



Universidade do Minho

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO POTENCIAL
EXPANSIVO DO RESÍDUO DE MÁRMORE TRATADO
TERMICAMENTE EM COMPARAÇÃO A AGENTES COMERCIAIS
DE MITIGAÇÃO DE RETRAÇÃO**

MARA MONALIZA LINHARES PEREIRA

**TESE DE DOUTORADO EM COTUTELA INTERNACIONAL ENTRE A
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA E A UNIVERSIDADE DO MINHO**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

CONSTRUÇÃO CIVIL – PECC/UNB: PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

ESTRUTURA DE CONCRETO – PDEC/UMINHO: PROGRAMA DOUTORAL EM
ENGENHARIA CIVIL

**FACULDADE DE
TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**ESCOLA DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO MINHO**

**FACULDADE DE
TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO MINHO**

**DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO POTENCIAL
EXPANSIVO DO RESÍDUO DE MÁRMORE TRATADO
TERMICAMENTE EM COMPARAÇÃO A AGENTES COMERCIAIS
DE MITIGAÇÃO DE RETRAÇÃO**

MARA MONALIZA LINHARES PEREIRA

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO (UnB)

ORIENTADOR: MIGUEL ÂNGELO DIAS AZENHA (UMinho)

COORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS (UnB)

**TESE DE DOUTORADO EM COTUTELA INTERNACIONAL ENTRE A
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA E A UNIVERSIDADE DO MINHO**

BRASÍLIA/DF: JANEIRO - 2026

**FACULDADE DE
TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO MINHO**

**DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO POTENCIAL
EXPANSIVO DO RESÍDUO DE MÁRMORE TRATADO
TERMICAMENTE EM COMPARAÇÃO A AGENTES COMERCIAIS
DE MITIGAÇÃO DE RETRAÇÃO**

MARA MONALIZA LINHARES PEREIRA

**TESE DE DOUTORADO EM COTUTELA INTERNACIONAL SUBMETIDO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM
COTUTELA INTERNACIONAL, PELA UNB E PELA UMINHO.**

APROVADA POR:

**Prof.^a Valdirene Maria Silva Capuzzo, Dr.^a. (UnB)
(Orientadora)**

**Prof. Miguel Ângelo Dias Azenha, PhD. (UMinho)
(Orientador)**

**Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, Dr. (UnB)
(Coorientador)**

**Prof. Raúl Darío Durand Farfan, Dr. (UnB)
(Examinador Interno)**

**José Luís Duarte Granja, PhD. (UMinho)
(Examinador Externo)**

**António Bettencourt Ribeiro, PhD. (LNEC)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 26 DE JANEIRO DE 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

PEREIRA, MARA MONALIZA LINHARES PEREIRA

Análise numérica e experimental do comportamento expansivo em materiais cimentícios com resíduo de mármore tratado termicamente [Distrito Federal] 2026.

xxv, 279 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2026).

Tese de doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estratégias mitigadoras de retração

2. Expansão

3. Concreto

4. Resíduo de mármore

5. Simulação numérica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Doutor)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, M. M. L. (2026). Análise numérica e experimental do comportamento expansivo em materiais cimentícios com resíduo de mármore tratado termicamente, Publicação E.DM – XX/26, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 279 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Mara Monaliza Linhares Pereira.

TÍTULO: Análise numérica e experimental do comportamento expansivo em materiais cimentícios com resíduo de mármore tratado termicamente.

GRAU: Doutor ANO: 2026

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Mara Monaliza Linhares Pereira
COLINA BLOCO K– Campus Universitário Darcy Ribeiro
CEP:70.904-111 – Brasília – DF – Brasil
E-mail: maramonaliza19@gmail.com

*Dedico este trabalho à Luiz Ferreira, meu avô e meu pai de coração,
que sempre acreditou que eu chegaria até aqui, doutora, como ele me chamava.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o autor da vida e minha fonte de coragem para superar todos os desafios. Obrigada, Pai, por me fortalecer e encorajar nos momentos mais difíceis, concedendo sabedoria, proteção divina e fé durante toda a realização deste trabalho.

Em especial, agradeço aos meus pais, Arrilton Linhares e Maria José, que sempre foram minha maior fonte de inspiração. Desde a infância, me incentivaram a lutar pelos meus sonhos, a não desistir e a seguir em frente, ensinando-me a ser grata por todas as oportunidades e lições que a vida oferece. Obrigada por todo amor, paciência e apoio incondicional.

Aos meus irmãos, Maria Luiza e Netinho, por serem meus fiéis companheiros, meus maiores incentivadores e a bússola que me orientava sempre que eu me sentia perdida. A distância entre nós, durante esses anos, foi apenas física.

À Mainha Socorro, que além de avó é minha segunda mãe, agradeço por todas as orações, por acreditar em mim mesmo à distância e por me ensinar, com sua sabedoria, a ter paciência e fé.

Obrigada por tudo, minha família. Vocês são as pessoas mais importantes da minha vida. A presença, mesmo na ausência física, sempre me deu coragem e esperança. A cada gesto de amor e compreensão, encontrei a motivação necessária para seguir firme até aqui. Eu amo vocês!

Aos meus orientadores Valdirene Capuzzo, Rodrigo Lameiras e Miguel Azenha, pelo suporte científico e humano. Obrigada pelo tema proposto, pela paciência, dedicação e incentivo constantes. Cada orientação e conselho contribuiu significativamente para o meu crescimento profissional e pessoal. O caminho trilhado até aqui certamente não seria o mesmo sem suas contribuições e encorajamento.

Aos professores Antônio Bettencourt e Raúl Durand, que desde a qualificação aceitaram o encargo de avaliar meu trabalho com atenção e profundidade, enriquecendo-o com críticas e sugestões valiosas. De forma semelhante, agradeço ao Professor José Granja, por aceitar integrar a banca e pela disponibilidade em contribuir com esta pesquisa.

A todos os professores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB) e o Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UMinho), pelo conhecimento transmitido e pelo exemplo de compromisso com a pesquisa e o ensino.

Agradeço, com profundo carinho, a todos os amigos que fizeram parte desta caminhada, em diferentes etapas da minha vida, e que, de formas únicas, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos de Belém do Brejo do Cruz, que sonham comigo cada conquista e vibram com cada passo dado. Vocês dão sentido à palavra amizade e me lembram, sempre que volto, o quanto sou acolhida e amada. Obrigada por todas as vezes em que me receberam de braços abertos e fizeram minha história ainda mais bonita.

Aos amigos da UFERSA-Caraúbas, que me acompanham até hoje, obrigada pelo apoio, amizade e pela presença constante, mesmo quando tempo e distância se interpõem.

Aos amigos do Ciência sem Fronteiras, que continuam me lembrando da sorte que tive ao encontrar pessoas tão especiais, que se tornaram parte da minha vida para sempre. Obrigada por permanecerem comigo.

Aos amigos construídos nesses anos de UnB, obrigada por tornarem os dias mais leves, pelas pausas para o café, pelas conversas no corredor, pelas risadas no laboratório e pelo apoio durante os experimentos. Vocês, muitas vezes sem perceber, me motivaram continuamente.

Aos amigos do Doutorado Sanduíche, que me acolheram de forma tão genuína durante minha estadia em Portugal e me fizeram sentir amada. Entre cafés, vinhos, jogatinas e boas conversas, vivemos dias felizes que levarei para sempre comigo.

Aos vizinhos da Colina, que se tornaram amigos de verdade, compartilhando os desafios da pós-graduação e oferecendo apoio nos momentos de cansaço e incerteza.

Aos amigos dos rolês, dos “amigos dos amigos”, obrigada por me lembrarem que a vida também precisa de leveza e diversão. Vocês me ajudaram a ressignificar minha morada em Brasília, contribuindo para o meu aconchego nos dias de saudades de casa e tornando-se pessoas que sei que posso contar em qualquer lugar.

Aos amigos recentes do DNIT, que me acompanharam no dia a dia e me deram forças para concluir o ciclo da escrita. A “terapia” dos desabafos, as conversas pelos corredores e as risadas nas pausas das refeições, tornaram a pressão desse último ano mais leve e possível de suportar.

A todos vocês, do fundo do coração: obrigada por existirem na minha vida. Cada gesto de amizade foi essencial para que eu continuasse firme nesta jornada. Parafraseando Marisa Monte: *“Sou feliz alegre e forte, tenho amor e muita sorte, aonde quer que eu vá”*.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios e Materiais (LEM-UnB), do Laboratório de raios X do Instituto de Geociências (IG-UnB), da Central Analítica do Instituto de Química (CAIQ-UnB), do Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB-UnB), da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e do Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP), agradeço por toda a ajuda com os equipamentos, concretagens e ensaios microestruturais, que contribuíram diretamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

A empresa Centrogan Granitos e Mármore, pela intermediação e doação dos resíduos de mármore utilizados na pesquisa; à empresa BASF e à GCP, pela doação do aditivo superplastificante e do aditivo redutor de retração. Aos terceirizados da limpeza e recepção do SG-12, que sempre proporcionaram um ambiente acolhedor.

Ao apoio da Universidade de Brasília (UnB) e da Universidade do Minho (UMinho). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - 88881.690573/2022-01), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 140437/2021-5) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF - 00193-00001532/2021-41) pelo financiamento indispensável à realização desta pesquisa.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho, deixo meu sincero agradecimento. Sou imensamente grata!

*Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.*

(Fernando Pessoa)

RESUMO

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO POTENCIAL EXPANSIVO DO RESÍDUO DE MÁRMORE TRATADO TERMICAMENTE EM COMPARAÇÃO A AGENTES COMERCIAIS DE MITIGAÇÃO DE RETRAÇÃO

Autora: Mara Monaliza Linhares Pereira

Orientadora: Valdirene Maria Silva Capuzzo

Orientador: Miguel Ângelo Dias Azenha

Coorientador: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, janeiro de 2025

Os materiais à base de cimento estão sujeitos à retração, fenômeno que pode gerar fissuras e comprometer o desempenho e a durabilidade das estruturas. Entre as estratégias de mitigação, destacam-se o uso de aditivos redutores de retração e agentes expansores. Paralelamente, a indústria de rochas ornamentais gera grandes quantidades de resíduo de mármore, cujo tratamento térmico surge como alternativa promissora, ainda pouco investigada no contexto da mitigação da retração. Assim, esta pesquisa investigou a influência do tratamento térmico do resíduo de mármore como agente expensor alternativo, por meio de abordagem experimental e numérica integrada. O estudo envolveu o tratamento térmico e caracterização físico-química e mineralógica dos resíduos, a avaliação de pastas e concretos quanto ao estado fresco, propriedades mecânicas e microestrutura, e simulações termomecânicas tridimensionais, incluindo estudo paramétrico da interação entre expansão, maturidade e evolução de tensões. Os resultados demonstraram que apenas o tratamento térmico a 1000 °C por 1 h conferiu reatividade significativa ao resíduo, promovendo a conversão de carbonatos em óxidos livres. Em pastas, o resíduo proveniente da Bahia apresentou expansões mais intensas, enquanto o resíduo do Espírito Santo exibiu comportamento mais gradual e estável. Em concretos, observou-se manutenção do desempenho mecânico, com incremento da resistência à tração no teor mais elevado do resíduo da Bahia e aumento do módulo de elasticidade nos concretos contendo o resíduo do Espírito Santo. As simulações indicaram que a expansão induzida pelos resíduos tratados pode reduzir tensões de tração em elementos estruturais, desde que sincronizada com o desenvolvimento da rigidez do concreto. Expansões muito precoces apresentaram efeito limitado, enquanto expansões tardias resultaram em tensões localizadas mais elevadas na interface entre parede e base. O estudo comparativo evidenciou que o resíduo tratado apresenta desempenho compatível com o agente expensor comercial e comportamento diferenciado em relação ao aditivo redutor de retração, destacando-se como alternativa técnica e ambientalmente viável. Conclui-se que o resíduo de mármore tratado termicamente possui potencial para atuar como agente mitigador de retração não comercial, contribuindo para a redução da fissuração e para a valorização de resíduos industriais. A integração dos resultados experimentais e numéricos reforça sua aplicabilidade em concretos estruturais, desde que considerados os efeitos da maturidade e o momento da expansão.

Palavras-chave: Estratégias mitigadoras de retração; Expansão; Tratamento térmico; Resíduo de mármore; Simulação numérica.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE EXPANSIVE POTENTIAL OF THERMALLY TREATED MARBLE WASTE IN COMPARISON WITH COMMERCIAL SHRINKAGE MITIGATION AGENTS

Author: Mara Monaliza Linhares Pereira

Supervisor: Valdirene Maria Silva Capuzzo

Supervisor: Miguel Ângelo Dias Azenha

Co-supervisor: Rodrigo de Melo Lameiras

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, january of 2026

Cement-based materials are susceptible to shrinkage, a phenomenon that may lead to cracking and compromise the performance and durability of structures. Among the mitigation strategies, the use of shrinkage-reducing admixtures and expansive agents stands out. In parallel, the ornamental stone industry generates large quantities of marble waste, whose thermal treatment emerges as a promising alternative that remains scarcely investigated in the context of shrinkage mitigation. Thus, this research investigated the influence of thermally treated marble waste as an alternative expansive agent through an integrated experimental and numerical approach. The study involved the thermal treatment and physical–chemical and mineralogical characterization of the residues, the evaluation of cement pastes and concretes in terms of fresh-state properties, mechanical performance and microstructure, and three-dimensional thermomechanical simulations, including a parametric study of the interaction between expansion, maturity and stress development. The results demonstrated that only thermal treatment at 1000 °C for 1 h provided significant reactivity to the residue, promoting the conversion of carbonates into free oxides. In cement pastes, the residue from Bahia exhibited more pronounced expansion, whereas the residue from Espírito Santo showed a more gradual and stable behavior. In concretes, mechanical performance was preserved, with increased tensile strength at the highest content of the Bahia residue and higher modulus of elasticity in concretes containing the Espírito Santo residue. Numerical simulations indicated that expansion induced by the treated residues can reduce tensile stresses in structural elements, provided that it is synchronized with the development of concrete stiffness. Very early expansion showed limited effectiveness, whereas delayed expansion resulted in higher localized stresses at the wall–base interface. The comparative analysis demonstrated that the treated residue exhibits performance comparable to that of a commercial expansive agent and behavior distinct from that of a shrinkage-reducing admixture, highlighting its potential as a technically and environmentally viable alternative. It is concluded that thermally treated marble waste has the potential to act as a non-commercial shrinkage-mitigating agent, contributing to crack reduction and the valorization of industrial residues. The integration of experimental and numerical results reinforces its applicability in structural concretes, provided that maturity effects and the timing of expansion are properly considered.

Keywords: Shrinkage mitigation strategies; Expansion; Thermal treatment; Marble waste; Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Métodos de ensaios típicos para determinar a retração em pasta de cimento: (a) Método volumétrico; (b) Método linear.	42
Figura 2.2 – Representação esquemática da expansão e retração por secagem de dois concretos, um contendo um agente expensor e o outro sem agente expensor.	49
Figura 2.3 – Etapas do processo de produção das rochas ornamentais.	55
Figura 3.1 – Fluxograma com as etapas do programa experimental e numérico.	30
Figura 3.2 – Morfologia dos resíduos de mármore bruto: (a) RMBA; (b) RMES.	33
Figura 3.3 – Etapas do processo de coleta e preparação dos resíduos de mármore: (a) coleta; (b) homogeneização; (c) redução por quarteamento; (d) destorroamento.	34
Figura 3.4 – Granulometria a laser dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).	35
Figura 3.5 – Difratoograma de raios X dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).	35
Figura 3.6 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, antes do tratamento (T0).	37
Figura 3.7 – (a) Forno tipo mufla utilizado para o tratamento térmico; (b) Resíduo de mármore antes e após tratamento térmico.	38
Figura 3.8 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, após tratamento térmico em temperatura máxima de 800°C (T800_0h).	39
Figura 3.9 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, após tratamento térmico em temperatura máxima de 800°C por 1 hora (T800_1h).	39
Figura 3.10 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, após tratamento térmico em temperatura máxima de 1000°C por 1 hora (T1000_1h).	39
Figura 3.11 – Difratoograma de raios X dos resíduos de mármore, Bahia (a) e Espírito Santo (b), antes do tratamento térmico (T0), após aplicação de temperatura máxima de 800°C (T800_0h) e temperatura máxima de 800°C por 1 hora (T800_1h).	40
Figura 3.12 – Difratoograma de raios X dos resíduos de mármore, Bahia (a) e Espírito Santo (b), antes do tratamento térmico (T0) e após aplicação de temperatura máxima de 1000°C por 1 hora (T1000_1h).	41
Figura 3.13 – Granulometria a laser do cimento CP II-F-32.	44
Figura 3.14 – Difratoograma de raios X do cimento CP II-F-32.	46
Figura 3.15 – Granulometria a laser dos mitigadores de retração com granulometria em pó.	47

Figura 3.16 – Difratoograma de raios X dos mitigadores de retração com granulometria em pó.	48
Figura 3.17 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.	50
Figura 3.18 – Composição granulométrica da areia composta.....	51
Figura 3.19 – Composição granulométrica do agregado graúdo.....	52
Figura 3.20 – Determinação em pastas de cimentos: (a) Consistência; (b) Tempos de pega. .	55
Figura 3.21 – Base de apoio do dilatômetro juntamente com molde de tubo corrugado e tampas de extremidades.	56
Figura 3.22 – Ensaio de deformação autógena em andamento.	57
Figura 3.23 – Configuração física utilizada no ensaio de EMM-IRM em pastas cimentícias: (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) vista frontal; (d) vista em 3D; (e) dimensões do atuador; (f) configuração real do ensaio.	59
Figura 3.24 – Sistema de ensaio Sonelastic utilizado para amostras de pastas cimentícias.	62
Figura 3.25 – (a) Fragmentos de pastas em isopropanol; (b) Fragmentos de pastas em processo de limpeza por ultrassom; (c) Fragmentos de pastas antes da secagem em estufa; (d) Material em pó após moagem.	64
Figura 3.26 – Ensaios de caracterização do estado fresco de concretos convencionais: (a) Consistência; (b) Massa específica.....	68
Figura 3.27 – Ensaio de retração autógena para o concreto RMBA5 em andamento.....	73
Figura 3.28 – Muro de arrimo após 28 dias de concretagem (cm).	78
Figura 3.29 – Geometria e planos de simetria adotadas no modelo 3D (cm).....	79
Figura 3.30 – Condições fronteira do modelo térmico adotadas no modelo 3D (cm).	80
Figura 3.31 – Condições fronteira do modelo térmico adotadas no modelo 3D.....	80
Figura 3.32 – Malhas dos elementos finitos adotadas no modelo 3D.	81
Figura 3.33 – Evolução da temperatura adiabática no concreto.....	83
Figura 3.34 – Evolução do módulo de elasticidade.....	84
Figura 3.35 – Função de conformidade de fluência para cargas em 14, 24 e 36h.....	84
Figura 4.1 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas de cimento propostas.....	91
Figura 4.2 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas contendo aditivos comerciais mitigadores de retração.....	92
Figura 4.3 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas contendo resíduo de mármore da Bahia tratado termicamente (RMBA).....	94

Figura 4.4 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas contendo resíduo de mármore do Espírito Santo tratado termicamente (RMES).	95
Figura 4.5 – Curva de evolução do módulo de elasticidade para as pastas de cimento propostas.	100
Figura 4.6 – Curva de evolução do módulo de elasticidade para as pastas de cimento estudadas: (a) aditivos comerciais; (b) resíduo de mármore da Bahia; (c) resíduo de mármore do Espírito Santo.	101
Figura 4.7 – Difratoograma de raios X para REF nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	106
Figura 4.8 – Difratoograma de raios X para AE2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.	106
Figura 4.9 – Difratoograma de raios X para ARR2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.	107
Figura 4.10 – Difratoograma de raios X para RMBA1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.....	109
Figura 4.11 – Difratoograma de raios X para RMBA2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.....	110
Figura 4.12 – Difratoograma de raios X para RMBA5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.....	110
Figura 4.13 – Difratoograma de raios X para RMES1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	114
Figura 4.14 – Difratoograma de raios X para RMES2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.	114
Figura 4.15 – Difratoograma de raios X para RMES5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	115
Figura 4.16 – Curvas de TG e DTG para REF nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	118
Figura 4.17 – Curvas de TG e DTG para AE2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	119
Figura 4.18 – Curvas de TG e DTG para ARR2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	119
Figura 4.19 – Curvas de TG e DTG para RMBA1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	123
Figura 4.20 – Curvas de TG e DTG para RMBA2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	124

Figura 4.21 – Curvas de TG e DTG para RMBA5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	124
Figura 4.22 – Curvas de TG e DTG para RMES1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	128
Figura 4.23 – Curvas de TG e DTG para RMES2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	128
Figura 4.24 – Curvas de TG e DTG para RMES5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.	129
Figura 4.25 – Curvas de distribuição de tamanho de poros por porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) das pastas cimentícias: (a) aditivos comerciais; (b) resíduo de mármore da Bahia; (c) resíduo de mármore do Espírito Santo.	133
Figura 4.26 – Curvas de volume acumulado intrudido em função do diâmetro dos poros por PIM das misturas das pastas cimentícias: (a) aditivos comerciais; (b) resíduo de mármore da Bahia; (c) resíduo de mármore do Espírito Santo.	133
Figura 4.27 – Curvas de retração/expansão das pastas cimentícias antes da homogeneização.	143
Figura 4.28 – Curvas de retração/expansão equivalentes do concreto após a homogeneização.	143
Figura 4.29 – Curvas de retração/expansão homogeneizadas para as misturas REF e RMBA5	145
Figura 4.30 – Relação entre deformação e módulo de elasticidade para a mistura de referência (REF): (a) resultados experimentais em pasta; (b) resultados homogeneizados em concreto.	146
Figura 4.31 – Relação entre deformação e módulo de elasticidade para a mistura de RMBA5: (a) resultados experimentais em pasta; (b) resultados homogeneizados em concreto.	147
Figura 4.32 – Comparação entre a deformação autógena experimental e a curva homogeneizada para o concreto RMBA5.	149
Figura 4.33 – Pontos analisados no plano de simetria YZ do muro de arrimo.	152
Figura 4.34 – Evolução da temperatura nos pontos A, B, C e D ao longo do tempo.	152
Figura 4.35 – Mapas tridimensionais da evolução da temperatura para alguns instantes selecionados.	154
Figura 4.36 – Evolução da tensão longitudinal (σ_{xx}) no plano de simetria para o concreto REF.	155

Figura 4.37 – Evolução da tensão longitudinal (σ_{xx}) no plano de simetria para o concreto RMBA5.	156
Figura 4.38 – Mapas tridimensionais dos campos de tensões no plano YZ, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo para os concretos REF e RMBA5.....	156
Figura 4.39 – Mapa tridimensional dos campos de tensões no plano de simetria, destacando as variações ao longo do muro de arrimo para os concretos REF e RMBA5.....	158
Figura 4.40 – Mapa tridimensional dos campos de tensões no plano invertido ao plano simétrico, destacando as variações ao longo do muro de arrimo para os concretos REF e RMBA5.	159
Figura 4.41 – Curva idealizada de deformação do concreto de referência (REF), adotada no estudo paramétrico como cenário sem retração ou expansão, com deformação nula ao longo do tempo.	164
Figura 4.42 –Curvas paramétricas de deformação geradas a partir da translação temporal da curva experimental do concreto RMBA5, simulando diferentes instantes de ocorrência da expansão máxima: (a) 15 h; (b) 24 h; (c) 36 h; e (d) 48 h.	165
Figura 4.43 – Evolução das tensões longitudinais (σ_{xx}) para o cenário referência (REF) no estudo paramétrico, considerando curva idealizada sem retração ou expansão.	166
Figura 4.44 – Evolução das tensões longitudinais (σ_{xx}) para o concreto RMBA5, simulando diferentes instantes de ocorrência da expansão máxima: (a) 15 h; (b) 24 h; (c) 36 h; e (d) 48 h.	167
Figura 4.45 – Mapas tridimensionais dos campos de tensões no plano YZ, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.	169
Figura 4.46 – Mapas tridimensionais no campo de tensões no plano de simetria, destacando as variações ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.	171
Figura 4.47 – Mapas tridimensionais dos campos de tensões no plano invertido ao plano de simetria, destacando as variações ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.....	174
Figura 4.48 – Relação entre tensões longitudinais (σ_{xx}) e deformação expansiva em função da idade equivalente para o concreto RMBA5, considerando os quatro cenários paramétricos de deslocamento temporal do pico expansivo: (a) 15 h; (b) 24 h; (c) 36 h; e (d) 48 h..	178
Figura 4.49 – Localização do ponto analisado no plano invertido ao plano simétrico.	179

Figura 4.50 – Evolução das tensões longitudinais (σ_{xx}) no plano invertido ao plano simétrico, para um ponto selecionado na interface parede/base.....	180
Figura 4.51 – Mapas tridimensionais de tensões correspondentes a diferentes instantes da evolução mecânica no plano invertido ao plano simétrico, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.	181
Figura 4.52 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (primeira fase) para todos os concretos.	185
Figura 4.53 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase) para o concreto REF.	187
Figura 4.54 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase) para o concreto RMBA5_15 h.	188
Figura 4.55 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase) para o concreto RMBA5_24 h.	189
Figura 4.56 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase) para o concreto RMBA5_36 h.	190
Figura 4.57 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase) para o concreto RMBA5_48 h.	191
Figura 4.58 – Relação entre tensões principais e a resistência à tração, considerando REF e os quatro cenários paramétricos de deslocamento temporal do pico expansivo: (a) REF; (b) 15 h; (c) 24 h; (d) 36 h; e (e) 48 h.....	194

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Síntese dos principais estudos experimentais com agentes expansores.	24
Tabela 3.1 – Variáveis independentes e dependentes do programa experimental e numérico.	32
Tabela 3.2 – Propriedades dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).....	34
Tabela 3.3 – Composição química dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).	36
Tabela 3.4 – Composição do resíduo de mármore da Bahia após aplicação dos tratamentos térmicos.	42
Tabela 3.5 – Composição do resíduo de mármore do Espírito Santo após aplicação dos tratamentos térmicos.....	42
Tabela 3.6 – Propriedades e características do cimento CP II-F-32.....	45
Tabela 3.7 – Propriedades do agente expensor e resíduos de mármore após tratamento térmico.	47
Tabela 3.8 – Composição química dos mitigadores de retração com granulometria em pó. ...	48
Tabela 3.9 – Propriedades dos agregados miúdos.	49
Tabela 3.10 – Propriedades da areia composta.....	50
Tabela 3.11 – Propriedades do agregado graúdo.....	51
Tabela 3.12 – Características do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.	52
Tabela 3.13 – Valor percentual de adição e nome das misturas utilizadas nesta pesquisa.	54
Tabela 3.14 – Ensaio de microanálises para a avaliação das propriedades microestruturais.	63
Tabela 3.15 – Propriedades térmicas do concreto consideradas na análise.....	82
Tabela 4.1 – Resultados de ensaios das propriedades do estado fresco das pastas de cimento avaliadas.	88
Tabela 4.2 – Resistência à compressão média das pastas de cimento avaliadas e índice de desempenho em relação à pasta de referência.	97
Tabela 4.3 – Comparação entre os resultados do <i>Sonelastic</i> e EMM-IRM em pastas de cimento.	104
Tabela 4.4 – Índice de cristalinidade para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	107
Tabela 4.5 – Índice de cristalinidade para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	111
Tabela 4.6 – Índice de cristalinidade para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	115
Tabela 4.7 – Frações de massa em cada temperatura (%) para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	120

Tabela 4.8 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.	120
Tabela 4.9 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	121
Tabela 4.10 – Frações de massa em cada temperatura (%) para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.	125
Tabela 4.11 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	125
Tabela 4.12 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	126
Tabela 4.13 – Frações de massa em cada temperatura (%) para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.	129
Tabela 4.14 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	130
Tabela 4.15 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.....	130
Tabela 4.16 – Características da estrutura porosa das pastas cimentícias obtidas por PIM. ..	134
Tabela 4.17 – Composições dos traços unitários de concreto.	137
Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios no estado fresco.	137
Tabela 4.19 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas.	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AE	Agente expansor
ASTM	American Society for Testing and Mater
ARR	Aditivo redutor de retração
BA	Bahia
CAA	Concreto autoadensável
CAIQ	Central Analítica do Instituto de Química
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COST	Cooperação Europeia em Ciência e Tecnologia
CP	Cimento Portland
DRX	Difração de raios-x
DTG	Derivada da termogravimetria
EMM-ARM	<i>Elasticity Modulus Measurement through Ambient Response Method</i>
EMM-IRM	<i>Elastic Modulus Measurement through Impulse Response Method</i>
ES	Espírito Santo
FAPDF	Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal
FRX	Fluorescência de raios X
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IG	Instituto de Geociências
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura Rodoviária
ITP/EPUSP	Instituto de Tecnologia e Pesquisa/ Escola Politécnica da USP
JCI	<i>Japan Concrete Institute</i>
LABEST	Laboratório de Estruturas

LAMCIA	Laboratório de Métodos Numéricos e Inteligência Artificial
LabMatl	Laboratório de Termomecânica e Microestrutural de Materiais Inteligentes
LEM	Laboratório de Ensaios e Materiais
LIMAC	Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
PECC	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
PIM	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages</i>
RMBA	Resíduo de mármore da Bahia
RMES	Resíduo de mármore do Espírito Santo
TEMAC	Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado
TG	Termogravimetria
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
ULEG	Unidade de Laboratórios de Ensino de Graduação
UMinho	Universidade do Minho
UnB	Universidade de Brasília
URI	Umidade relativa interna

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	óxido de alumínio
AFt	etringita
AFm	monossulfato
a/agl	água/aglomerante
a/c	água/cimento
C_2S	belita
C_3O	alita
C_4AF	ferrita
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	hidróxido de cálcio/Portlandita
CaCO_3	carbonato de cálcio
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	dolomita
CaO	óxido de cálcio
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	gipsita
cm	centímetros
cm^2	centímetros quadrados
cm^3	centímetros cúbicos
CO_2	dióxido de carbono
CrI	Índice de cristalinidade
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
CSA	sulfaluminato de cálcio
d	diâmetro
$\epsilon_{\text{sh},c,\text{ult}}$	retração final do concreto
$\epsilon_{\text{sh},p,\text{ult}}$	retração final da pasta
Fe_2O_3	óxido de ferro (III)
g	grama
GPa	gigapascal
g/cm^3	grama por centímetro cúbico
h	hora
kg/m^3	quilogramas por metros cúbicos
m	razão entre o módulo de elasticidade dos agregados e o da pasta de cimento
MgO	óxido de magnésio

Mg(OH)_2	hidróxido de Magnésio/Brucita
min	minutos
ml	mililitros
mg	miligramas
mm	milímetros
m^3	metros cúbicos
m^2/g	metros quadrados por grama
m^2/kg	metros quadrados por quilograma
mL/g	mililitros por grama
MPa	megapascal
N_2	nitrogênio
nm	nanômetros
rpm	rotações por minuto
s	segundos
SiO_2	dióxido de silício
SO_3	enxofre
t_{eq}	idade equivalente
t_0	tempo zero
V_a	volume relativo dos agregados
μm	micrômetros
ZTI	zona de transição interfacial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA	27
1.2 OBJETIVO GERAL	30
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	33
2.1.1 Retração térmica.....	38
2.1.2 Retração autógena	39
2.1.3 Retração por secagem	43
2.2 ESTRATÉGIAS MITIGADORAS DE RETRAÇÃO	48
2.2.1 Agente expensor (AE)	48
2.2.2 Aditivo redutor de retração (ARR).....	53
2.3 RESÍDUO DE MÁRMORE	55
2.3.1 Aplicação do resíduo de mármore na construção civil	57
2.3.2 Tratamento térmico do resíduo de mármore.....	59
2.4 MODELAGEM NUMÉRICA	61
3 METODOLOGIA.....	29
3.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	32
3.2.1 Preparação dos agentes tratados termicamente	32
3.2.1.1 Caracterização	34
3.2.1.2 Tratamento térmico.....	37
3.2.2 Caracterização dos materiais	44
3.2.2.1 Cimento Portland.....	44
3.2.2.2 Mitigadores de retração	46
3.2.2.3 Agregados miúdo e graúdo.....	49

3.2.2.4	Aditivo superplastificante.....	52
3.2.2.5	Água de amassamento	52
3.3	ENSAIOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	53
3.3.1	Pastas cimentícias	53
3.3.1.1	Avaliação das propriedades do estado fresco	55
3.3.1.2	Avaliação da expansibilidade	56
3.3.1.3	Avaliação das propriedades mecânicas	58
3.3.1.3.1	Resistência à compressão	58
3.3.1.3.2	EMM-IRM.....	58
3.3.1.3.3	Método de frequência ressonante	61
3.3.1.4	Ensaio de microanálises	62
3.3.1.4.1	Difração de raios X (DRX).....	64
3.3.1.4.2	Análise termogravimétrica (TD/DTG)	65
3.3.1.4.3	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....	66
3.3.2	Concretos convencionais	67
3.3.2.1	Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco	68
3.3.2.2	Avaliação das propriedades mecânicas do concreto.....	68
3.3.3	Estratégia de extrapolação das deformações experimentais em pastas cimentícias para a escala do concreto	69
3.3.4	Análises complementares para validação da estratégia de homogeneização	71
3.3.4.1	Análise da relação entre ganho de rigidez e ocorrência da expansão.....	71
3.3.4.2	Ensaio experimental da retração autógena em concreto.....	72
3.4	ANÁLISES NUMÉRICAS.....	73
3.4.1	Estratégias de modelagem	75
3.4.1.1	Modelo térmico	76
3.4.1.2	Modelo de retração e fluência	77

3.4.2	Informações geométricas e malha	77
3.4.3	Propriedades dos materiais.....	82
3.4.4	Estudo paramétrico	85
3.4.4.1	Descrição do estudo paramétrico.....	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	ENSAIOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	88
4.1.1	Pastas cimentícias	88
4.1.1.1	Avaliação das propriedades do estado fresco	88
4.1.1.2	Avaliação da expansibilidade	90
4.1.1.3	Avaliação das propriedades mecânicas	97
4.1.1.3.1	Resistência à compressão	97
4.1.1.3.2	Módulo de elasticidade por meio do método EMM-IRM	100
4.1.1.3.3	Método de frequência ressonante	103
4.1.1.4	Ensaio de microanálises	105
4.1.1.4.1	Difração de raios X (DRX).....	105
4.1.1.4.2	Análise termogravimétrica (TG/DTG)	117
4.1.1.4.3	Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	132
4.1.2	Concretos convencionais	136
4.1.2.1	Avaliação das propriedades do estado fresco	137
4.1.2.2	Avaliação das propriedades mecânicas	138
4.1.3	Estratégia de extrapolação das deformações experimentais em pastas cimentícias para a escala do concreto	141
4.1.4	Análises complementares para validação da estratégia de homogeneização	145
4.1.4.1	Avaliação da relação entre ganho de rigidez e ocorrência da expansão	145
4.1.4.2	Ensaio experimental de retração autógena em concreto.....	148
4.2	ANÁLISES NUMÉRICAS.....	150
4.2.1	Simulações numéricas	150

4.2.1.1	Efeitos no modelo térmico.....	152
4.2.1.2	Efeitos no modelo mecânico.....	155
4.2.2	Estudo paramétrico	163
4.2.2.1	Resultados das tensões longitudinais.....	165
4.2.2.2	Resultados das reações de levantamento	184
4.2.2.3	Tensões principais	193
5	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS	197
6	CONCLUSÃO.....	203
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	205

1. INTRODUÇÃO

Materiais cimentícios, tais como argamassas e concretos, são os materiais de construção mais empregados, desde que desempenham propriedades mecânicas e de durabilidade notáveis e oferecem excelente eficiência econômica, em comparação com outros materiais de construção. No entanto, esses materiais à base de cimento também envolvem alguns problemas, tais como riscos de fissuras por retração, que caso aconteça, afeta a vida útil da estrutura e compromete o seu desempenho (Corinaldesi *et al.*, 2015; Golewski, 2018; Zha; He, 2019). Devido a retração, a tensão de tração é capaz de gerar fissuras prejudiciais, que cria um caminho para a penetração de agentes agressivos no material, e por isso, a fissuração é considerada uma questão desafiante em todas as fases da vida útil do concreto, desde que tem o potencial de causar graves danos nas estruturas de concreto (Tran *et al.*, 2021; Zhan; He, 2019).

