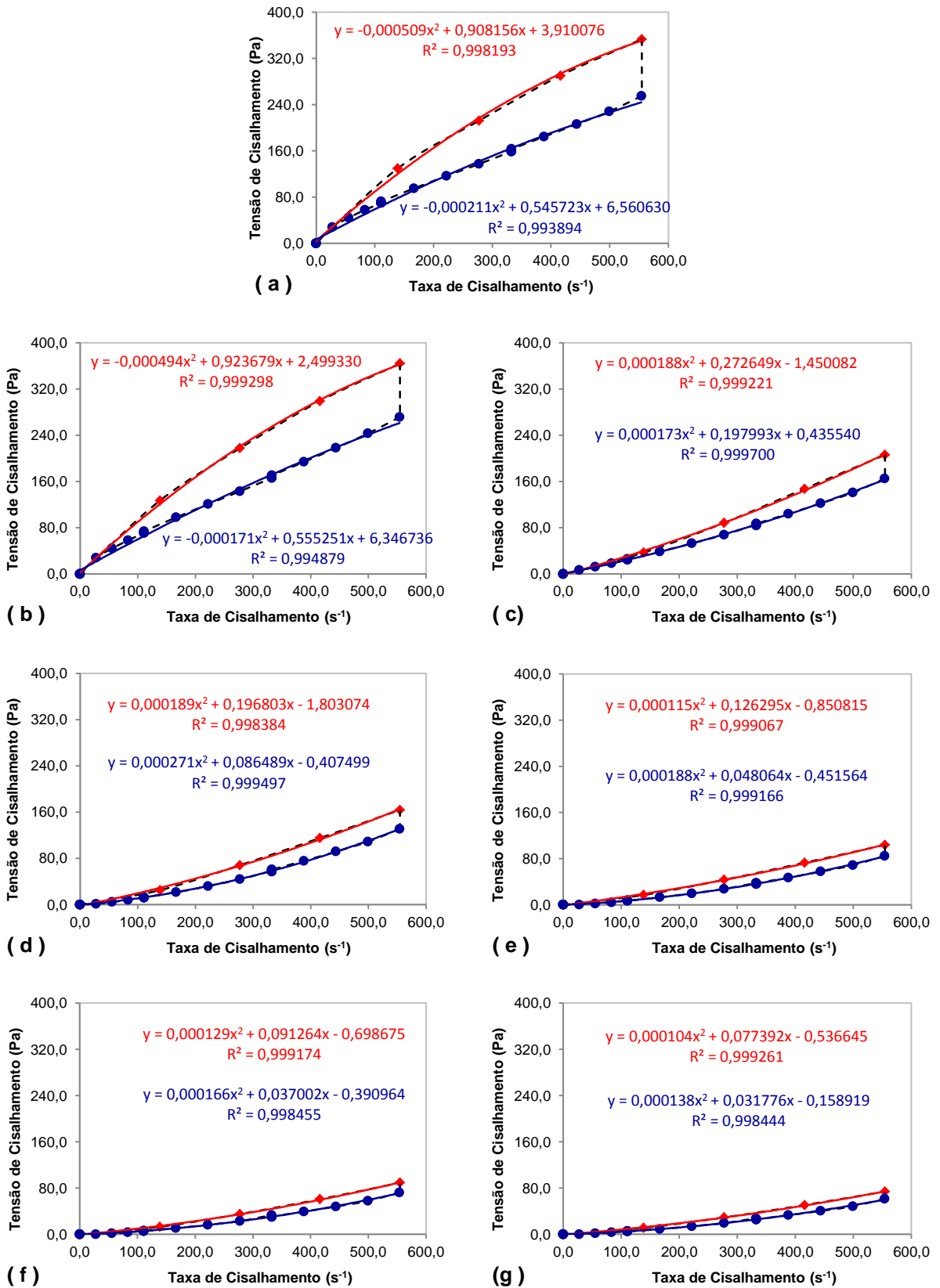


Figura A5: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,40, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

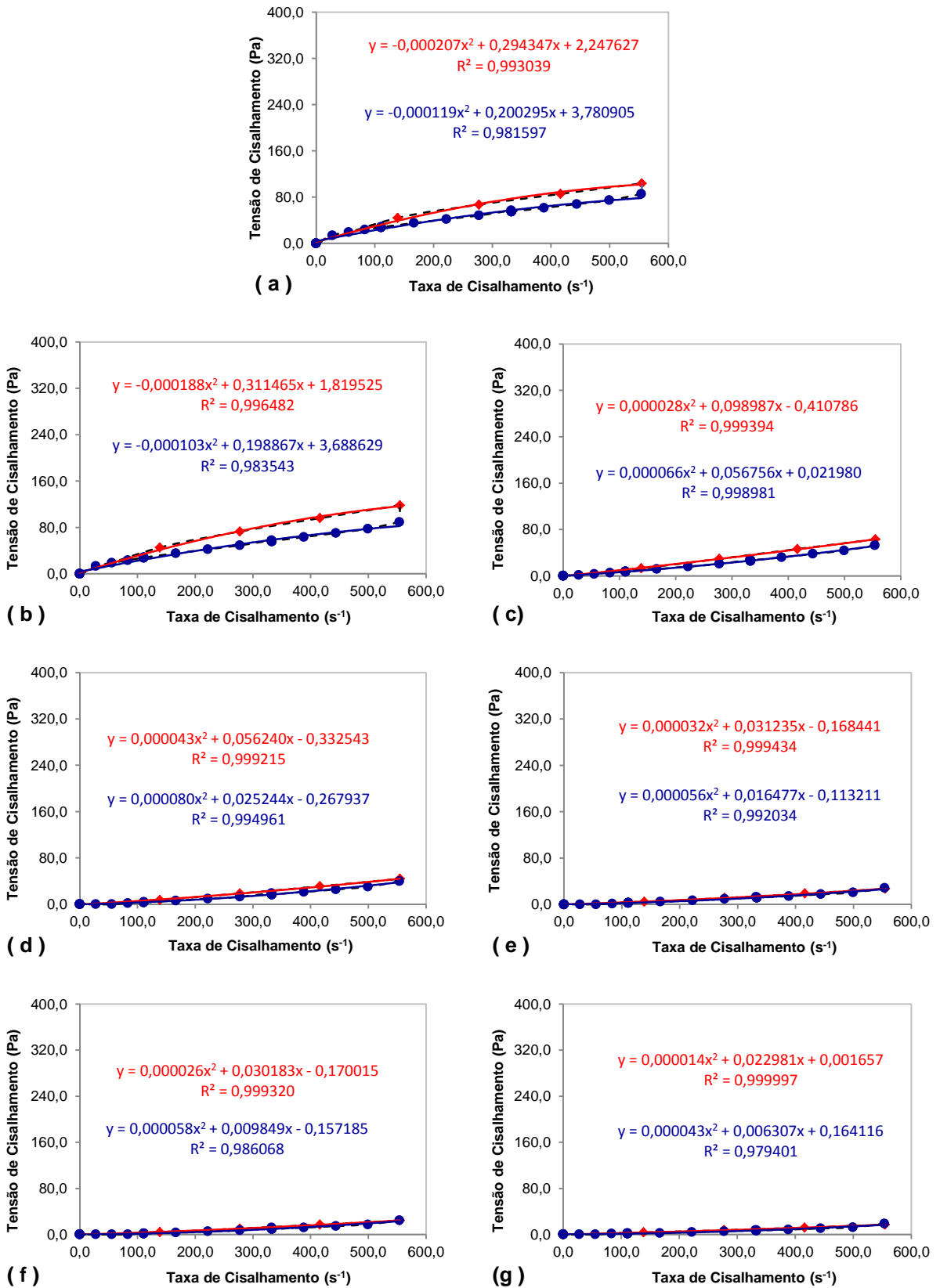


Figura A6: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

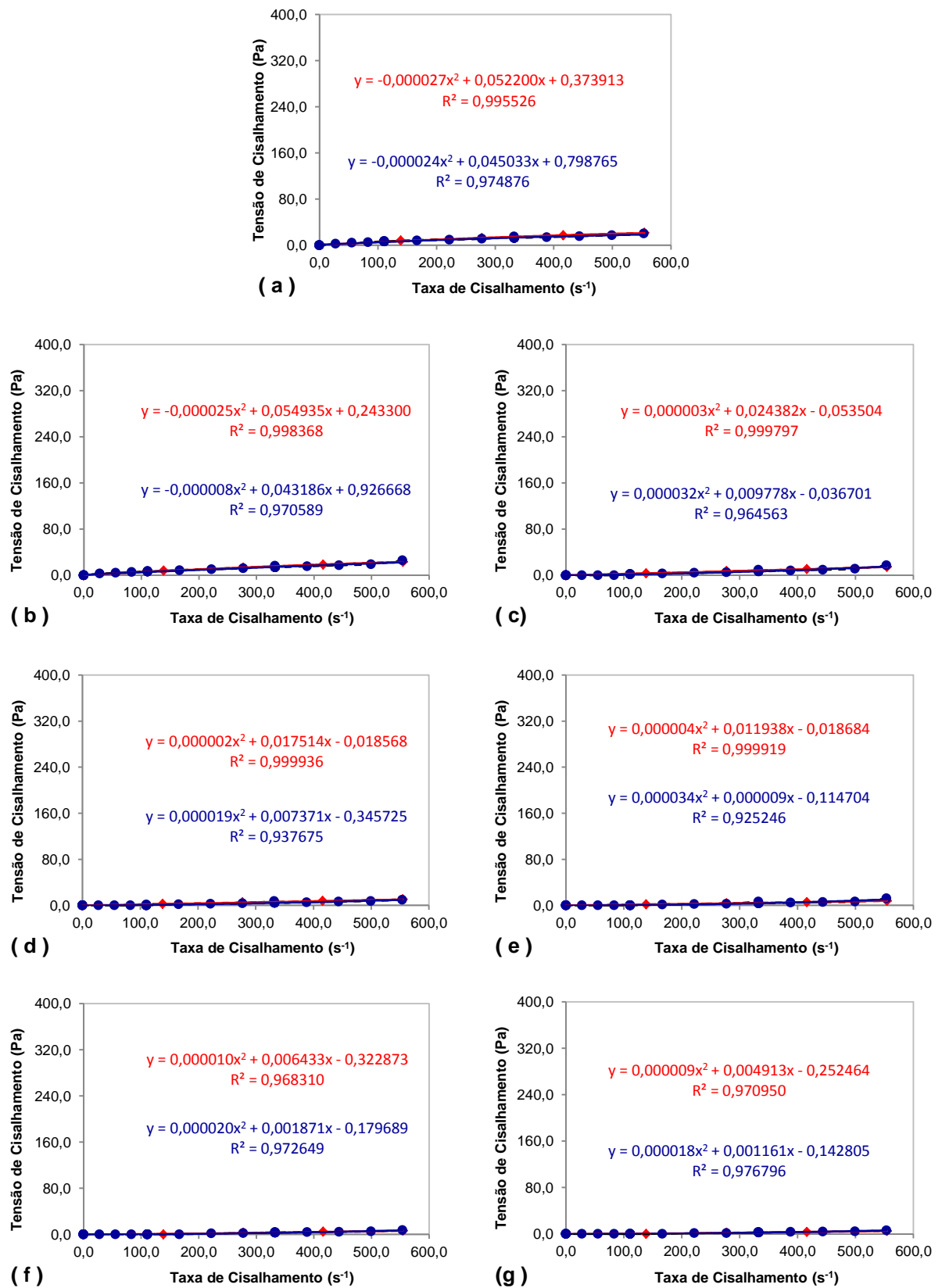


Figura A7: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,68, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