Dentre os vários tipos de retração, as mais relevantes são a retração autógena e a retração por secagem (Carballosa *et al.*, 2015). Uma maneira para mitigar os problemas de retração do concreto pode ser através do uso da tecnologia de aditivos redutores de retração (ARR) e agentes expansores (AE) (Pilar *et al.*, 2021). O ARR tem como principal mecanismo de ação a redução da tensão superficial dos poros líquidos intersticiais do concreto (Oliveira *et al.*, 2014), enquanto, o AE, tais como sulfoaluminato de cálcio ou óxido de cálcio, ao reagir com água produz uma expansão contida em estruturas de concreto (Corinaldesi *et al.*, 2015). Entretanto, o uso individual desses produtos tem apresentado algumas limitações conhecidas. O ARR gera alguns efeitos secundários negativos, tais como a redução do grau de hidratação do cimento e uma pequena redução da resistência do concreto, sendo esses efeitos mais evidenciados em idades iniciais. Por outro lado, o AE tem uma taxa de expansão muito rápida nas primeiras idades e seu uso em dosagens elevadas pode resultar em expansão indesejada e excessiva (Corinaldesi *et al.*, 2012, Corinaldesi, 2012; Jia *et al.*, 2023; Maltese *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2014; Zaichenko *et al.*, 2014). Além disso, embora esses agentes expansivos mitiguem a retração, eles também exigem energia significativa para o processo de produção e podem representar recursos subutilizados (Li *et al.*, 2024).

Existe uma preocupação do impacto causado pelo uso de diferentes agentes expansivos desde que a sua adição pode causar uma interação das partículas, a floculação e o processo de hidratação da pasta de cimento. Os tipos de agentes expansores podem apresentar diferenças significativas nas suas características físicas e químicas, o que causa efeitos variados no processo de formação estrutural dos materiais cimentícios (Jia *et al.*, 2023). Além disso, tratam-

se de aditivos comerciais cujo custo é relativamente elevado, o que limita a sua utilização, principalmente, na execução de projetos estruturais que seriam beneficiados pela redução dos efeitos da retração (Souza *et al.*, 2020). Diante dessas limitações, torna-se evidente a necessidade de investigar novas fontes ou materiais alternativos para mitigação de retração, capazes de desempenhar efeito compensador de forma mais sustentável e viável economicamente. Essa orientação está em consonância com revisões recentes sobre aditivos redutores de retração (por exemplo, Zhan; He, 2019), que ressaltam a importância de ampliar o escopo além dos produtos comerciais convencionais.

Outro problema associado à construção civil é a elevada geração de resíduos no setor de rochas ornamentais. Segundo dados do *World Marble and Stones Report 2021*, comentados por Montani, em 2020 a extração global de rochas ornamentais (*gross quarrying*) atingiu aproximadamente 318 milhões de toneladas. Desse total, cerca de 163 milhões de toneladas corresponderam a resíduos de lavra (*quarrying waste*), resultando em uma produção bruta aproveitável (*raw production*) de aproximadamente 155 milhões de toneladas. Adicionalmente, durante as etapas de beneficiamento, foram geradas cerca de 63,5 milhões de toneladas de resíduos de processamento. Considerando a produção em pedreira (*leading quarry production*), o Brasil e Portugal figuraram entre os dez maiores produtores mundiais, com aproximadamente 8,0 e 2,85 milhões de toneladas, correspondendo a 5,2% e 1,8% da produção global, respectivamente (Montani, 2021). O processo de fabricação dessas rochas gera grandes volumes de lama poluída, normalmente depositados em aterros ou áreas reservadas pelas empresas (Bacarji *et al.*, 2013). Segundo Singh *et al.* (2017a), no beneficiamento das rochas ornamentais, incluindo corte, modelagem e polimento, cerca de 30% do material processado transforma-se em resíduo, frequentemente descartado de forma inadequada no meio ambiente. No Brasil, dados setoriais evidenciam a magnitude dos resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva das rochas ornamentais. De acordo com a ABIROCHAS (2024), em 2024 a produção de rochas brutas atingiu aproximadamente 10,5 milhões de toneladas, das quais cerca de 9,43 milhões de toneladas foram destinadas ao processamento. Nessa etapa, os rejeitos de processamento corresponderam a aproximadamente 41% do material processado, totalizando cerca de 3,87 milhões de toneladas, o que reforça a relevância ambiental associada à destinação desses resíduos.

O mármore, conhecido como uma rocha metamórfica transformada a partir de calcário puro vem sendo utilizado cada vez mais na indústria de materiais de construção (Ma *et al.*, 2019a),

se destacando a China, Índia, Brasil, Turquia e Itália, como os países líderes na produção deste material (Vardhan *et al.*, 2019a). Assim, à medida que a produção nas fábricas de mármore aumentou, a quantidade de resíduos não pôde ser armazenada (Tunc, 2019). Pesquisas anteriores já demonstraram que os rejeitos de mármore possuem potencial de reciclagem e beneficiamento na confecção de materiais de construção civil como, por exemplo: blocos de concreto (Gencel *et al.*, 2012; Mashaly *et al.*, Uygunoğlu *et al.*, 2012); concretos convencionais (Ashish, 2019; Bacarji *et al.*, 2013; Basaran *et al.*, 2022; Vardhan *et al.*, 2019a), concretos autoadensáveis (Ahmad; Zhou, 2023; Alyousef *et al.*, 2019; Aslani *et al.*, 2018; Jain *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2022) e argamassas (Li *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2019a). Dessa forma, ao utilizar esse resíduo o ganho pode ser alcançado e a poluição pode ser evitada (Tunc, 2019).

Outros estudos investigaram a possibilidade de transformar o resíduo de rochas ornamentais em um material pozolânico após passar por um tratamento térmico em altas temperaturas (Mármol *et al.*, 2010; Medina *et al.*, 2017; Mehta *et al.*, 2016; Mittri *et al.*, 2018; Vazzoler *et al.*, 2018; Uliana *et al.*, 2015). À época do desenvolvimento desta pesquisa, contudo, não haviam sido publicados trabalhos que explorassem o tratamento térmico do resíduo de mármore especificamente com o objetivo de avaliar seu potencial expansivo em materiais cimentícios Portland. Assim, esta investigação propôs uma abordagem inédita, ao examinar se a calcinação controlada do resíduo de mármore poderia induzir expansão em pastas cimentícias, contribuindo para a mitigação da retração autógena. Estudos posteriores, como os de Siddique *et al.* (2021) e Rashad *et al.* (2025), também aplicaram o tratamento térmico a resíduos de mármore, confirmando a formação de fases reativas de CaO e MgO e demonstrando sua viabilidade como aditivo ou substituinte em sistemas alcalino-ativados. Contudo, esses trabalhos focaram em aspectos de reatividade e desempenho mecânico, sem abordar o comportamento expansivo nem a compensação de retração em sistemas à base de cimento Portland, temas que permanecem originais e centrais nesta pesquisa. Além disso, observa-se que a maioria dos estudos anteriores abordou resíduos de predominância granítica, enquanto esta pesquisa se dedica a resíduos de mármore, cuja composição mineralógica, rica em carbonatos, oferece um potencial distinto de reatividade e expansão. Dessa forma, esta investigação mantém sua originalidade ao propor e avaliar, por meio de uma abordagem experimental–numérica integrada, o uso de resíduos de mármore calcinados como agentes expansores alternativos, visando não apenas a caracterização do potencial expansivo do material, mas também a análise de seu impacto no desenvolvimento das tensões internas e no

risco de fissuração de elementos estruturais de concreto nas primeiras idades, contribuindo para soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis para a mitigação da retração.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Sem dúvidas, desconsiderando a água, o concreto pode ser considerado o material de construção mais utilizado com uma crescente produção ano a ano em todo o mundo, sendo indispensável durante o processo de qualquer construção moderna (Rubio-Cintas *et al.*, 2023; S Aprianti, 2017). Entretanto, uma característica natural do concreto é o surgimento de fissuras, principalmente na zona de transição interfacial, que podem atuar como principais caminhos para a penetração de materiais nocivos no concreto, o que gera uma alta permeabilidade e baixa durabilidade, degradando assim as propriedades do concreto (Zhan; He, 2019). As fissuras no concreto, antes do carregamento, são causadas principalmente pela retração diferencial e excessiva (Wu *et al.*, 2017). O início do processo de fissuração depende principalmente das relações entre o desenvolvimento da tensão induzida pela retração e a resistência à tração do concreto.

Durante a hidratação do cimento, o calor liberado pelas reações químicas provoca um aumento da temperatura do concreto, seguido posteriormente por um resfriamento, resultando em deformações térmicas caracterizadas por expansão durante o aquecimento e contração durante o resfriamento. Em elementos de concreto em grandes dimensões, esse comportamento torna-se crítico, uma vez que a presença de gradientes térmicos ao longo da seção transversal faz com que a região central, submetida a temperaturas mais elevadas se expanda inicialmente mais do que as camadas externas, que permanecem a temperaturas mais baixas. Como consequência dessa deformação diferencial, surgem tensões de tração na superfície do elemento, as quais podem levar à formação de fissuras ainda durante a fase de aumento de temperatura. Essas fissuras tendem a ser finas e, em muitos casos, podem se fechar parcialmente quando a temperatura do elemento se uniformiza. Na presença de restrições externas, como estruturas adjacentes ou o contato com o subleito, o aumento de temperatura pode gerar tensões de compressão no núcleo do concreto, associadas à expansão impedida. Durante a fase de resfriamento, essas tensões de compressão podem se converter em tensões de tração, à medida que o concreto tenta se contrair enquanto se encontra parcial ou totalmente restrito. Esse efeito é intensificado pelo fato de que, nesse estágio, o concreto apresenta maior grau de hidratação e maior módulo de elasticidade, reduzindo a capacidade de relaxação das tensões. Adicionalmente, a ocorrência simultânea de outros mecanismos de deformação volumétrica,

como a retração autógena, contribui para o aumento das tensões de tração, que podem superar aquelas desenvolvidas na fase inicial de aquecimento. Embora a presença de fissuras seja considerada no dimensionamento do concreto armado, as fissuras induzidas por variações volumétricas podem resultar em alargamento das aberturas existentes, comprometendo o desempenho e a durabilidade das estruturas (Maruyama e Lura; 2019).

A indústria de rochas ornamentais produz uma grande quantidade de resíduos que, misturado à água e outros componentes, dependendo do sistema de corte, transforma-se em uma lama que precisa ser descartada. Devido aos efeitos negativos gerados pelo montante de resíduo e aos custos e dificuldades para destinação, este resíduo tem sido alvo de estudos para a busca de diferentes alternativas, com o intuito de promover a sua utilização no setor da construção civil. Dentre essas alternativas, destaca-se os estudos ligados a investigação do resíduo de mármore em materiais à base de cimento. Alternativamente, os resíduos em forma de pedaços podem ser britados e utilizados como pó e agregados, mas devido as condições físicas o material proveniente da serragem ainda não é aplicado diretamente. Desta forma, o tratamento dos resíduos de rochas ornamentais é uma grande necessidade do setor.

Com base na literatura, observa-se que a aplicação do resíduo de mármore na produção de materiais cimentícios reduz não apenas os efeitos ambientais da utilização do mármore, mas também causa a redução no uso de outros recursos naturais, além de ser possível obter boas propriedades do concreto em termos de durabilidade, resistência e desempenho microestrutural. Mesmo embora uma grande quantidade de estudos tem sido realizada em nível global, ainda não existem resultados suficientes para comprovar a eficácia do resíduo de mármore tratado termicamente, pois o comportamento deste material proposto permanece desconhecido frente aos parâmetros estudados. Além disso, o mármore trata-se de uma rocha metamórfica que tem como constituintes a calcita e a dolomita, sendo que a calcita é o principal constituinte (Singh *et al.* 2019a). Devido a isso, o resíduo de mármore possui alta concentração de teor de óxido de cálcio em sua composição química, o que oferece a possibilidade de ser utilizado como um agente expensor, e com isso, tornar-se uma estratégia mitigadora de retração.

Por outro lado, a aplicação de agentes expansores em estruturas de concreto armado suscita preocupações quanto ao desenvolvimento de tensões internas não previstas no dimensionamento original. Visto que esses materiais induzem variações volumétricas significativas nas idades iniciais, é crucial compreender como tais fenômenos alteram o estado tensional do elemento estrutural. Dessa forma, a simulação numérica desenvolvida nesta

pesquisa não se restringe a uma análise termomecânica convencional, mas busca representar de forma integrada os principais mecanismos responsáveis pela geração de tensões em idades iniciais, incluindo a evolução térmica, a retração autógena, a expansão induzida por agentes expansores e o desenvolvimento progressivo da rigidez do concreto. O uso do Método dos Elementos Finitos permite avaliar como a interação entre esses fenômenos influencia o estado tensional do elemento estrutural e o risco de fissuração antes da aplicação de carregamentos externos, aspecto ainda pouco explorado na literatura técnica, especialmente para concretos contendo agentes expansores não comerciais.

Tendo em vista a identificação da lacuna de conhecimento na literatura científica, a parte inovadora dessa pesquisa é a busca por uma nova alternativa que incentive a população a incorporar o resíduo de mármore na construção civil, bem como a busca por alternativas viáveis para mitigar a retração, e a partir disso, conscientizar a sociedade sobre a eficácia e viabilidade desse resíduo como um material eficaz. Se confirmada a eficácia do estudo, o produto proposto não só contribuirá significativamente para a durabilidade do concreto utilizado na região do Distrito Federal, que enfrenta diversos indícios de problemas patológicos em estruturas de concreto armado devido a questões climáticas locais, mas terá também aplicações benéficas mundialmente.

Esse trabalho está inserido na linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção” do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília. Pelo PECC, algumas pesquisas foram desenvolvidas por outros pesquisadores que abordaram estudos com resíduo de rochas ornamentais em concreto convencional (Negredo, 2018) e concreto autoadensável (Vieira, 2017; Pereira, 2021). Além dos trabalhos que abordaram o desenvolvimento e mitigação da retração em materiais cimentícios (Agostinho, 2021; Borges, 2019; Fraga, 2023; Manzano, 2016; Martins, 2022; Ordóñez, 2013; Pereira, 2007; Reis, 2019; Rodrigues, 2010; Santos, 2016; Santos, 2021; Silva Junior, 2017; Silva, 2022; Suarez, 2015) e análises numéricas, por meio da linha de pesquisa “Métodos Numéricos e Computacionais Aplicados à Engenharia”, com aplicações do Método dos Elementos Finitos e outros.

Um acordo de cotutela foi formalizado, com a orientação do Professor Miguel Ângelo Dias Azenha na Universidade do Minho e orientação da professora Valdirene Maria Silva Capuzzo e coorientação do professor Rodrigo de Melo Lameiras na Universidade de Brasília. O professor Miguel Azenha tem realizado estudos com materiais cimentícios, envolvendo ensaios

experimentais e análises numéricas, sobre a evolução das propriedades durante a hidratação, fluência e retração assuntos esses de interesse no desenvolvimento do plano de pesquisa proposto. Além disso, um dos ensaios previstos na pesquisa, o EMM-ARM, foi desenvolvido, melhorado e aplicado pelo professor Miguel Azenha e vem sendo utilizado em vários outros estudos inclusive nas pesquisas do PECC, orientadas pelo professor Rodrigo de Melo Lameiras.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral proposto para esta pesquisa é investigar a influência do tratamento térmico do resíduo de mármore como agente expensor alternativo para a mitigação da retração em materiais cimentícios, por meio de uma abordagem conjunta experimental e numérica, comparando seu desempenho com agentes expansores e aditivos redutores de retração comerciais.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a finalidade de atender o que foi proposto no objetivo geral, foi necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Submeter resíduos de mármore de diferentes origens a tratamento térmicos em distintas condições, avaliando a influência da temperatura na ativação de fases potencialmente expansivas;
- Caracterizar física, química, térmica e mineralogicamente os resíduos de mármore antes e após o tratamento térmico, visando identificar as transformações responsáveis pelo comportamento expansivo;
- Avaliar o comportamento de expansão e retração em pastas cimentícias contendo resíduo de mármore tratado termicamente, comparando-o com agentes expansores e aditivos redutores de retração comerciais, por meio da análise das alterações microestruturais e das propriedades mecânicas;
- Avaliar as propriedades do estado fresco e endurecido dos concretos convencionais produzidos com diferentes estratégias de mitigação da retração, incluindo resíduo de mármore tratado termicamente, agente expensor e aditivo redutor de retração;
- Desenvolver e validar um modelo numérico termomecânico tridimensional não linear, baseado no método dos elementos finitos, capaz de representar adequadamente o comportamento estrutural de concretos com agentes expansores;

- Realizar um estudo paramétrico numérico para avaliar a interação entre expansão, maturidade do concreto, desenvolvimento do módulo de elasticidade e evolução das tensões em elementos estruturais de concreto simples.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em quatro capítulos. Neste capítulo, de introdução, contém a justificativa da pesquisa e importância do tema, assim como o objetivo geral, os objetivos específicos e a descrição da estrutura do trabalho.

No segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando conceitos sobre variações volumétricas nos materiais cimentícios, com destaque para os fenômenos de retração térmica, retração autógena e retração por secagem. Este capítulo aborda, também, as estratégias mitigadoras de retração, tais como a utilização do agente expansor e o aditivo redutor de retração, empregados individualmente e combinados. Foram levantadas informações relevantes para o presente trabalho, incluindo estudos realizados sobre a problemática da geração do resíduo de mármore, bem como as várias possibilidades de utilização desse material, com o destaque para o tratamento térmico como uma lacuna científica para ser investigada nesta pesquisa. Por fim, apresenta-se uma abordagem simples e objetiva da modelagem numérica, com destaque para o Método dos Elementos Finitos (MEF), para a utilização nas análises numéricas que serão desenvolvidas neste estudo.

No terceiro capítulo apresenta o programa experimental e numérico desenvolvido para atender aos objetivos específicos da pesquisa. São descritos os materiais utilizados, os ensaios de caracterização, os procedimentos de preparação dos agentes tratados termicamente, bem como os ensaios realizados com pastas cimentícias e concretos convencionais, abrangendo propriedades no estado fresco, expansibilidade, microanálises e propriedades mecânicas. Além disso, o capítulo apresenta as premissas e estratégias adotadas para as análises numéricas, desenvolvidas com base nos resultados experimentais e em dados complementares da literatura.

No quarto capítulo reúne os resultados obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas, acompanhados de suas respectivas discussões e interpretações, destacando as correlações observadas entre o comportamento experimental e o modelado.

No quinto capítulo é dedicado à síntese e integração dos principais resultados da pesquisa, reunindo de forma sistematizada os achados mais relevantes e evidenciando as contribuições científicas do estudo.

Por fim, no sexto capítulo apresenta as conclusões gerais da pesquisa e propõe recomendações para trabalhos futuros, com base nas evidências experimentais e numéricas obtidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo será apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais conceitos abordados no desenvolvimento da pesquisa. A seleção dos artigos mais relevantes, utilizados como referência na escrita deste capítulo, foi feita por meio de uma revisão sistemática, em que foi utilizado a Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC), proposta por Mariano e Rocha Santos (2017), através da base de dados *Scopus* e *Web of Science*.

2.1 VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O concreto, por ser um material poroso, está sujeito a variações volumétricas associadas à presença e ao movimento de água em sua rede capilar, bem como às alterações térmicas decorrentes do calor de hidratação. Essas mudanças podem induzir tensões internas mesmo em elementos sem restrições externas relevantes, pois o processo de redistribuição de umidade e temperatura tende a ocorrer de forma não uniforme no interior do material. Assim, ainda que a resultante de tensões possa ser nula em condições de equilíbrio externo, a evolução transiente das tensões internas pode levar ao surgimento de fissuras (Ribeiro *et al.* Vermelhudo, 2023). Desde as primeiras idades, tais variações podem estar associadas a efeitos térmicos e higrométricos, a processos químicos de hidratação e, eventualmente, à ação de carregamentos externos, ocorrendo tanto nas primeiras 24 horas quanto após o endurecimento (Idiart, 2009).

Para compreender as retrações e expansões em materiais cimentícios, é fundamental distinguir os conceitos de volume aparente e volume absoluto (ou volume de sólidos). O volume aparente corresponde ao volume geométrico externo do corpo, independentemente de sua porosidade e estrutura interna. Já o volume absoluto representa a fração do volume aparente efetivamente ocupada por matéria sólida. Assim, dois corpos podem apresentar o mesmo volume aparente e diferentes volumes absolutos, por exemplo, em função de distintos teores de ar incorporado, o que implica massas distintas para um mesmo volume geométrico (Aïtcin, 2000). Essa distinção é crucial, uma vez que as principais reações do cimento alteram primariamente o volume absoluto dos sólidos formados, enquanto as retrações usualmente observadas em ensaios correspondem à variação do volume aparente.

Durante a hidratação do cimento Portland ocorre liberação de calor e contração química do volume sólido, uma vez que o volume absoluto dos produtos hidratados é menor do que a soma dos volumes absolutos do cimento anidro e da água combinada, sendo usualmente aceita uma redução da ordem de 10% no volume sólido (Aïtcin, 2000). Entretanto, a contração do volume

absoluto não implica necessariamente redução do volume aparente. Em concretos curados continuamente sob água, o volume aparente pode, inclusive, aumentar nas idades iniciais, devido ao crescimento de cristais, como etringita e portlandita, e à absorção de água pelos produtos de hidratação, enquanto o volume sólido diminui (Aïtcin, 2000). Desse modo, em condições de cura úmida adequada, a contração química pode ocorrer sem se traduzir em retração mensurável do corpo.

A transição da contração química para a retração do concreto está fortemente associada à formação de meniscos na rede capilar. Quando há perda de água por secagem ou quando a hidratação consome água em um sistema selado (autossecagem), meniscos se desenvolvem em capilares progressivamente mais finos, aumentando as forças capilares internas. Enquanto essas forças forem inferiores à resistência à tração do material, a deformação se manifesta de forma predominantemente elástica; quando superam a resistência à tração, ocorre fissuração (Aïtcin, 2000). Nesse contexto, a cura assume papel decisivo, pois a presença de fonte externa de água minimiza a formação de meniscos, reduzindo o potencial de retração autógena e de fissuração associada.

É importante ainda diferenciar autossecagem e secagem. A autossecagem tende a ocorrer de modo relativamente homogêneo no interior do concreto não curado, enquanto a secagem é um fenômeno localizado, que se inicia na superfície e progride para o interior conforme a conectividade da microestrutura e as condições ambientais. Como consequência, gradientes de umidade e de resistência à tração se desenvolvem próximos à superfície, podendo resultar em fissuras mais pronunciadas nessa região (Aïtcin, 2000). Além disso, a retração do concreto é sempre menor que a retração da pasta correspondente, devido à restrição imposta pelo esqueleto dos agregados; contudo, essa restrição pode favorecer a microfissuração na pasta e tornar a zona superficial, enriquecida em pasta pelo efeito parede, mais suscetível à fissuração por retração (Aïtcin, 2000).

Embora fenômenos como expansão por absorção de água envolvam mecanismos físico-químicos (Powers, 1959 *apud* Neville, 2016), a interpretação adequada das variações volumétricas em materiais cimentícios requer reconhecer que a retração observada no concreto resulta da combinação de efeitos térmicos e higrométricos e, sobretudo, do modo como a cura controla a disponibilidade de água, a formação de meniscos e a evolução da microestrutura. Por essa razão, a retração não deve ser tratada como um fenômeno inevitável, mas como fortemente

dependente das condições de cura e do transporte de umidade, com implicações diretas sobre fissuração e durabilidade das estruturas (Aïtcin, 2000).

Em síntese, as variações volumétricas em materiais cimentícios decorrem da combinação de efeitos térmicos, químicos e higrométricos, sendo fortemente influenciadas pelas condições de cura e pelo estado de saturação da rede capilar. Essas variações podem resultar em retrações e expansões com mecanismos distintos, que se manifestam em diferentes idades e escalas.

O concreto expansivo pode ser produzido a partir de cimentos expansivos ou pela incorporação de aditivos capazes de induzir expansão nas idades iniciais. Em ambos os casos, o objetivo é compensar parcial ou totalmente as tensões de tração associadas à retração restringida, reduzindo o potencial de fissuração em estruturas de concreto (Prayuda *et al.*, 2022a). Embora cimentos expansivos possam dispensar a adição de outros componentes para promover expansão, eles geralmente oferecem controle limitado sobre a magnitude e a cinética do processo expansivo, uma vez que o mecanismo de expansão está intrinsecamente ligado à sua composição e não permite ajustes flexíveis de dosagem. Em contrapartida, os aditivos expansivos possibilitam maior controle do nível e do momento da expansão por meio da dosagem, permitindo sua adequação às condições de restrição e aos requisitos estruturais específicos. Essa flexibilidade torna os aditivos expansivos particularmente atrativos em aplicações associadas à compensação de retração e à protensão química, nas quais o controle da resposta expansiva é fundamental para o desempenho estrutural (Dhahir; Marx, 2023).

A retração é uma característica inerente aos materiais cimentícios, manifestando-se tanto na fase plástica quanto após o endurecimento (Tran *et al.*, 2021). Trata-se de um fenômeno diretamente relacionado ao deslocamento e à redistribuição da água na rede capilar do concreto quando este se encontra parcialmente saturado (Aïtcin, 2016). A retração pode impactar negativamente o desempenho estrutural, especialmente quando as tensões de tração geradas pela restrição à deformação são suficientemente elevadas para provocar fissuração (Liang *et al.*, 2023). Em nível micromecânico, o surgimento dessas tensões está associado à evaporação da umidade, ao desenvolvimento de tensões capilares e de tensão superficial no interior da matriz cimentícia (Aghaee; Khayat, 2021).

A origem da retração é complexa e envolve diferentes mecanismos que se iniciam em idades precoces e podem se sobrepor ao longo da vida útil do material cimentício (Tran *et al.*, 2021). Por esse motivo, a retração deve ser considerada no projeto estrutural sempre que sua influência

comprometer o atendimento aos requisitos de segurança associados aos estados limites de serviço e, em situações específicas, aos estados limites últimos (Ribeiro; Faria; Vermelhudo, 2023). Esses mecanismos dão origem a diferentes manifestações de retração, cuja classificação auxilia na compreensão de suas causas, efeitos estruturais e estratégias de mitigação. Do ponto de vista prático e conceitual, a literatura reconhece seis principais tipos de retração no concreto: retração plástica, retração química, retração autógena, retração por secagem, retração térmica e retração por carbonatação (Aïtcin, 2016; Tang *et al.*, 2021; Abedi *et al.*, 2025).

A retração plástica ocorre nas primeiras horas após a mistura, enquanto o concreto ainda se encontra no estado plástico, sendo resultante da evaporação superficial da água em uma taxa superior à sua reposição por exsudação. Essa condição leva à formação de pressão capilar negativa na pasta, podendo provocar fissuras superficiais precoces, especialmente sob condições ambientais adversas, como vento, baixa umidade relativa e altas temperaturas (Tang; He, 2021; Kurup *et al.*, 2023).

A retração química acompanha inevitavelmente a hidratação do cimento, uma vez que o volume absoluto dos produtos de hidratação é menor do que o volume combinado dos reagentes (cimento anidro e água). Essa contração do volume sólido ocorre independentemente da relação água/aglomerante, enquanto houver hidratação em curso, e constitui a base físico-química para o desenvolvimento da retração autógena (Aïtcin, 2016; Tang; He, 2021). Embora a retração química represente uma redução do volume absoluto dos sólidos formados durante a hidratação, ela não se traduz necessariamente em retração mensurável do volume aparente do concreto. Em condições de cura úmida adequada, essa contração pode ocorrer sem redução do volume externo, devido ao preenchimento contínuo dos poros por água e à ausência de meniscos capilares capazes de gerar tensões de tração na matriz cimentícia (Aïtcin, 2016).

A retração autógena está associada ao consumo interno de água durante a hidratação, que reduz a saturação dos poros e gera autosssecagem, com consequente desenvolvimento de pressão capilar e contração do material, mesmo em sistemas selados. Esse tipo de retração é particularmente significativo em concretos com baixa relação água/aglomerante, nos quais a disponibilidade de água livre é limitada (Aïtcin, 2016; Abedi *et al.*, 2025).

A retração por secagem ocorre após o endurecimento, quando a água capilar migra do interior do concreto para o ambiente externo devido a gradientes de umidade. Esse processo pode se

estender por longos períodos e é influenciado por fatores como umidade relativa, temperatura, dimensão do elemento e composição do concreto (Tang; He, 2021; Abedi *et al.*, 2025).

A retração térmica resulta das variações de temperatura no concreto, particularmente do resfriamento subsequente ao pico térmico provocado pelo calor de hidratação. Em idades iniciais, quando o módulo de elasticidade do concreto já se encontra em elevação, o resfriamento sob condições de restrição pode gerar tensões de tração significativas e levar à fissuração, sendo um mecanismo especialmente relevante em concretos massivos (Aïtcin, 2000; Tang; He, 2021; Kurup *et al.*, 2023).

Por fim, a retração por carbonatação decorre da reação do dióxido de carbono atmosférico com os produtos de hidratação do cimento, especialmente a portlandita, formando carbonato de cálcio. Trata-se de um fenômeno de evolução lenta, que se desenvolve predominantemente da superfície para o interior do concreto e tende a se manifestar em idades avançadas, motivo pelo qual não será aprofundado neste trabalho (Tang; He, 2021; Abedi *et al.*, 2025).

Embora a literatura reconheça a existência de seis tipos de retração em materiais cimentícios, esta tese aprofunda a análise daquelas mais diretamente relacionadas ao desempenho estrutural nas idades iniciais e ao controle da fissuração em concreto endurecido: a retração térmica, a retração autógena e a retração por secagem. Essa escolha justifica-se pelo fato de que esses três mecanismos representam as principais contribuições para a retração total do concreto endurecido, especialmente em concretos de baixa relação água/aglomerante e em elementos submetidos a diferentes níveis de restrição e gradientes térmicos, sendo diretamente influenciados por processos físico-químicos associados à hidratação do cimento e à evolução da microestrutura.

A retração plástica não é abordada de forma detalhada neste trabalho, uma vez que se manifesta predominantemente no estado fresco, antes da pega do concreto, estando fortemente associada a condições de execução e ambientais, como taxa de evaporação, vento, temperatura e exsudação. Assim, seu controle está mais relacionado a práticas adequadas de lançamento e cura inicial do concreto do que à atuação de agentes expansores ou à resposta mecânica do material endurecido, que constituem o foco desta pesquisa. A retração por carbonatação, por sua vez, não é aprofundada por ocorrer majoritariamente em idades mais avançadas e depender fortemente das condições de exposição ambiental. Já a retração química, embora fundamental para a compreensão dos mecanismos volumétricos associados à hidratação do cimento, está

relacionada à variação do volume absoluto dos sólidos e é amplamente reconhecida como a base física da retração autógena. Assim, nesta tese, a retração química é tratada de forma integrada à discussão sobre autosssecagem, pressão capilar e desenvolvimento da retração autógena.

2.1.1 Retração térmica

A retração térmica corresponde à variação volumétrica do concreto associada à redução de sua temperatura interna, sendo um fenômeno inerente aos materiais cimentícios submetidos a ciclos térmicos ao longo do processo de hidratação e endurecimento. Em idades iniciais, o concreto experimenta um aumento significativo de temperatura devido à liberação de calor das reações exotérmicas de hidratação do cimento, seguido por uma fase de resfriamento à medida que as perdas térmicas superam a taxa de geração de calor (Aïtcin, 2000; Tang *et al.*, 2021).

Durante a fase de aquecimento, o módulo de elasticidade do concreto ainda é relativamente baixo, de modo que as deformações térmicas tendem a gerar tensões internas de pequena magnitude, mesmo na presença de restrições. No entanto, à medida que a hidratação avança, ocorre um aumento progressivo da rigidez do material. Assim, quando o concreto entra na fase de resfriamento, a contração térmica ocorre em um estado no qual o módulo de elasticidade já é significativamente maior, favorecendo o desenvolvimento de tensões de tração elevadas sob condições de restrição parcial ou total, o que pode levar à fissuração térmica (Tang *et al.*, 2021).

Além da variação temporal da temperatura média, a retração térmica está fortemente associada à existência de gradientes térmicos no interior do elemento estrutural. Em elementos delgados, o calor gerado pela hidratação é dissipado com relativa facilidade para o ambiente, resultando em menores gradientes de temperatura. Em contrapartida, em elementos de grandes dimensões ou em concretos massivos, a dissipação térmica é mais lenta no núcleo do elemento, enquanto as regiões superficiais sofrem resfriamento mais rápido. Essa diferença de temperatura entre o interior e a superfície gera deformações térmicas diferenciais, induzindo tensões de tração que podem superar a resistência à tração do concreto e provocar fissuração (Kurup *et al.*, 2023).

Fenômeno semelhante pode ocorrer em pavimentos e lajes, nos quais diferenças de temperatura entre as faces superior e inferior do elemento, resultantes da exposição solar, variações ambientais ou condições de cura, promovem retrações térmicas não uniformes e elevam o risco de fissuração. Nesses casos, a retração térmica não está apenas associada ao histórico de

hidratação, mas também às condições de exposição e troca térmica com o meio ambiente (Kurup *et al.*, 2023).

Do ponto de vista físico, o comportamento térmico do concreto em idades iniciais apresenta uma particularidade relevante: as ligações mecânicas responsáveis pela resistência do material são formadas a temperaturas que evoluem ao longo do tempo, e não necessariamente à temperatura de serviço da estrutura. Assim, o concreto pode ser “fixado” microestruturalmente a uma temperatura mais elevada, sofrendo posteriormente retração térmica ao resfriar até a temperatura ambiente, o que contribui para o desenvolvimento de tensões internas adicionais (Aïtcin, 2000). A retração térmica é, portanto, um mecanismo particularmente crítico em concretos massivos e em estruturas submetidas a elevados gradientes térmicos, especialmente quando combinada com outros tipos de retração, como a autógena e a retração por secagem. Estratégias de mitigação incluem o controle do calor de hidratação por meio da utilização de materiais cimentícios suplementares, a adoção de medidas de controle térmico durante a concretagem e a implementação de práticas adequadas de cura, de modo a reduzir gradientes térmicos e limitar o desenvolvimento de tensões de tração associadas ao resfriamento do concreto (Kurup *et al.*, 2023).

2.1.2 Retração autógena

A retração autógena é definida como uma deformação macroscópica em materiais cimentícios que ocorre em sistemas fechados e isotérmicos, resultante exclusivamente das reações químicas associadas à hidratação do aglomerante, sem influência de trocas de umidade com o ambiente externo ou de carregamentos mecânicos (Mechtcherine; Reinhardt, 2012; Wu *et al.*, 2017). Esse fenômeno está diretamente associado ao consumo interno de água durante a hidratação do cimento, o que leva à redução da umidade relativa interna e ao desenvolvimento de tensões capilares na rede porosa do material (Zhan; He, 2019).

A retração autógena manifesta-se independentemente de restrições externas, variações térmicas ou evaporação superficial, sendo particularmente significativa em sistemas com baixa relação água/aglomerante. Nessas condições, a água disponível torna-se insuficiente para manter a saturação dos poros à medida que a hidratação avança, intensificando o processo de autossecagem e, conseqüentemente, as deformações por retração (Oliveira; Ribeiro; Branco, 2020). Por essa razão, a retração autógena é mais pronunciada em pastas, argamassas e

concretos de alto desempenho, caracterizados por elevada compacidade e baixa permeabilidade.

Silva (2007) define a retração autógena como a redução macroscópica de volume observada em sistemas cimentícios a partir do momento em que o material ultrapassa o patamar de percolação, correspondente à transição do estado de suspensão para um esqueleto sólido contínuo. A partir desse estágio, as deformações internas passam a ser transmitidas como deformações externas mensuráveis. A redução volumétrica está associada predominantemente ao mecanismo de autosssecagem, que gera tensões capilares nos poros preenchidos por água, sendo esse fenômeno físico-químico dominante para o desenvolvimento da retração autógena. Esse tipo de retração ocorre principalmente nas idades iniciais, quando tanto a taxa de hidratação quanto a intensidade da autosssecagem são mais elevadas, o que torna fundamental o monitoramento das deformações desde os primeiros instantes após a mistura (Wyrzykowski *et al.*, 2017).

O instante a partir do qual a retração autógena passa a ser relevante do ponto de vista do desenvolvimento de tensões internas e do risco de fissuração é frequentemente denominado na literatura como tempo zero (t_0). Em termos físicos, esse conceito está associado à transição de comportamento típico de uma suspensão para comportamento típico de sólido, capaz de restringir a transformação integral da contração química em variação externa de volume e de permitir o surgimento de meniscos, pressão capilar e tensões internas (Aïtcin, 1998; Silva, 2007; Weiss, 2002). A definição do tempo zero exerce influência direta sobre os valores de retração autógena reportados, uma vez que medições iniciadas tardiamente tendem a subestimar as deformações efetivamente relevantes para a avaliação do potencial de fissuração. Por esse motivo, Aïtcin (1998) recomenda que as medições sejam iniciadas o mais cedo possível, ainda que a interpretação dos resultados considere apenas períodos posteriores, de modo a evitar a perda de informações associadas às deformações iniciais.

Na prática, entretanto, não existe um critério único e universalmente aceito para a definição do tempo zero. Diversos estudos adotam o final de pega como marco operacional para t_0 , por representar um momento em que o material já apresenta rigidez suficiente para transmitir tensões de tração, sendo essa abordagem amplamente empregada em ensaios de retração autógena e em protocolos experimentais consolidados (Gao *et al.*, 2014; Tenório Filho *et al.*, 2019; Wyrzykowski *et al.*, 2017). Em muitos casos, as deformações são monitoradas desde idades muito precoces, mas os valores de retração passam a ser contabilizados a partir do final de pega, por razões de consistência mecânica e comparabilidade entre estudos.

Contudo, a literatura também aponta que o final de pega nem sempre coincide com o início efetivo da autosssecagem ou do acúmulo significativo de tensões internas. Em função disso, alguns autores discutem alternativas para a definição do tempo zero, como: (i) o início da queda da umidade relativa interna, quando esta não ocorre imediatamente após a pega (Huang; Ye, 2017; Ma *et al.*, 2019b); (ii) a identificação de um ponto de transição (“*knee-point*”) na curva de deformação ou em sua taxa, associado à estabilização do esqueleto sólido (Huang; Ye, 2017;; Ma *et al.*, 2019b); e (iii) o uso de indicadores indiretos da evolução microestrutural, como a velocidade de pulso ultrassônico ou parâmetros derivados de calorimetria isotérmica, nos quais o tempo de pega é inferido a partir do comportamento do fluxo de calor (Afroz *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2014).

Dessa forma, o tempo zero deve ser compreendido não como um instante físico único, mas como um marco operacional, cuja definição pode variar conforme o objetivo do estudo, o método de ensaio e o fenômeno que se deseja representar (Huang; Ye, 2017; Tenório Filho *et al.*, 2019). Essa diversidade de abordagens reforça a importância de explicitar claramente o critério adotado em cada investigação, de modo a garantir a correta interpretação e comparação dos resultados de retração autógena.

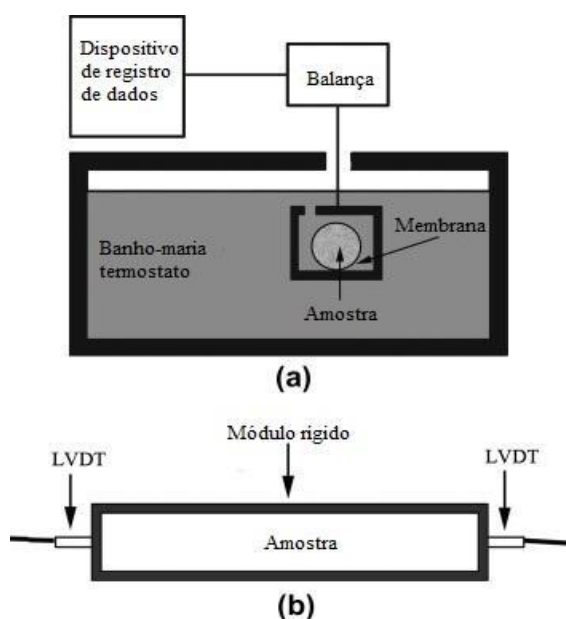
Diversos fatores influenciam a magnitude e a cinética da retração autógena, incluindo a composição da mistura, a temperatura de cura, a composição e finura do cimento e das adições minerais, as características dos agregados e parâmetros de dosagem, como a relação água/aglomerante e o consumo de cimento. Dentre esses fatores, a relação água/aglomerante exerce papel central, pois controla diretamente a disponibilidade de água livre no sistema e, consequentemente, a evolução da umidade relativa interna (Silva, 2007). De modo geral, quanto menor a relação água/aglomerante, maior tende a ser a retração autógena, em função da intensificação da autosssecagem.

Apesar de amplamente investigada e de haver consenso quanto às suas causas gerais, associadas ao consumo interno de água, à retração química e à autosssecagem, a retração autógena resulta de mecanismos físicos e físico-químicos complexos, cuja hierarquia relativa e contribuição dominante ainda não são descritas de forma unívoca na literatura, especialmente no que se refere ao papel da pressão capilar, da água adsorvida e da pressão de disjunção (Zhan; He, 2019; Tang; He, 2021; Kurup *et al.*, 2023; Abedi *et al.*, 2025).. Os mecanismos mais aceitos para explicar a geração das forças responsáveis por essa retração incluem: (i) o desenvolvimento de pressão capilar associada à formação de meniscos em poros parcialmente saturados; (ii)

variações na energia superficial das partículas coloidais; e (iii) alterações na pressão de disjunção associadas à redução da espessura da água adsorvida nas superfícies sólidas (Van Breugel, 2001). Estudos recentes indicam ainda uma forte correlação entre a retração autógena e a umidade relativa interna do concreto, sendo observada uma relação inversa entre ambas: quanto maior a umidade relativa interna, menor a magnitude da retração autógena (Kang *et al.*, 2022).

A determinação experimental da retração autógena requer sua separação conceitual e experimental em relação a outras deformações que podem ocorrer nas idades iniciais, como a retração por secagem e as deformações térmicas. Assim, a escolha do método de ensaio adequado é um aspecto fundamental. Os métodos empregados para medir a retração autógena em materiais cimentícios podem ser classificados, de modo geral, em métodos volumétricos e métodos lineares (Wyrzykowski *et al.*, 2017). No método volumétrico, usualmente aplicado a pastas de cimento, a amostra é envolta por uma membrana flexível e curada sob água em condições isotérmicas. A retração é então determinada a partir da variação do volume de água deslocada ou da mudança de flutuabilidade do sistema, conforme ilustrado na Figura 2.1(a) (Gao *et al.*, 2014). Já no método linear, a pasta é moldada em um molde rígido de baixo atrito, sendo as variações de comprimento registradas por sistemas de medição acoplados, como sensores de deslocamento ou relógios comparadores, conforme apresentado na Figura 2.1(b).

Figura 2.1 – Métodos de ensaios típicos para determinar a retração em pasta de cimento: (a) Método volumétrico; (b) Método linear.



Fonte: Adaptado de Gao *et al.* (2014).

Uma das abordagens mais conhecidas para o método linear em pasta cimentícias é a proposta original de Jensen e Hansen (1995), que introduz a pasta em tubo de plástico corrugado, em seguida o tubo é selado e colocado horizontalmente em uma estrutura metálica rígida, para que seja feito as medições da retração linear. Atualmente esse método é normatizado através da ASTM C1698 (2019), que foi desenvolvida com base no projeto original de Jensen e Hansen (1995), e foi utilizado nesta pesquisa.

Entre os métodos lineares, destaca-se a metodologia originalmente proposta por Jensen e Hansen (1995), na qual a pasta cimentícia é inserida em um tubo plástico corrugado, selado e posicionado horizontalmente em uma estrutura rígida para a medição das deformações ao longo do tempo. Esse procedimento foi posteriormente normalizado pela ASTM C1698 (2019) e constitui o método adotado nesta pesquisa. Diversos estudos que investigam deformações volumétricas em materiais cimentícios, incluindo a atuação de agentes redutores de retração e agentes expansores, utilizam o método do tubo corrugado para a determinação da retração autógena em pastas (Anshuang *et al.*, 2017; Mo *et al.*, 2019; Ribeiro; Faria; Vermelhudo, 2023; Wyrzykowski; Terrasi; Lura, 2018).

Para concretos, o método volumétrico não é recomendado, uma vez que a geometria e a rigidez dos agregados podem danificar a membrana utilizada nesse tipo de ensaio (Gao *et al.*, 2014). Assim, a retração autógena em concretos é usualmente determinada por métodos lineares, com medições realizadas em corpos de prova dispostos horizontal ou verticalmente. Entre as metodologias consolidadas, destaca-se a proposta por Tazawa e Miyazawa (1999), desenvolvida em conjunto com o *JCI – Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete* (1998) e posteriormente modificada por Silva (2007). Alternativamente, a retração autógena em concreto pode ser avaliada por meio de corpos de prova prismáticos selados com filmes plásticos impermeáveis, desde que sejam adotados cuidados rigorosos para evitar trocas de umidade com o ambiente externo, conforme relatado em diversos estudos recentes (Liu *et al.*, 2019; Oliveira; Ribeiro; Branco, 2014, 2015; Rubio-Cintas *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2020a; Valipour; Khayat, 2018; Yuan *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2022).

2.1.3 Retração por secagem

Ambos os mecanismos responsáveis pela retração autógena e pela retração por secagem, autodessecação e secagem, respectivamente, correspondem a uma diminuição da umidade relativa interna (URI) do material, sendo que a diferença entre eles se encontra na origem desta

diminuição. Para o mecanismo de autodessecação, a diminuição da URI é decorrente do consumo de água capilar pelas reações químicas de hidratação, enquanto que para o mecanismo de secagem, essa diminuição é gerada pela evaporação da água dos poros, devido a diferença existente entre a URI interna e a URI do ambiente externo (Silva, 2007). Por isso, de acordo com Hua *et al.* (1995), pode-se pensar que o mecanismo responsável pela retração autógena é semelhante ao mecanismo que gera a retração por secagem, quando mantém os domínios de umidade relativa correspondentes. Logo, os três mecanismos principais que explicam a retração por secagem são também a variação da depressão capilar, variação da pressão de disjunção, e a variação da tensão de superfície de partículas coloidais.

A retração por secagem trata-se da continuidade da evaporação da umidade presente nos poros capilares finos e da água localizada entre as lamelas do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Durante a evaporação é formado menisco ao longo das redes capilares e causa tensão superficial, que atua como tensão de tração sobre as paredes dos poros, que por sua vez, causa uma pressão interna negativa e forças compressivas nos poros capilares, causando então a retração nas pastas cimentícias (Noushini *et al.*, 2014). A retração por secagem em materiais cimentícios trata-se do resultado da perda de umidade interna na estrutura porosa, que acontece para estabelecer o equilíbrio hídrico com a umidade relativa do ambiente externo (Di Bella, 2016).

A retração por secagem está associada à perda progressiva de água presente na pasta de cimento hidratada, cuja natureza e localização na microestrutura controlam a magnitude das deformações volumétricas. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a água na pasta pode ser classificada em água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada, sendo que apenas parte dessas contribui efetivamente para a retração por secagem.

Inicialmente, ocorre a evaporação da água capilar presente em vazios maiores que aproximadamente 50 nm, frequentemente denominada água livre. A remoção dessa água provoca efeitos volumétricos limitados. À medida que a secagem prossegue e a umidade relativa interna diminui, a água passa a ser removida de poros capilares mais finos. Nessa faixa de poros, desenvolvem-se tensões associadas à curvatura dos meniscos líquido-vapor e à redução da pressão interna nos poros, o que induz estados de compressão na matriz sólida adjacente. Entretanto, a retração por secagem não é explicada exclusivamente por um mecanismo capilar clássico, sendo resultado da interação entre tensões capilares, variações de energia superficial e redistribuição interna de umidade.

Além da água capilar, a retração por secagem está fortemente relacionada à remoção da água fisicamente adsorvida nas superfícies do C-S-H. Essa água encontra-se associada às superfícies internas do material por forças físico-químicas. Sua remoção não implica simplesmente aproximação rígida entre partículas sólidas, mas altera o equilíbrio de forças intermoleculares e a energia superficial do sistema, promovendo rearranjos estruturais na nanoescala que se manifestam como deformação macroscópica.

Em condições de secagem mais intensas, pode ocorrer também a remoção parcial da água interlamelar, localizada entre as lamelas do C-S-H. A perda dessa água provoca a redução do espaçamento interlamelar, levando a uma contração significativa da estrutura do C-S-H, fenômeno associado tanto à retração quanto à fluência do concreto. Por outro lado, a água quimicamente combinada integra a estrutura dos produtos de hidratação e não é removida durante a secagem convencional, sendo liberada apenas por decomposição térmica dos hidratos.

Assim, a retração por secagem decorre principalmente da redistribuição e remoção de água capilar fina e água fisicamente ligada ao C-S-H, processos intensificados sob baixa umidade relativa, quando se estabelecem gradientes internos que promovem migração de umidade do interior da matriz para o ambiente externo (Mehta; Monteiro, 2014; Vardhan *et al.*, 2019b).

A magnitude desse fenômeno está associada ao regime de cura, distribuição do tamanho dos poros, comportamento termodinâmico do teor de água nos poros, como também, a morfologia dos sólidos hidratados na microestrutura (Collins; Sanjayan, 2000). O estudo da retração por secagem pode ser realizado por meio de um nível macroestrutural, levando em consideração os fatores que influenciam o fenômeno, como também, através dos níveis meso e microestrutural, cujo foco é nos mecanismos associados à perda de água e a transferência de massa (Nunes; Figueiredo, 2007).

Dentre os fatores que influenciam a retração por secagem, destacam-se os fatores externos ligados às condições ambientais, tais como temperatura e umidade relativa do ar, além da velocidade do vento, influenciando diretamente na taxa de evaporação e na perda de umidade da superfície do concreto. Outros fatores externos importantes são o tamanho e a forma do elemento do concreto, bem como, a sua geometria. Com relação aos fatores internos, os principais são aqueles relacionados ao concreto e a seus constituintes, que enquadram o cimento, agregados, adições, relação água/cimento, teor de água e do agregado, além das

propriedades que podem variar de acordo com a função do elemento e as práticas construtivas aplicadas durante as etapas de produção dos materiais cimentícios (Silva, 2016).

Segundo Qomi *et al.* (2021), a retração por secagem é usualmente avaliada em escala macroscópica, isto é, por meio da medição das deformações globais de comprimento ou volume de corpos de prova livres de carregamento externo, tais como pastas de cimento, argamassas ou concretos. Nesses ensaios, as amostras são expostas, por períodos controlados, a ambientes com diferentes níveis de umidade relativa, e a retração é determinada a partir da variação dimensional ao longo do tempo. O controle da umidade relativa pode ser realizado, por exemplo, por meio de dessecadores contendo soluções salinas ou soluções salinas saturadas, bem como por câmaras climáticas com controle ativo de temperatura e umidade. Adicionalmente, a massa das amostras é frequentemente monitorada, permitindo correlacionar as deformações de retração com o teor de água remanescente e estabelecer relações entre retração, umidade relativa e conteúdo de água (Qomi *et al.*, 2021).

Embora o procedimento experimental seja conceitualmente simples, a determinação precisa da retração por secagem envolve diversas complexidades. Qomi *et al.* (2021) destacam, entre elas, a heterogeneidade do material, a natureza multiescalar do concreto e o comportamento metaestável da microestrutura do C-S-H, que evolui continuamente durante o processo de secagem. Além disso, a condição de secagem não apenas induz retração, mas também influencia a própria cinética de hidratação do cimento, modificando o desenvolvimento microestrutural do material.

Do ponto de vista experimental, normas técnicas como a ASTM C157 estabelecem o início da exposição à secagem apenas após idades mais avançadas, tipicamente 7 ou 28 dias, justamente com o objetivo de minimizar a influência da retração autógena nas medições de retração por secagem. Ainda assim, mesmo quando essas precauções são adotadas, a retração por secagem medida não pode ser interpretada como uma simples superposição da retração autógena e da retração induzida pela perda de umidade, uma vez que o processo de secagem altera significativamente as reações de hidratação e o estado higrotérmico interno do material (Wu *et al.*, 2017; Qomi *et al.*, 2021).

Rodrigues (2010) investigou o desenvolvimento da retração e da fluência em concretos estruturais comerciais, comparando corpos de prova selados e não selados, com o objetivo de distinguir o papel da troca de umidade no comportamento deformacional em baixas idades. No

estudo de retração por secagem, os corpos de prova foram expostos às condições ambientais de laboratório após período de cura, e a variação dimensional foi monitorada em prismas de $75 \times 75 \times 285$ mm, seguindo procedimento baseado na ASTM C157. Para discutir o efeito do “marco inicial” na interpretação das deformações, a autora também utiliza o patamar de percolação (estimado por ultrassom) como referência para analisar a retração em idades iniciais, evidenciando que a escolha do instante de referência (por exemplo, percolação vs início do regime de secagem após cura) altera os valores reportados e a leitura do fenômeno. Complementarmente, a fluência foi avaliada sob diferentes condições de selagem e idade de carregamento, permitindo comparar o potencial de fluência específica entre corpos selados e não selados, e reforçando a influência da umidade no acoplamento retração–fluência.

Por outro lado, diversos estudos empregaram métodos normativos distintos para a medição da retração por secagem em pesquisas voltadas à avaliação da eficiência de diferentes estratégias mitigadoras, como aditivos redutores de retração, agentes expansores e técnicas de cura interna (Li *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2019; Treesuwan; Maleesee, 2017; Wang *et al.*, 2017; Wyrzykowski *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021). De forma geral, esses trabalhos indicam que, embora os procedimentos normativos forneçam uma base consistente para a comparação entre misturas, os valores absolutos de retração por secagem são fortemente dependentes das condições de ensaio, do histórico de cura e do instante adotado como referência inicial. Assim, os resultados reforçam que a interpretação da retração por secagem deve considerar não apenas o método normativo empregado, mas também o contexto experimental e o objetivo específico da investigação, especialmente quando se busca avaliar a atuação de mecanismos mitigadores.

De acordo com Azenha (2004) uma parcela da retração por secagem é reversível, resultando em expansões volumétricas do concreto quando exposto à umidade (ou aumento da umidade ambiental). Devido ao fato de essa reversibilidade tornar-se significativa apenas em estágios posteriores à fase inicial do concreto, geralmente a retração por secagem não é incorporada em modelagens numéricas correspondentes a esses estágios iniciais.

Pode-se considerar que a diferença principal entre a retração autógena e a retração por secagem está no fato de como acontece a perda de água, desde que na retração autógena a perda de água acontece por meio da autodessecação, enquanto na retração por secagem, essa perda acontece pelo desenvolvimento de um gradiente de umidade entre o volume interno e o ambiente, que o concreto está localizado (Rodrigues, 2010).

Caso a retração autógena e a retração por secagem sejam restringidas algumas tensões de tração serão desenvolvidas nos materiais cimentícios, e quando essas tensões ultrapassam a resistência à tração, surgem fissuras. As fissuras podem permitir a entrada de agentes agressivos, tais como cloreto, sulfato e dióxido de carbono, que pode conduzir a corrosão do aço e carbonatação do concreto, e com isso, afetar a vida útil das estruturas de concreto (Guo *et al.*, 2020). De maneira geral, para evitar o alto custo e os problemas associados à reparação de estruturas de concreto, é necessário buscar soluções que venha controlar tanto a retração autógena quanto a retração por secagem nos materiais cimentícios.

2.2 ESTRATÉGIAS MITIGADORAS DE RETRAÇÃO

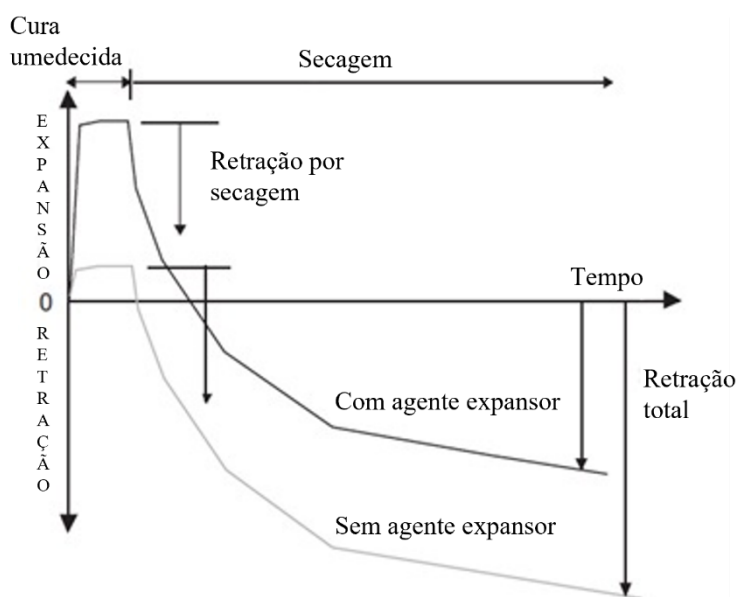
Como visto na literatura, reduzir a retração é de importância prática para garantir a durabilidade em materiais cimentícios. Diversos materiais para mitigar a retração vem sendo investigado com o objetivo de tanto mitigar a retração como também aumentar a resistência às fissuras em materiais à base de cimento (Mehdipour; Khayat, 2018). Esses materiais incluem: o cimento Portland de baixo calor (Melo Neto *et al.*, 2008; Pozo-Antonio, 2015), materiais cimentícios suplementares (Duerame *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2017; Li, 2016), agentes expansores (AE) (Corinaldesi *et al.*, 2015; Gupta *et al.*, 2021; Gupta *et al.*, 2023; Jia *et al.*, 2018; Pilar *et al.*, 2021), polímeros superabsorventes (Kang *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2020), areia leve saturada (Mehdipour; Khayat, 2018; Valipour; Khayat, 2018), aditivo redutor de retração (ARR) (Klausen; Kanstad, 2020; Li *et al.*, 2020), e fibras (Guo *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2020). Dentre essas soluções para mitigar a retração, adicionar aditivo redutor de retração (ARR) ou agente expensor (AE) vem sendo adotada amplamente em materiais cimentícios, em que o ARR causa um efeito retardador sobre o processo de hidratação do cimento, diminuindo a tensão superficial e tensão capilar, enquanto que o AE tem provado acelerar a reação de hidratação (Androuët; Charron, 2021; Pilar *et al.*, 2021).

2.2.1 Agente expensor (AE)

O AE são aditivos vendidos em pó, que são adicionados ao concreto. Na fase inicial de endurecimento, produzem uma reação interna controlada para que o volume aparente do concreto aumente (ACI, 2011). O mecanismo de ação desses agentes trata-se de neutralizar a deformação induzida pela retração, através da expansão ocorrida nos primeiros dias de hidratação (Repette, 2010). Essa retração interna geralmente ocorre durante os primeiros sete dias, após a moldagem do concreto, com um valor não superior a 0,1% (Bissonnette *et al.*,

2008). O agente expansivo pode aumentar seu volume, resultando na formação significativa de etringita ou hidróxido de cálcio durante as fases iniciais da hidratação do cimento. Esse aumento de volume, decorrente do agente expansivo, gera tensões de compressão no concreto, aliviando a probabilidade de fissuração devido à retração, principalmente nas áreas onde há restrição durante o processo de expansão (Prayuda *et al.*, 2022b). Na Figura 2.2 está apresentado um exemplo de retração livre de dois concretos, um contendo agente expansor e o outro não.

Figura 2.2 – Representação esquemática da expansão e retração por secagem de dois concretos, um contendo um agente expansor e o outro sem agente expansor.



Fonte: Adaptado de Gagné (2016a).

Pode-se observar na Figura 2.2 que concreto sem a adição de agente expansor apresenta uma pequena expansão nas idades iniciais, durante a cura úmida. Esse comportamento está associado ao crescimento inicial dos produtos de hidratação do cimento, como a etringita e a portlandita, bem como à absorção de água pelos hidratos formados, especialmente pelo silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Conforme discutido por Aïtcin (2000), nas primeiras idades o concreto apresenta baixa resistência à tração e reduzida rigidez, de modo que o crescimento desses cristais pode afastar as partículas sólidas, resultando em um aumento temporário do volume aparente, mesmo que o volume sólido esteja simultaneamente diminuindo em decorrência da retração química. Essa expansão inicial tende a cessar à medida que o concreto ganha resistência e o esqueleto sólido se torna suficientemente rígido para resistir às pressões internas geradas pelos produtos de hidratação, não devendo ser confundida com a expansão induzida por agentes expansivos.

Com o encerramento da cura úmida, inicia-se o processo de secagem, no qual a perda de água da microestrutura do concreto passa a ser o mecanismo dominante, dando origem à retração por secagem. Essa retração desenvolve-se de forma mais intensa nos instantes iniciais após o fim de cura, tendendo a se estabilizar progressivamente ao longo do tempo. Por outro lado, o concreto com adição do agente expensor apresenta uma expansão inicial significativamente mais pronunciada durante o período de cura com água. A magnitude da expansão máxima depende do tipo de agente expensor empregado e, de modo geral, é atingida entre o segundo e o sétimo dia de cura, passando a ocorrer retração por secagem a partir do término da cura úmida. Observa-se ainda, na Figura 2.2, que a variação dimensional associada à retração por secagem após o período de cura é semelhante para ambos os concretos analisados, com e sem agente expensor (Gagné, 2016a).

A expansão interna pode ser produzida utilizando diferentes tipos de agentes expansivos, que produzem hidratos expansivos quando reagem com água. Os dois agentes mais importantes são um contendo sulfaluminato de cálcio e o outro grânulos de cal virgem (CaO) (Gagné, 2016a). Uma classificação para os mecanismos de expansão foi proposta pelo Comitê 233 do *American Concrete Institute* (ACI), com base na função da natureza química dos minerais responsáveis pela formação dos hidratos expansivos. Alguns exemplos desses mecanismos são o agente expensor do tipo K (sulfaluminato de cálcio), que resulta na formação da etringita, e o agente expensor do tipo G com base em cal livre, que causa a formação de cal hidratada (*portlandita*) (ACI 223-98, 2011).

Os agentes expansores também podem ser classificados como à base de óxido de cálcio (CaO), à base de etringita (CSA) ou à base de óxido de magnésio (MgO), dependendo do tipo de ingrediente em uso (Mo *et al.*, 2014). Cada variante de agente expansivo exibe particularidades distintas, gerando produtos expansivos diversos conforme a hidratação, a temperatura de calcinação e as condições de cura (Mahmood *et al.*, 2021).

Ao utilizar os agentes expansores com base de CaO e etringita, a expansão é gerada predominantemente nas idades iniciais e caracteriza-se por seu rápido desenvolvimento. No caso dos agentes expansores à base de CaO, a expansão está associada à elevada reatividade do CaO livre, que se hidrata rapidamente em contato com água, promovendo a formação precoce de portlandita (Ca(OH)₂). Essa rápida hidratação ocorre sobretudo nas primeiras horas após a mistura, quando o esqueleto do cimento ainda não está completamente formado, podendo

comprometer a eficiência da expansão caso a reação ocorra antes do período efetivo de ganho de rigidez a matriz cimentícia (Higuchi *et al.*, 2014).

Já o agente expensor com base de MgO apresenta um produto de hidratação quimicamente estável, isto é, precisa relativamente de pouca água para a hidratação do MgO e para projetar suas propriedades de expansão (Mo *et al.*, 2014). Além disso, os agentes expansivos feitos com MgO são comumente empregados em construções de barragens, enquanto os agentes expansivos à base de CSA ou CaO são amplamente utilizados em lajes, paredes e construções de pontes (Han, Jia e Yan, 2016; Wang *et al.*, 2022a). Nesse contexto, a rápida reação entre o AE à base de CaO e água compensa a retração inicial, ao passo que a expansão retardada do AE à base de MgO é considerada eficaz na mitigação da retração tardia (Jia *et al.*, 2023).

O agente expensor com base de CaO produz cristais de portlandita (Ca(OH)_2), ao entrar em contato com a água, produzindo uma rápida expansão na pasta de cimento, que atinge seu máximo em 48 horas. Para a formação de cristais de portlandita é necessário de alguma água, dessa forma, uma cura eficiente com água deve ser realizada para ser possível alcançar uma expansão esperada.

Os agentes expansores comerciais geralmente são utilizados com uma dosagem em torno de 2 a 10%, podendo ser inseridos em substituição ou em adição da massa de cimento. Além disso, agentes expansores à base de óxido de cálcio não influenciam significativamente na reologia do concreto e na dosagem da mistura, e quando são adicionados em relação a massa de cimento podem causar em um rápido aumento de resistência à compressão (Bissonnette *et al.*, 2014). É importante ainda ressaltar que a expansão obtida não depende apenas da dosagem do agente expensor, mas também da temperatura e da cura eficiente com água (Gagné, 2016a).

Ao comparar agentes expansores à base de sulfoaluminato de cálcio (CSA) e de óxido de cálcio (CaO), Carballosa *et al.* (2015) observaram que os agentes à base de CaO apresentaram maior eficácia em termos de expansão longitudinal e maior estabilidade dimensional ao longo do tempo. Essa resposta foi associada à formação de aglomerados hidratados de cálcio de caráter amorfo, identificados por análises microestruturais, os quais contribuíram para uma expansão mais homogênea e estável da matriz cimentícia.

Em contraste, os agentes expansores à base de CSA promoveram a formação predominante e pouco controlada de etringita, resultando em elevadas expansões iniciais seguidas por redução da deformação após o pico de expansão, indicando menor estabilidade dimensional. Os autores

também verificaram que o aumento do teor de agentes expansores levou a maiores expansões finais, sendo esse efeito mais estável nos concretos com adição de CaO em comparação aos concretos contendo CSA (Carballosa *et al.*, 2015).

Outro estudo realizado por Jia *et al.* (2018) utilizou dois tipos de composições diferentes para os agentes expansores, um com sulfoaluminato de cálcio (CSA) e outro com óxido de cálcio (CaO), com o objetivo de melhorar a retração por secagem do sistema de escória ativada por álcali. Ao comparar os resultados, o agente à base de CaO apresentou um melhor efeito na diminuição da retração por secagem do que o agente à base de CSA, devido ao efeito abrangente do baixo consumo de água do CaO durante o processo de hidratação.