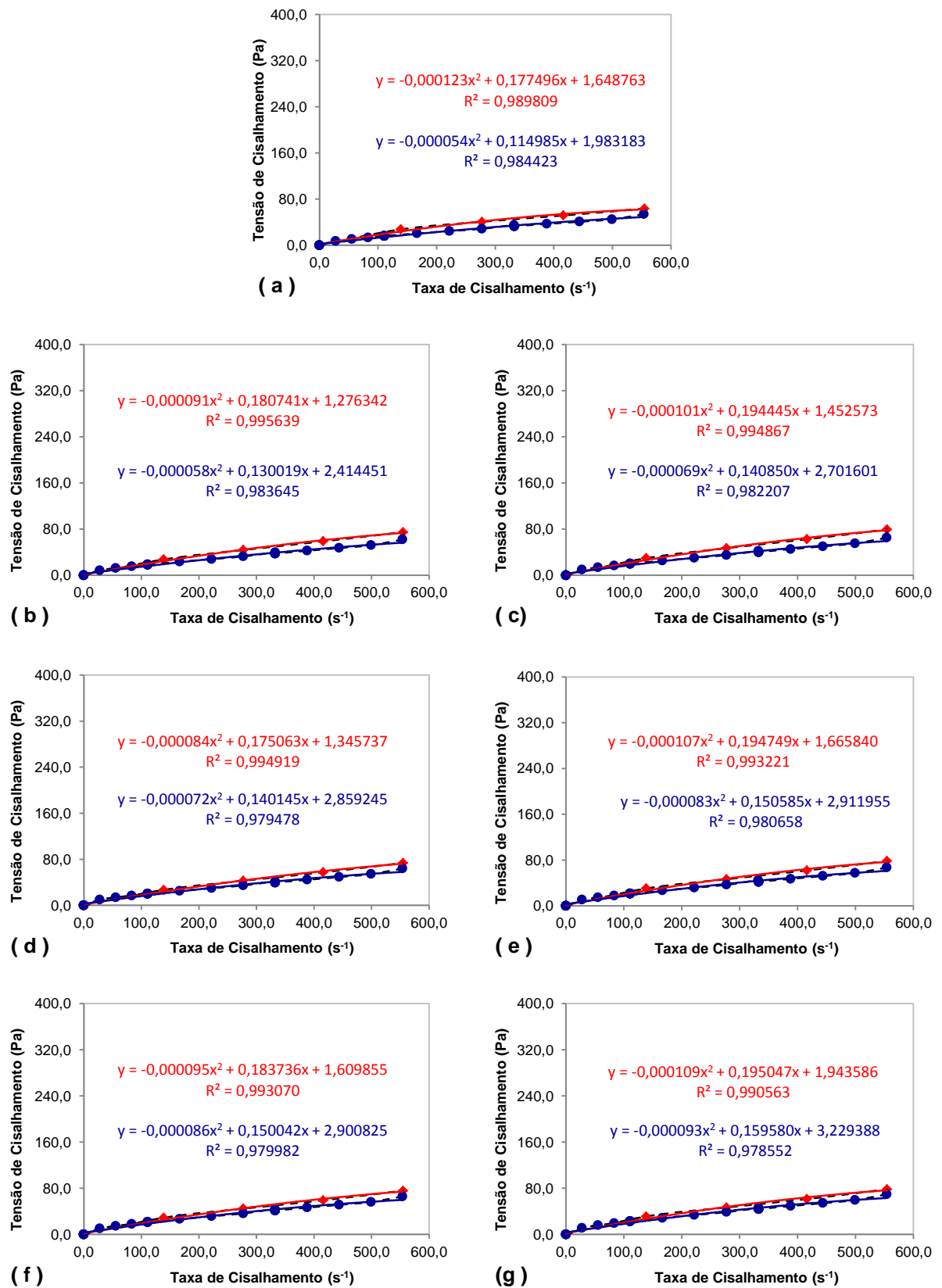


Figura A8: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura sem processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

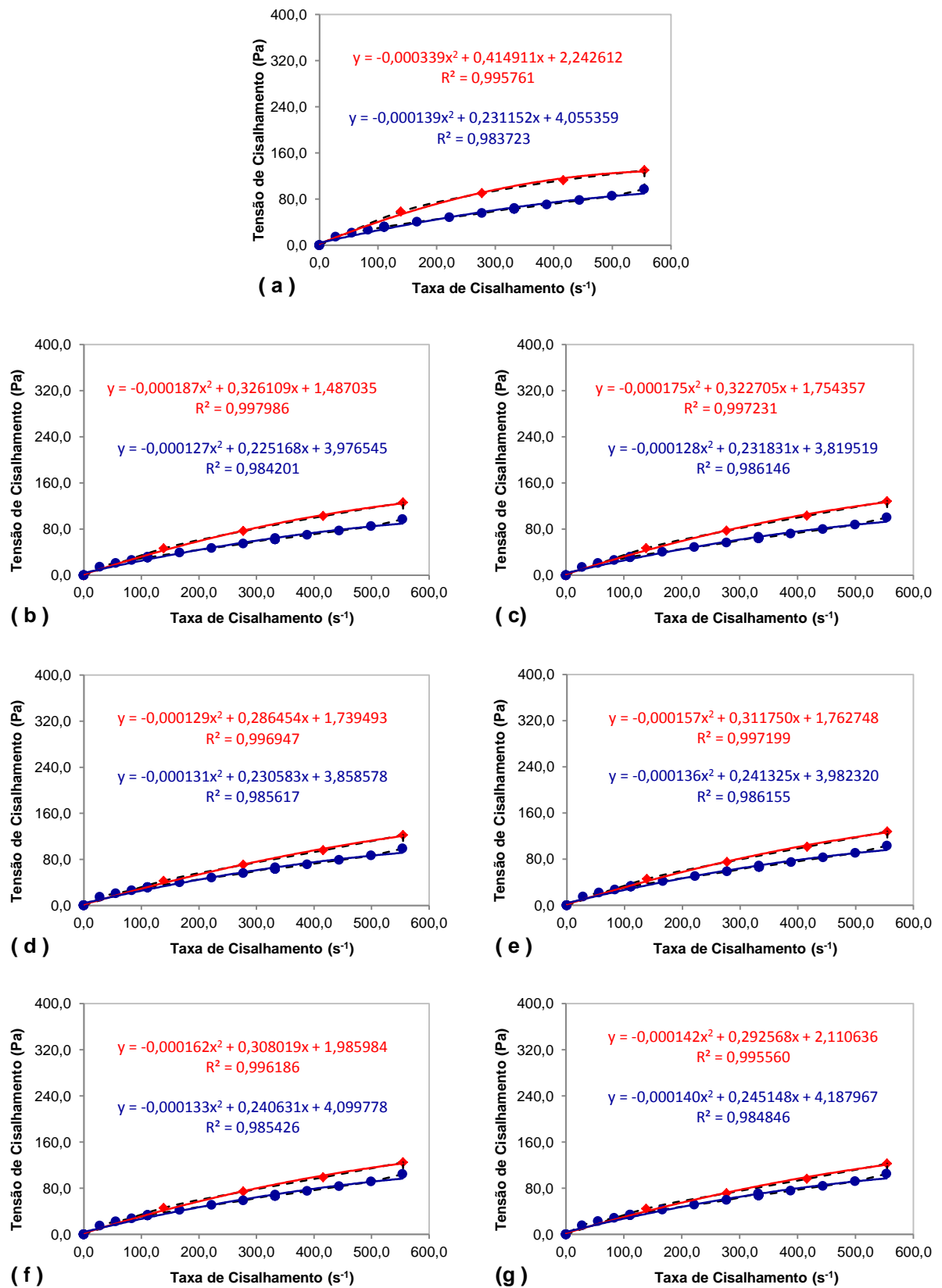


Figura A9: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, em mistura sem processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