Nalon *et al.* (2023) avaliaram o efeito de um aditivo redutor de retração (ARR) e de dois agentes expansivos (AE), à base de óxido de cálcio (CaO) e de sulfoaluminato de cálcio (CSA), em sensores cimentícios nanomodificados, desenvolvidos para aplicações em monitoramento estrutural. Os autores investigaram o comportamento de retração por secagem, a microestrutura, a resposta de autodetecção e a resistência à compressão de argamassas condutivas contendo nanopartículas. Os resultados indicaram que o ARR proporcionou reduções de retração de até 47,4%, enquanto os agentes expansivos induziram um comportamento expansivo nas idades iniciais, especialmente nos primeiros sete dias, compensando de forma eficaz a retração por secagem subsequente quando os compósitos foram expostos a procedimentos de secagem. Os autores atribuíram a expansão promovida pelo agente expansivo à base de CaO à hidratação do óxido de cálcio, com formação de portlandita (Ca(OH)_2), enquanto, para o agente expansivo à base de CSA, o comportamento expansivo foi associado à formação de cristais de etringita (AFt) a partir da fonte sulfoaluminatada presente nas misturas.

Com relação ao comportamento do agente expensor, foram propostas diversas teorias para explicar a origem da expansão, incluindo a teoria do crescimento do cristal, a teoria do enchimento e a teoria da pressão de cristalização. Acredita-se comumente que a hidratação do expensor resulta na precipitação de etringita e portlandita. Esses hidratos expansivos exercem pressão interna nas paredes microscópicas dos poros, expandindo a pasta de cimento em uma escala macroscópica. Além disso, a presença de agregados impõe uma restrição interna à expansão do concreto, enquanto fatores externos, como armaduras e condições de apoio restritivas, também influenciam na expansão. Além das restrições, os parâmetros do projeto da mistura, como a quantidade e tipo de expensor e aglomerante, relação água/aglomerante e

condições de cura (tipo e temperatura), também desempenham um papel crucial na expansão do concreto (Gupta *et al.*, 2023).

Dentre os tipos de agentes já mencionados, o sulfato de cálcio (CSA) demanda grandes quantidades de água para a formação da etringita e os produtos de hidratação gerados podem apresentar instabilidade, provocando uma formação de etringita tardia, aumentando assim o risco de fissuras em idades iniciais. Com isso, opta-se por outros tipos de agentes expansores, como por exemplo, à base de CaO e MgO.

A hidratação do agente expensor à base de óxido de cálcio (CaO) pode resultar em uma expansão volumétrica significativa do próprio agente, podendo atingir valores de até 90%, desde que haja uma disponibilidade adequada de água para a reação. Por esse motivo, a presença de água suficiente é crucial para garantir a hidratação simultânea do cimento e do agente expensor quando empregados em conjunto. Em contraste com o CaO, cuja hidratação é rápida e altamente dependente da disponibilidade de água, os agentes expansores à base de MgO permitem um maior controle da cinética de expansão. A reatividade do MgO está diretamente relacionada à sua temperatura de calcinação, de modo que temperaturas mais elevadas retardam a hidratação e a taxa de expansão do material (Aghaee *et al.*, 2023a).

2.2.2 Aditivo redutor de retração (ARR)

O ARR é um agente tensoativo que desempenha a função de reduzir a tensão superficial da interface ar/água no sistema de poros desidratantes, de modo que as tensões de tração desenvolvidas pelo fenômeno de secagem e retração autógena são reduzidos significativamente (Eberhardt; Flatt, 2016; Marchon *et al.*, 2016). Os aditivos redutores de retração (ARRs) têm sido utilizados como uma alternativa interessante para combater as consequências da retração autógena, principalmente quando a sua utilização é combinada com uma efetiva cura externa com água. Os ARRs podem também serem utilizados com objetivo de diminuir o efeito da retração por secagem para um concreto com uma relação água/cimento superior a 0,40 (Gagné, 2016b; Zhan; He, 2019). Com uma dosagem adequada, o ARR também demonstra eficácia significativa na minimização da retração plástica e na prevenção de fissuras em materiais à base de cimento. Além disso, observa-se um retardo no tempo de formação de fissuras, juntamente com uma diminuição na quantidade e largura das fissuras, quando utilizados em quantidades apropriadas (Zhang *et al.*, 2022).

Várias versões de ARR podem ser encontradas e a composição geralmente são mantidas em segredo pelas empresas produtoras, fazendo com que seja desafiador comparar estudos de ARR e discutir as consequências do uso de ARR (Klausen; Kanstad, 2020). De acordo com Gagné (2016b), os ARRs contêm vários tensoativos, tais como os monoálcoois, com um grupo funcional OH^- (hidroxil); os glicóis, que apresentam dois grupos funcionais hidroxila ligados a dois átomos de carbono adjacentes; os ésteres alquílicos de polioxialquilenol glicol; os tensoativos poliméricos; e os álcoois de amino. Androuët e Charron (2021) avaliaram o efeito de diferentes misturas e condições de curas nas propriedades de retração de um concreto de ultra alto desempenho utilizando dois diferentes ARRs. Os autores observaram que os ARRs reduziram a retração nas primeiras idades e ao longo prazo, no entanto, os efeitos variaram, dependendo do tipo e das condições empregadas.

Para gerar uma redução significativa da retração autógena em materiais cimentícios com baixa relação água/cimento e da retração por secagem em materiais cimentícios com alta relação água/cimento, é necessário utilizar uma alta dosagem de ARRs. O valor de dosagem é geralmente expressado como uma porcentagem da massa de cimento, entre 1 a 2% ou em l/m^3 de concreto para cada formulação comercial (Gagné, 2016b). Entretanto, essa dosagem pode ter variação, especialmente entre os diferentes tipos de materiais cimentícios, como visto no estudo de Weiss *et al.* (2008), em que realizaram-se medições de retração inicial e de retração ao longo prazo em pastas de cimento simples e contendo 5% de ARR, obtendo resultados que indicaram que as pastas contendo ARR apresentaram uma expansão na fase inicial de hidratação.

Klausen e Kanstad (2020) investigaram o efeito de aditivo redutor de retração (ARR) nas mudanças de volume, que causam fissuras por retração e fissuras nas idades iniciais. Avaliou-se a retração autógena e retração por secagem durante um período de 2,5 anos utilizando três concretos, com e sem adição de 1% de ARR. Os autores obtiveram até 32% de redução para a deformação total, e quanto maior foi a retração, maior foi o efeito do ARR. Tran *et al.* (2021) afirmam ainda que limitar a dosagem do ARR para um valor abaixo de 3% gera uma redução de 20 a 50% na retração por secagem, enquanto restringe o impacto negativo na resistência.

O agente redutor de retração (ARR) tem efeito tanto na retração autógena como na retração por secagem, através de determinados mecanismos de retração física bastante semelhantes. Se tratando da retração autógena os mecanismos são: (1) redução da tensão superficial, (2) redução da concentração de íons de solução de poros, (3) umidade relativa ajustada, e (4) efeito de

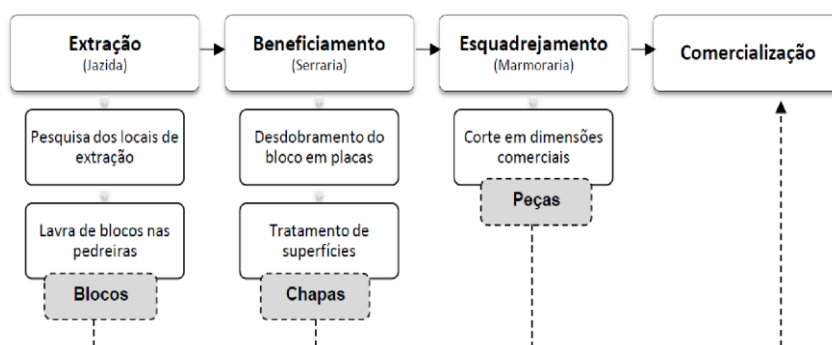
expansão. De modo geral, o mecanismo de efeito do ARR na retração por secagem é semelhante ao da retração autógena. Além disso, ao combinar o uso de ARR e outros materiais, como um agente expensor ou agente de cura interna, é gerado um melhor efeito na redução da retração (Zhan; He, 2019).

A incorporação do ARR também pode gerar uma diminuição na quantidade de vapor de água, o que gera uma redução nas tensões residuais, e com isso, preservar uma maior umidade relativa interna (Valipour; Khayat, 2018). Apesar das vantagens obtidas com a utilização de ARR, existem estudos que obtiveram alguns efeitos negativos, tais como uma redução da taxa de hidratação do cimento nas primeiras idades devido ao filme molecular orgânico, uma perda de ar de entrada, um atraso no tempo de pega e no desenvolvimento das propriedades mecânicas nas primeiras idades (Wyrzykowski *et al.*, 2015; Zhan; He, 2019). Alguns resultados indicam que as propriedades mecânicas especialmente a resistência à compressão, flexão e tração sofrem redução ao aumentar os teores de ARR, principalmente nas idades iniciais. Essas reduções são atribuídas à reação de hidratação retardada, o tempo de pega prolongado e o aumento da porosidade (Zhan; He, 2019).

2.3 RESÍDUO DE MÁRMORE

O processo produtivo das rochas ornamentais compreende várias etapas, sendo caracterizado principalmente pela extração e beneficiamento do produto, em que as rochas são extraídas de forma bruta nas jazidas e transformadas em peças aplicáveis como revestimento ou decoração (Uliana, 2014). Na Figura 2.3 está apresentada as etapas do processo de produção das rochas ornamentais.

Figura 2.3 – Etapas do processo de produção das rochas ornamentais.



Fonte: Dietrich (2015).

A primeira etapa do processo produtivo das rochas ornamentais consiste na extração, em que o material rochoso é retirado da jazida por meio de técnicas específicas, definidas a partir das

características geológicas da localidade e do tipo de rocha a ser lavrada. Após a extração, os blocos, com volumes típicos entre 8 m³ e 12 m³, são transportados até as serrarias para a continuidade do processamento (Silva, 2019; Pereira, 2021). Em seguida, ocorre a etapa de beneficiamento, cujo objetivo é transformar os blocos extraídos em produtos finais ou semiacabados. Essa etapa é realizada por meio de equipamentos denominados teares, que podem ser do tipo lâminas metálicas ou fios diamantados. Nos últimos anos, observa-se uma mudança significativa no parque tecnológico brasileiro, com a substituição progressiva dos teares de lâminas por teares diamantados. Estima-se que, em 2020, cerca de 80% da capacidade nacional de serragem de chapas já fosse realizada por esse tipo de tecnologia, devido à maior eficiência produtiva e à redução na geração de resíduos (Rodrigues, 2018; Pereira, 2021).

Após passar pelo processamento dos teares, cerca de 20 a 30% do bloco extraído é convertido em resíduo com características de lama. Além disso, grandes quantidades de pedaços de placas também são geradas, podendo ainda serem utilizadas como um produto secundário sustentável (Rana *et al.*, 2016). Concluída a etapa de corte dos blocos em chapas, o material passa por um tratamento de superfícies, feito por levigamento, polimento e lustro das placas, até tornar-se uma chapa comercializável. O polimento é realizado utilizando um equipamento chamado politriz e neste processo também é gerado um resíduo, em quantidade menor, constituído de água, pó de pedra, resinas e materiais provenientes do desgaste do equipamento. Obtidas as chapas, as marmorarias realizam o esquadrejamento que consiste na produção de peças sob medida para comercialização com destino ao consumidor (Negredo, 2018; Soares, 2014).

Durante o processo produtivo do mármore é gerado uma enorme quantidade de resíduos tanto em serrarias, a partir da extração de blocos, quanto em instalações de processamento, durante o beneficiamento dos produtos. Estados Unidos, França, Bélgica, Espanha, Itália, Turquia, Brasil, Portugal e Grécia estão entre os países com consideráveis reservas de mármore, e devido a maior procura de mármore na indústria da construção, espera-se um aumento na quantidade de resíduos produzidos (Singh *et al.*, 2017).

Uma pequena parte dos resíduos variados é aproveitada como material reciclado para produzir agregados e como material de preenchimento. Enquanto isso, a maior parte é usualmente armazenada ao redor da pedreira. Esses resíduos acumulados contribuem para a poluição visual, resultando na formação de montes de entulho e na necessidade de construção de estradas adicionais. A expansão das áreas de armazenamento e, conseqüentemente, o aumento das estradas adicionais, levam à progressiva degradação da vegetação (Basaran *et al.*, 2022).

O resíduo de mármore gerado constitui um grave problema para os produtores devido não apenas ao enorme volume gerado, mas também aos outros problemas levados em conta, tais como: necessidade de ter locais adequados para o seu armazenamento temporário e posterior retirada; geração de custo econômico e ambiental no processo de envio para aterros sanitários; efeitos adversos na qualidade de água e na fotossíntese da vida vegetal quando o resíduo é despejado de forma descontrolada em locais inapropriados; e principalmente, risco para a saúde humana no que diz respeito a suspensão de pequenas partículas no ar (Medina *et al.*, 2017).

Além disso, o estado do Espírito Santo é reconhecido como o principal produtor brasileiro de rochas ornamentais. Em 2022, este estado representou aproximadamente 28% da produção nacional, enquanto o estado da Bahia representou 18%, e juntos totalizaram quase metade da produção brasileira (ABIROCHAS, 2022). Logo, para enfrentar os desafios ambientais resultantes do acúmulo de resíduos de mármore, é preciso criar métodos que permitam a utilização desses resíduos em diferentes produtos ou aplicações, bem como o seu processo de reciclagem (Basaran *et al.*, 2022).

2.3.1 Aplicação do resíduo de mármore na construção civil

Caso estejam disponíveis com a granulometria correta, as partículas e o pó resultantes dos resíduos de mármore podem ser empregados como agregados, cargas e aditivos minerais em composições de concreto (Basaran *et al.*, 2022). Muitos autores vêm investigando o uso do resíduo de mármore em diferentes tipos de concreto e argamassa de cimento (Ashish, 2018; Belouadah *et al.*, 2021; Khodabakhshian *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018), sendo que sua principal aplicação no setor de construção é seu uso como agregado fino e como substituinte do cimento (Galetakis e Soultana, 2016). Foi determinado que o concreto feito com a adição do resíduo de mármore pode ser ecológico, se enquadrando nas estratégias de desenvolvimento sustentável (Ashish, 2018; Singh *et al.*, 2017; Tunc, 2019).

Uma revisão de literatura realizada por Tunc (2019) a partir de estudos após 2010 verificou que aproximadamente 15% de lucro econômico pode ser obtido através da reciclagem de resíduos de mármore. Os resultados sugerem que a utilização deste resíduo na produção do concreto é vantajosa em termos de obtenção de concreto barato e durável, além de ser uma solução ecológica. De forma breve e detalhada, o autor apresentou as seguintes opções para o resíduo: substituição do agregado e do cimento em concreto convencional, incorporação em concreto autoadensável, uso em concreto asfáltico, estabilização de solos, e produção industrial de

diferentes materiais tais como tijolos, compósitos e painéis isolantes. Os resultados indicaram ainda, que para obter um concreto com ótima resistência, o teor ótimo de substituição foi de 10%, ao utilizar o resíduo de mármore em substituição ao cimento.

Singh, Srivastava e Bhunia (2017b) avaliaram o efeito de substituir cimento por resíduo de mármore em diferentes porcentagens de resíduo de mármore, 10%, 15% e 20%, para diferentes relações água/aglomerante (a/agl), 0,35, 0,40 e 0,45, na resistência à compressão do concreto. Os autores observaram que as propriedades mecânicas do concreto melhoraram com a incorporação de até 15% de resíduo em substituição, para as relações a/agl de 0,35 e 0,40.

Khodabakhshian *et al.* (2018) realizaram uma investigação experimental de algumas propriedades de durabilidade em misturas de concretos contendo resíduo de mármore (0%, 5%, 10% e 20%) e sílica ativa (0, 2,5%, 5% e 10%) como substituição parcial do cimento. De maneira geral, pode-se afirmar que a resistência e a durabilidade do concreto com resíduo de mármore tenderam a diminuir ao utilizar taxas de substituição superiores a 10%.

De acordo com outros pesquisadores, o resíduo de mármore deve ser utilizado como aditivos minerais no concreto autoadensável (CAA) para melhorar o seu desempenho (Ahmad; Zhou *et al.*, 2023; Alyamac; Ghafari; Ince, 2017; Alyousef *et al.*, 2019; Haddadou; Chaid; Ghernouti, 2014; Ma *et al.*, 2019a; Sadek; El-Attar; Ali, 2016). Tennich, Kallel e Ouezdou (2015) determinaram que o resíduo de mármore utilizado com material de enchimento no CAA aumentou a resistência à compressão das amostras em 42,7% quando comparado ao CAA de referência. Os resultados mostraram ainda que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e a resistência à tração dos concretos autoadensáveis com incorporação de pó de mármore apresentaram desempenho equivalente ao observado no CAA e no concreto convencional.

Alyousef *et al.* (2018) realizaram a incorporação de 15, 20, 25 e 30% de pó de mármore, em relação a massa de cimento Portland, em concretos autoadensáveis. Os autores observaram que com o aumento da quantidade de resíduo adicionado obteve-se um aumento nos valores para os ensaios de espalhamento, caixa L e densidade aparente. Já para os ensaios de funil V e teor de ar, obteve-se uma redução dos valores. Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão do CAA foram próximos nas idades de 3, 7 e 14 dias para todas as adições, e acima do desejado, 30MPa, aos 28 dias, para adições de 20 e 25%.

A partir do levantamento bibliográfico identificou-se poucas pesquisas envolvendo medições de retração quando o resíduo de mármore foi incorporado nas misturas cimentícias, sendo que a maioria dos estudos foi em substituição aos agregados miúdos (Gencel *et al.*, 2021; Vardhan, Siddique e Goyal, 2019b) ou em combinação com outros materiais (Bayraktar *et al.*, 2022; Faleschini *et al.*, 2023). Dessa forma, as propriedades de retração do concreto que incorpora resíduos de mármore precisam ser mais bem compreendidas, principalmente quando o resíduo passa por algum tipo de tratamento e é empregado como um agente expensor.

2.3.2 Tratamento térmico do resíduo de mármore

Uma alternativa que vem sendo investigada nos últimos anos é a realização de tratamento térmico em resíduos de rochas ornamentais com o objetivo de modificar sua estrutura cristalina e potencializar seu comportamento pozolânico. Uliana *et al.* (2015) e Vazzoler *et al.* (2018) avaliaram o uso de resíduos de rochas ornamentais submetidos a tratamento térmico a temperaturas elevadas, da ordem de 1200°C, em misturas de pastas cimentícias, observando alterações significativas na composição mineralógica e no estado físico do material.

Mittri *et al.* (2018) realizaram o tratamento térmico do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais a 1200 °C e procederam à sua caracterização físico-química e à avaliação formal da atividade pozolânica, por meio de ensaios normativos de atividade pozolânica com cal (NBR 5751) e de índice de desempenho com cimento Portland (NBR 5752), além de análises de composição química por fluorescência de raios X e de finura. Os resultados indicaram que o resíduo tratado termicamente apresentou atividade pozolânica conforme os critérios normativos. A partir dessa caracterização, os autores produziram concretos contendo 5% e 10% do resíduo tratado termicamente, observando ganhos de resistência à compressão e redução da penetração de íons cloreto, atribuídos tanto ao efeito físico de preenchimento de poros quanto à reação pozolânica entre o material tratado e o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento (Mittri *et al.*, 2018).

Em outros estudos, para o tratamento térmico foi alcançado temperaturas de 700-900°C (Mármol *et al.*, 2010) e 600°C e 700°C (Medina *et al.*, 2017). Mármol *et al.* (2010) avaliaram o potencial de lamas de granito como material de enchimento e como possível material pozolânico em argamassas de alvenaria, após calcinação em temperaturas entre 700 e 900 °C por curtos períodos. A caracterização incluiu análises químicas (FRX), mineralógicas (DRX), distribuição granulométrica e ensaios mecânicos, além da avaliação da atividade pozolânica

pelo método químico baseado na redução das concentrações de Ca^{2+} e OH^- em solução saturada de hidróxido de cálcio (método do tipo Frattini, conforme UNE-EN 196-5). Os resultados indicaram consumo de hidróxido de cálcio e manutenção ou aumento da resistência mecânica, sugerindo a ocorrência de atividade pozolânica, especialmente para baixos teores de substituição do cimento.

Por outro lado, Medina *et al.* (2017) investigaram a evolução mineralógica e a reatividade de resíduos de granito tratados termicamente a 600 °C e 700 °C em sistemas pozolânicos/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ao longo do tempo. A avaliação da pozolanicidade foi realizada por meio de análises mineralógicas (DRX), térmicas (TG/DTG) e monitoramento da reação com hidróxido de cálcio. Os autores observaram que a reatividade pozolânica dos resíduos foi baixa em idades iniciais, apresentando aumento apenas com tempos prolongados de reação, e concluíram que o tratamento térmico nessas temperaturas não promoveu um efeito significativamente benéfico sobre a pozolanicidade do resíduo de granito.

Todos os resíduos tratados termicamente nos estudos discutidos anteriormente, foram obtidos no processo de corte do granito, e através de uma busca na literatura, não foi localizado nenhum trabalho que tenha investigado o tratamento térmico do resíduo de mármore, para aplicações em materiais cimentícios. Esse resultado deixa claro a lacuna na literatura mundial sobre o estudo do tratamento térmico do resíduo de mármore, evidenciando a necessidade de aprofundamento no estudo do tema, para a comunidade científica atualmente.

Com base na revisão teórica, observa-se que a aplicação do resíduo de mármore na produção de materiais cimentícios reduz não apenas os efeitos ambientais da utilização do mármore, mas também causa a redução no uso de outros recursos naturais, além de ser possível obter boas propriedades do concreto em termos de durabilidade, resistência e desempenho microestrutural. Mesmo embora uma grande quantidade de estudos tem sido realizada em nível global, ainda não existem resultados suficientes para comprovar a eficácia do resíduo de mármore tratado termicamente, pois o comportamento deste material proposto permanece desconhecido frente aos parâmetros estudados, principalmente como uma estratégia de mitigar retração. A contribuição inovadora desta pesquisa consiste na proposição de uma nova alternativa para a valorização do resíduo de mármore na construção civil, demonstrando, por meio de avaliação técnica e experimental, sua eficácia e viabilidade como material de desempenho, além de contribuir para a conscientização sobre seu potencial de aplicação sustentável.

2.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Como etapa de fundamentação para a modelagem numérica proposta, foi realizada uma revisão sistematizada da literatura com foco em estudos experimentais envolvendo agentes expansores aplicados a pastas e concretos. A busca bibliográfica foi conduzida na base de dados *Scopus*, utilizando o termo “*expansive agent*” como palavra-chave, resultando em aproximadamente 760 publicações relacionadas ao tema.

Após a triagem dos resumos, foram selecionados estudos que apresentavam maior afinidade com os materiais investigados nesta tese, especialmente aqueles baseados em sistemas ricos em óxidos de cálcio e magnésio. A partir dessa seleção, foi elaborada uma tabela síntese reunindo informações relevantes para a modelagem, incluindo composição química dos agentes expansores, teores utilizados, relações água/aglomerante, metodologias de ensaio e faixas típicas de deformação observadas ao longo do tempo.

Essa sistematização permitiu identificar tendências recorrentes quanto à magnitude da expansão, instantes típicos de ocorrência das deformações máximas e tempos de estabilização reportados na literatura. Os dados consolidados encontram-se apresentados na Tabela 2.1, e serviram como referência para a definição dos cenários avaliados no estudo paramétrico desenvolvido nesta pesquisa.

Tabela 2.1 – Síntese dos principais estudos experimentais com agentes expansores.

Referência	Dosagens do agente expensor	Principal composição química do expensor (%)	água/aglomerante	Metodologia utilizada	Início das medições	Máxima deformação (μm/m)	Idade correspondente	Deformação final	Idade final
Chen <i>et al.</i> (2025b)	0, 3, 6 e 9%	CaO = 90,3 Fe ₂ O ₃ = 3,10 SiO ₂ = 2,74 Al ₂ O ₃ = 1,31 MgO = 1,27	0,30	Tudo de PVC com diâmetro de 110 mm, altura de 420 mm e espessura de 3,2 mm	Tempo de início de pega	0% = -25 3% = +50 6% = +140 9% = +230	16 horas 18 horas 20 horas 24 horas	0% = -180 3% = -80 6% = +30 9% = +130	28 dias
Yang <i>et al.</i> (2025)	0 e 2%	CaO = 90,3 Fe ₂ O ₃ = 3,19 SiO ₂ = 2,74 Al ₂ O ₃ = 1,31 MgO = 1,27	0,15	TSTM (150 mm x 150 mm x 700 mm)	Tempo de fim de pega	0% = -400 2% = -210	2,5 dias	0% = -640 2% = -340	28 dias
Li <i>et al.</i> (2025b)	0 e 8%	CaO = 69,5 SO ₃ = 10,1 Al ₂ O ₃ = 6,47 SiO ₂ = 3,57 MgO = 1,83	0,36	Tudo de PVC (100 mm x 400 mm)	Tempo de fim de pega	0% = -30 8% = +390	7 dias	0% = -150 8% = +270	360 dias
Abbas <i>et al.</i> (2025)	0, 5, 10 e 15%	CaO = 57,14 SO ₃ = 22,13 SiO ₂ = 6,60 Al ₂ O ₃ = 2,71 MgO = 1,37	0,17	Tubos ocos de PVC e extensômetros de fio vibratório	Depois de 15 minutos	0% = -600 5% = -320 10% = -100 15% = +80	30 horas	0% = -880 5% = -610 10% = -230 15% = +50	28 dias
Chen <i>et al.</i> (2025a)	0, 4, 8, 12 e 16%	CaO = 57,92 SO ₃ = 22,31 SiO ₂ = 11,77 Al ₂ O ₃ = 2,33	0,26	Método do tubo corrugado	Tempo de fim de pega	0% = -300 4% = +30 8% = +100 12% = +160 16% = +250	12 horas	0% = -325 4% = +50 8% = +160 12% = +250 16% = +380	30 dias

Tabela 2.1 – Síntese dos principais estudos experimentais com agentes expansores. (Continuação)

Referência	Dosagens do agente expansor	Principal composição química do expansor (%)	água/aglomerante	Metodologia utilizada	Início das medições	Máxima deformação (μm/m)	Idade correspondente	Deformação final	Idade final
Liu <i>et al.</i> (2024)	0, 3, 6, 9%	CaO = 32,40 MgO = 28,84 SiO ₂ = 15,62 Al ₂ O ₃ = 11,21	0,18	Método do tubo corrugado	Tempo de início de pega	0% = +870 3% = +750 6% = +720 9% = +630	12 horas	0% = +1030 3% = +870 6% = +730 9% = +550	72 horas
Feng <i>et al.</i> (2024)	0 e 10%	-	0,20	Molde de 30 x 15 x 10 cm ³ ; Extensômetros de fio vibratório	-	0% = +520 10% = +280	10 dias	0% = -700 10% = 300	100 dias
Ji <i>et al.</i> (2024)	0 e 10%	CaO = 55,25 SO ₃ = 21,3 SiO ₂ = 3,71 Al ₂ O ₃ = 2,24 MgO = 1,64	0,49	TSTM (150 mm x 150 mm x 1500 mm)	-	0% = -70 10% = +360	1 dia	0% = -130 10% = +310	6 dias
Holland <i>et al.</i> (2023)	0, 2, 4 e 6%	-	0,19	Método do tubo corrugado	Tempo de fim de pega	0% = -80 2% = 40 4% = +100 6% = +140	1 dia	0% = -550 2% = -520 4% = -400 6% = -380	28 dias
Aghaee <i>et al.</i> (2023b)	0 e 10%	CaO = 82,6 SiO ₂ = 12,6 Al ₂ O ₃ = 5,70 MgO = 0,1	0,40	ASTM C157 + extensômetros	-	0% = -150 10% = +230	1 dia	0% = -570 10% = +15	28 dias
Lu <i>et al.</i> (2023)	0, 6 e 8%	CaO = 87,5 Al ₂ O ₃ = 4,79 SiO ₂ = 1,72 MgO = 1,27	0,29	Tubo de PVC (160 mm x 400 mm)	-	0% = 300 6% = + 670 8% = +760	1.5 dias	0% = -350 6% = +50 8% = +100	25 dias

Tabela 2.1 – Síntese dos principais estudos experimentais com agentes expansores. (Continuação)

Referência	Dosagens do agente expansor	Principal composição química do expansor (%)	água/aglomerante	Metodologia utilizada	Início das medições	Máxima deformação (µm/m)	Idade correspondente	Deformação final	Idade final
Hua <i>et al.</i> (2022b)	0, 3, 6, 9 e 12%	CaO = 69,6 SO ₃ = 16,7 Al ₂ O ₃ = 5,96 SiO ₂ = 4,30 MgO = 1,99	0,42	Tubo de PVC (100 mm x 400 mm)	Tempo de fim de pega	0% = -70 3% = -10 6% = +80 9% = 280 12% = +950	2 dias	0% = -200 3% = -90 6% = +40 9% = +250 12% = +920	28 dias
Yang <i>et al.</i> (2022)	0, 1 e 2%	CaO = 90,3 Fe ₂ O ₃ = 3,19 SiO ₂ = 2,74 MgO = 1,27	0,15	Tubo de PVC (110 mm x 400 mm)	-	0% = -430 1% = -340 2% = -230	5 dias	0% = -620 1% = -350 2% = -230	28 dias
Aghaee <i>et al.</i> (2022a)	0 e 10%	CaO = 82,6 SiO ₂ = 12,6 Al ₂ O ₃ = 5,7 MgO = 0,1	0,40	Método do tubo corrugado	Tempo de início de pega	0% = -180 10% = +375	2 dias	0% = -700 10% = +25	28 dias
Aghaee <i>et al.</i> (2022b)	0 e 10%	CaO = 82,6 SiO ₂ = 12,6 Al ₂ O ₃ = 5,7 MgO = 0,1	0,40	ASTM C157 + extensômetros	-	0% = -190 10% = +310	3 dias	0% = -680 10% = +90	56 dias
Hua <i>et al.</i> (2022c)	0, 3, 6, 9 e 12%	CaO = 69,6 SO ₃ = 16,7 Al ₂ O ₃ = 5,96 SiO ₂ = 4,30 MgO = 1,99	0,42	Tubo de PVC (100 mm x 400 mm)	Tempo de fim de pega	0% = -70 3% = -10 6% = +80 9% = +280 12% = + 950	2 dias	0% = -200 3% = -90 6% = +40 9% = +250 12% = +920	28 dias
Wang <i>et al.</i> (2022b)	0, 1, 2, e 3%	CaO = 81,9 Al ₂ O ₃ = 3,33 SiO ₂ = 1,18 MgO = 1,50	0,17	Tubo de PVC (100 mm x 500 mm)	Tempo de início de pega	0% = -280 1% = -250 2% = -30 3% = 90	1 dia	0% = -610 1% = -500 2% = -330 3% = -180	28 dias

Tabela 2.1 – Síntese dos principais estudos experimentais com agentes expansores. (Continuação)

Referência	Dosagens do agente expansor	Principal composição química do expansor (%)	água/aglomerante	Metodologia utilizada	Início das medições	Máxima deformação (μm/m)	Idade correspondente	Deformação final	Idade final
Liu <i>et al.</i> (2022)	0, 20, 40, 60, e 80 kg/m ³	-	0,18	GB/T 50.082–2009	Tempo de início de pega	0 = -250 20 = -120 40 = -70 60 = +160 80 = + 460	1.5 dias	0 = -330 20 = -300 40 = -210 60 = -90 80 = +290	180 dias
Zhao <i>et al.</i> (2022)	0, 3 e 6%	CaO = 90,3 Fe ₂ O ₃ = 3,19 SiO ₂ = 2,74 MgO = 1,27	0,35	Sensor de deslocamento + corpos de prova prismáticos (150 mm x 150 mm x 500 mm)	Tempo de fim de pega	0% = -50 3% = +75 6% = +140	1 dia	0% = -170 3% = -40 6% = -20	28 dias
Xu <i>et al.</i> (2021)	0, 5, 7.5 e 10%	-	0,33	Corpos de prova prismáticos (100 mm x 100 mm x 515 mm)	-	0% = -40 5% = +250 7.5% = +330 10% = +425	5 dias	0% = -250 5% = +75 7.5% = +200 10% = +310	90 dias
Shen <i>et al.</i> (2020b)	0, 3, 6, 9 e 12%	CaO = 65.25 SO ₃ = 16.3 SiO ₂ = 3,77 MgO = 1.89	0,18	GB/T 50082–2009	Tempo de fim de pega	0% = 0 3% = +235 6% = +360 9% = +630 12% = +780	1 dia	0% = -510 3% = -35 6% = +200 9% = +390 12% = +600	60 dias

Com base nessa síntese, observa-se que a expansão reportada na literatura apresenta magnitudes e janelas temporais bastante variáveis, dependendo da composição do agente expensor e das condições de cura e restrição. Assim, além de quantificar a expansão em escala de material, torna-se necessário avaliar como a sua ocorrência no tempo, e sua interação com a evolução da rigidez, pode alterar o estado de tensões em elementos estruturais representativos. É nesse contexto que se insere a modelagem numérica adotada nesta tese, discutida a seguir.

A modelagem numérica constitui uma ferramenta essencial na engenharia estrutural não como substituta de ensaios experimentais, mas como meio indispensável para a análise do comportamento de estruturas reais sob diferentes cenários de carregamento, geometria e condições de restrição. Em particular, quando se introduzem materiais ou mecanismos que alteram a dinâmica inicial das deformações volumétricas do concreto, torna-se fundamental compreender de que forma essas alterações se refletem no estado tensional e no risco de fissuração das estruturas.

No contexto desta pesquisa, a utilização de um agente expensor não comercial, obtido a partir do tratamento térmico de resíduos de mármore, modifica o comportamento volumétrico do concreto nas idades iniciais, introduzindo expansões adicionais que se sobrepõem às deformações térmicas e à retração autógena. Embora a expansão seja frequentemente interpretada como um mecanismo benéfico para mitigação da retração, sua ocorrência em instantes precoces pode também induzir estados de tensão distintos daqueles tradicionalmente observados em concretos convencionais, especialmente quando associada a diferentes níveis de restrição.

A síntese apresentada na Tabela 2.1 evidencia o volume de estudos experimentais sobre agentes expansores e as diferentes faixas de expansão reportadas. Entretanto, permanecem limitadas as investigações numéricas que avaliem, via Método dos Elementos Finitos (MEF), como a expansão inicial altera a evolução de tensões e o risco de fissuração em estruturas, especialmente em elementos maciços. Nesse sentido, a simulação numérica desenvolvida nesta tese não tem como objetivo apenas reproduzir fenômenos já conhecidos, mas avaliar de forma inédita as consequências estruturais da alteração da dinâmica inicial das variações volumétricas do concreto, distinguindo o comportamento esperado em estruturas esbeltas daquele observado em estruturas maciças, nas quais os gradientes térmicos e as restrições internas desempenham papel determinante.

A análise numérica torna-se, portanto, uma ferramenta indispensável para compreender os riscos associados à aplicação de agentes expansores em diferentes contextos estruturais e para subsidiar o uso seguro e racional desses materiais.

O MEF emprega funções de interpolação, geralmente expressas por polinômios, para representar as variáveis dependentes primárias em subdomínios denominados elementos finitos. Essa abordagem substitui as leis exatas de resolução do modelo matemático, muitas vezes complexas ou de solução impossível. Os elementos finitos são interligados por meio de pontos nodais em seus contornos, e as leis adotadas são baseadas em parâmetros nodais, substituindo assim os infinitos pontos do modelo matemático contínuo por um número finito de pontos (Souza, 2018).

O concreto endurecido é reconhecido como um dos materiais estruturais mais complexos de modelar, em função de sua natureza heterogênea, da coexistência de múltiplos fenômenos físicos e químicos e da evolução contínua de suas propriedades ao longo do processo de endurecimento. Em idades iniciais, essa complexidade é ainda mais acentuada devido à interação entre o desenvolvimento térmico, as reações de hidratação e a evolução do comportamento mecânico do material. Nesse contexto, a literatura identifica duas abordagens principais para a modelagem do comportamento do concreto em idades precoces.

A primeira consiste no uso de modelos termoquímicos, eventualmente acoplados a modelos mecânicos, nos quais a evolução da temperatura e do grau de hidratação é descrita por equações constitutivas específicas, sendo seus efeitos incorporados posteriormente na resposta mecânica do material. Nessa abordagem, o concreto é geralmente tratado como um meio contínuo homogêneo em escala macroscópica, e os efeitos microestruturais são considerados de forma indireta, por meio de parâmetros efetivos dependentes do tempo. A segunda abordagem baseia-se no desenvolvimento de modelos multicampo, nos quais diferentes campos físicos, como térmico, químico, mecânico e, em alguns casos, higrométrico, são resolvidos de forma simultânea e fortemente acoplada.

Esses modelos permitem representar de maneira mais detalhada as interações entre os fenômenos envolvidos, incluindo a influência direta das reações químicas e do transporte de umidade na evolução das tensões e deformações, embora apresentem maior complexidade computacional e demandem um número mais elevado de parâmetros de entrada. Ambas as abordagens têm sido amplamente empregadas na literatura para a análise do comportamento do

concreto em idades iniciais, especialmente em estudos relacionados à fissuração térmica e ao desenvolvimento de tensões internas, sendo a escolha entre elas dependente dos objetivos do estudo, da escala de análise e da disponibilidade de dados experimentais (Pesavento *et al.*, 2019).

Pesavento *et al.* (2019) afirmam que os modelos termoquímico-mecânicos abordam o acoplamento entre o transporte de calor, a evolução da microestrutura por meio de reações químicas e a mecânica dos sólidos. Durante as fases iniciais, diversos fenômenos ocorrem simultaneamente, em que geralmente são contemplados: a hidratação vinculada à variação de temperatura devido à reação exotérmica do cimento, condução e dilatação térmica, retração autógena, evolução das propriedades mecânicas, e degradação mecânica causada por fissuras e/ou danos, podendo ser modelados como danos viscoelásticos ou modelos plásticos.

Como mencionado, modelar o comportamento em idades iniciais de materiais cimentícios é ainda um grande desafio devido à grande extensão de conhecimento sobre esse assunto, o que resulta em uma variedade de modelos diferentes utilizados atualmente para simular materiais à base de cimento (Jędrzejewska *et al.*, 2018). Como solução para auxiliar o desenvolvimento, compreensão e comparação dos modelos é a realização de testes de benchmarking através de uma rede de pesquisa interdisciplinar formada por pesquisadores e inovadores, como por exemplo o COST Action TU1404. Além disso, o International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, a partir do nome em Francês) publica recomendações produzidas pelos Comitês Técnicos, que em sua maioria trata-se de recomendações para serem adotadas na investigação e na prática.

O comitê técnico RILEM TC 287-CCS publicou um conjunto de recomendações voltadas à modelagem do comportamento termoquímico-mecânico de estruturas maciças de concreto desde as idades iniciais. Essas recomendações abordam aspectos relacionados às características e complexidades geométricas das estruturas, às propriedades dos concretos, à seleção de modelos constitutivos adequados, às condições de contorno e de carregamento, bem como às particularidades inerentes à implementação numérica. No âmbito dessas diretrizes, a análise numérica considera a realização conjunta de análises térmicas dependentes do tempo (transferência de calor), análises químicas associadas à hidratação do cimento e análises mecânicas para a avaliação do estado de tensões, sendo esse conjunto de procedimentos frequentemente referido de forma simplificada como análise termomecânica.

Do ponto de vista da simulação, as recomendações indicam que tais análises podem ser conduzidas por meio de estratégias escalonadas, com acoplamento unidirecional entre os campos físico-químicos e mecânicos, sendo o método dos elementos finitos amplamente empregado para a discretização e resolução dos problemas envolvidos (Azenha *et al.*, 2021).

Com relação a simulação mecânica algumas suposições simplificadas foram adotadas de acordo com as recomendações do RILEM TC 287-CCS, tais como: (i) A modelagem subestima a fissuração, uma vez que o foco é a avaliação do risco por meio da análise dos níveis de tensão; (ii) A evolução das propriedades mecânicas do concreto segue um padrão bem estabelecido, geralmente levando em consideração a maturidade; (iii) O comportamento viscoelástico, como a fluência, é integralmente incorporado à modelagem; e (iv) os efeitos de reforço podem ser deixados de lado, exceto em situações extraordinárias.

Cifuentes *et al.* (2019) estabeleceram um método abrangente fundamentado em modelos de mecânica da fratura para examinar o grau de fissuração e a integridade estrutural em elementos de concreto armado durante as fases iniciais, considerando a influência do tempo de desmoldagem. Nesse modelo implica a criação de um modelo numérico termomecânico, utilizando o MEF, que considera a evolução ao longo do tempo nas propriedades mecânica do concreto. De forma resumida, o procedimento metodológico desse método consiste nas seguintes etapas: (i) determinação do fluxo de calor volumétrico; (ii) identificação das propriedades mecânicas do concreto quanto à sua idade; (iii) Resolução do problema térmico; (iv) Resolução do problema mecânico; (v) Determinação dos campos de tensão e larguras de fissuras; e (vi) monitoramento no local (opcional) e verificações padrões.

É imperativo avaliar o risco de fissuração e adotar estratégias de mitigação apropriadas, utilizando de abordagens simplificadas e o conhecimento das propriedades mecânicas e variações de volume do concreto, para que as deformações e tensões sejam calculadas com modelos de elementos finitos em geometrias reais e complexas. Frente a esse desafio, diversas pesquisas têm sido conduzidas para aprimorar a compreensão das fissuras no concreto decorrentes de deformações autoimpostas. Essas abordagens englobam experimentos práticos e simulações multifísicas dos fenômenos pertinentes (Azenha *et al.*, 2017).

Em síntese, é crucial incorporar a reação do resíduo de mármore tratado termicamente e sua interação mecânica com a pasta de cimento e o concreto para uma adequada modelagem do efeito expansivo proposto neste estudo para este novo material. As dimensões dos corpos de

prova são restritas para avaliar a expansão restrita, portanto, não refletem adequadamente as condições reais das estruturas de concreto com agentes expansores. Assim, torna-se importante desenvolver um modelo termomecânico, utilizando o MEF, que leve em conta tanto a hidratação quanto as interações mecânicas entre os hidratos expansivos e a pasta de cimento, permitindo a representação precisa das expansões livre e restrita.

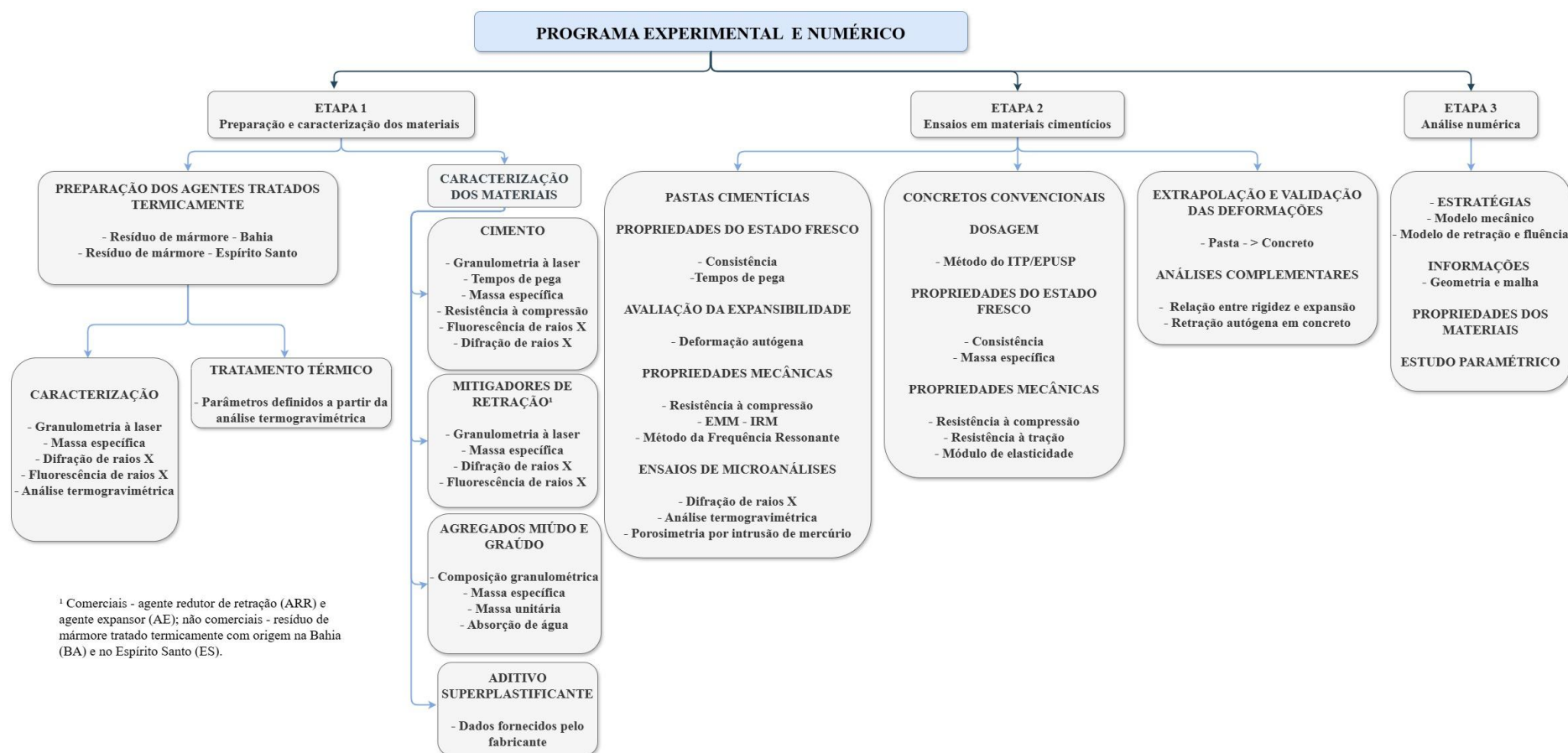
3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos para o desenvolvimento do programa experimental e numérico, estruturado de acordo com os objetivos propostos no trabalho. Serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa, as fases do programa experimental e numérico, a descrição e metodologia de cada ensaio realizado, além da classificação das variáveis da pesquisa.

A metodologia adotada nesta pesquisa fundamentou-se na execução de um programa experimental e numérico voltado para a produção e análise de materiais cimentícios. Nesse contexto, foram considerados dois mitigadores de retração comerciais, o redutor (ARR) e o expansor (AE), além de dois mitigadores de retração não comerciais, obtidos a partir de resíduos de mármore provenientes de diferentes origens.

Os procedimentos experimentais e numéricos dessa pesquisa foram organizados em três etapas principais. Na Etapa 1, foi realizada a preparação dos agentes tratados termicamente, abrangendo os resíduos de mármore provenientes do estado da Bahia e do Espírito Santo, além da caracterização de todos os materiais empregados, incluindo cimento, agregados, aditivos superplastificantes e mitigadores de retração, tanto comerciais (ARR e AE) quanto não comerciais (resíduos tratados). Na Etapa 2, foram realizados os ensaios em materiais cimentícios, envolvendo pastas e concretos. Para as pastas cimentícias, definiram-se os teores de mistura e foram conduzidos ensaios para a avaliação das propriedades no estado fresco, da expansibilidade autógena, das propriedades mecânicas e das microanálises. Em seguida, foram dosados concretos convencionais pelo método do ITP/EPUSP, com posterior avaliação das propriedades do estado fresco e das propriedades mecânicas. A Etapa 3 correspondeu à análise numérica, desenvolvida com base nos resultados experimentais obtidos e em dados complementares da literatura. Nessa fase, foram implementadas simulações termomecânicas em elementos estruturais de concreto simples, com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural nas primeiras idades, especialmente frente aos efeitos induzidos por materiais mitigadores de retração, contribuindo para a compreensão do risco de fissuração em estruturas de concreto. O fluxograma apresentado na Figura 3.1 destaca as etapas do programa experimental e numérico, as quais serão detalhadas nos próximos itens.

Figura 3.1 – Fluxograma com as etapas do programa experimental e numérico.



O programa experimental desenvolvido teve parte dos ensaios realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM/UnB), com exceção do ensaio de difração de raios X (DRX) que foi realizado no Instituto de Geociências (IG/UnB), espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TG/DTG) na Central Analítica do Instituto de Química (CAIQ/UnB), granulometria por difração a laser no Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos (LIMAC/UEPG), EMM-IRM na Unidade de Laboratórios de Ensino de Graduação (ULEG/UnB), método de frequência ressonante no Laboratório de Termomecânica e Microestrutural de Materiais Inteligentes (LabMatl/UnB) e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) no Instituto de Física de São Carlos (IFSC/USP). As análises numéricas, correspondentes à terceira etapa da pesquisa, foram realizadas por meio do *software* DIANA FEA 10.5 (Ferreira; Manie, 2022). Essa etapa foi desenvolvida no âmbito da cotutela internacional da pesquisa, sendo parte das atividades conduzida em Portugal, na Universidade do Minho, e parte no Brasil, na Universidade de Brasília, utilizando a infraestrutura computacional disponível no Laboratório de Métodos Numéricos e Inteligência Artificial (LAMCIA/UnB).

A pesquisa experimental consiste na manipulação de variáveis em que estas podem ser classificadas como dependentes e independentes. A variável independente é aquela que influencia ou afeta outra variável, tratando-se de um fator determinante para certo resultado; é a variável que pode ser controlada pelo investigador no seu estudo. A variável dependente trata-se dos valores a serem descobertos à medida que a variável independente é modificada pelo investigador, ou seja, é o efeito a algo que foi controlado. Todas as variáveis, que podem interferir ou afetar o objeto em estudo, devem ser não só levadas em consideração, mas também devidamente controladas, para que evite o comprometimento ou risco de invalidar a pesquisa (Marconi; Lakatos, 2003).

A partir das definições para as variáveis independentes e dependentes, pôde ser definidas as variáveis deste estudo. Assim, as variáveis independentes que podem alterar as propriedades a serem estudadas são: os mitigadores de retração comerciais, redutor (ARR) e expensor (AE), e os agentes tratados termicamente, os resíduos de mármore, com origem no estado da Bahia (RMBA) e do Espírito Santo (RMES). Já as variáveis dependentes, consideradas como respostas do programa experimental e numérico, são as propriedades do estado fresco, do estado endurecido e microanálises, além da análise numérica. Na Tabela 3.1, estão apresentadas as variáveis independentes e dependentes do programa experimental e numérico desta pesquisa.

Tabela 3.1 – Variáveis independentes e dependentes do programa experimental e numérico.

Variáveis Independentes	Mitigadores de retração comerciais	Aditivo redutor de retração
		Agente expansor
	Mitigadores de retração não comerciais	Resíduo de mármore – Bahia
		Resíduo de mármore – Espírito Santo
Variáveis Dependentes	Propriedades no estado fresco	Início e fim de pega
		Consistência
		Massa específica
	Propriedades no estado endurecido	Deformação autógena
		Resistência à compressão simples
		Resistência à tração por compressão diametral
		Módulo de elasticidade à compressão
		Método da Frequência Ressonante
	Ensaio de microanálises	EMM – IRM
		Fases cristalinas
		Teores de portlandita (CH)
		Distribuição do tamanho de poros
	Análise numérica	Comportamento térmico e mecânico

3.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir, apresentam-se os materiais utilizados na pesquisa para a produção das pastas cimentícias e dos concretos convencionais, que serão os resíduos de mármore, o cimento Portland, os agregados grão e miúdo, os mitigadores de retração, o aditivo superplastificante e a água, bem como os métodos empregados para a caracterização destes materiais, seus respectivos resultados e o procedimento para a obtenção dos agentes tratados termicamente.

3.2.1 Preparação dos agentes tratados termicamente

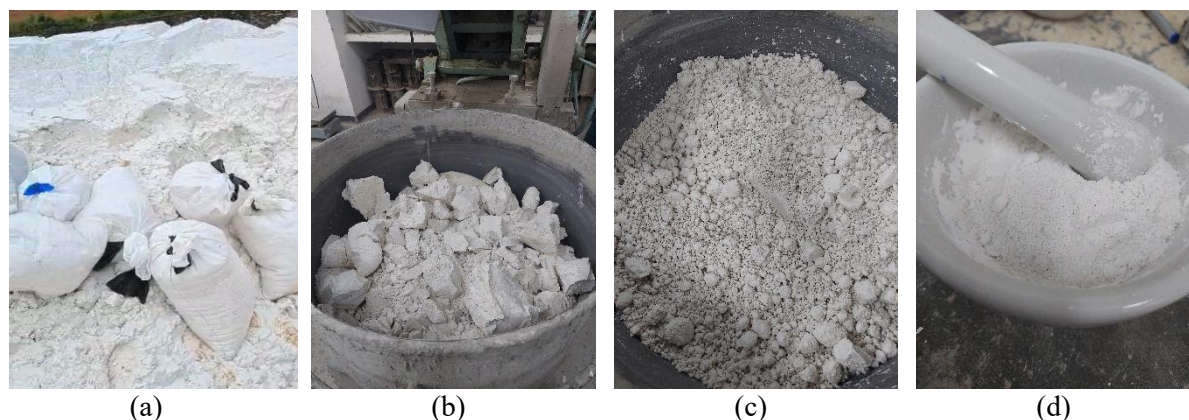
Os materiais submetidos ao processo de tratamento térmico nessa pesquisa foram dois resíduos de mármore, provenientes de diferentes origens. Um deles é o mármore Bege Bahia, predominantemente encontrado em Ouro Preto, no estado da Bahia (BA). Esse mármore é classificado como travertino, uma rocha sedimentar de coloração geralmente bege, formada por precipitação química de carbonato de cálcio em ambientes de água doce, como pode ser visto na Figura 3.2 (a). O outro resíduo analisado é oriundo do mármore extraído em Cachoeira de Itapemirim, no estado do Espírito Santo (ES), uma rocha de origem carbonática cuja principal constituição mineralógica é a calcita, uma forma cristalina de carbonato de cálcio com coloração semelhante ao calcário, conforme mostrado na Figura 3.2 (b). Essas amostras foram selecionadas devido à sua ampla utilização pelo mercado regional do Distrito Federal, o que reforça a relevância prática da pesquisa no contexto local.

Figura 3.2 – Morfologia dos resíduos de mármore bruto: (a) RMBA; (b) RMES.



A coleta dos resíduos de mármore foi realizada em duas serrarias de grande porte, cujo processos produtivos iniciam-se desde o desdobramento dos blocos em placas, passando pela etapa de tratamento de superfície em chapas, até a etapa de acabamento e comercialização de peças. Nestas empresas, no processo de corte utilizam-se teares de fios diamantados, que não geram um resíduo com vestígios de granalha em sua composição. Como um dos objetivos desta pesquisa é avaliar e caracterizar o desempenho do resíduo de mármore, como mitigador de retração, após a aplicação de tratamento térmico; optou-se por utilizar resíduos de mármore de diferentes localidades, pelo intuito de ter diferentes valores de composição química para cada tipo de mármore, antes e após o tratamento térmico, e com isso avaliar a relação dos compostos químicos com a expansão volumétrica dos materiais cimentícios. É importante ressaltar, que os resíduos de mármore foram retirados diretamente do local de descarte, e que após a coleta, passaram por uma preparação inicial antes de ser aplicado na pesquisa. Nessa preparação, foi realizada a homogeneização, redução por quarteamento, secagem, destorroamento, caracterização e armazenamento das amostras em sacos plásticos até a realização do tratamento térmico, como pode ser observado na Figura 3.3 a seguir.

Figura 3.3 – Etapas do processo de coleta e preparação dos resíduos de mármore: (a) coleta; (b) homogeneização; (c) redução por quartejamento; (d) destorroamento.



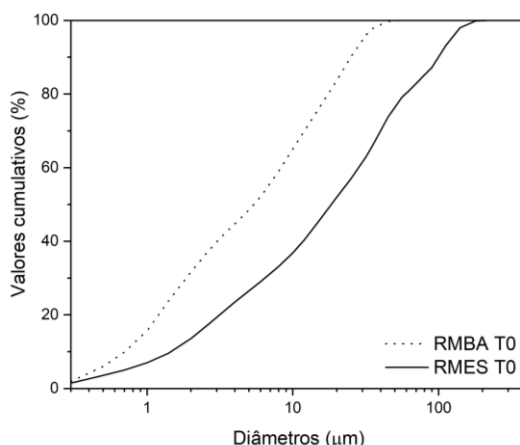
3.2.1.1 Caracterização

Após a coleta e preparação inicial, os resíduos de mármore, antes do tratamento térmico, foram caracterizados em diferentes propriedades físicas, cujos métodos e resultados estão apresentados na Tabela 3.2 e nas curvas granulométricas da Figura 3.4. Estas curvas foram obtidas por meio de ensaio de granulometria a laser, utilizando o analisador de partículas modelo CILASTM 920, em modo líquido, com dispersão ultrassônica por 60 segundos, faixa de análise de entre 0,30 e 400,00 μm , empregando a técnica de difração de Fraunhofer.

Tabela 3.2 – Propriedades dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).

Propriedades	Método de ensaio	RMBA	RMES
Massa específica (g/cm^3)	ABNT NBR 16605 (2017)	2,62	2,76
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas – D_{10} (μm)	Granulometria a laser	0,71	1,46
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 50% das partículas – D_{50} (μm)		5,41	18,35
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas – D_{90} (μm)		24,93	99,59
Diâmetro médio (μm)		9,43	34,42
Perda ao fogo (%)	ABNT NM 18 (2012)	42	41

Figura 3.4 – Granulometria a laser dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).



Avaliando a distribuição granulométrica dos resíduos de mármore, apresentada na Tabela 3.2 e Figura 3.4, pode-se dizer que o resíduo de mármore originado na Bahia (RMBA) apresentou-se como o material mais fino entre os resíduos estudados nesta pesquisa.

As caracterizações mineralógica e química também foram realizadas por difração de raios X (DRX) e espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), respectivamente. O DRX foi conduzido em um difratômetro Bruker D8 Discover, com radiação monocromática proveniente de tubo de cobre acoplado a monocromador Johansson para $K\alpha_1$ operando em 40kV e 40mA, na configuração Bragg-Brentano θ - 2θ , com detector unidimensional Lynxeye®, intervalo de 2θ entre 5° e 70° e passo de $0,01^\circ$. O FRX foi realizado em espectrômetro Shimadzu EDX 720. Os resultados da caracterização mineralógica e química dos resíduos antes do tratamento térmico estão apresentados, respectivamente, na Figura 3.5 e na Tabela 3.3.

Figura 3.5 – Difratoograma de raios X dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).

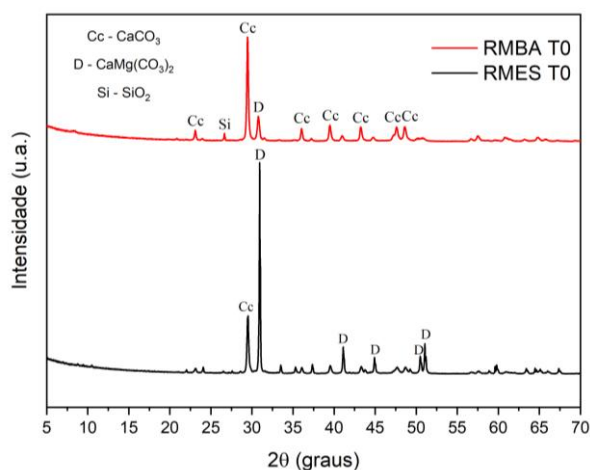


Tabela 3.3 – Composição química dos resíduos de mármore antes do tratamento térmico (T0).

Composto químico, em óxidos (%)	RMBA T0	RMES T0
CaO	47,88	41,89
MgO	5,71	14,80
SiO ₂	3,53	2,05
Al ₂ O ₃	0,32	-
Fe ₂ O ₃	0,20	0,11
SO ₃	0,16	0,08
K ₂ O	0,08	0,04
SrO	0,03	0,02
Outros	0,09	0,01
Perda ao Fogo	42	41

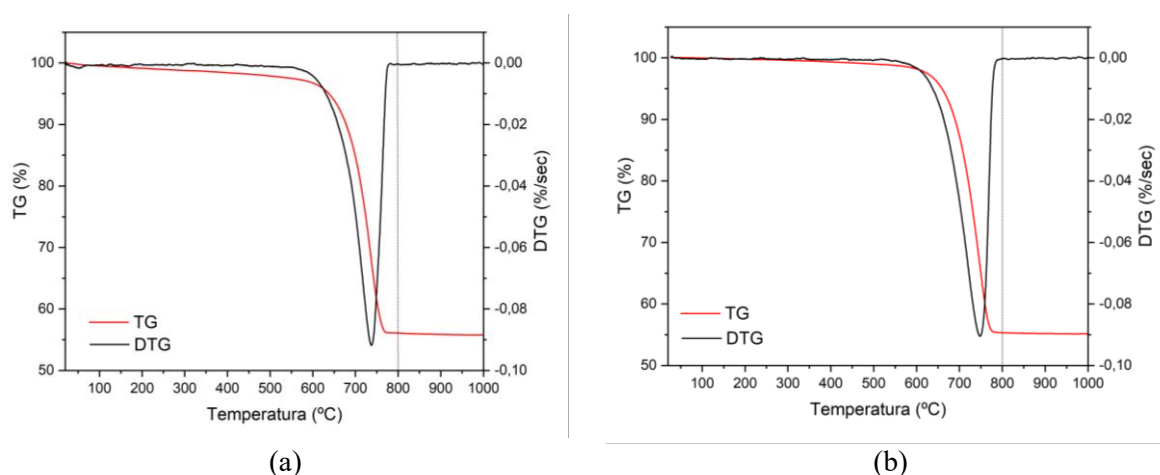
A partir da Figura 3.5 e Tabela 3.3, é possível identificar, para cada resíduo, alguns compostos químicos principais em sua formação mineral. Nota-se, por meio da composição química, (Tabela 3.3), a predominância de óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e dióxido de silício (SiO₂) para ambos os resíduos, sendo que, na composição química do RMBA, o CaO e o SiO₂ apresentam-se em maiores quantidades, além da presença do óxido de alumínio (Al₂O₃), quando comparado com a composição química do RMES, que, por sua vez, apresenta maiores quantidades de óxido de magnésio.

Para o difratograma de raios X, Figura 3.5, observou-se um pico bem definido de calcita (CaCO₃) para o RMBA, além da presença de picos de quartzo (SiO₂) e dolomita (CaMg(CO₃)₂), enquanto que, para o RMES, notou-se um pico bem definido de dolomita (CaMg(CO₃)₂) e a presença de picos de calcita (CaCO₃), minerais característicos das rochas de mármore. Além disso, ressalta-se a presença maior de picos definidos de dolomita para o RMES em relação ao RMBA, comportamento esse justificado pelas diferenças nas quantidades já mencionadas dos compostos químicos desses resíduos. Outra característica importante observada diz respeito à ausência de halo amorfo para ambos os resíduos no difratograma, indicando que o RMBA e RMES, antes do tratamento térmico, apresenta característica de material cristalino, com baixa ou nenhuma pozolanicidade.

Com o intuito de orientar o tratamento térmico, realizou-se uma análise termogravimétrica (TG/DTG) individual para cada resíduo de mármore, conforme ilustrado na Figura 3.6. O objetivo principal foi identificar a temperatura e o tempo ideais de calcinação capazes de promover transformações mineralógicas relevantes, especialmente a descarbonatação, assegurando ao mesmo tempo o menor consumo de energia. Os ensaios foram conduzidos em equipamento Shimadzu DTG-60H, utilizando aproximadamente 10 mg de material, em cadinho

de platina, com faixa de aquecimento desde a temperatura ambiente até 1000 °C, a uma taxa de 10 °C/min, sob atmosfera de N₂ com fluxo de 30 ml/min.

Figura 3.6 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, antes do tratamento (T0).



Observa-se, na Figura 3.6, que ambos os materiais apresentam comportamentos semelhantes. A curva vermelha representa a variação de massa em função da temperatura durante o aquecimento, enquanto a curva preta corresponde à análise térmica diferencial (DTG), indicando a derivada da perda de massa. Observa-se um pico endotérmico proeminente entre 600 °C e 800 °C, sendo o evento térmico mais relevante registrado próximo a 750 °C. Esse pico está associado à decomposição do carbonato de cálcio, caracterizada pela liberação de CO₂ e formação de CaO. Acima de 800 °C, a perda de massa se estabiliza, o que sugere o término da decomposição das principais fases e a aproximação de temperaturas de fusão em níveis mais elevados.

3.2.1.2 Tratamento térmico

Com base nos resultados preliminares de caracterização, em especial da análise termogravimétrica (TG/DTG), foram definidas três condições de tratamento térmico, com o objetivo de induzir transformações mineralógicas nos resíduos de mármore e, potencialmente, melhorar seu comportamento expansivo: (i) aquecimento até 800°C, seguido de resfriamento lento imediato (T800_0h); (ii) aquecimento até 800°C com patamar de 1 hora, seguido de resfriamento lento (T800_1h); e (iii) aquecimento até 1000°C com patamar de 1 hora, seguido de resfriamento lento (T1000_1h).

O tratamento térmico foi realizado em um forno mufla Quimis, modelo 318 A 21, com taxa de aquecimento aproximada de 10°C/min até a temperatura programada, mantida constante quando necessário. O processo de resfriamento ocorreu de forma natural, conforme a inércia do forno, até a temperatura ambiente. Os resíduos foram acondicionados em recipientes de porcelana refratária de 105 mm de diâmetro, com capacidade máxima de 150 gramas por recipiente, como pode ser observado na Figura 3.7 a seguir.

Figura 3.7 – (a) Forno tipo mufla utilizado para o tratamento térmico; (b) Resíduo de mármore antes e após tratamento térmico.



(a)



(b)

O objetivo foi avaliar a influência da temperatura e do tempo de patamar na evolução mineralógica do material, identificando as condições mais adequadas para induzir modificações estruturais compatíveis com o potencial de expansão em sistemas cimentícios. Após cada tratamento, as amostras foram novamente submetidas a análises de TG/DTG, DRX e FRX, a fim de verificar as alterações obtidas e selecionar a condição mais eficaz para as etapas subsequentes da pesquisa. Os resultados dessas análises estão apresentados nas Figuras 3.8 a 3.10.

Figura 3.8 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, após tratamento térmico em temperatura máxima de 800°C (T800_0h).

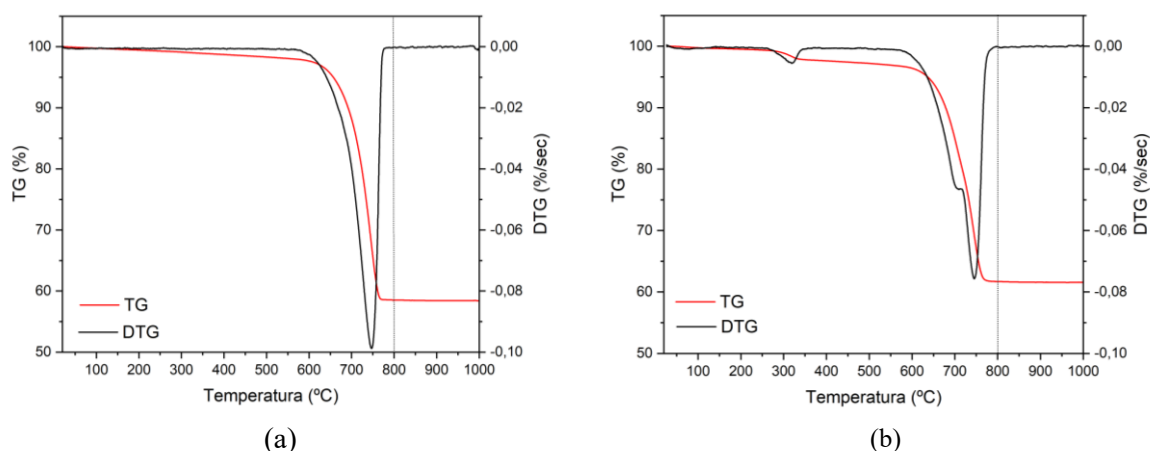


Figura 3.9 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, após tratamento térmico em temperatura máxima de 800°C por 1 hora (T800_1h).