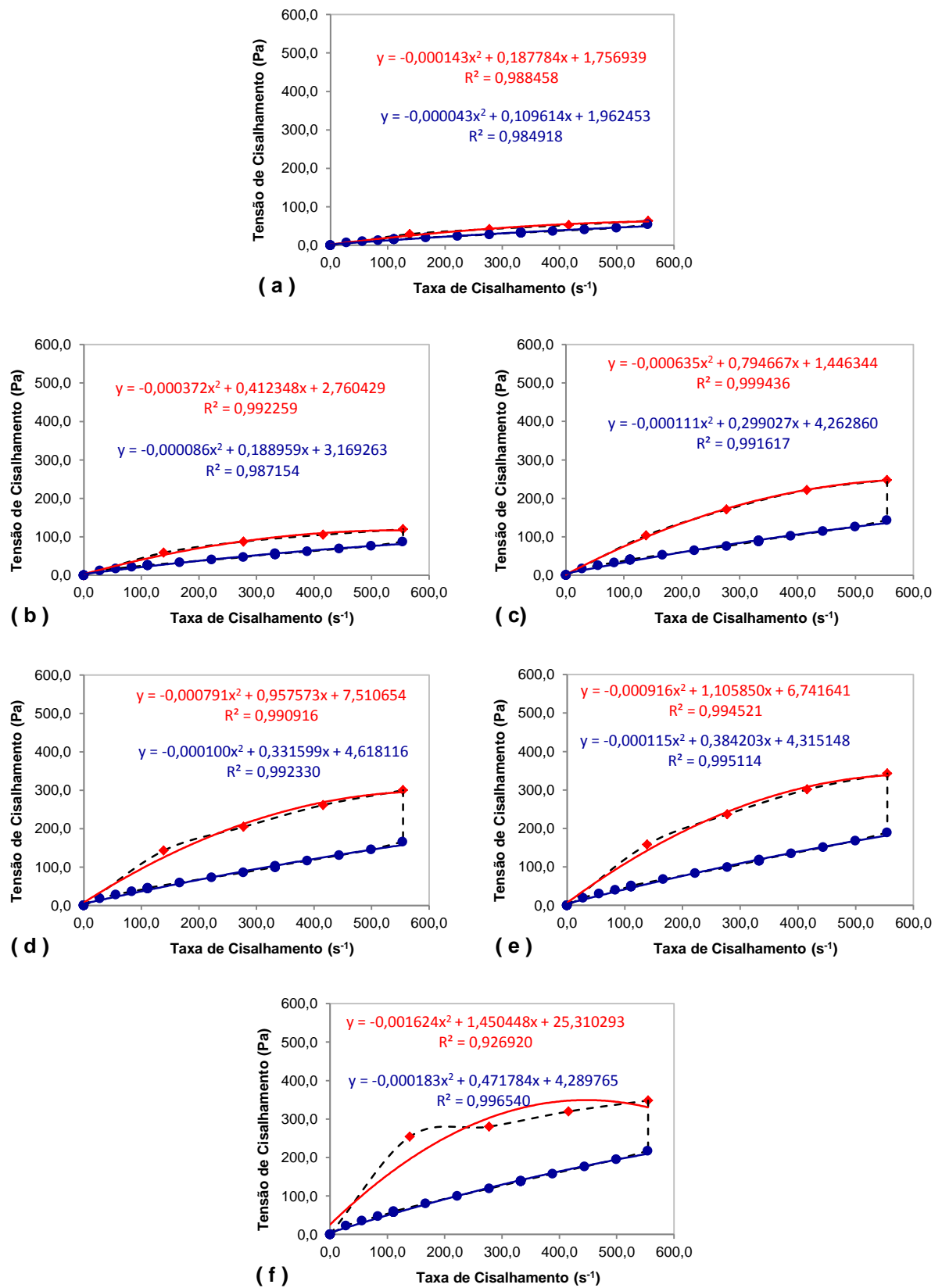


Figura A10: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, parada sem processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas e f) 5 horas

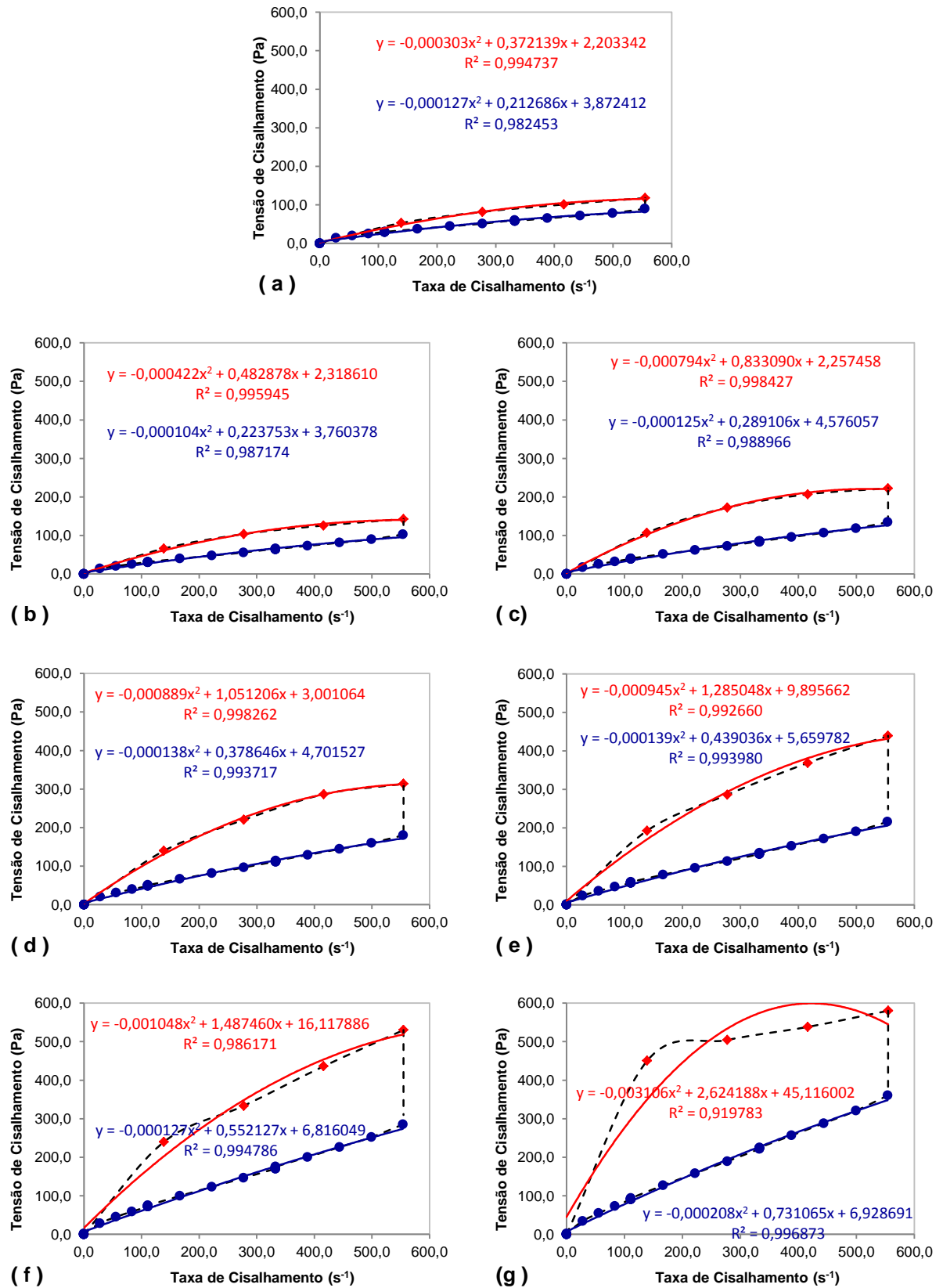


Figura A11: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a área de histerese na pasta, parada sem processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e relação a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

Tabela A1: Detalhamento das áreas de histerese, obtidas pelo ajuste das curvas de cisalhamento, para cada ponto da matriz estudada na pesquisa

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | | ÁREAS DE HISTERESE (Pa.s ¹) | | | | | | |
|--------------------------|------|---------------------------------|--------------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Cimento | a/c | Processo adotado | Curvas de Ajustes | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | Curva ascendente: | 99.690,43 | 88.927,07 | 51.236,64 | 43.631,99 | 28.771,08 | 22.678,38 | 15.309,56 |
| | | | Curva descendente: | 50.853,31 | 59.849,45 | 34.556,45 | 24.889,92 | 18.429,99 | 14.572,34 | 10.333,46 |
| | | | Diferença: | 48.837,12 | 29.077,62 | 16.680,19 | 18.742,07 | 10.341,08 | 8.106,03 | 4.976,09 |
| CP II Z 32 | 0,52 | Pastas em mistura com redosagem | Curva ascendente: | 23.275,65 | 26.726,66 | 19.329,32 | 11.603,54 | 6.728,95 | 4.501,15 | 2.656,76 |
| | | | Curva descendente: | 15.757,11 | 19.191,25 | 11.085,98 | 7.492,14 | 4.785,86 | 3.190,75 | 2.349,51 |
| | | | Diferença: | 7.518,54 | 7.535,42 | 8.243,34 | 4.111,40 | 1.943,09 | 1.310,40 | 307,25 |
| CP II Z 32 | 0,68 | Pastas em mistura com redosagem | Curva ascendente: | 4.813,28 | 6.448,24 | 3.347,82 | 2.517,36 | 1.651,19 | 1.478,27 | 1.342,62 |
| | | | Curva descendente: | 4.368,62 | 5.104,19 | 2.736,56 | 2.004,82 | 1.443,25 | 1.320,33 | 1.330,53 |
| | | | Diferença: | 444,66 | 1.344,05 | 611,26 | 512,54 | 207,94 | 157,94 | 12,09 |
| CP II Z 32 | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | Curva ascendente: | 21.230,10 | 23.344,43 | 24.982,04 | 22.907,54 | 24.805,61 | 23.762,71 | 24.891,72 |
| | | | Curva descendente: | 15.722,79 | 18.048,12 | 19.248,19 | 19.056,38 | 20.066,20 | 19.805,69 | 21.057,43 |
| | | | Diferença: | 5.507,31 | 5.296,31 | 5.733,85 | 3.851,16 | 4.739,41 | 3.957,02 | 3.834,29 |
| CP II Z 32 | 0,52 | Pasta sem mistura sem redosagem | Curva ascendente: | 21.735,00 | 43.817,10 | 86.956,76 | 106.512,72 | 121.790,75 | 144.825,28 | |
| | | | Curva descendente: | 15.510,84 | 25.944,00 | 42.067,29 | 47.903,42 | 54.977,32 | 64.571,32 | |
| | | | Diferença: | 6.224,16 | 17.873,10 | 44.889,47 | 58.609,31 | 66.813,43 | 80.253,96 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | Curva ascendente: | 112.962,07 | 115.422,25 | 51.858,12 | 40.046,39 | 25.511,11 | 21.001,12 | 17.533,01 |
| | | | Curva descendente: | 75.616,67 | 79.241,30 | 40.560,75 | 28.510,85 | 17.848,13 | 14.926,98 | 12.657,59 |
| | | | Diferença: | 37.345,40 | 36.180,95 | 11.297,37 | 11.535,54 | 7.662,98 | 6.074,13 | 4.875,43 |
| CP IV 32 RS | 0,52 | Pastas em mistura com redosagem | Curva ascendente: | 34.764,36 | 38.242,88 | 16.600,19 | 10.918,62 | 6.535,20 | 6.030,88 | 4.334,65 |
| | | | Curva descendente: | 26.149,51 | 26.789,31 | 12.503,95 | 8.290,28 | 5.660,72 | 4.730,11 | 3.509,40 |
| | | | Diferença: | 8.614,86 | 11.453,57 | 4.096,24 | 2.628,34 | 874,48 | 1.300,78 | 825,25 |
| CP IV 32 RS | 0,68 | Pastas em mistura com redosagem | Curva ascendente: | 6.704,18 | 7.166,49 | 3.893,51 | 2.798,98 | 2.054,60 | 1.380,15 | 1.128,36 |
| | | | Curva descendente: | 6.007,65 | 6.705,12 | 3.305,99 | 2.024,14 | 1.873,13 | 1.326,72 | 1.124,07 |
| | | | Diferença: | 696,54 | 461,36 | 587,52 | 774,84 | 181,47 | 53,43 | 4,29 |
| CP IV 32 RS | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | Curva ascendente: | 45.802,72 | 40.369,07 | 40.676,57 | 37.707,70 | 40.019,85 | 39.284,88 | 38.114,57 |
| | | | Curva descendente: | 29.912,25 | 29.630,66 | 30.512,06 | 30.170,89 | 31.608,14 | 31.737,27 | 32.082,91 |
| | | | Diferença: | 15.890,47 | 10.738,41 | 10.164,51 | 7.536,81 | 8.411,71 | 7.547,61 | 6.031,66 |
| CP IV 32 RS | 0,52 | Pasta sem mistura sem redosagem | Curva ascendente: | 41.247,49 | 51.580,50 | 84.269,36 | 112.842,61 | 149.468,68 | 178.209,21 | 252.093,91 |
| | | | Curva descendente: | 27.651,89 | 30.602,19 | 39.917,27 | 53.027,22 | 62.796,05 | 81.525,50 | 104.516,06 |
| | | | Diferença: | 13.595,60 | 20.978,31 | 44.352,09 | 59.815,38 | 86.672,63 | 96.683,71 | 147.577,85 |