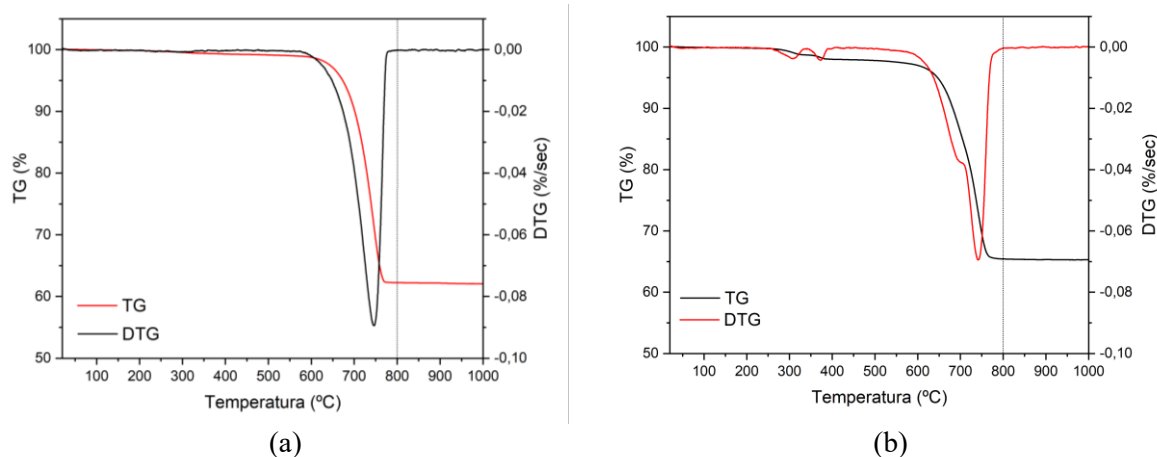
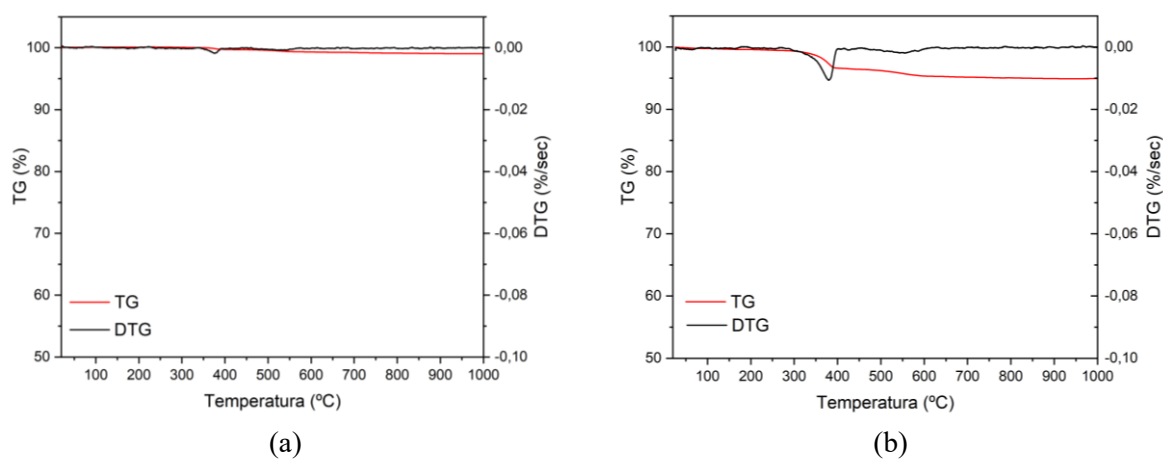


Figura 3.10 – Curvas de TG e DTG: (a) amostra de RMBA; (b) amostra de RMES, após tratamento térmico em temperatura máxima de 1000°C por 1 hora (T1000_1h).



Ao se realizarem os tratamentos T800_0h (Figura 3.8) e T800_1h (Figura 3.9), não foram identificadas mudanças significativas nos valores de perda de massa para os resíduos de mármore da Bahia (RMBA) e do Espírito Santo (RMES). Para o RMBA, nas Figura 3.8(a) e 3.9(a), observaram-se perdas de massa de 41,62% e 37,93%, respectivamente, enquanto, para o RMES, nas Figuras 3.8(b) 3.9(b), os valores obtidos foram de 38,41% e 34,69%. Esses resultados indicam que tais tratamentos térmicos não foram suficientes para atingir o objetivo da pesquisa. Além disso, para o RMES, verificou-se um pico de 250°C a 350°C, correspondente a um evento endotérmico em torno de 320°C, associado à liberação de CO₂ e formação de MgO. Por sua vez, a análise termogravimétrica após o tratamento a 1000°C por 1 hora resultou em uma variação de massa bastante reduzida. Conforme apresentado na Figura 3.10, a perda de massa para o RMBA foi de apenas 0,95% e, para o RMES, de 5,07%, confirmando que esse último tratamento promoveu praticamente a completa transformação dos compostos químicos presentes nos resíduos de mármore.

Com relação as análises de difração de raios X, os difratogramas dos resíduos de mármore antes e após o tratamento térmico são apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12, permitindo identificar as alterações nas fases cristalinas resultantes de cada processo.

Figura 3.11 – Difratograma de raios X dos resíduos de mármore, Bahia (a) e Espírito Santo (b), antes do tratamento térmico (T0), após aplicação de temperatura máxima de 800°C (T800_0h) e temperatura máxima de 800°C por 1 hora (T800_1h).

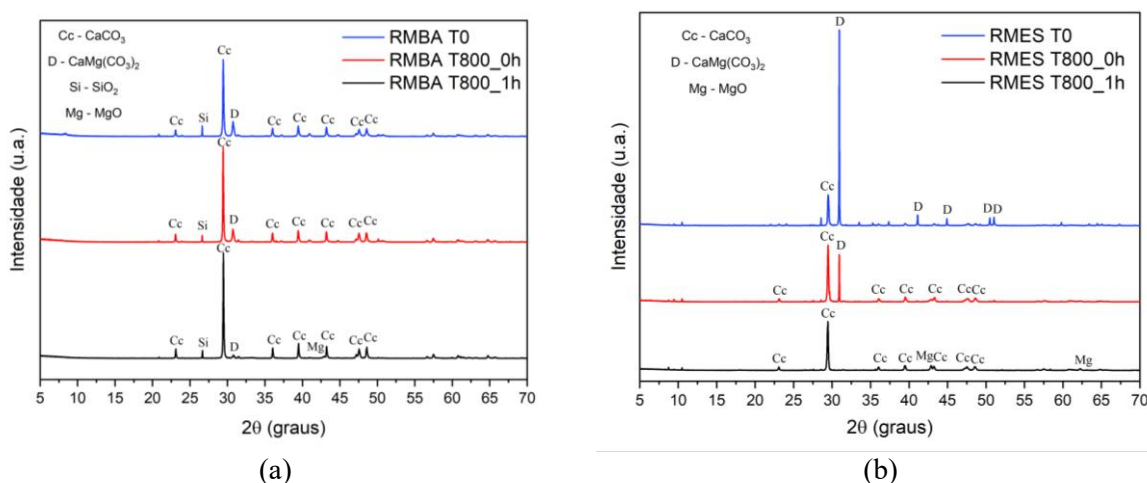
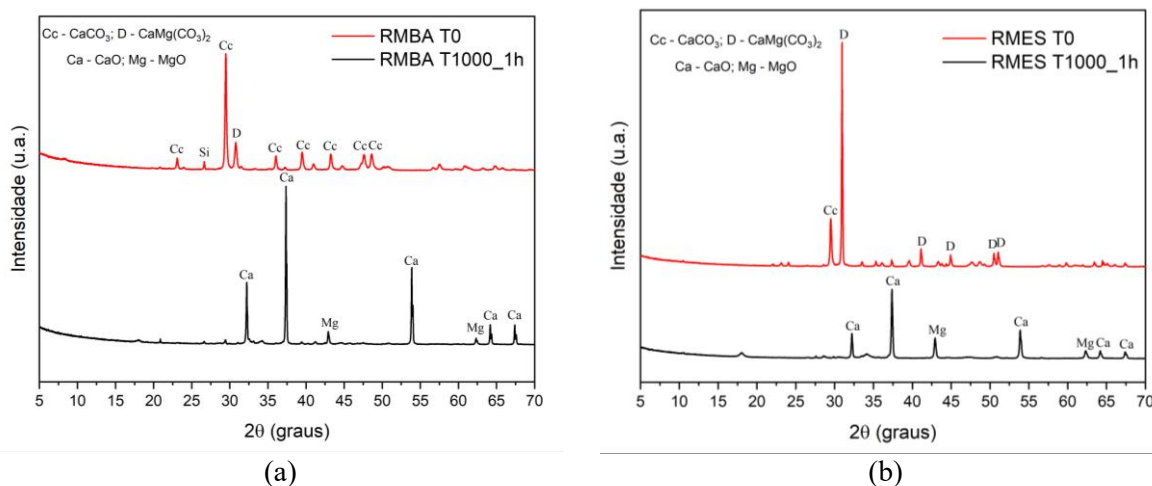


Figura 3.12 – Difratoograma de raios X dos resíduos de mármore, Bahia (a) e Espírito Santo (b), antes do tratamento térmico (T0) e após aplicação de temperatura máxima de 1000°C por 1 hora (T1000_1h).



Como observado anteriormente nas análises termogravimétricas, os tratamentos térmicos T800_0h e T800_1h não foram eficazes em promover mudanças significativas nos resíduos de mármore, resultado também confirmado qualitativamente pelos difratogramas. Para o RMBA (Figura 3.11(a)), verifica-se um leve incremento no pico de calcita (CaCO₃), localizado na posição 2θ de 29°, e uma redução no pico de dolomita (CaMg(CO₃)₂), localizado na posição 2θ de 31°, além do surgimento de indícios de óxido de magnésio (MgO) no tratamento T800_1h. Já para o RMES (Figura 3.11(b)), observou-se uma acentuada redução no pico de dolomita, localizado na posição 2θ de 31°, chegando ao completo desaparecimento após os tratamentos, acompanhada pelo surgimento de picos de calcita e de óxido de magnésio.

Após a aplicação do tratamento térmico T1000_1h (Figura 3.12), identificaram-se mudanças mais expressivas nos compostos cristalinos, em comparação com os difratogramas obtidos antes do tratamento térmico (T0). Nessa condição, os picos de calcita e dolomita desapareceram, dando lugar aos picos de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), sendo os picos de CaO mais intensos para RMBA e os de MgO mais intensos para o RMES.

Esses resultados obtidos com os diferentes tipos de tratamento térmico podem estar relacionados ao fato de que, conforme discutido por Mehta e George (2016), a calcinação do pó de mármore a 650 °C promove a dissociação térmica da dolomita, formando carbonato de cálcio e óxido de magnésio. Os autores destacam que todos os carbonatos sofrem decomposição térmica, resultando em óxidos metálicos e dióxido de carbono. Com o aumento da temperatura para 850°C, o carbonato de cálcio decompõe-se em óxido de cálcio, liberando CO₂ e formando,

simultaneamente, silicato de cálcio. A 1000°C, são observadas predominantemente fases de óxido de cálcio e óxido de magnésio. Essa decomposição dos carbonatos em duas etapas é representada nas Equações 1 e 2.



A partir das análises realizadas, verifica-se que o aumento da temperatura de calcinação de 800°C para 1000°C promoveu a decomposição dos carbonatos e a formação das novas fases de CaO e MgO, evidenciando, portanto, a ineficácia dos tratamentos térmicos conduzidos em temperaturas inferiores a 850°C.

Por fim, com o objetivo de complementar as informações obtidas pelas técnicas anteriores, a composição química dos resíduos de mármore, após os diferentes métodos de tratamento térmico, é apresentada nas Tabelas 3.4 e 3.5, obtida por meio da técnica de FRX.

Tabela 3.4 – Composição do resíduo de mármore da Bahia após aplicação dos tratamentos térmicos.

Composto químico, em óxidos (%)	RMBA T800_0h	RMBA T800_1h	RMBA T1000_1h
CaO	49,10	48,73	47,55
MgO	4,43	4,77	5,78
SiO ₂	3,60	3,61	3,50
Al ₂ O ₃	0,38	0,39	0,34
Fe ₂ O ₃	0,24	0,22	0,19
SO ₃	0,10	0,12	0,16
K ₂ O	0,10	0,11	0,11
SrO	0,04	0,03	0,03
Outros	-	0,02	0,34
Perda ao fogo (%)	42		

Tabela 3.5 – Composição do resíduo de mármore do Espírito Santo após aplicação dos tratamentos térmicos

Composto químico, em óxidos (%)	RMES T800_0h	RMES T800_1h	RMES T1000_1h
CaO	44,06	43,36	41,78
MgO	12,45	13,10	14,48
SiO ₂	2,35	2,37	2,25
Al ₂ O ₃	-	-	0,24
Fe ₂ O ₃	0,14	0,14	0,14
SO ₃	-	-	0,07
K ₂ O	-	-	0,03
SrO	-	0,02	0,02
Outros	-	0,01	-
Perda ao fogo (%)	41		

É importante diferenciar as técnicas de raios X empregadas na caracterização dos materiais, difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), uma vez que, embora utilizem a mesma fonte e detector de raios X, fornecem informações distintas e complementares. O DRX possibilita a identificação qualitativa das fases cristalinas presentes em uma amostra e distingue compostos, enquanto o FRX determina a composição elementar, identificando quais elementos estão presentes e em quais proporções.

Após os procedimentos térmicos, verificou-se, para cada tipo de resíduo, a predominância dos mesmos compostos químicos previamente identificados por FRX antes do tratamento. No caso do RMBA (Tabela 3.4), observou-se uma redução no teor de óxido de cálcio e um aumento nas quantidades de óxido de magnésio e dióxido de silício, comportamento semelhante ao observado na Tabela 3.5 para o RMES, com exceção do surgimento de alguns compostos químicos inexistentes antes do tratamento térmico T1000_1h, tais como óxido de alumínio, trióxido de enxofre e óxido de potássio. Apesar dessas modificações, o RMBA e o RMES continuaram apresentando predominância do óxido de cálcio e o óxido de magnésio.

Com base nas análises termogravimétricas e difratométricas, confirma-se que o tratamento térmico T1000_1h foi o mais adequado para alcançar a completa decomposição dos carbonatos e a formação das fases de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). Embora a temperatura de 1000 °C implique maior demanda energética, essa condição foi a única, entre as avaliadas, capaz de promover a transformação total das fases carbonatadas presentes nos resíduos, garantindo a reatividade necessária para posterior aplicação em sistemas cimentícios. Resultados similares foram relatados por Rashad *et al.* (2025), que destacaram que a eficiência da calcinação depende fortemente da composição mineralógica e, em especial, do teor de dolomita presente no material de origem, fatores que influenciam a temperatura necessária para a completa decomposição dos carbonatos.

Ressalta-se, entretanto, que o impacto energético do tratamento deve ser ponderado no contexto da valorização de um subproduto industrial abundante e de difícil disposição, cujo reaproveitamento contribui para reduzir a extração de calcário natural e mitigar impactos ambientais associados. Assim, mesmo considerando o custo térmico do processo, o aproveitamento do resíduo de mármore em forma calcinada representa uma alternativa sustentável ao transformar um passivo ambiental em insumo funcional, capaz de melhorar o desempenho e a durabilidade de matrizes cimentícias por meio da mitigação da retração. Diante dos resultados obtidos e da viabilidade técnica demonstrada, o resíduo de mármore tratado

termicamente a 1000 °C por 1 h (T1000_1h) foi selecionado para as etapas subsequentes desta pesquisa.

3.2.2 Caracterização dos materiais

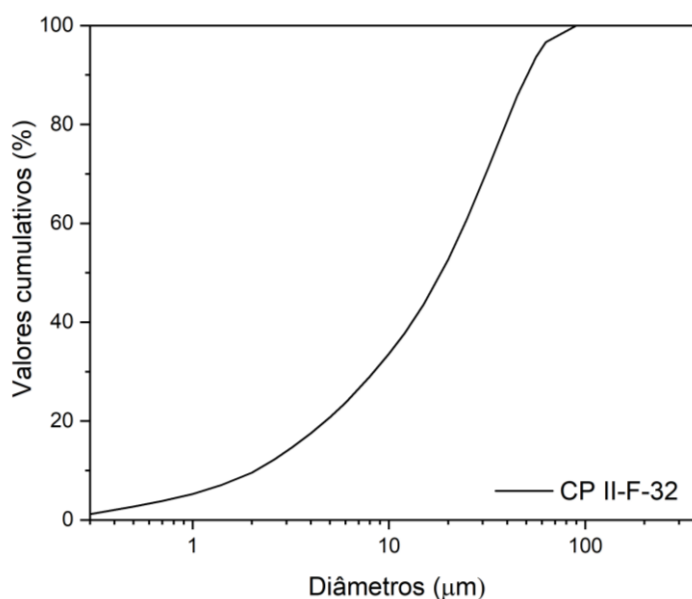
3.2.2.1 Cimento Portland

Na presente pesquisa foi selecionado o cimento Portland composto com material carbonático e classe de resistência de 32 MPa aos 28 dias (CP II-F-32), conforme a ABNT NBR 16697 (2018). A escolha deste aglomerante se deu pelo intuito de utilizar um cimento indicado para aplicações gerais, que não apresentasse material pozolânico em sua composição.

A caracterização física, química, mineralógica e mecânica do cimento Portland CP II-F-32 foi realizada utilizando os mesmos equipamentos e parâmetros empregados anteriormente na caracterização dos resíduos de mármore. Antes da análise por fluorescência de raios X (FRX), procedeu-se ao ensaio de perda ao fogo, conforme a ABNT NM 18 (2012).

A curva granulométrica do cimento Portland é apresentada na Figura 3.13. Ao compará-la com a distribuição granulométrica dos materiais finos mostrada na Figura 3.4, observa-se que as curvas desse aglomerante e do resíduo de mármore proveniente de Cachoeira de Itapemirim (RMES) apresentam grande semelhança entre si.

Figura 3.13 – Granulometria a laser do cimento CP II-F-32.



Os métodos empregados e os resultados obtidos estão apresentados de forma consolidada na Tabela 3.6, que evidencia a predominância de óxido de cálcio, característica esperada para um cimento composto com até 25% de material carbonático, ou seja, elevado teor de clínquer e riqueza em carbonato de cálcio. Observa-se ainda que os limites normatizados para os tempos de pega, resistência à compressão e composição química foram devidamente atendidos.

Tabela 3.6 – Propriedades e características do cimento CP II-F-32.

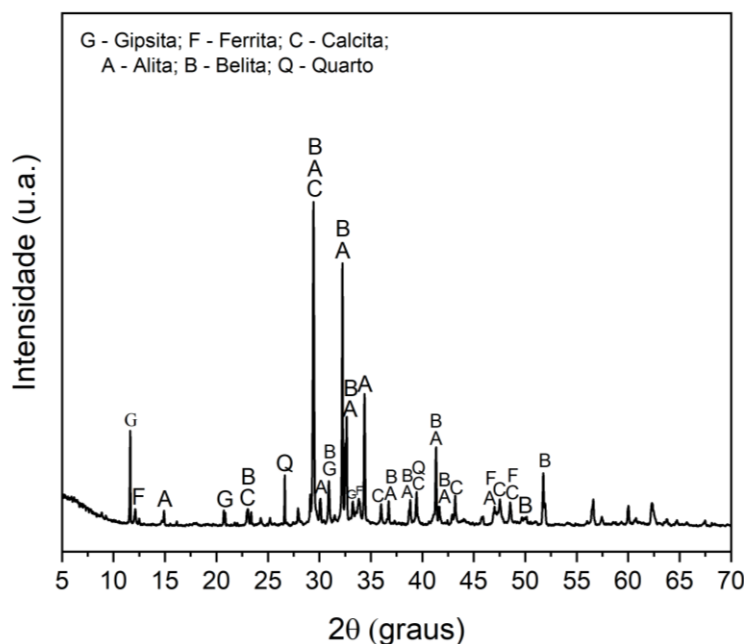
Propriedades e características		Método de ensaio	Resultados	Limites ^(a)
Tempos de pega	Início de pega (min)	ABNT NBR 16607 (2018)	160	≥ 60
	Fim de pega (min)		210	≤ 600
Massa específica (g/cm³)		ABNT NBR 16605 (2017)	3,04	-
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas – D ₁₀ (µm)		Granulometria a laser	2,09	-
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 50% das partículas – D ₅₀ (µm)			18,38	-
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas – D ₉₀ (µm)			50,57	-
Diâmetro Médio (µm)			22,92	-
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	ABNT NBR 7215 (2019)	24,5	≥ 10,0
	7 dias		26,1	≥ 20,0
	28 dias		37,3	≥ 32,0
Composição química, em óxidos (%)	CaO	Espectrometria por fluorescência de raios X (FRX)	65,73	-
	SiO ₂		13,10	-
	Fe ₂ O ₃		3,31	-
	Al ₂ O ₃		3,10	-
	SO ₃		2,98	≤ 4,5
	MgO		2,18	≤ 6,5
	K ₂ O		0,96	-
	SrO		0,40	-
	TiO ₂		0,19	-
	MnO		0,05	-
	P.F. ^(b)		ABNT NM 18 (2012)	8,00

^(a) Limites estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (2018)

^(b) Perda ao fogo (%)

No difratograma apresentado na Figura 3.14, podem ser identificados qualitativamente picos característicos de calcita ou carbonato de cálcio (CaCO₃), gipsita (CaSO₄.2H₂O), ferrita (C₄AF), quartzo (SiO₂), alita (C₃O) e belita (C₂S), correspondentes aos compostos cristalinos formados a partir das matérias-primas empregadas na produção deste tipo de cimento Portland.

Figura 3.14 – Difratoograma de raios X do cimento CP II-F-32.



3.2.2.2 Mitigadores de retração

Com o objetivo de avaliar o comportamento de expansão em materiais cimentícios ao incorporar diferentes resíduos de mármore tratados termicamente foi estabelecido nesta pesquisa utilizar dois mitigadores de retração comerciais. Um aditivo redutor de retração (ARR) e um agente expansor (AE) foram escolhidos para servir como materiais de referência para comparação neste estudo. O aditivo redutor de retração selecionado é um aditivo líquido que não contém material expansivo, mas atua quimicamente para reduzir significativamente as forças internas primárias, tensão superficial da água, que causam retração. Já o aditivo expansor de retração trata-se de um aditivo em pó, isento de cloretos, sulfato e ferro, recomendado para utilização em materiais cimentícios que precisem de propriedades expansivas.

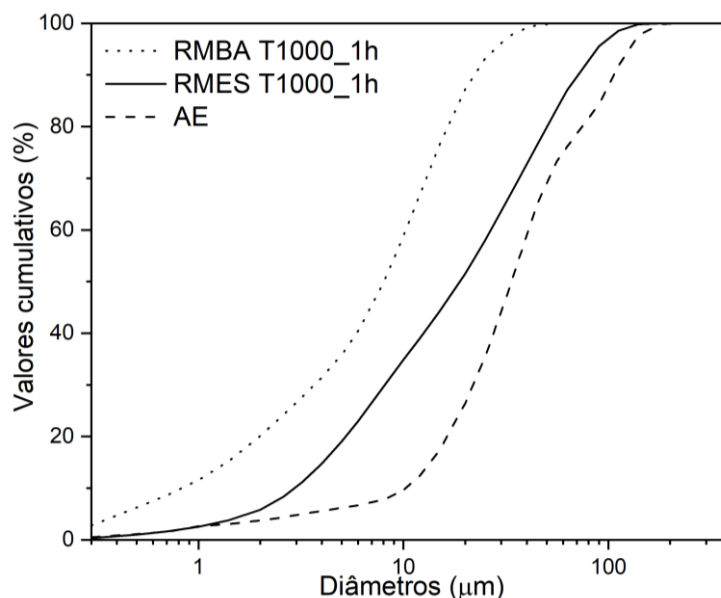
Os mitigadores de retração em pó utilizados nesta pesquisa, o agente expansor (AE) e os resíduos de mármore tratados termicamente (RMBA T1000_1h e RMES T1000_1h), foram caracterizados conforme os métodos listados na Tabela 3.7, na qual também estão reunidos os principais resultados obtidos. Para o aditivo redutor de retração (ARR), os dados técnicos foram fornecidos pelo fabricante. As curvas granulométricas referentes aos materiais em pó podem ser visualizadas na Figura 3.15.

Tabela 3.7 – Propriedades do agente expensor e resíduos de mármore após tratamento térmico.

Propriedade	Método de ensaio	AE	RMBA T1000 1h	RMES T1000 1h
Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR 16605 (2017)	2,76	3,00	3,05
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas – D ₁₀ (μm)	Granulometria a laser	10,23	0,83	2,94
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 50% das partículas – D ₅₀ (μm)		33,64	8,04	18,81
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas – D ₉₀ (μm)		106,18	22,2	71,24
Diâmetro Médio (μm)		45,97	10,07	28,95

Avaliando as propriedades físicas dos mitigadores de retração em pó (Tabela 3.7 e Figura 3.15), verificou-se que o agente expensor apresenta granulometria mais elevada em comparação aos resíduos de mármore tratados termicamente, destacando-se o RMBA T1000_1h como o material mais fino entre todos os analisados nesta pesquisa.

Figura 3.15 – Granulometria a laser dos mitigadores de retração com granulometria em pó.



A caracterização mineralógica e química dos mitigadores de retração em pó é apresentada na Figura 3.16 e Tabela 3.8, respectivamente. Como discutido nas seções anteriores, após o tratamento térmico a 1000°C por 1 hora nos resíduos de mármore (RMBA T1000_1h e RMES T1000_1h), observou-se, nos difratogramas de raios X, a transformação das fases cristalinas

dos principais compostos minerais, confirmando a decomposição da calcita (CaCO_3) e da dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) em óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), identificados pelos picos bem definidos na Figura 3.16. Quanto ao agente expensor (AE), foram observados picos característicos de dolomita, localizado principalmente na posição 2θ de 31° , e de quartzo (SiO_2), localizado principalmente em 2θ de 26° , além de um pico de calcita, em menor intensidade, na posição 2θ de 29° , semelhantes aos cristalinos identificados nos resíduos de mármore antes do tratamento térmico.

Figura 3.16 – Difratograma de raios X dos mitigadores de retração com granulometria em pó.

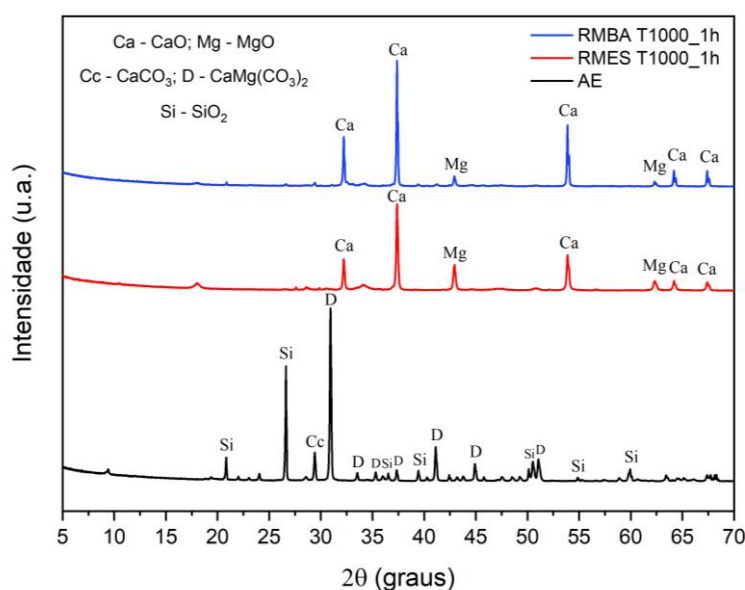


Tabela 3.8 – Composição química dos mitigadores de retração com granulometria em pó.

Composto químico, em óxidos (%)	AE	RMBA T1000 1h	RMES T1000 1h
CaO	35,18	47,55	41,78
MgO	17,92	5,78	14,48
SiO ₂	13,22	3,50	2,25
Al ₂ O ₃	0,36	0,34	0,24
Fe ₂ O ₃	0,18	0,19	0,14
SO ₃	0,08	0,16	0,07
K ₂ O	0,02	0,11	0,03
SrO	0,01	0,03	0,02
Outros	-	0,34	-
Perda ao fogo	33	42	41

A composição química do agente expensor (AE) confirma as informações fornecidas pelo fabricante, que o caracteriza como um material de base carbonática. Conforme apresentado na Tabela 3.8, identificou-se a predominância de óxido de cálcio, óxido de magnésio e óxido de silício, com destaque para o óxido de cálcio, presente em maior proporção. Comportamento

semelhante foi observado nos resíduos de mármore tratados termicamente, conforme discutido anteriormente. Adicionalmente, com base nas classificações apresentadas na revisão bibliográfica (Capítulo 2), tanto o agente expansor comercial quanto os resíduos de mármore tratados termicamente podem ser enquadrados na categoria de agente expansor do tipo G, conforme a norma ACI 223R-10 (2011), uma vez que sua composição principal é baseada em cal livre (CaO).

De acordo com o fabricante, o aditivo redutor de retração (ARR) empregado nesta pesquisa é de base glicólica, não contém água, mas, em doses elevadas, seu volume deve ser considerado no ajuste da quantidade final de água. Sua massa específica é de 0,91 g/cm³.

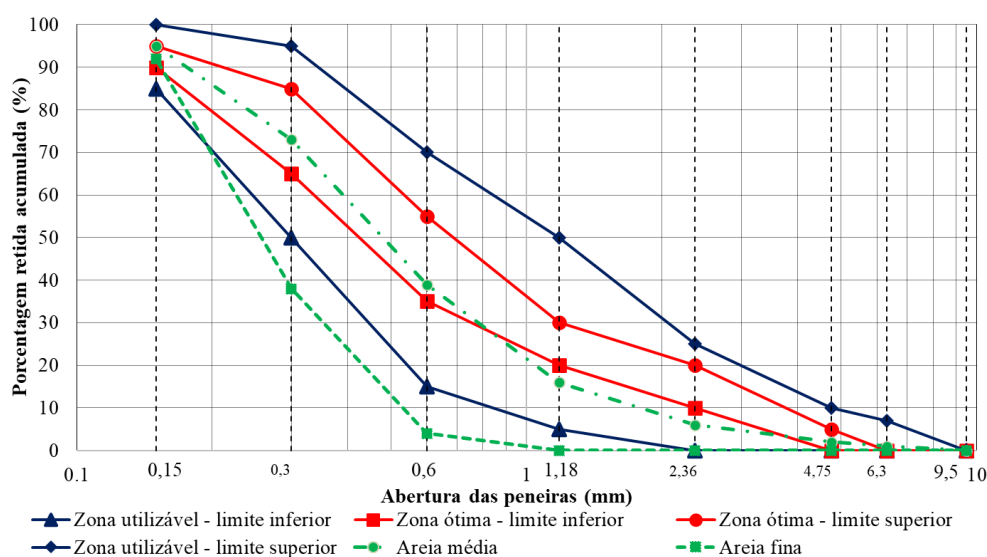
3.2.2.3 Agregados miúdo e graúdo

Para a produção das misturas de concreto convencional, foram utilizados dois tipos de agregados: miúdo e graúdo. Como agregado miúdo, optou-se pela combinação de duas areias naturais lavadas de rio, ambas de origem quartzosa, denominadas areia média e areia fina, adquiridas na região de Brasília-DF. Os resultados da caracterização física dessas areias são apresentados na Tabela 3.9, enquanto a distribuição granulométrica é apresentada na Figura 3.17.

Tabela 3.9 – Propriedades dos agregados miúdos.

Propriedade	Método de ensaio	Areia média	Areia fina
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (2009)	2,62	2,63
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2003)	2,31	1,30
Dimensão Máxima (mm)		4,75	0,60

Figura 3.17 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.

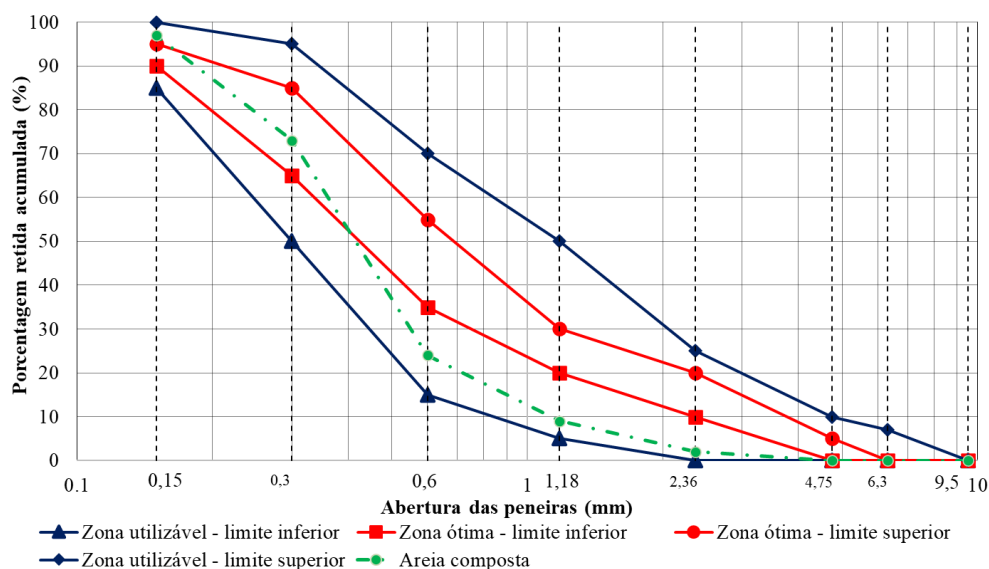


As zonas demarcadas e denominadas como ótima ou utilizável são definidas pela ABNT NBR 7211 (2022), com base no valor do módulo de finura. Observa-se que a areia fina se encontra abaixo do limite inferior da zona utilizável, cujo valor mínimo do módulo de finura é 1,55. Por esse motivo, visando obter maior compacidade e menor índice de vazios entre as areias, optou-se por realizar uma combinação entre a areia média e areia fina, denominada areia composta, de forma que o empacotamento entre elas formasse um esqueleto granular mais adequado para compor o concreto convencional. A proporção ótima de cada fração foi determinada por meio do ensaio de massa unitária no estado compactado, conforme as recomendações da NBR 16972 (2021), resultando em 65% de areia média e 35% de areia fina. Essa foi a proporção utilizada em todos os traços dessa pesquisa, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 3.10, além da distribuição granulométrica, na Figura 3.18.

Tabela 3.10 – Propriedades da areia composta.

Propriedade	Areia composta
Massa específica (g/cm ³)	2,63
Módulo de Finura	2,05
Dimensão Máxima (mm)	2,36

Figura 3.18 – Composição granulométrica da areia composta.



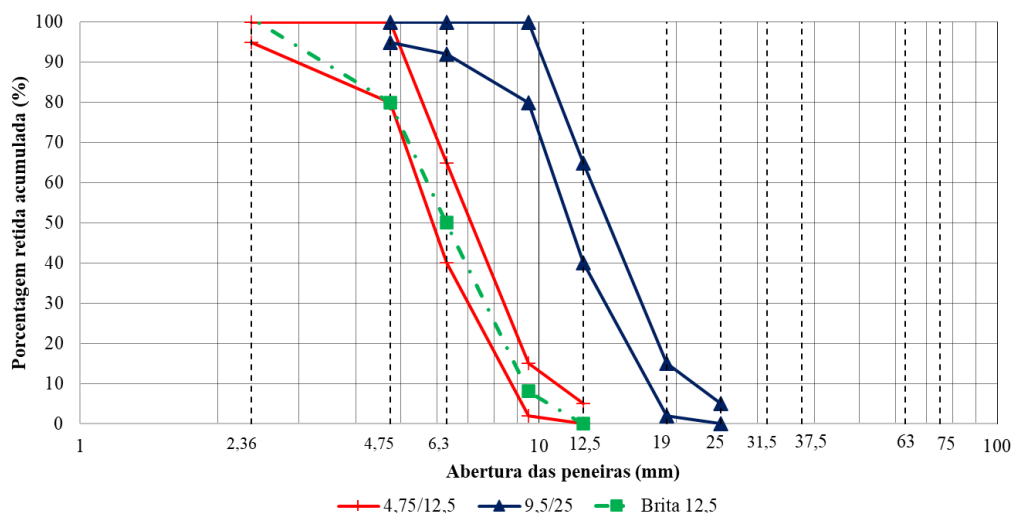
O agregado graúdo utilizado foi proveniente da britagem de rocha calcária, denominado brita 12,5, com dimensão máxima de 12,5 mm e adquirido no mercado local de Brasília-DF. Sua caracterização física foi realizada conforme as recomendações normativas, sendo os resultados apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Propriedades do agregado graúdo.

Propriedade	Método de ensaio	Brita 12,5
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (2009)	2,66
Massa unitária compactada (g/cm ³)	NBR 16972 (2021)	1,56
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)		1,43
Absorção (%)	NBR NM 53 (2009)	1,02
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2003)	5,93
Dimensão Máxima (mm)		12,5

A distribuição granulométrica da brita 12,5 é apresentada na Figura 3.19, definida com base no valor, em milímetros, de sua dimensão máxima. Nota-se que este agregado encontra-se na zona granulométrica correspondente ao intervalo de diâmetro 4,75/12,5 mm, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7211 (2022).

Figura 3.19 – Composição granulométrica do agregado graúdo.



3.2.2.4 Aditivo superplastificante

Com o objetivo de reduzir a quantidade de água necessária e, ao mesmo tempo, manter a trabalhabilidade do concreto, foi utilizado, na produção do concreto convencional desta pesquisa, um aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico modificado, classificado como de terceira geração. Esse aditivo, em forma líquida e livre de cloretos, possui como base um único polímero éter policarboxílico com largas cadeias laterais, atuando como dispersante das partículas cimentícias. As principais características do superplastificante, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Características do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.

Características	<i>MasterGlenium51</i>
Dosagem recomendada (%)	0,2-1,0
Aparência	Líquido branco turvo
Densidade (g/cm ³)	1,067-1,107
pH	5-7
Teor de sólidos (%)	28,5-31,5
Viscosidade (cps)	<150

Fonte: BASF (2021)

3.2.2.5 Água de amassamento

Para a produção das pastas cimentícias e dos concretos convencionais, foi utilizada água de amassamento de acordo com a NBR 15900-1 (2009), fornecida pela companhia de abastecimento de água da região de Brasília-DF.

3.3 ENSAIOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Os ensaios com pastas cimentícias e concretos convencionais buscam avaliar a influência do tratamento térmico do resíduo de mármore como agente mitigador de retração em materiais cimentícios. Antes da realização dos ensaios experimentais, os teores das misturas foram definidos por meio da dosagem dos materiais cimentícios.

3.3.1 Pastas cimentícias

À época do desenvolvimento desta pesquisa, não haviam sido publicados estudos que investigassem o tratamento térmico do resíduo de mármore com o propósito de avaliar o seu potencial expansivo em materiais cimentícios Portland. Assim, este trabalho propôs uma abordagem inédita ao examinar se a calcinação controlada do resíduo de mármore poderia induzir expansão em pastas cimentícias, contribuindo para a mitigação da retração autógena. Estudos publicados posteriormente, como os de Siddique *et al.* (2021) e Rashad *et al.* (2025), também aplicaram o tratamento térmico ao resíduo de mármore, confirmando a formação de fases reativas de CaO e MgO e demonstrando sua viabilidade como aditivo ou substituinte em sistemas alcalino-ativados. Entretanto, esses trabalhos se concentraram na reatividade e nas propriedades mecânicas dos materiais calcinados, sem abordar o comportamento expansivo nem a capacidade de compensação de retração em sistemas à base de cimento Portland, aspectos que permanecem centrais e inovadores nesta investigação.

Para estabelecer uma referência comparativa dos resultados, foram selecionados dois materiais amplamente reconhecidos como mitigadores de retração: o agente redutor de retração (ARR) e o agente expansor (AE). Como as fichas técnicas dos fabricantes recomendam um teor máximo de 2% em relação ao peso do cimento para esses mitigadores de retração comerciais, essa porcentagem foi adotada como referência para a definição dos teores individuais dos resíduos de mármore tratados termicamente com base no método selecionado. O método específico de tratamento térmico adotado é detalhado e justificado com base nos resultados experimentais discutidos na seção de resultados.

Estudos anteriores (Carballosa *et al.*, 2015; Han, Jia, e Yan, 2016; Liang *et al.*, 2023) observaram que o aumento do teor dos agentes expansivos resultou em maiores expansões finais dos materiais cimentícios, reduzindo consequentemente a retração. Com base nessa premissa, esta pesquisa adotou uma abordagem experimental na qual foram selecionados teores acima e abaixo do limite máximo recomendado para os agentes mitigadores de retração

comerciais (ARR e AE), fixado em 2%, a fim de verificar se o mesmo comportamento poderia ser observado para os resíduos de mármore tratados termicamente. Para isso, pastas cimentícias foram preparadas com adições de mármore tratado termicamente nos teores de 1, 2 e 5% em relação à massa de cimento. Nesta etapa, foram realizados ensaios para avaliar propriedades no estado fresco, expansibilidade, desempenho mecânico e microanálises. Quanto à nomenclatura, adotou-se para cada material estudado a sigla já utilizada no texto, seguida do valor percentual de adição em relação à massa de cimento. No caso dos resíduos de mármore tratados termicamente, utilizou-se a sigla correspondente ao estado de origem. A lista de todas as misturas e suas respectivas nomenclaturas utilizadas na pesquisa encontra-se apresentada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Valor percentual de adição e nome das misturas utilizadas nesta pesquisa.

Nomenclatura	Características
REF	Referência (sem adições)
AE2	2% de agente expensor
ARR2	2% de aditivo redutor de retração
RMBA1	1% de resíduo tratado termicamente com origem na Bahia
RMBA2	2% de resíduo tratado termicamente com origem na Bahia
RMBA5	5% de resíduo tratado termicamente com origem na Bahia
RMES1	1% de resíduo tratado termicamente com origem no Espírito Santo
RMES2	2% de resíduo tratado termicamente com origem no Espírito Santo
RMES5	5% de resíduo tratado termicamente com origem no Espírito Santo

Todas as pastas apresentaram a mesma relação água/cimento (a/c) de 0,5 e uma consistência fixa que não atrapalhasse a moldagem dos tubos corrugados, correspondente ao espalhamento de 90 ± 20 mm. Além disso, teve a premissa de evitar o uso do aditivo superplastificante na preparação das pastas cimentícias, com o objetivo de não incluir outra variável que pudesse atrapalhar a avaliação do efeito expansivo dos mitigadores de retração utilizados na pesquisa.

As pastas de cimento foram preparadas seguindo o mesmo procedimento de mistura utilizado na determinação da consistência normal da pasta, conforme recomendações da ABNT NBR 16606 (2018). Para o processo de mistura foi utilizado um misturador mecânico Hobart, realizado na seguinte ordem: primeiramente, toda a quantidade de água foi colocada na cuba, o cimento e o mitigador de retração foram adicionados, e a mistura foi realizada por 60 segundos em baixa rotação (140 ± 5 rpm). Em seguida, o misturador foi desligado por 60 segundos para que nos primeiros 30 segundos, as paredes internas da cuba fossem raspadas com uma espátula de borracha. Após esse tempo, o misturador foi ligado em alta rotação (285 ± 10 rpm) por mais

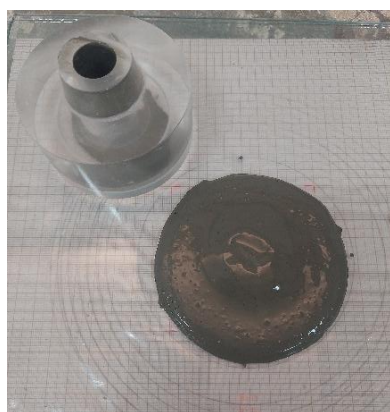
60 segundos. Após a mistura da pasta de cimento, a pasta foi utilizada para diferentes métodos experimentais, conforme explicado na próxima seção.

3.3.1.1 Avaliação das propriedades do estado fresco

As propriedades do estado fresco em pastas cimentícias foram avaliadas por meio de ensaios de consistência e tempos de pega, como pode ser observado na Figura 3.20. A consistência da pasta cimentícia foi verificada através do ensaio de mini-slump seguindo a metodologia de Kantro (1980). Para a realização do ensaio de mini-slump foi utilizado um dispositivo de mini-cone de acrílico com 60 mm de altura, base inferior de 40 mm de diâmetro e base superior de 20 mm de diâmetro. O dispositivo foi preenchido com pasta de cimento, e em seguida, removido verticalmente a superfície. A consistência da pasta foi avaliada por meio da medição do espalhamento com paquímetro, sendo considerado válido o ensaio cujo diâmetro de espalhamento estivesse compreendido no intervalo de 90 ± 20 mm. O procedimento foi repetido três vezes para cada mistura.

Outro ensaio realizado com as pastas de cimento foi o de determinação dos tempos de início e fim de pega, conduzido conforme as recomendações da ABNT NBR 16607 (2018). A adoção do tempo de fim de pega como referência justificou-se pela necessidade de estabelecer o instante inicial das leituras nos ensaios de variação autógena, em conformidade com a ASTM C1698 (2019).

Figura 3.20 – Determinação em pastas de cimentos: (a) Consistência; (b) Tempos de pega.



(a)



(b)

3.3.1.2 Avaliação da expansibilidade

Na avaliação da expansibilidade, o tempo de fim de pega foi adotado como referência para definir o início das determinações da variação autógena. Os ensaios foram conduzidos pelo método do dilatômetro, utilizando tubos corrugados, conforme a ASTM C1698 (2019), com o objetivo de avaliar a expansão em idades iniciais nas pastas cimentícias. Embora tenha sido desenvolvida principalmente para a avaliação da retração, essa metodologia também tem sido adaptada com sucesso em estudos anteriores para monitorar a expansão em idades iniciais, especialmente quando agentes expansivos são incorporados a materiais à base de cimento (Anshuang *et al.*, 2017). O monitoramento contínuo e de alta resolução da deformação, conforme previsto na norma, torna esse método adequado para captar os fenômenos de expansão nas idades iniciais investigados nesta pesquisa.

O método do dilatômetro, amplamente utilizado, envolve a moldagem da pasta cimentícia recém-misturada em um tubo corrugado, que oferece baixa resistência à variação de comprimento da amostra. O ensaio consiste na medição contínua da deformação do material cimentício moldado em um tubo corrugado com dimensões nominais de 28,5 mm de diâmetro e comprimento entre 420 mm e 440 mm. As extremidades do tubo foram vedadas com tampas cônicas de 19 mm de comprimento. Cada tubo foi posicionado em uma base de apoio composta por três hastes de aço inoxidável, com 20 mm de diâmetro, e duas placas terminais do mesmo material. O aparato utilizado para a medição das deformações, constituído por um tubo corrugado com duas tampas nas extremidades e sua respectiva base de apoio, encontra-se apresentado na Figura 3.21.”.

Figura 3.21 – Base de apoio do dilatômetro juntamente com molde de tubo corrugado e tampas de extremidades.



Antes do preenchimento, uma das extremidades do tubo foi fechada com uma tampa, e a pasta de cimento foi inserida em três camadas sucessivas. Cada camada foi adensada manualmente com uma haste metálica para reduzir a presença de vazios. Após o preenchimento, a tampa superior foi ajustada firmemente, e o molde foi selado com cola epóxi para minimizar a possível secagem do corpo de prova. Concluída a moldagem, a massa do corpo de prova foi determinada, e o molde preenchido foi fixado na base de apoio do dilatômetro. Uma extremidade foi rigidamente ancorada ao equipamento, enquanto a outra foi conectada a um relógio comparador com precisão de 0,001mm, responsável pelas medições de comprimento. As medições tiveram início o mais rápido possível após a preparação das pastas de cimento, conforme recomendado por Lura e Kovler (2022). Para cada traço de mistura, foram preparados dois corpos de prova. Na Figura 3.22 encontra-se apresentada a configuração do ensaio.

Figura 3.22 – Ensaio de deformação autógena em andamento.



O ensaio foi conduzido em uma sala com temperatura controlada a $23 \pm 1^\circ\text{C}$, conforme recomendado pela norma. A evolução do comprimento dos corpos de prova foi registrada por um relógio comparador com precisão de 0,001 mm, e as medições foram registradas por meio de uma *webcam* conectada a um notebook, utilizando o *software Yawcam®*. A frequência de registro foi de 5 minutos nas primeiras 72 horas e, posteriormente, a cada 1 hora até 7 dias. Para garantir a precisão das leituras, os moldes não foram movimentados durante todo o ensaio. Ao final dos 7 dias, o ensaio foi interrompido e os dados foram processados manualmente. A deformação linear, expressa em $\mu\text{m/m}$, foi calculada conforme as recomendações da ASTM C1698 (2019).

A partir das deformações calculadas, foi elaborada uma curva de deformação *versus* tempo, permitindo avaliar a evolução da hidratação da pasta cimentícia. Para este estudo, adotou-se como referência o tempo de fim de pega, conforme estabelecido pela ASTM C1698 (2019), por corresponder ao instante em que o material passa a apresentar um esqueleto sólido capaz de sustentar tensões internas, permitindo que as deformações medidas sejam efetivamente atribuídas à retração autógena e não ao comportamento plástico da pasta.

3.3.1.3 Avaliação das propriedades mecânicas

Para a avaliação das propriedades mecânicas das pastas cimentícias foram realizados os ensaios de resistência à compressão e o EMM-IRM (*Elastic Modulus Measurement through Impulse Response Method*) e o método de frequência ressonante.

3.3.1.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, conforme as recomendações da ABNT NBR 7215 (2019), para as misturas produzidas. Para cada mistura, foram moldados três corpos de provas cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm, cujas superfícies foram retificadas para garantir uma distribuição uniforme da carga na área transversal. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram na câmara úmida por 24 horas e, em seguida, foram submetidos à cura submersa em água saturada com cal até atingirem as idades estabelecidas para a realização do ensaio.

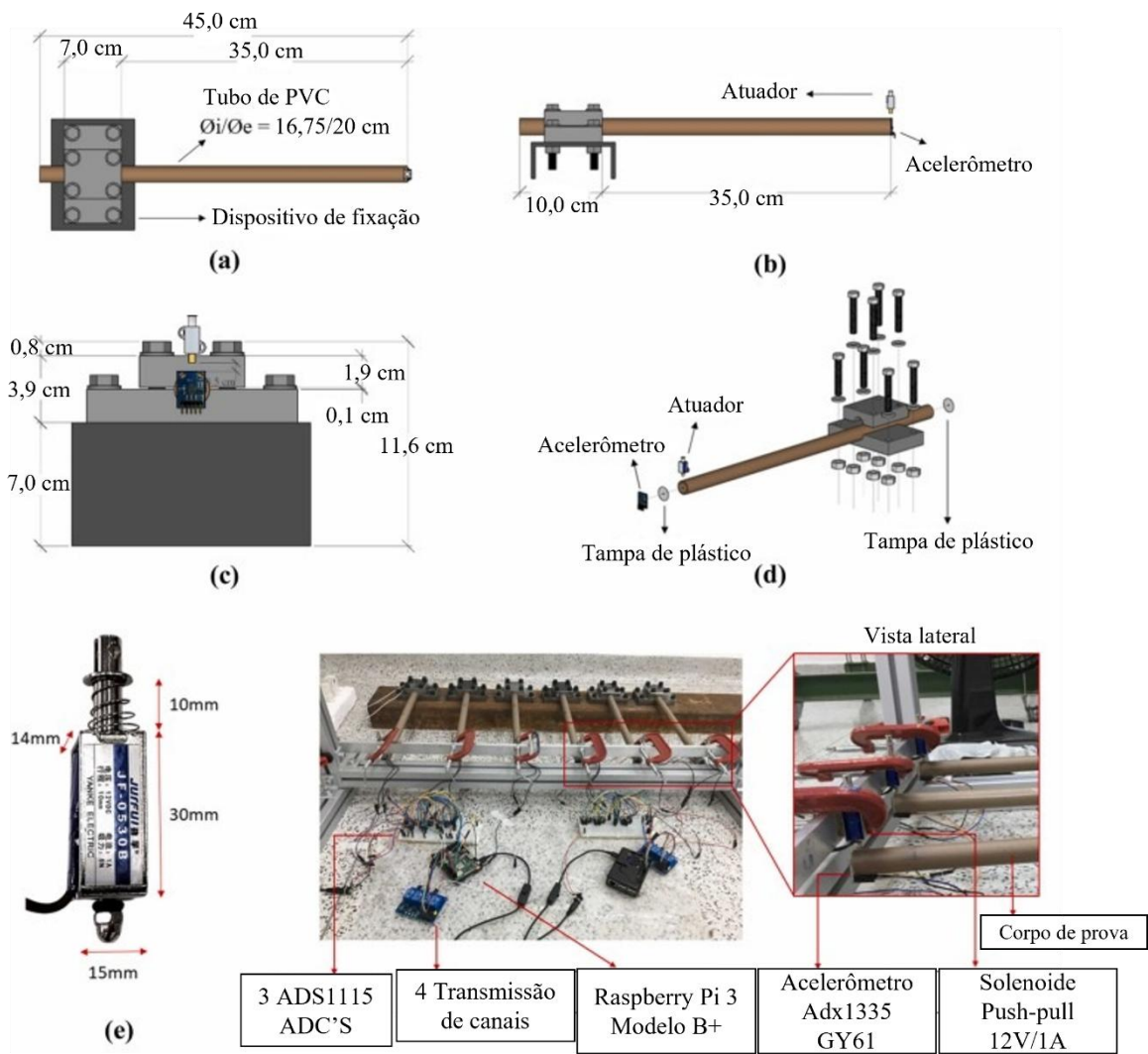
3.3.1.3.2 EMM-IRM

O método de ensaio denominado EMM-IRM, proposto por Araghi *et al.* (2024), foi realizado para monitorar a evolução do módulo de elasticidade até 7 dias de idade, utilizando três corpos de prova por mistura. Este sistema de ensaio tem origem no EMM-ARM (*Elasticity Modulus Measurement through Ambient Response Method*) proposto por Azenha (2009) e otimizado por Granja (2016), que posteriormente foi adaptado a um sistema de teste baseado em microcontrolador de baixo custo por Ribeiro *et al.* (2022). O método foi previamente validado por Araghi *et al.* (2024) por meio da comparação com ensaios de compressão cíclica, excitação por impacto tradicional e o método EMM-ARM.

Para a execução do ensaio EMM-IRM utilizaram-se como corpos de prova tubos de PVC com comprimento de 350 mm, diâmetros internos e externo de 16,75 mm e 20 mm, respectivamente,

apoiados na forma de uma viga composta, como mostrado na Figura 3.23. Diferentemente das configurações propostas anteriormente, nesse método a vibração da viga foi induzida por um impulso de um atuador instalado na ponta da viga. Com o atuador na ponta, a vibração controlada em níveis mais altos do que as forças ambientais pôde ser aplicada à viga.

Figura 3.23 – Configuração física utilizada no ensaio de EMM-IRM em pastas cimentícias: (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) vista frontal; (d) vista em 3D; (e) dimensões do atuador; (f) configuração real do ensaio.



Fonte: Adaptado de Araghi *et al.* (2024)

Como descrito por Araghi *et al.* (2024), o hardware escolhido para o sistema EMM-IRM permite a operação de até quatro canais em um único sistema unificado, possibilitando a execução dos ensaios de forma totalmente automatizada, com mínima intervenção do usuário. Após o preenchimento das amostras e o correto posicionamento dos tubos no sistema físico, o

equipamento é capaz de excitar as amostras, coletar os sinais de aceleração, processar os dados e fornecer, em tempo real, os valores do módulo de elasticidade do material cimentício.

A etapa inicial do procedimento experimental envolveu a preparação dos componentes do sistema físico, incluindo tubos de PVC cortados no comprimento adequado, tampas plásticas, adesivos e fita para a vedação das extremidades e para a fixação do acelerômetro ao tubo. Inicialmente, foram medidos o comprimento total dos tubos e a massa concentrada na extremidade livre do feixe, correspondente à soma das massas da tampa plástica, fita dupla-face, adesivo, acelerômetro e parte dos cabos conectados. Após essas medições, a tampa e o conjunto do acelerômetro foram fixados e selados em uma das extremidades do tubo.

Em seguida, as pastas cimentícias foram preparadas, sendo registrado o instante em que a água entrou em contato com o cimento, definido como tempo inicial do ensaio. Todas as medições do módulo de elasticidade realizadas ao longo do teste foram referenciadas a esse instante. Posteriormente, o tubo foi preenchido com a pasta de cimento utilizando um funil, em três camadas sucessiva. Para garantir o adequado preenchimento do tubo e minimizar a presença de vazios, aplicou-se vibração manual ao longo de todo o comprimento do tubo por aproximadamente 1 minuto, por meio de leves batidas laterais com uma espátula, conforme recomendado por Araghi *et al.* (2024). Essa vibração foi realizada de forma controlada, com o objetivo exclusivo de eliminar bolhas de ar aprisionadas, evitando segregação ou exsudação da pasta, especialmente em função de sua consistência nas idades iniciais.

Após o preenchimento, a extremidade oposta do tubo foi selada com tampa plástica e fita adesiva, assegurando a estanqueidade do sistema. Em seguida, o conjunto foi pesado e, ao se subtrair a massa dos componentes previamente fixados nas extremidades, determinou-se a massa efetiva da pasta no interior do tubo. Por fim, o tubo foi posicionado no local apropriado do sistema físico e os cabos do acelerômetro foram conectados ao equipamento. Para cada traço avaliado, foram moldados três tubos, permitindo a verificação da repetibilidade das medições ao longo do monitoramento das propriedades mecânicas nas idades iniciais.

O *software* foi utilizado para aquisição, processamento e armazenamento dos dados experimentais, permitindo o cálculo do módulo de elasticidade equivalente do material ao longo do tempo de ensaio. Após a execução das medições, o sistema gerava automaticamente um arquivo contendo os valores do módulo de elasticidade associados aos respectivos instantes de medição.

Para descrever a evolução temporal do módulo de elasticidade, $E(t)$, o software realiza um ajuste por regressão não linear dos dados experimentais utilizando o modelo empírico apresentado na Equação 3, conforme proposto por Araghi *et al.* (2024):

$$E(t) = a_1 x e^{-(\frac{\tau_1}{t})^{\beta_1}} + a_2 x e^{-(\frac{\tau_2}{t})^{\beta_2}} \quad (3)$$

em que a_1 e a_2 representam os valores assintóticos aparentes correspondentes a cada componente do modelo, enquanto τ_1 , τ_2 , β_1 e β_2 controlam a interceptação inicial e a curvatura da curva de evolução do módulo de elasticidade quando representada em escala logarítmica.

Durante a execução do ensaio, o sistema de aquisição realizava automaticamente sessões de amostragem a cada 10 minutos, com duração de 5 segundos cada, mantendo essa frequência por um período contínuo de 7 dias. Ao final de cada sessão, os sinais registrados eram processados para obtenção do módulo de elasticidade correspondente ao intervalo de medição, sendo posteriormente utilizados no ajuste da curva $E(t)$ ao longo do tempo. O uso desse modelo permite uma representação contínua e suavizada do desenvolvimento do módulo de elasticidade, facilitando a análise da evolução da rigidez do material nas idades iniciais e a comparação entre diferentes misturas cimentícias, conforme discutido em Araghi *et al.* (2024).

3.3.1.3.3 Método de frequência ressonante

O método de frequência ressonante foi utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico das pastas de cimento, em conformidade com a ASTM C215 (2022). O ensaio consistiu na excitação do corpo de prova cilíndrico por meio da aplicação de um impacto mecânico e no registro da resposta vibracional utilizando um sensor acoplado ao sistema Sonelastic, produzido pela ATCP Engenharia Física (Otani *et al.*, 2014). A partir da identificação da frequência fundamental de vibração, em conjunto com as dimensões geométricas e a massa das amostras, o equipamento calcula o módulo dinâmico de elasticidade. Os ensaios foram realizados nas idades de 1, 3 e 7 dias. Para isso, após a produção das pastas de cimento, foram moldados três corpos de prova para cada mistura em moldes de PVC, com diâmetros entre 16 e 17 mm e alturas entre 70 e 75 mm, seguindo as recomendações da ASTM C215 (2022). Após a desmoldagem, os corpos de prova foram envolvidos em filme plástico a fim de evitar a perda de umidade, e mantidos em ambiente com temperatura controlada até o momento do ensaio. Antes de cada medição, as amostras foram medidas e pesadas, conforme exigido pelo método. Para garantir estabilidade e precisão durante os ensaios, foi utilizado um

suporte específico para pequenas amostras de pastas de cimento, conforme apresentado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Sistema de ensaio Sonelastic utilizado para amostras de pastas cimentícias.



Este procedimento foi empregado de forma complementar ao EMM-IRM, com o objetivo de validar os resultados obtidos e permitir uma análise comparativa da evolução da rigidez das diferentes misturas ao longo do tempo. Abordagem semelhante foi adotada por Araghi *et al.* (2024), que utilizaram o método de frequência ressonante em conjunto com técnicas não destrutivas de monitoramento dinâmico para acompanhar o desenvolvimento do módulo de elasticidade em pastas de cimento.

Os resultados do ensaio de frequência ressonante, originalmente em termos de módulo de elasticidade dinâmico, foram convertidos para valores estáticos utilizando-se a Equação 4 sugerida por Neville (2012):

$$E_{\text{estático}} = 0,83 \times E_{\text{dinâmico}} \quad (4)$$

em que os valores de módulo de elasticidade estático e dinâmico possuem a mesma unidade.

3.3.1.4 Ensaios de microanálises

Com o objetivo de avaliar as mudanças microestruturais provocadas pela utilização dos mitigadores de retração comerciais e dos resíduos de mármore tratados termicamente nos

materiais cimentícios, foram executados os ensaios de microanálises apresentados na Tabela 3.14 a seguir.

Tabela 3.14 – Ensaios de microanálises para a avaliação das propriedades microestruturais.

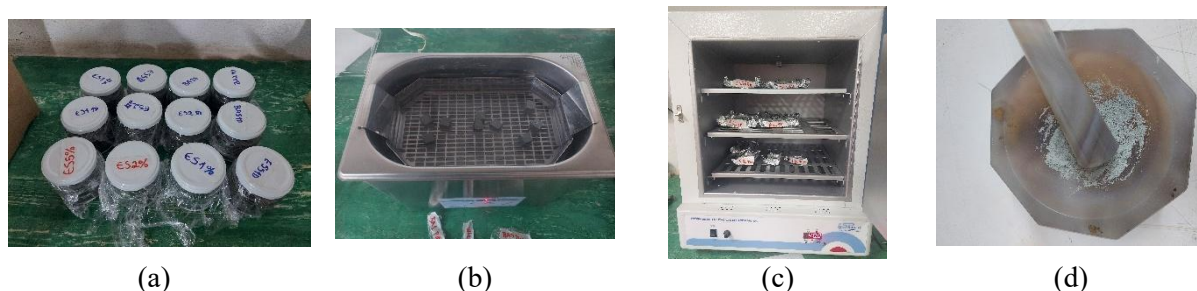
Ensaio	Idade do ensaio	Objetivo de ensaio	Local do ensaio
Difração de raio X (DRX)	1, 3, 7 e 28 dias	Analisar qualitativamente a evolução das fases cristalinas durante a hidratação	IG/UnB
Análise termogravimétrica (TG/DTG)	1, 3, 7 e 28 dias	Acompanhar o processo de hidratação por meio do cálculo do teor de hidróxido de cálcio (CH)	CAIQ/UnB
Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	28 dias	Caracterizar a porosidade e avaliar a distribuição do tamanho dos poros	IFSC/USP

Para a realização dos ensaios foram preparadas as pastas de cimento correspondentes aos traços selecionados na dosagem, seguindo os mesmos procedimentos e parâmetros adotados na determinação dos teores do estudo. Após a produção das pastas cimentícias, as amostras foram colocadas em câmara úmida por 24 horas, com a superfície protegida, a fim de evitar alterações na relação água/cimento. Finalizado esse período, foram submetidas à cura submersa em água saturada com cal até a idade prevista para a realização da paralisação da hidratação.

Ao atingir as idades previstas para a realização de cada microanálise, os corpos de prova foram reduzidos de tamanho com o objetivo de obter fragmentos representativos e minimizar a indução de fissuras adicionais. Inicialmente, os corpos de prova foram rompidos de forma controlada. Em seguida, os fragmentos obtidos foram subdivididos manualmente com o auxílio de uma espátula metálica e golpes leves de marreta, permitindo a obtenção de amostras de dimensões adequadas para as microanálises, sem a aplicação de processos de corte ou moagem que pudessem alterar a microestrutura do material. Em seguida, foi realizada a paralisação da hidratação das pastas cimentícias, utilizando os fragmentos da parte interna das amostras, conforme o procedimento descrito por Scrivener *et al.* (2016) para cada tipo de ensaio. O procedimento consistiu na imersão dos fragmentos em isopropanol e secagem em estufa à $\pm 40^{\circ}\text{C}$, ambos por 24 horas. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em um recipiente contendo sílica gel e cal soldada, com objetivo de manter a amostra seca e evitar a carbonatação, respectivamente, garantindo condições ideais até o dia de realização dos ensaios de microanálises. O processo de paralisação da hidratação das pastas cimentícias, bem como a

obtenção das amostras em pó destinadas aos ensaios subsequentes, é descrito a seguir na Figura 3.25.

Figura 3.25 – (a) Fragmentos de pastas em isopropanol; (b) Fragmentos de pastas em processo de limpeza por ultrassom; (c) Fragmentos de pastas antes da secagem em estufa; (d) Material em pó após moagem.



3.3.1.4.1 Difração de raios X (DRX)

Para a realização dos ensaios de DRX, utilizaram-se os mesmos equipamentos e parâmetros descritos anteriormente, sendo que as amostras foram moídas com auxílio de um almofariz de ágata, para a diminuição da granulometria, até todo o material passar pela peneira 200 (abertura de 0,075 mm). As análises dos resultados tiveram dois objetivos distintos: (i) a identificação qualitativa das fases cristalinas presentes nas pastas cimentícias e (ii) a estimativa do índice de cristalinidade (CrI) como parâmetro semiquantitativo associado à proporção relativa entre as frações cristalina e amorfa do material.

A identificação das fases cristalinas foi realizada a partir da análise dos picos difratados, utilizando o software JADE 3.0 em conjunto com o banco de dados *Powder Diffraction File* (PDF) do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), permitindo a atribuição das principais fases cristalinas presentes nas amostras.

O índice de cristalinidade (CrI) foi determinado com base na adaptação de metodologias originalmente propostas para materiais celulósicos, como o método clássico de Segal *et al.* (1959), amplamente empregado em estudos de cristalinidade de celulose e biomateriais (Serra *et al.*, 2021; Simplicio *et al.*, 2024). Essas abordagens têm sido progressivamente adaptadas para sistemas cimentícios, considerando as particularidades mineralógicas desses materiais, conforme demonstrado por Thipchai *et al.* (2024), que aplicaram o conceito de CrI diretamente a matrizes à base de cimento. No presente estudo, o cálculo do CrI foi realizado com base na Equação (5), em que I_{am} corresponde à intensidade mínima registrada no intervalo de 2θ entre

29° e 36°, região associada predominantemente à contribuição amorfa do silicato de cálcio hidratado (C–S–H), enquanto I_{101} representa a intensidade máxima do pico cristalino dominante, geralmente atribuído à portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), correspondente à reflexão (101), próxima a $2\theta \approx 34^\circ$. Essa adaptação permite uma avaliação comparativa da evolução da cristalinidade das pastas cimentícias, reconhecendo o caráter relativo do índice obtido.

$$CrI = 100 \times \frac{(I_{101} - I_{am})}{I_{101}} \quad (5)$$

Esse índice expressa o grau relativo de cristalinidade, permitindo avaliar a evolução da formação de fases cristalinas ao longo do processo de hidratação.