APÊNDICE B – Tensões de Escoamento e Viscosidades obtidas pelo ensaio de Reologia em Pastas

Para determinação dos parâmetros reológicos, tensão de escoamento e viscosidade plástica, conforme já explicado no trabalho, o ajuste das curvas de cisalhamento obtidas nas pastas através da utilização do reômetro, foi feito através do modelo de Herschel-Bulkey (HB) que fornece uma relação da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento com base em uma função de potência.

Definindo, pelo modelo utilizado, a equação para cada ponto da matriz estudada em função do comportamento apresentando pela equação, foi possível caracterizar o comportamento da mistura como sendo binghamiano ou dilatante, conforme ilustrado na figura 18, que mostra os diferentes comportamentos que um fluido pode apresentar. A tabela B1 detalha essa caracterização.

Tabela B1: Caracterização dos comportamentos de fluxos das misturas

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA MISTURA | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CPI II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,68 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | - |
| CPI IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,68 | | binghamiano | binghamiano | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante | dilatante |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano | binghamiano |

Quando não há interferência do aditivo superplastificante, que muda o comportamento do fluxo obtém-se, conforme apresentado na literatura, comportamento binghamiano. Os modelos matemáticos finais adotados para cada ponto da matriz com seus respectivos coeficientes de ajuste estão detalhados nas figuras B1 até B10, respectivamente.

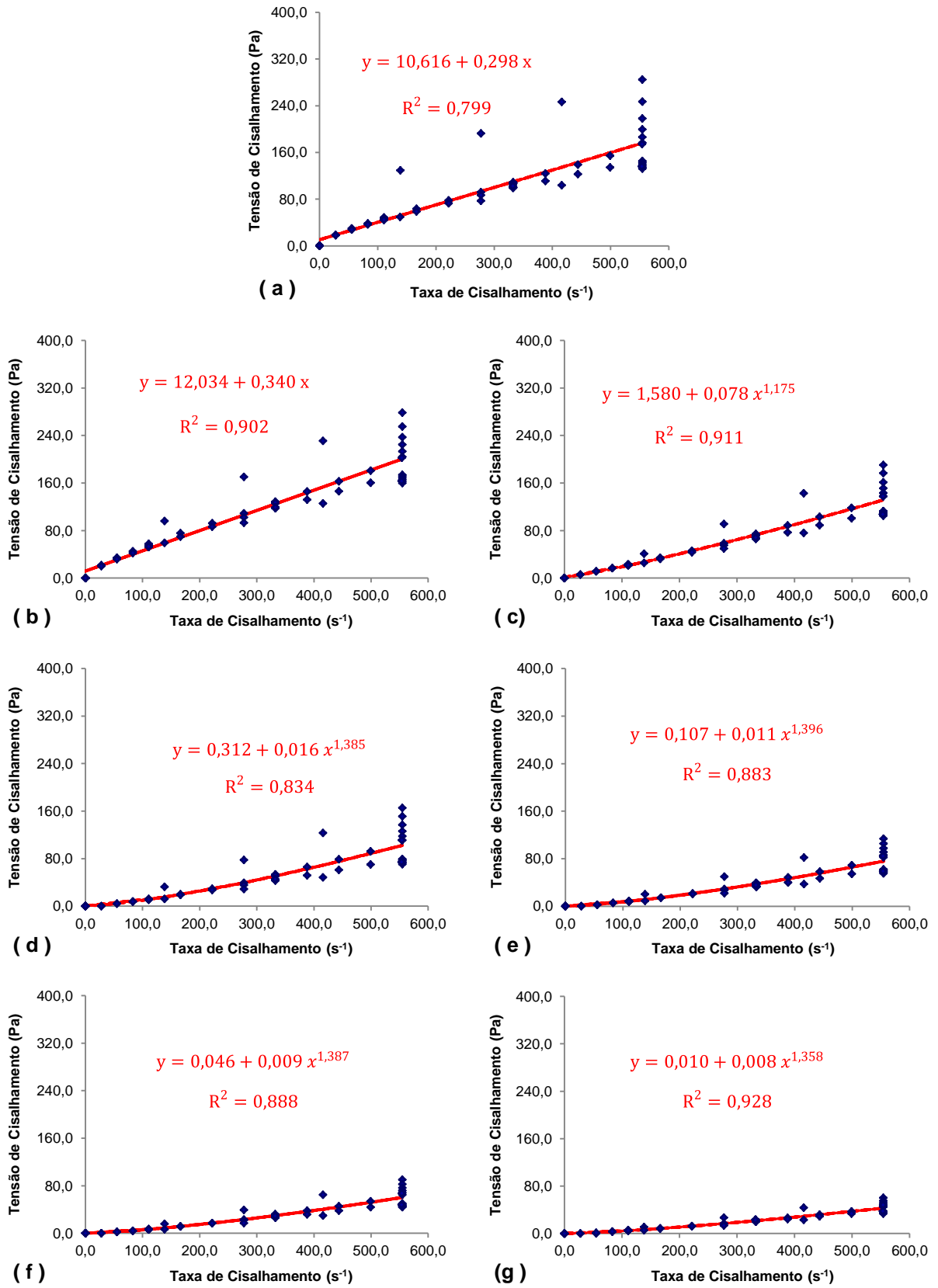


Figura B1: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e a/c=0,40, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

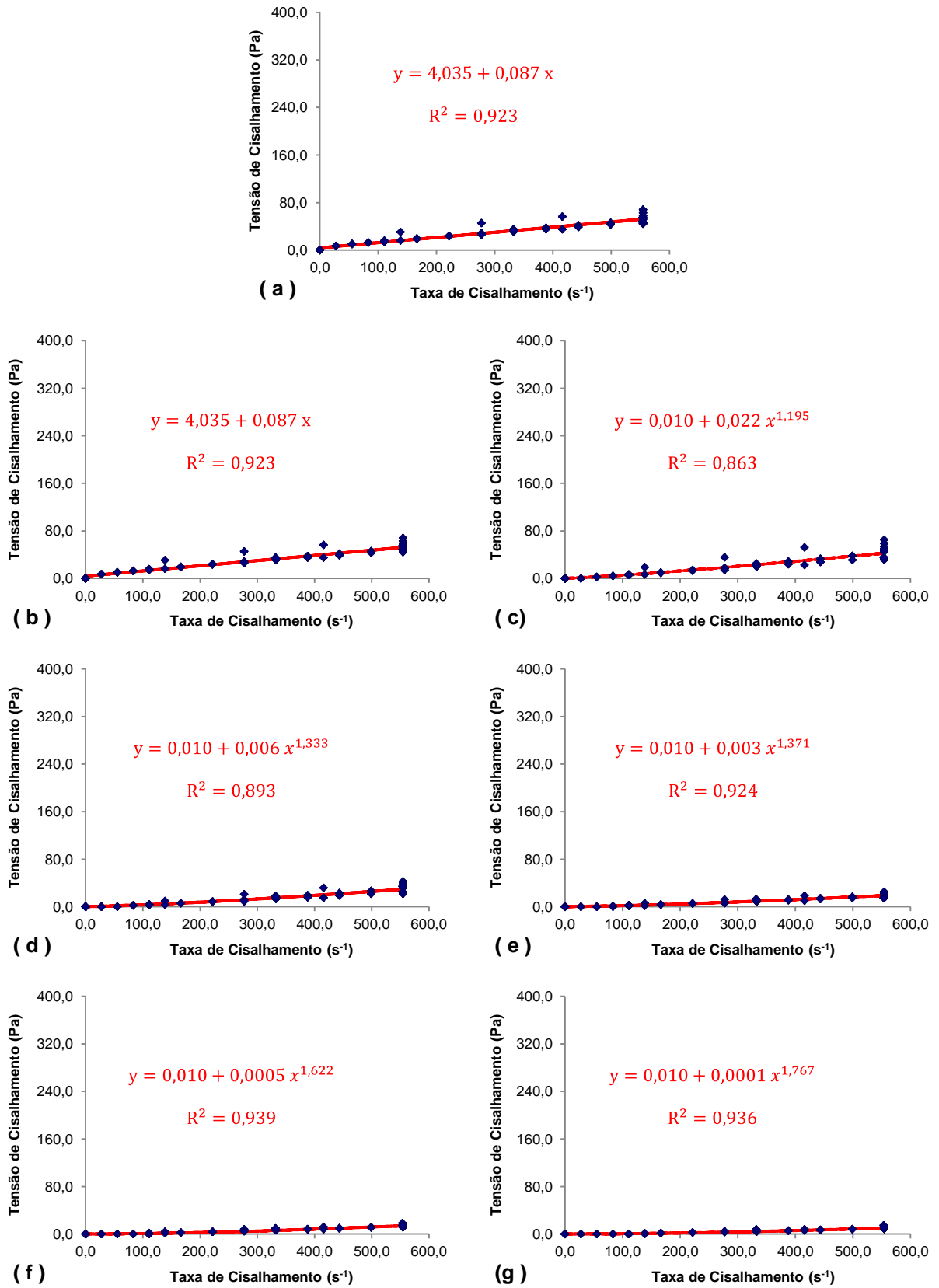


Figura B2: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

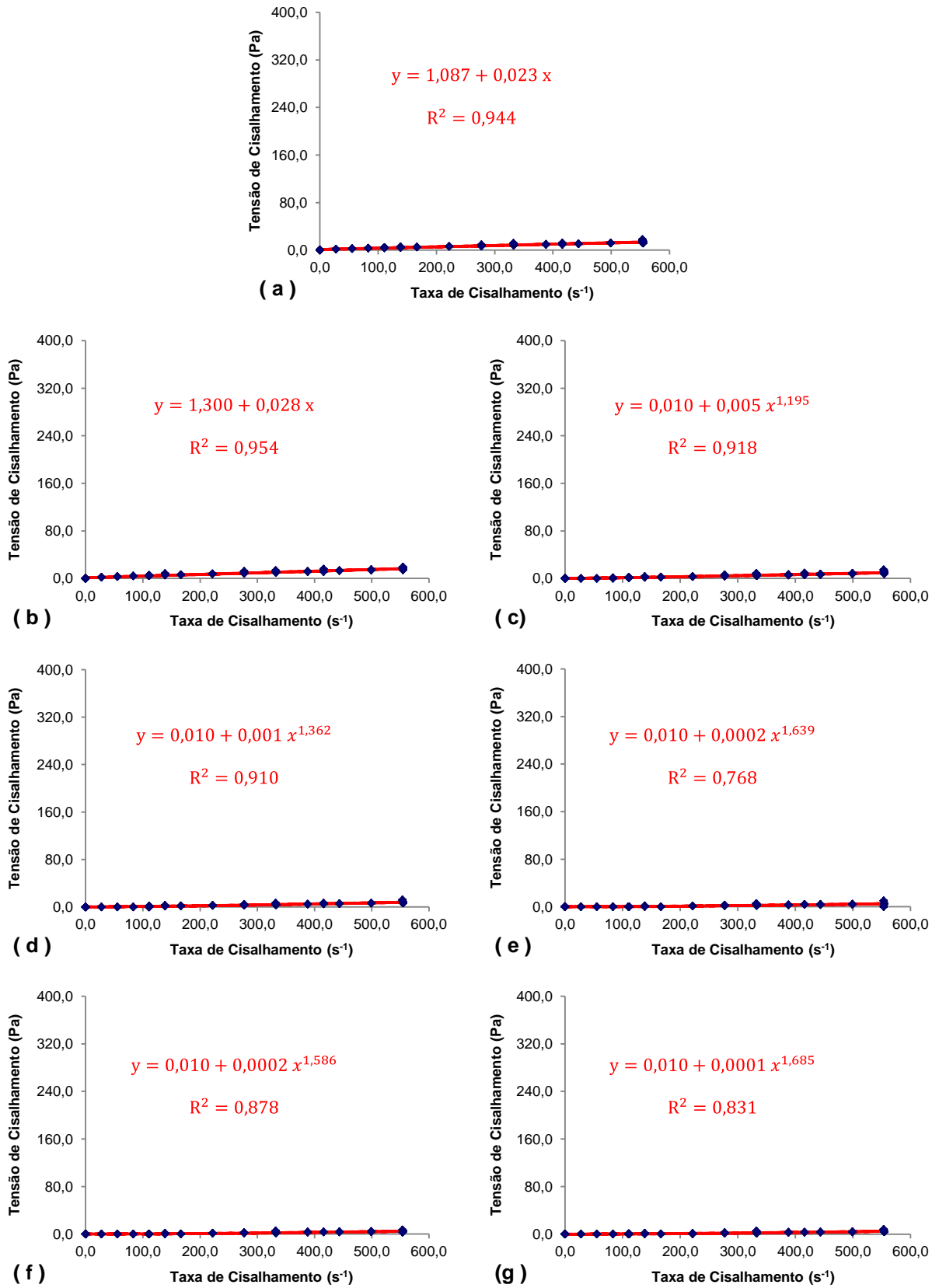


Figura B3: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e a/c=0,68, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

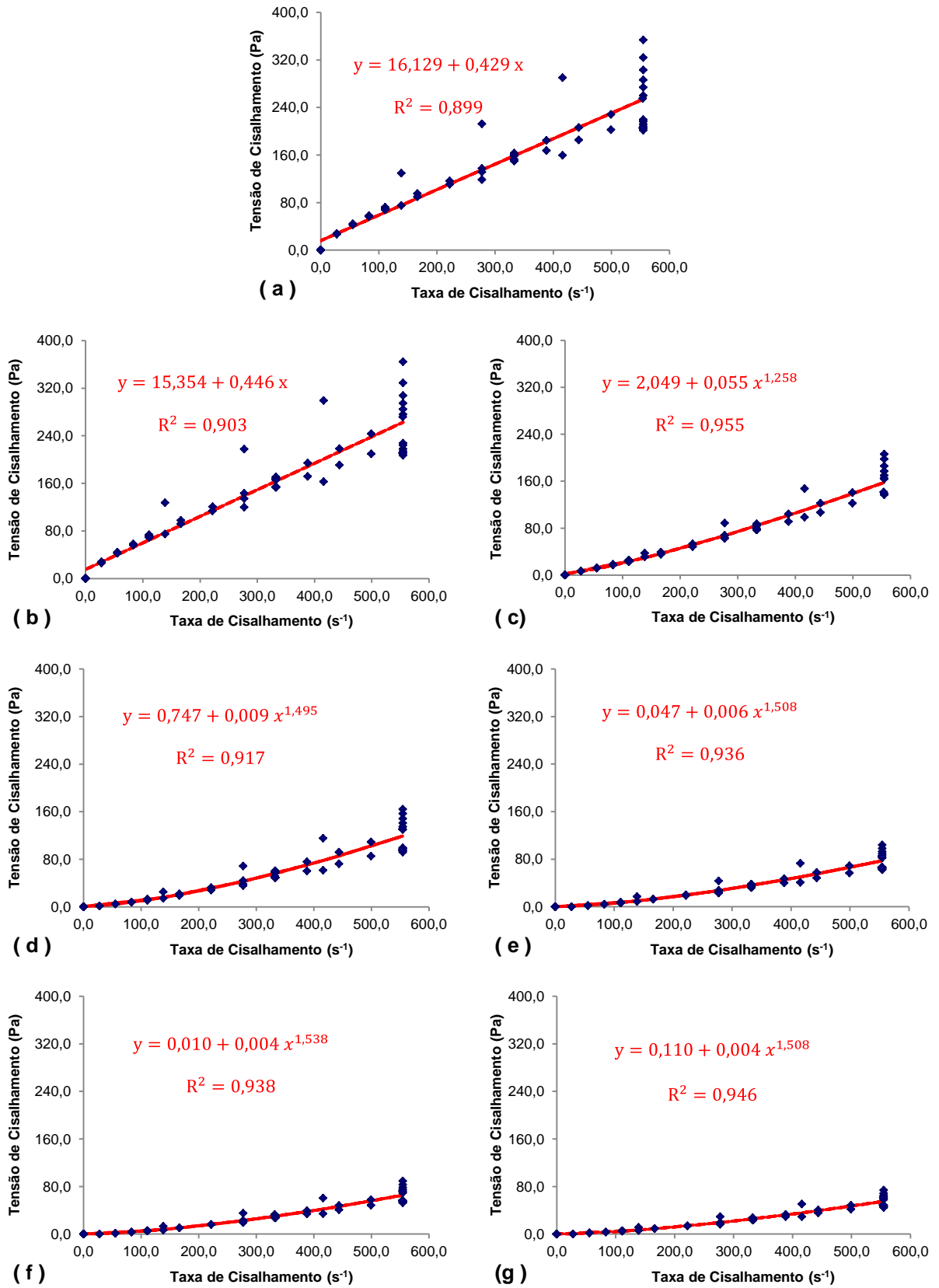


Figura B4: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e a/c=0,40, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

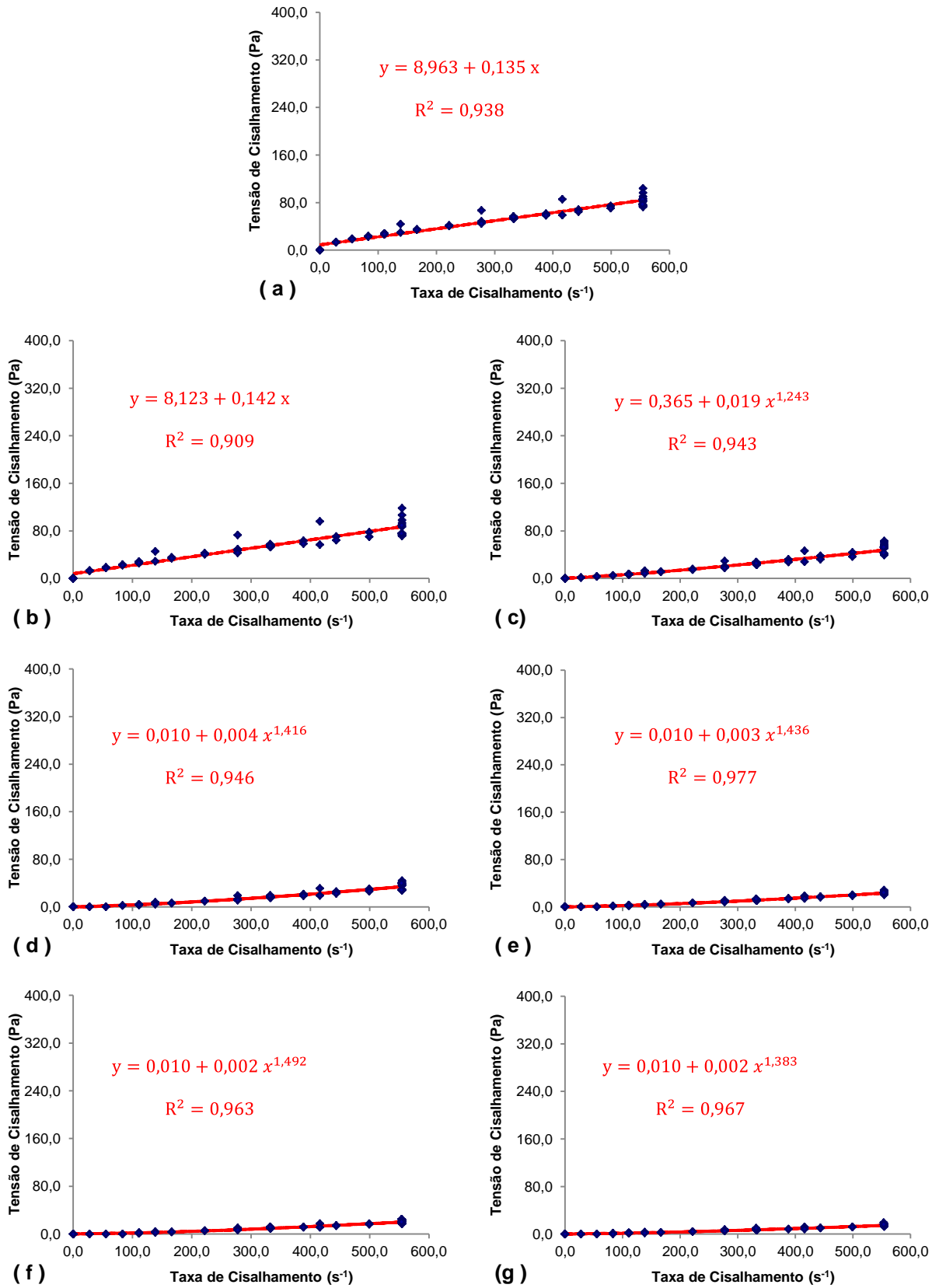


Figura B5: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

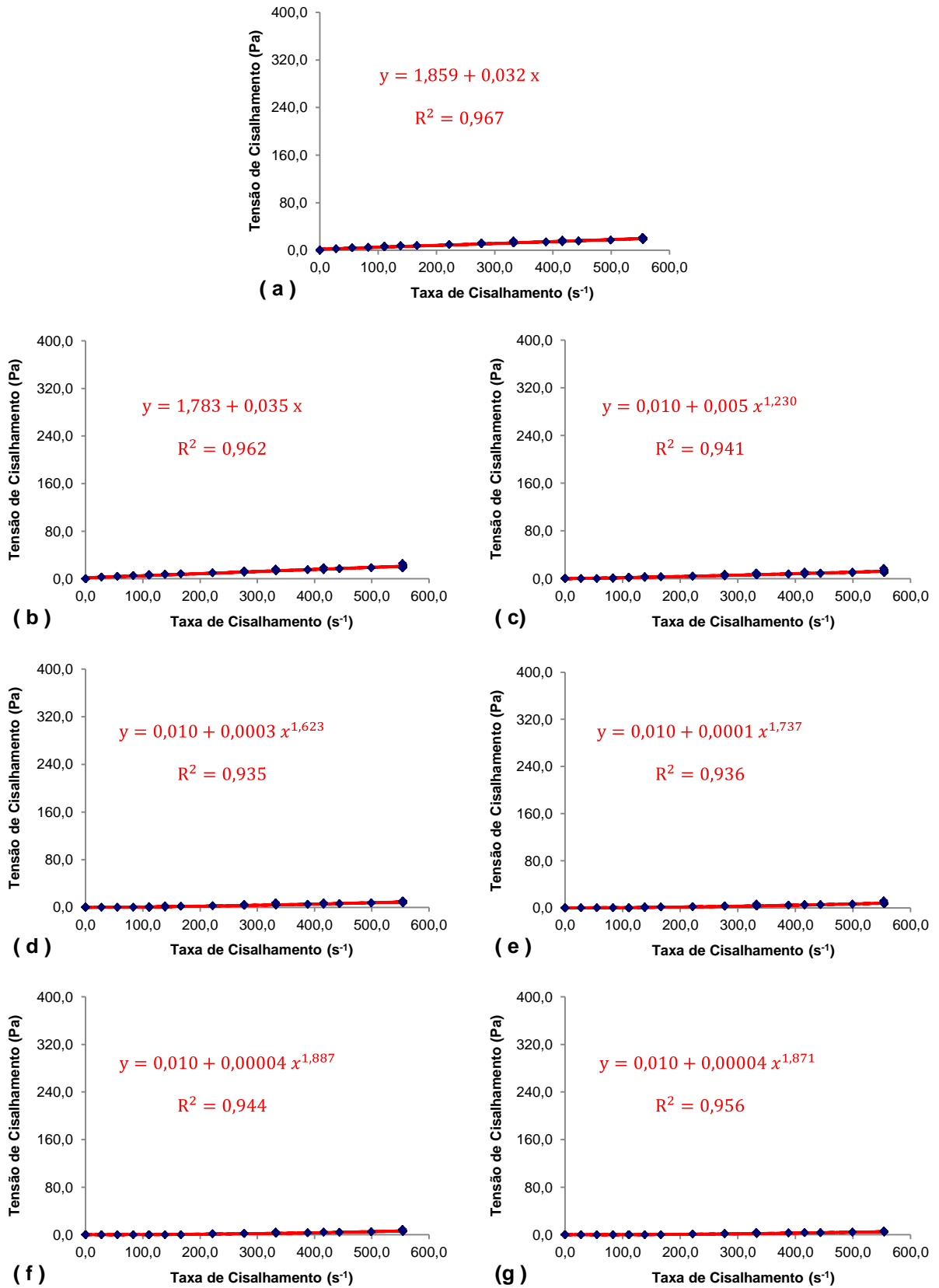


Figura B6: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura com processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e a/c=0,68, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

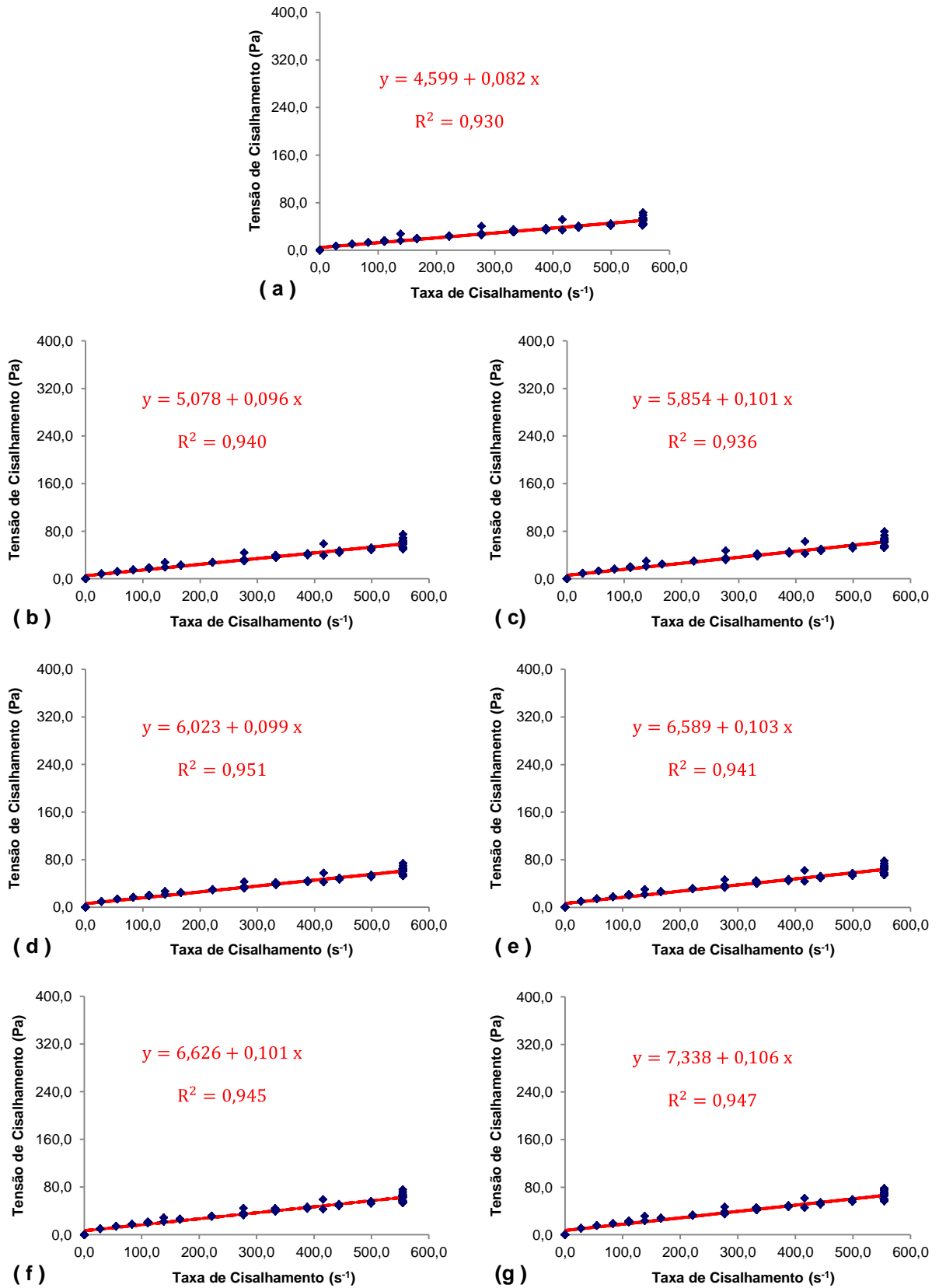


Figura B7: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura sem processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

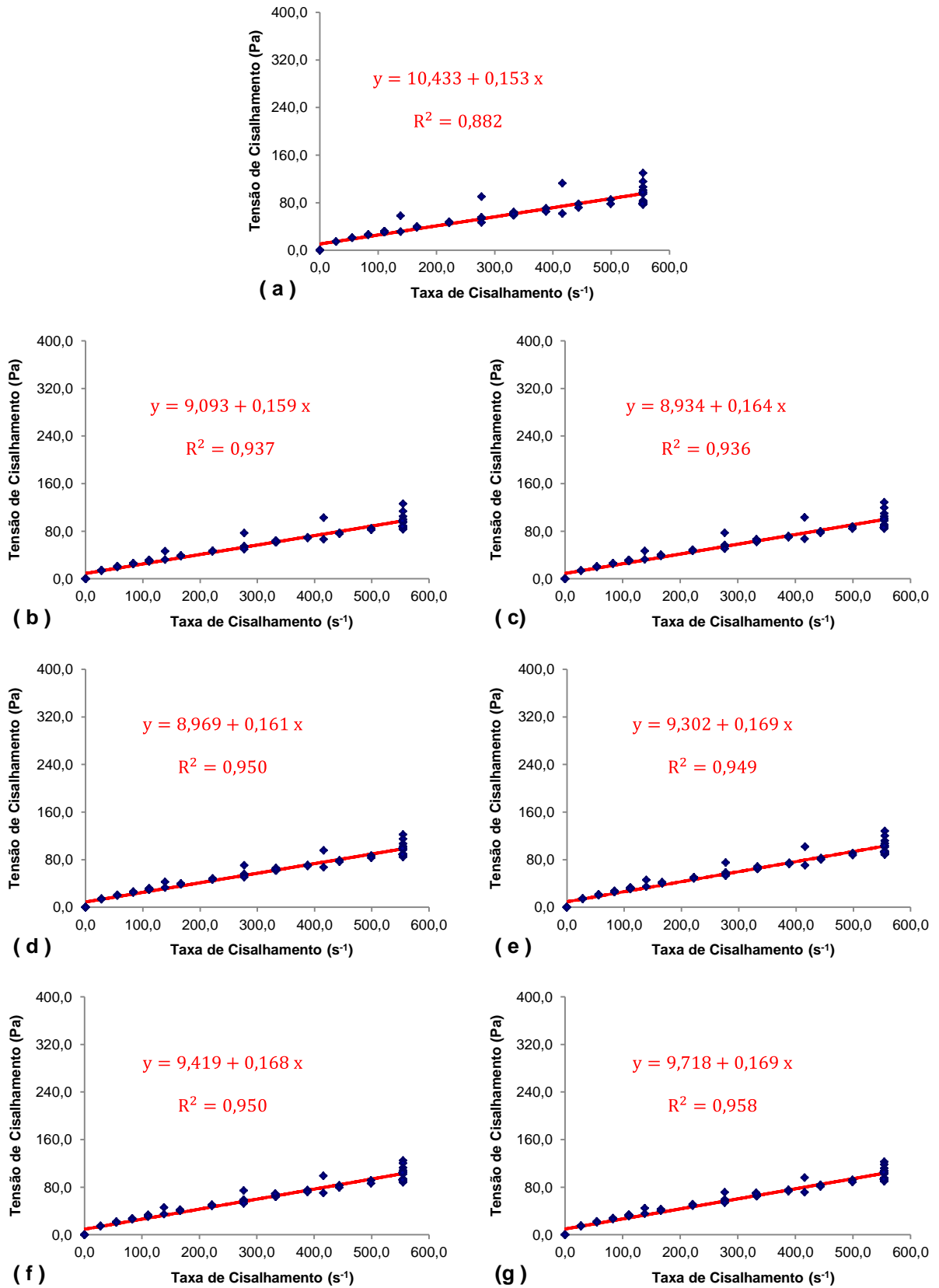


Figura B8: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta em mistura sem processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS e a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

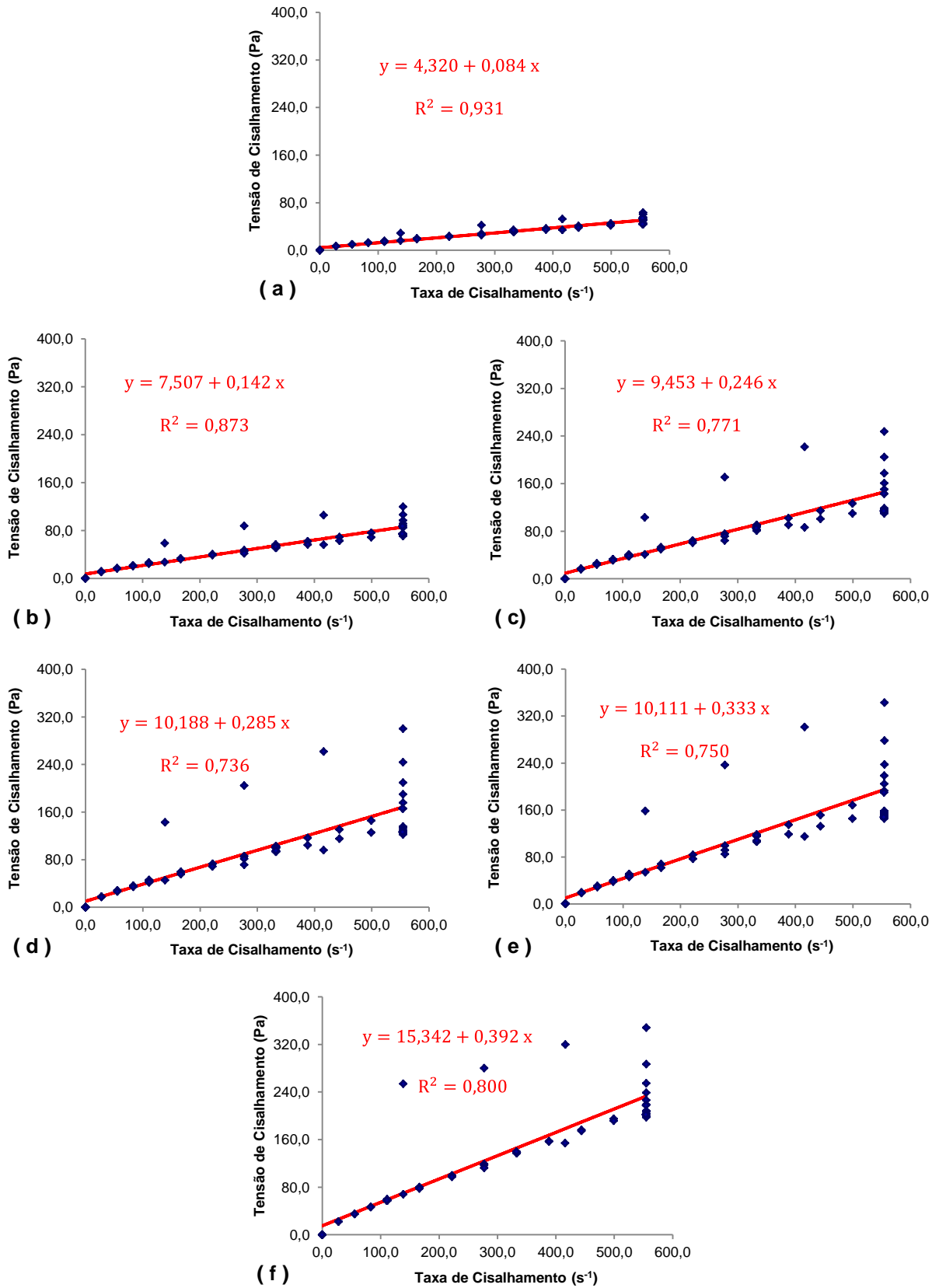


Figura B9: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar a tensão de escoamento e viscosidade na pasta parada sem processo de redosagem, produzida com cimento CP II Z 32 e a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas e f) 5 horas

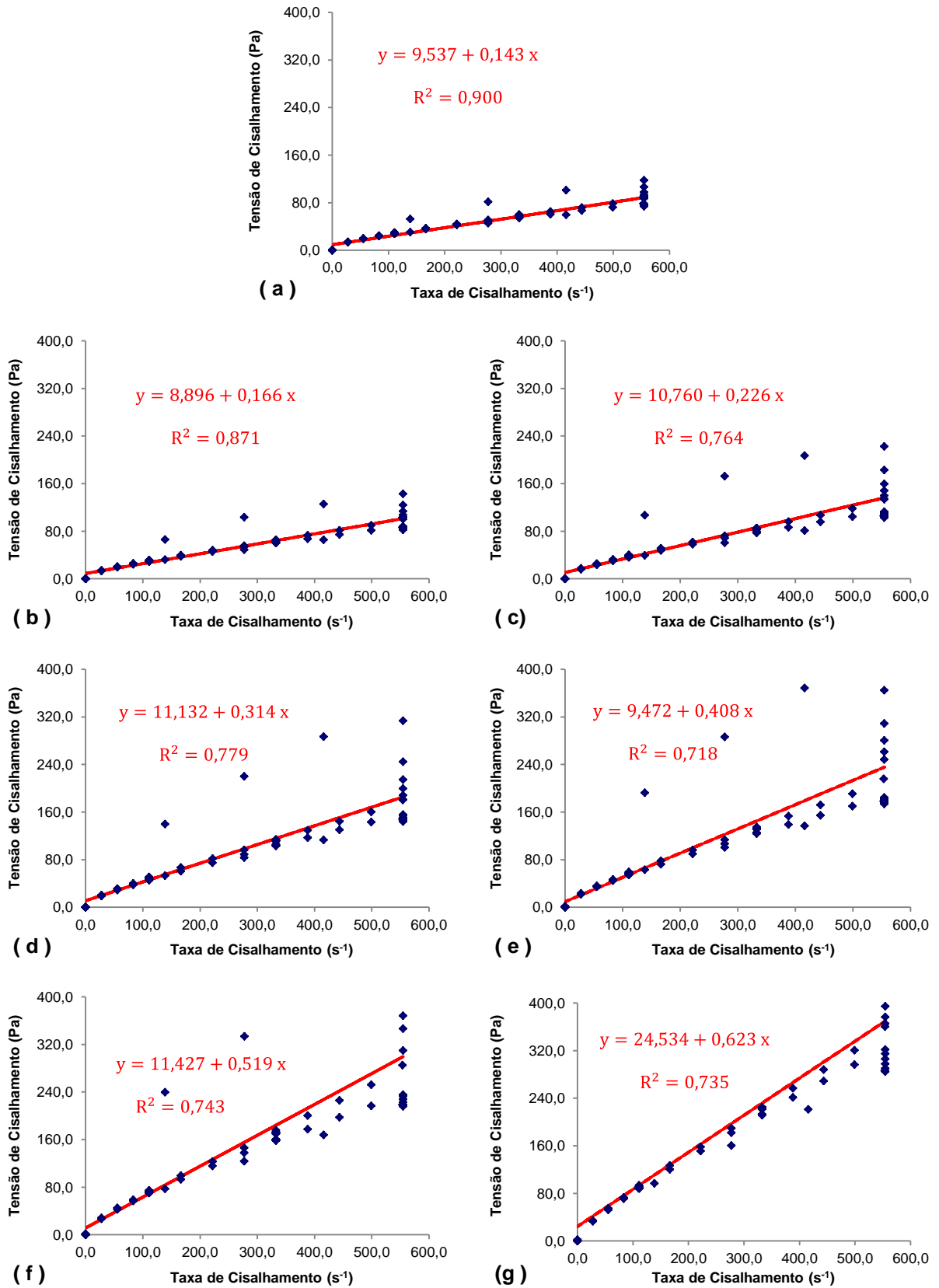


Figura B10: curvas de cisalhamento ajustadas para determinar tensão de escoamento e viscosidade para a pasta parada sem processo de redosagem, produzida com cimento CP IV 32 RS a/c=0,52, para os tempos: a) 0 hora, b) 1 hora, c) 2 horas, d) 3 horas, e) 4 horas, f) 5 horas e g) 6 horas

O modelo de Herschel-Bulkey (HB) é expresso por uma equação que fornece uma relação da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento com base em uma função de potência, podendo ser expressa por $\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}^n$ sendo “ τ_0 ” a tensão de escoamento do fluido analisado. Com base em cada equação apresentada nas figuras anteriores, a tabela B2 apresenta as tensões de escoamento obtidas para cada análise realizada na pesquisa.

Tabela B2: Tensões de escoamento das curvas de cisalhamento estudadas

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | TENSÃO DE ESCOAMENTO (Pa) | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 10,62 | 12,03 | 1,58 | 0,31 | 0,11 | 0,05 | 0,01 |
| | 0,52 | | 4,03 | 5,21 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,68 | | 1,09 | 1,30 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 4,60 | 5,08 | 5,85 | 6,02 | 6,59 | 6,63 | 7,34 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 4,32 | 7,51 | 9,45 | 10,19 | 10,11 | 15,34 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 16,13 | 15,35 | 2,05 | 0,75 | 0,05 | 0,01 | 0,11 |
| | 0,52 | | 8,96 | 8,12 | 0,37 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,68 | | 1,86 | 1,78 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 10,43 | 9,09 | 8,93 | 8,97 | 9,30 | 9,42 | 9,72 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 9,54 | 8,90 | 10,76 | 11,13 | 9,47 | 11,43 | 24,53 |

Contudo, para determinar a viscosidade plástica, além dos parâmetros K e n já apresentados na equação, considera-se uma taxa de cisalhamento máxima obtida no teste $\dot{\gamma}_{máx}$ e a viscosidade plástica é dada pela expressão $\mu = (3 * K/n + 2) * \dot{\gamma}_{máx}^{n-1}$ (FERRARIS *et al.*, 2001). Observa-se que para comportamento binghamiano a viscosidade é diretamente obtida pelo valor de “ K ” da expressão, sendo independente da taxa de cisalhamento aplicada, o que não ocorre para o fluido com comportamento dilatante.

A seguir, nas tabelas B3 a B5, apresentam-se as viscosidades obtidas para três diferentes taxas de cisalhamento, que correspondem aos três níveis de velocidades constantes utilizadas no ensaio:

- Velocidade de 9 rad/s (85,9 rpm) – Taxa de Cisalhamento de $110,95 \text{ s}^{-1}$
- Velocidade de 27 rad/s (257,8 rpm) – Taxa de Cisalhamento de $332,86 \text{ s}^{-1}$
- Velocidade de 45 rad/s (429,7 rpm) – Taxa de Cisalhamento de $554,77 \text{ s}^{-1}$

Tabela B3: Viscosidades plásticas para taxa de cisalhamento de $110,95 \text{ s}^{-1}$

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | VISCOSIDADE (Pa.s) | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 0,2983 | 0,3398 | 0,1670 | 0,0877 | 0,0638 | 0,0516 | 0,0390 |
| | 0,52 | | 0,0870 | 0,1045 | 0,0526 | 0,0281 | 0,0168 | 0,0077 | 0,0043 |
| | 0,68 | | 0,0228 | 0,0277 | 0,0122 | 0,0071 | 0,0028 | 0,0029 | 0,0024 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 0,0821 | 0,0964 | 0,1011 | 0,0990 | 0,1031 | 0,1009 | 0,1060 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 0,0835 | 0,1415 | 0,2458 | 0,2853 | 0,3331 | 0,3923 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 0,4286 | 0,4460 | 0,1711 | 0,0826 | 0,0526 | 0,0421 | 0,0375 |
| | 0,52 | | 0,1354 | 0,1422 | 0,0537 | 0,0275 | 0,0183 | 0,0141 | 0,0126 |
| | 0,68 | | 0,0322 | 0,0351 | 0,0143 | 0,0050 | 0,0035 | 0,0021 | 0,0018 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 0,1534 | 0,1591 | 0,1639 | 0,1610 | 0,1690 | 0,1684 | 0,1690 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 0,1429 | 0,1664 | 0,2259 | 0,3144 | 0,4076 | 0,5195 | 0,6228 |

Tabela B4: Viscosidades plásticas para taxa de cisalhamento de $332,86 \text{ s}^{-1}$

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | VISCOSIDADE (Pa.s) | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 0,2983 | 0,3398 | 0,2025 | 0,1339 | 0,0987 | 0,0789 | 0,0577 |
| | 0,52 | | 0,0870 | 0,1045 | 0,0652 | 0,0405 | 0,0252 | 0,0153 | 0,0101 |
| | 0,68 | | 0,0228 | 0,0277 | 0,0151 | 0,0106 | 0,0056 | 0,0055 | 0,0051 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 0,0821 | 0,0964 | 0,1011 | 0,0990 | 0,1031 | 0,1009 | 0,1060 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 0,0835 | 0,1415 | 0,2458 | 0,2853 | 0,3331 | 0,3923 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 0,4286 | 0,4460 | 0,2271 | 0,1423 | 0,0919 | 0,0761 | 0,0655 |
| | 0,52 | | 0,1354 | 0,1422 | 0,0701 | 0,0434 | 0,0295 | 0,0243 | 0,0192 |
| | 0,68 | | 0,0322 | 0,0351 | 0,0183 | 0,0099 | 0,0079 | 0,0056 | 0,0047 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 0,1534 | 0,1591 | 0,1639 | 0,1610 | 0,1690 | 0,1684 | 0,1690 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 0,1429 | 0,1664 | 0,2259 | 0,3144 | 0,4076 | 0,5195 | 0,6228 |

Tabela B5: Viscosidades plásticas para taxa de cisalhamento de 554,77 s⁻¹

| ESPECIFICAÇÃO DA MISTURA | | | VISCOSIDADE (Pa.s) | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cimento | Relação a/c | Processo adotado | 0 hora | 1 hora | 2 horas | 3 horas | 4 horas | 5 horas | 6 horas |
| CP II Z 32 | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 0,2983 | 0,3398 | 0,2214 | 0,1629 | 0,1208 | 0,0962 | 0,0693 |
| | 0,52 | | 0,0870 | 0,1045 | 0,0721 | 0,0480 | 0,0305 | 0,0210 | 0,0149 |
| | 0,68 | | 0,0228 | 0,0277 | 0,0167 | 0,0127 | 0,0077 | 0,0074 | 0,0072 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 0,0821 | 0,0964 | 0,1011 | 0,0990 | 0,1031 | 0,1009 | 0,1060 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 0,0835 | 0,1415 | 0,2458 | 0,2853 | 0,3331 | 0,3923 | |
| CP IV 32 RS | 0,40 | Pastas em mistura com redosagem | 0,4286 | 0,4460 | 0,2591 | 0,1833 | 0,1191 | 0,1002 | 0,0849 |
| | 0,52 | | 0,1354 | 0,1422 | 0,0794 | 0,0537 | 0,0369 | 0,0312 | 0,0234 |
| | 0,68 | | 0,0322 | 0,0351 | 0,0206 | 0,0136 | 0,0115 | 0,0088 | 0,0073 |
| | 0,52 | Pasta em mistura sem redosagem | 0,1534 | 0,1591 | 0,1639 | 0,1610 | 0,1690 | 0,1684 | 0,1690 |
| | 0,52 | Pasta parada sem redosagem | 0,1429 | 0,1664 | 0,2259 | 0,3144 | 0,4076 | 0,5195 | 0,6228 |