3.3.1.4.2 Análise termogravimétrica (TD/DTG)

Da mesma forma que nos ensaios de DRX, para a realização dos ensaios de TG/DTG foram utilizados os mesmos equipamentos e parâmetros previamente descritos na etapa de preparação e caracterização dos materiais. As amostras foram moídas com auxílio de um almofariz de ágata, visando à redução da granulometria, até que todo o material passasse pela peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm).

Para a análise dos resultados, foi considerado o tempo de decomposição, conforme indicado por Scrivener *et al.* (2016) e outros autores. Na literatura, há consenso quanto à ocorrência de quatro principais regiões de perda de massa em pastas cimentícias, ainda que as faixas de temperatura apresentem variações em função do tipo de cimento, da idade de hidratação e da presença de adições minerais ou agentes expansores.

De modo geral, a primeira região está relacionada à perda de água combinada, englobando a desidratação dos produtos de hidratação como o gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), etringita (AFt), monossulfato (AFm) e aluminatos. Essa etapa é comumente observada entre 40 °C e 240 °C, embora estudos reportem faixas mais restritas, como 90-120 °C para o C–S–H e 135–159 °C para a etringita (Zhang *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2025a). A segunda faixa está associada à desidroxilação da brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), que é geralmente identificada entre 270-400 °C, podendo ocorrer picos distintos em torno de 310-400 °C em pastas contendo óxidos de magnésio reativos (Li *et al.*, 2025a, Liu *et al.*, 2024). A terceira região corresponde à desidroxilação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), comumente observada entre 395 °C e 580 °C, faixa também amplamente relatada entre 400–500 °C em diferentes sistemas cimentícios (Shen *et al.*, 2020a; Oliveira *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2025a). Por fim, a quarta faixa, entre

aproximadamente 580 °C e 780 °C, está associada à decomposição dos carbonatos (CaCO_3), com picos endotérmicos geralmente entre 650-750 °C, podendo se estender até 900 °C em materiais parcialmente carbonatados (Oliveira *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2025a).

Com base nas referências da literatura e, sobretudo, na análise detalhada das curvas TG/DTG obtidas neste estudo, as faixas de temperatura adotadas para a interpretação dos resultados foram definidas de forma ajustada ao comportamento térmico experimental das pastas analisadas. Assim, os intervalos considerados foram aproximadamente 40–240 °C, 300–380 °C, 380–480 °C e 520–780 °C, por representarem de maneira mais adequada os eventos de perda de massa e os picos de decomposição efetivamente observados nas curvas TG/DTG. Ressalta-se que as faixas de temperatura adotadas são aproximadas e foram definidas com base na análise conjunta das curvas TG e DTG obtidas neste estudo, considerando os picos experimentais observados. Reconhece-se que pode haver sobreposição parcial entre eventos térmicos, razão pela qual os intervalos foram ajustados de forma a representar adequadamente os fenômenos predominantes em cada região, sem caráter normativo ou absoluto. A partir dos dados obtidos, foi possível identificar, para cada evento térmico, as temperaturas correspondentes ao início e ao fim de cada transformação, por meio da análise dos picos característicos em cada curva de TG/DTG. Com as Equações 6 a 9, os teores da água quimicamente combinada, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e carbonato de cálcio na pasta foram calculados, como sugeridos em Scrivener *et al.* (2016) e Taylor (1997), onde M_C representa a massa residual na temperatura correspondente e M_{total} é a massa total da amostra.

$$\text{Água combinada (\%)} = \frac{(M_{40^\circ\text{C}} - M_{240^\circ\text{C}})}{M_{\text{total}}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{Mg(OH)}_2 (\%) = 3.22 \times \frac{(M_{300^\circ\text{C}} - M_{380^\circ\text{C}})}{M_{\text{total}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{Ca(OH)}_2 (\%) = 4.11 \times \frac{(M_{380^\circ\text{C}} - M_{480^\circ\text{C}})}{M_{\text{total}}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{CaCO}_3 (\%) = 2.27 \times \frac{(M_{520^\circ\text{C}} - M_{780^\circ\text{C}})}{M_{\text{total}}} \times 100\% \quad (9)$$

3.3.1.4.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Para o ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM), foi utilizada uma amostra com volume aproximado de 1 cm³. A obtenção dessa amostra foi realizada a partir de um fragmento previamente rompido do corpo de prova, o qual foi posteriormente reduzido de forma

controlada utilizando uma lixadeira/politriz metalográfica de bancada. A redução dimensional foi efetuada com o uso de lixa abrasiva de granulometria nº 60, aplicada de maneira gradual e uniforme, até que a amostra atingisse o volume desejado. Durante todo o processo, foram adotados cuidados rigorosos para evitar a indução de fissuras ou danos à microestrutura, como a aplicação de pressão reduzida, controle do tempo de lixamento e inspeção visual contínua da amostra. Esse procedimento visou garantir a integridade da rede porosa do material, condição essencial para a confiabilidade dos resultados obtidos por PIM. O equipamento utilizado para a realização do ensaio de PIM foi o Micromeritics Poresizer, modelo 9320. No ensaio, o mercúrio foi intrudido nas amostras de forma contínua, considerando-se um ângulo de contato de 130° , tensão superficial do mercúrio de $4,85 \times 10^{-1}$ N/m, densidade de 13,5389 g/mL e incremento de pressão de 0,004 a 323 MPa.

Para a análise dos resultados de PIM, considerou-se a classificação funcional dos poros com base no seu diâmetro médio equivalente. De acordo com Guo *et al.* (2025), os poros em materiais cimentícios podem ser agrupados em quatro faixas principais: poros de gel ($d < 10$ nm), poros capilares médios ($10 \text{ nm} < d < 50 \text{ nm}$), poros capilares grandes ($50 \text{ nm} < d < 10.000 \text{ nm}$) e vazios de ar ($d > 10.000 \text{ nm}$). Essa categorização permite correlacionar a distribuição de poros com as propriedades microestruturais e de durabilidade das pastas, auxiliando na interpretação do efeito das adições sobre a densificação e a conectividade da rede porosa.

3.3.2 Concretos convencionais

Para completar o estudo de dosagem dos materiais cimentícios, a partir dos traços selecionados, foi realizada a dosagem das misturas de concretos convencionais, conforme o método do ITP/EPUSP de Helene e Terzian (1992), utilizando a relação água/cimento de 0,50. Como recomenda o método, inicialmente foi executado um traço piloto, com o objetivo de determinar o teor de argamassa ideal. Com o teor ideal de argamassa fixo e a consistência em 130 ± 20 mm, foi determinada a composição das demais misturas. A consistência desejada foi atingida por meio da utilização de aditivo superplastificante, sendo necessário subtrair a quantidade de água do aditivo para manter a relação água/cimento exata. A partir dos traços definidos, todos os concretos convencionais foram produzidos seguindo o mesmo procedimento de mistura e as recomendações da ABNT NBR 12655 (2022).

3.3.2.1 Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco

Com o concreto produzido, foram realizados os ensaios de consistência, pelo abatimento do tronco de cone, e de massa específica, seguindo as recomendações normativas da ABNT NBR 16889 (2020) e do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), respectivamente, para investigar as alterações nas propriedades do estado fresco. Os ensaios realizados para a avaliação das propriedades do estado fresco são apresentados na Figura 3.26.

Figura 3.26 – Ensaios de caracterização do estado fresco de concretos convencionais: (a) Consistência; (b) Massa específica.



3.3.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas do concreto

Para a avaliação das propriedades mecânicas, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 x 200 mm, conforme as especificações da ABNT NBR 5738 (2015). A cura dos corpos de prova foi realizada ao ar nas primeiras 24 horas e, após este período, foram desmoldados e colocados na câmara úmida até a data de realização dos ensaios.

As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Para isso, foram utilizados três corpos de provas cilíndricos para cada ensaio. Antes da realização dos ensaios, as superfícies dos corpos de prova foram retificadas para garantir uma distribuição uniforme da carga na área transversal.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado conforme a ABNT NBR 5739 (2018), sendo analisado nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Aos 28 dias, também foram realizados os ensaios

de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, seguindo as recomendações das normas ABNT NBR 7222 (2011) e ABNT NBR 8522-1 (2021), respectivamente.

3.3.3 Estratégia de extrapolação das deformações experimentais em pastas cimentícias para a escala do concreto

A utilização direta de resultados experimentais de retração obtidos em pastas cimentícias para a avaliação do comportamento do concreto apresenta limitações práticas e conceituais. Conforme discutido por Azenha (2009), a retração livre de tensões, isto é, desenvolvida sem qualquer restrição mecânica, representa a grandeza fundamental para a compreensão do fenômeno. No entanto, sua determinação experimental é viável apenas em corpos de prova de dimensões reduzidas, de modo a garantir a uniformidade do potencial hídrico durante o processo de secagem. Em amostras de maior espessura, surgem gradientes de umidade que induzem tensões internas, inviabilizando a medição da retração livre.

Do ponto de vista prático, a obtenção experimental da retração final do concreto também se mostra inviável. Como destacado por Azenha (2009), a secagem completa de um corpo de prova com dimensões típicas de ensaio (por exemplo, 15 cm de espessura) pode demandar vários anos, um intervalo incompatível com o desenvolvimento de estudos experimentais e com a tomada de decisões relacionadas à formulação de misturas. De modo semelhante, a medição local da retração livre no concreto é limitada pelas dimensões mínimas necessárias para garantir condições uniformes de secagem.

Diante dessas restrições, diversos autores buscaram estabelecer relações experimentais que permitissem correlacionar a retração do concreto à retração da pasta correspondente. Bissonnette *et al.* (1999) demonstraram que, para concretos com diferentes relações água/cimento e proporções agregado/pasta, a razão entre a retração final do concreto ($\epsilon_{sh,c,ult}$) e a retração final da pasta ($\epsilon_{sh,p,ult}$) pode ser expressa em função do volume relativo de pasta na mistura, conforme apresentado na Equação (10):

$$\frac{\epsilon_{sh,c,ult}}{\epsilon_{sh,p,ult}} \quad (10)$$

Os resultados indicaram uma tendência aproximadamente linear: quanto menor o volume de pasta no concreto, maior a restrição imposta pelos agregados e, conseqüentemente, menor a retração final do material. Em termos gerais, concretos com volumes de pasta entre 25% e 35% apresentam retrações equivalentes a cerca de 15% a 25% da retração da pasta correspondente.

Resultados consistentes foram observados por Hansen e Almudaiheem (1987), que investigaram experimentalmente o efeito da fração volumétrica de agregados sobre a retração do concreto. Comparando esses dados com os de Bissonnette *et al.* (1999), Miguel (2009) verificou que o efeito da relação água/cimento sobre essa relação relativa é pouco significativo, sendo as tendências obtidas bastante coerentes, apesar das diferenças entre os materiais e procedimentos experimentais empregados.

Com base nesses estudos, Hansen (1987) propôs um modelo fundamentado na teoria da elasticidade e dos compósitos, no qual o concreto é tratado como um material bifásico, composto por uma matriz ativa em retração (produtos de hidratação do cimento) e uma fase particulada não retrátil (agregados e cimento não hidratado). Considerando coeficientes de Poisson de 0,26 para a pasta totalmente hidratada e de 0,12 para os agregados, a formulação simplificada do modelo conduz à Equação (11), que relaciona a retração final do concreto à retração da pasta correspondente:

$$\frac{\varepsilon_{sh,c,ult}}{\varepsilon_{sh,p,ult}} = 0,5 (1 - V_a) \left[\frac{1}{1 - V_a + 0,58 m V_a} + (1 - V_a) + \frac{1,72}{m} V_a \right] \quad (11)$$

em que V_a é o conteúdo relativo de agregados em relação ao volume total do concreto, e m é a razão entre o módulo de elasticidade dos agregados e o da pasta de cimento (valores típicos de m geralmente variam entre 4 e 7).

Com base nessas considerações, foi definida, no presente estudo, uma estratégia experimental para extrapolar os resultados de deformação obtidos em pastas cimentícias para a escala do concreto. Essa estratégia consistiu na medição da retração/expansão em pastas correspondentes aos concretos estudados, conforme a ASTM C1698 (2019), na caracterização do módulo de elasticidade das pastas por meio do método EMM-IRM e na utilização de propriedades mecânicas dos agregados obtidas da literatura. A partir desses dados, a Equação 11 foi aplicada de forma incremental ao longo do tempo, permitindo a obtenção de curvas constitutivas equivalentes de retração/expansão representativas do comportamento esperado do concreto.

Essa abordagem teve como objetivo avaliar a coerência física e a consistência dos dados experimentais quando transpostos para a escala do concreto, fornecendo uma base fundamentada para análises estruturais subsequentes. Caso a equivalência entre pasta e concreto não se mostrasse adequada, estratégias alternativas de representação do fenômeno seriam consideradas, de modo a assegurar uma descrição realista das deformações volumétricas envolvidas.

3.3.4 Análises complementares para validação da estratégia de homogeneização

Com o objetivo de avaliar a adequação da estratégia de homogeneização adotada para a extrapolação das deformações observadas em pastas cimentícias para a escala de concreto, foram previstas análises complementares voltadas à verificação da coerência física e da representatividade estrutural das curvas homogeneizadas. Essas análises foram concebidas como etapas adicionais de validação, destinadas a investigar se a metodologia empregada é capaz de reproduzir, de forma consistente, os mecanismos associados ao desenvolvimento de expansão e sua interação com a evolução das propriedades mecânicas do concreto jovem. Para esse fim, foram definidas duas abordagens metodológicas complementares:

- (i) uma análise da relação entre o ganho de rigidez do material e a ocorrência das deformações expansivas ao longo do tempo, com o intuito de examinar a influência do instante relativo entre a evolução do módulo de elasticidade e o desenvolvimento da expansão sobre o potencial de geração de tensões internas no concreto; e
- (ii) a realização de um ensaio experimental de retração autógena em concreto, aplicado ao traço que representasse a condição mais crítica em termos de potencial expansivo, visando comparar o comportamento experimental do concreto com aquele estimado a partir das curvas homogeneizadas obtidas por meio da extrapolação.

Essas análises foram estruturadas de modo a permitir uma avaliação integrada da estratégia de homogeneização, considerando tanto aspectos numéricos quanto experimentais, e a investigar possíveis limitações associadas às hipóteses teóricas adotadas, ao procedimento de extrapolação empregado e à evolução simultânea da rigidez e das deformações no concreto em idades precoces. Dessa forma, buscou-se estabelecer uma base metodológica robusta para a análise crítica da aplicabilidade da homogeneização proposta em estudos de simulação numérica envolvendo agentes expansores não comerciais.

3.3.4.1 Análise da relação entre ganho de rigidez e ocorrência da expansão

Com o objetivo de investigar a influência do instante de ocorrência da expansão em relação à evolução da rigidez do material, foi conduzida uma análise da relação entre a deformação volumétrica e o módulo de elasticidade ao longo do tempo. Essa análise teve como finalidade avaliar se o potencial expansivo observado nas pastas cimentícias ocorre em um estágio em que o material apresenta rigidez suficiente para gerar tensões internas relevantes, ou se a expansão

se desenvolve predominantemente em fases iniciais, caracterizadas por baixa rigidez da matriz. Para essa finalidade, foram consideradas duas escalas de análise:

- (i) a escala de pasta, a partir dos resultados experimentais de deformação e do desenvolvimento do módulo de elasticidade obtidos por meio do ensaio EMM-IRM; e
- (ii) a escala de concreto, utilizando as curvas de deformação extrapoladas por homogeneização e a evolução do módulo de elasticidade empregada nas simulações numéricas.

A análise foi aplicada a misturas representativas do conjunto experimental estudado, abrangendo composições com diferentes comportamentos de deformação nas primeiras idades. A relação entre deformação e rigidez foi avaliada ao longo do tempo, permitindo examinar a simultaneidade ou defasagem entre a ocorrência das deformações expansivas e o ganho de rigidez do material, aspecto considerado determinante para a efetividade da expansão na mitigação de tensões iniciais em estruturas de concreto jovem.

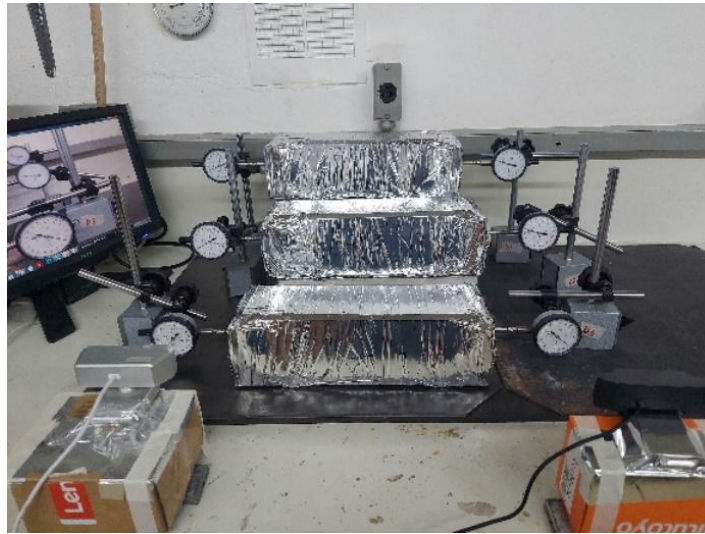
3.3.4.2 Ensaio experimental da retração autógena em concreto

Com o objetivo de verificar experimentalmente a compatibilidade entre a expansão observada em concreto e aquela estimada a partir do procedimento de homogeneização adotado, foi realizado um ensaio de retração autógena em concreto. O procedimento experimental baseou-se na metodologia desenvolvida por Silva (2007). O concreto foi moldado imediatamente após o processo de mistura, em formas metálicas prismáticas com dimensões de 75 mm × 75 mm × 285 mm (largura × altura × comprimento). Para garantir o livre movimento longitudinal da amostra, evitando restrições impostas pelo molde, as superfícies de contato laterais e de fundo foram revestidas com folhas de poliestireno de 3 mm de espessura.

Nas extremidades das faces de 75 mm × 75 mm, foi realizado um furo central para o encaixe dos pinos metálicos de medição, assegurando que o eixo principal dos pinos coincidissem com o eixo longitudinal do corpo de prova. Foram moldados três corpos de prova, e a medição da deformação autógena foi iniciada imediatamente após o tempo de fim de pega da pasta referente, estendendo-se até 7 dias de hidratação. O lançamento do concreto foi realizado em duas camadas, com adensamento manual por meio de haste metálica, tomando-se cuidado para não deslocar os pinos de medição por vibração. Após o adensamento, as amostras foram vedadas com filme plástico e fita adesiva, de modo a impedir a evaporação de água, conforme descrito por Silva (2007), sendo então armazenadas a $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

As medições foram realizadas com relógios comparadores de precisão de 0,001 mm, acoplados aos pinos metálicos nas extremidades dos corpos de prova, de forma que seus eixos principais permanecessem alinhados com o eixo longitudinal da amostra. A aquisição de imagens foi feita por meio de duas webcams conectadas a um notebook, utilizando o *software Yawcam®*, com frequência de registro de 5 minutos nas primeiras 72 horas e de 1 hora até o término de 7 dias (Figura 3.27).

Figura 3.27 – Ensaio de retração autógena para o concreto RMBA5 em andamento.



Ao final do período de monitoramento, o ensaio foi encerrado e os dados foram processados manualmente. A retração autógena, expressa em $\mu\text{m}/\text{m}$, foi calculada conforme a Equação 12:

$$\varepsilon = \frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{G} \quad (12)$$

em que ε é a deformação relativa de comprimento, X_{0a} , X_{0b} é igual a leitura inicial dos relógios comparadores; X_{ia} , X_{ib} é igual a leitura nos relógios comparadores, no tempo i ; e G é a distância entre as extremidades interiores dos pinos metálicos (ajustadas em 22 cm) para o cálculo da deformação autógena livre.

3.4 ANÁLISES NUMÉRICAS

Apesar dos avanços na modelagem termomecânica do concreto em idades iniciais, a maioria dos estudos concentra-se na previsão de tensões induzidas por variações térmicas e retração, sem considerar explicitamente a presença de materiais que induzem expansão controlada, como agentes expansores ou adições com potencial compensatório. Nesses casos, a deformação

volumétrica deixa de ser monotonicamente contrativa, passando a resultar da interação entre retração, expansão e desenvolvimento progressivo da rigidez do material. Essa condição altera significativamente o estado tensional interno, sobretudo em elementos parcialmente restritos, nos quais a sincronia entre expansão e ganho de módulo de elasticidade passa a desempenhar papel determinante no risco de fissuração.

Dessa forma, a simulação numérica proposta neste trabalho não tem como objetivo apenas reproduzir campos térmicos ou retração inicial, mas investigar como a incorporação de materiais mitigadores de retração, avaliados experimentalmente nas etapas anteriores, modifica o equilíbrio entre deformações impostas e capacidade resistente do concreto jovem. A análise busca, portanto, avaliar o impacto da evolução temporal das deformações volumétricas sobre o estado tensional de elementos estruturais restritos, fornecendo uma interpretação mecanicista para os resultados experimentais obtidos.

Diante da possibilidade de ocorrência de danos em estruturas de concreto, identificou-se a necessidade de desenvolver uma análise numérica capaz de avaliar, de forma adequada, o comportamento estrutural de elementos suscetíveis à fissuração nas primeiras idades. De acordo com Klemczak e Knoppik-Wróbel (2015), a fissuração em idades iniciais ainda é frequentemente subestimada em estruturas de concreto, especialmente em elementos cuja liberdade de deformação é limitada frente aos efeitos combinados de variações térmicas e de umidade, resultando na geração de tensões elevadas. Esse tipo de fissuração é comumente associado à contração térmica e à retração de elementos de concreto externamente restritos, como paredes moldadas monoliticamente sobre fundações previamente executadas e já enrijecidas, a exemplo de paredes de reservatórios, encontros de pontes e muros de contenção. Nesses casos, a restrição imposta pela fundação limita a deformação livre do elemento vertical durante o resfriamento e a retração inicial, favorecendo o desenvolvimento de tensões de tração que podem superar a resistência do concreto jovem e levar à formação de fissuras.

Segundo Azenha (2004), a restrição imposta pela fundação à parede, quando esta é concretada após o endurecimento daquela, gera tensões de tração que podem explicar a formação de fissuras verticais (na zona central) e diagonais (próximas aos extremos). O mesmo autor investigou o comportamento do concreto nas primeiras idades a partir de uma metodologia de cálculo baseada no Método dos Elementos Finitos, cuja aplicação em um muro de arrimo foi adotada como referência para a modelagem numérica desenvolvida nesta pesquisa.

A metodologia adotada neste trabalho também foi fundamentada na *COST Action TU1404 — “Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures”*, cujo objetivo foi contribuir para o desenvolvimento de novas recomendações para avaliação da vida útil de materiais e estruturas à base de cimento na Europa, considerando os avanços experimentais e numéricos mais recentes, com foco especial no desempenho do concreto em idades iniciais. No âmbito dessa ação, o artigo “*COST TU1404 benchmark on macroscopic modelling of concrete and concrete structures at early age: Proof-of-concept stage*” (Jędrzejewska *et al.*, 2018) apresentou, na *Task 3: modelling development of thermal stress in shrinkage restraining device*, um ensaio de quadro restrito (*restrained frame*), validado por resultados experimentais publicados e abrangendo a evolução adiabática e real da temperatura, retração, rigidez e tensões restritas, incluindo efeitos da fluência inicial. Esse estudo serviu de base para as abordagens de modelagem adotadas nesta pesquisa.

No presente trabalho, essa abordagem metodológica foi aplicada à análise termomecânica de um muro de arrimo executado em duas fases construtivas: a concretagem da base de fundação e, posteriormente, da parede. O objetivo foi avaliar o comportamento inicial da estrutura, considerando traços de concretos selecionados a partir dos estudos experimentais com pastas cimentícias. As análises permitiram investigar: (i) a influência da sincronia entre expansão e desenvolvimento do módulo de elasticidade e (ii) os efeitos da magnitude da expansão sobre o risco de fissuração em estruturas de concreto nas primeiras idades.

As seções seguintes apresentam, em detalhe, as estratégias de modelagem utilizadas, bem como a geometria, as condições de contorno e as propriedades dos materiais adotados. Além disso, inclui-se uma seção específica dedicada à proposta do estudo numérico.

3.4.1 Estratégias de modelagem

Descrições detalhadas sobre a abordagem adotada e as equações envolvidas na modelagem do desenvolvimento de temperatura e tensões em elementos de concreto nas idades iniciais podem ser encontradas nas referências (Azenha, 2004; Azenha; Faria *et al.*, 2006; Faria, 2008). Essas abordagens consistem em modelos macroscópicos implementados via Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse estudo, utilizou-se o software DIANA FEA 10.5 (Ferreira; Manie, 2022). O fluxo de trabalho no software DIANA FEA iniciou-se com a definição da geometria, seguida da atribuição das propriedades dos materiais e da geração das malhas. A seguir, resume-se os aspectos relevantes do modelo termomecânico adotado.

3.4.1.1 Modelo térmico

O cálculo dos campos de temperatura transiente no concreto foi realizado a partir da Equação 12 de balanço térmico:

$$k \nabla \cdot (\nabla T) + \dot{Q} = \rho c \dot{T} \quad (12)$$

em que T é a temperatura, k é a condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e ρc é o calor específico volumétrico do concreto ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$). O termo $\dot{Q}$ representa a taxa volumétrica de calor interno ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) gerada pela hidratação do cimento, formulada segundo uma lei do tipo Arrhenius (Reinhardt *et al*, 1982), Equação 13:

$$\dot{Q} = A f(\alpha) e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (13)$$

em que A é a constante de taxa ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$), E_a é a energia de ativação ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), α é o grau de hidratação (considerado aqui como a razão entre o calor Q liberado até o tempo t e o calor total Q_{final} liberado ao final da hidratação do cimento), R é a constante universal dos gases ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T é a temperatura, e $f(\alpha)$ descreve a evolução da função normalizada de liberação de calor.

As propriedades térmicas consideradas constantes no tempo, e as condições de contorno associadas foram modeladas por um fluxo de calor q_T ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) expresso pela Equação 14:

$$q_T = h(T_b - T_e) \quad (14)$$

em que q_T é o fluxo de calor por unidade de área, T_b é a temperatura da superfície de contorno, T_e é a temperatura ambiente e h é o coeficiente de transferência por convecção-radiação ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), ajustado conforme a condição de contorno (contato com o ar, fôrmas, solo, etc.).

Após o cálculo da evolução da temperatura $T(\tau)$ em cada ponto da estrutura, é possível determinar também a idade equivalente (t_{eq}), com base na Equação 15 do tipo Arrhenius:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} d\tau \quad (15)$$

em que T_{ref} é a temperatura de referência (20 °C) e $T(\tau)$ corresponde ao histórico de temperatura experimentado pelo concreto durante a hidratação.

As deformações térmicas foram tratadas como deformações volumétricas impostas, calculadas com base na variação de temperatura previamente determinada por meio da Equação 16:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T \mathbf{1} \quad (16)$$

em que α_T é o coeficiente de dilatação térmica do concreto (1/K) e $\mathbf{1}$ é o tensor identidade.

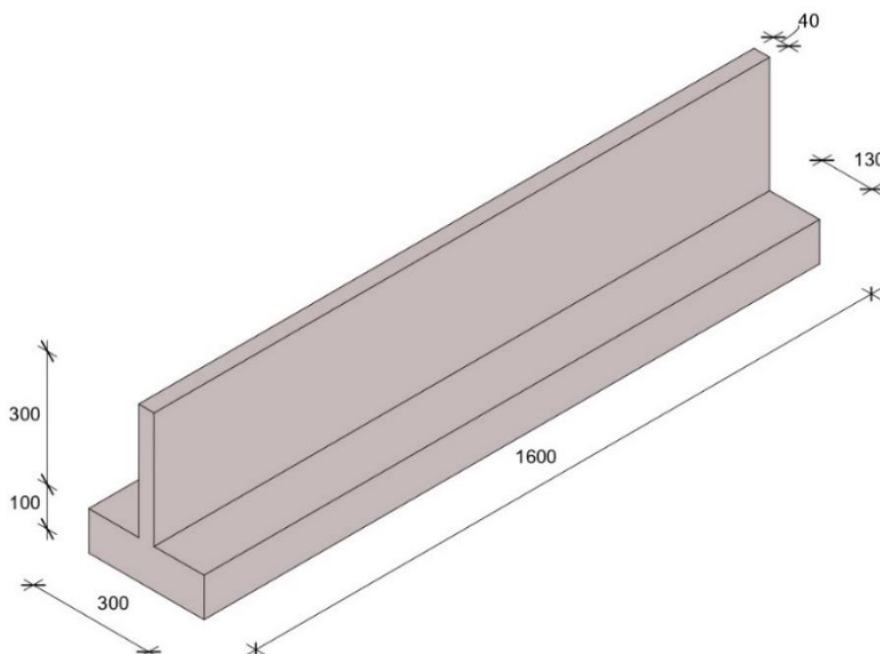
3.4.1.2 Modelo de retração e fluência

No contexto da modelagem numérica do concreto em idades iniciais, as deformações totais podem ser decompostas em diferentes parcelas, a saber: deformação elástica nominal, deformações impostas por retração, fluência básica e fluência por secagem. As deformações por retração, associadas à autodessecação (retração autógena) e à evaporação de água para o ambiente (retração por secagem), podem ser introduzidas no modelo como deformações impostas em cada elemento finito. No presente estudo, considerou-se apenas a retração autógena, relacionada à autodessecação decorrente da hidratação do cimento e à evolução térmica do concreto, sendo representada em função da idade equivalente do material (t_{eq}). Essa simplificação é justificada pelo fato de a base ter sido modelada de forma isolada e de a parede permanecer em fôrmas durante os três primeiros dias, condições sob as quais a retração por secagem pode ser considerada desprezável. O desenvolvimento das tensões foi inicialmente avaliado em regime elástico, considerando apenas a deformação elástica nominal, e posteriormente incorporou-se o efeito da fluência básica por meio de modelos viscoelásticos. A fluência básica do concreto foi representada por cadeias de Kelvin com envelhecimento, ajustadas a partir de funções de conformidade expressas por uma série de Dirichlet (Hardy; Riesz, 2013).

3.4.2 Informações geométricas e malha

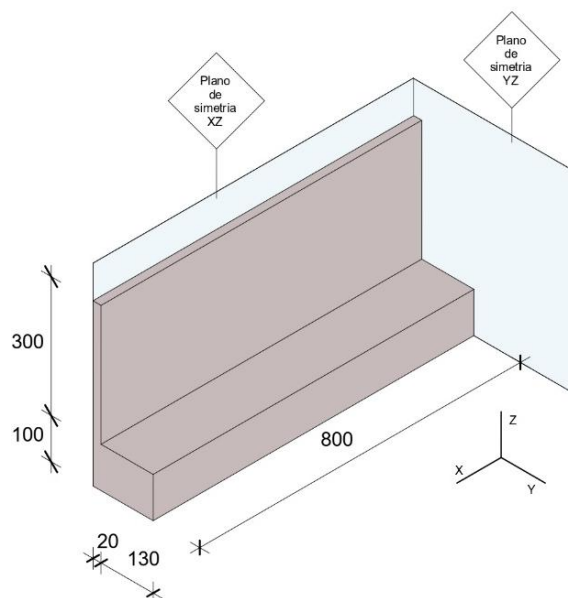
Para a simulação numérica, desenvolveu-se um modelo tridimensional de um muro de arrimo concretado em duas fases: execução da base de fundação e, após 28 dias, moldagem da parede (Figura 3.28). A escolha do muro de arrimo como estrutura de referência baseou-se na configuração proposta por Azenha (2004), que investigou o comportamento de elementos de concreto moldados em fases e sujeitos à restrição imposta por fundações previamente endurecidas. Esse tipo de geometria é amplamente utilizado em estudos de fissuração em idades iniciais por reproduzir uma condição estrutural recorrente em muros, encontros e reservatórios, na qual a parede concretada posteriormente tem sua deformação parcialmente impedida pela base, favorecendo o desenvolvimento de tensões autoimpostas.

Figura 3.28 – Muro de arrimo após 28 dias de concretagem (cm).



As dimensões adotadas foram definidas a partir dessa referência, com pequenas adaptações para atender aos objetivos do presente estudo. A base com 1,00 m de espessura e 1,50 m de largura fornece elevada rigidez e inércia térmica, funcionando como elemento restritor e permitindo o desenvolvimento de gradientes térmicos típicos de concreto massa. Já a parede com 0,20 m de espessura e 3,00 m de altura representa um elemento relativamente esbelto moldado monoliticamente sobre a fundação, condição adequada para avaliar a interação entre retração/expansão e evolução da rigidez. A extensão longitudinal de 8 m (modelada por simetria) foi adotada para reduzir efeitos de borda e permitir a formação de campos de tensão representativos, mantendo o custo computacional em níveis viáveis. Dessa forma, a geometria utilizada não tem como objetivo reproduzir um caso específico de obra, mas representar um cenário estrutural controlado e consagrado na literatura para a análise de tensões em idades iniciais, permitindo a comparação qualitativa com estudos anteriores e a avaliação isolada dos efeitos da expansão induzida pelos materiais investigados. A geometria e os planos de simetria adotados estão apresentados na Figura 3.29.

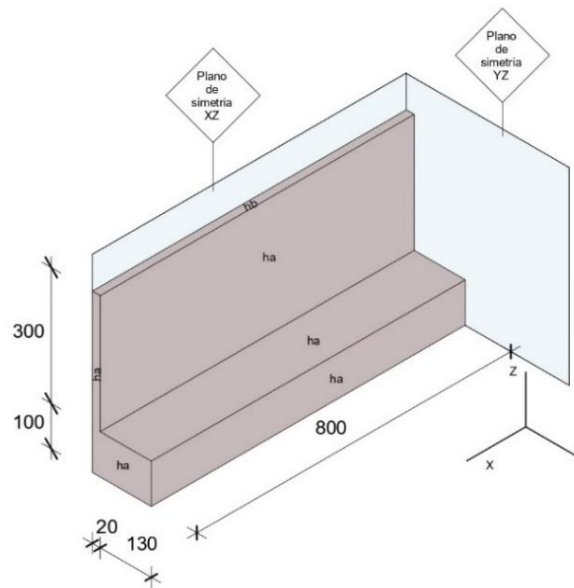
Figura 3.29 – Geometria e planos de simetria adotadas no modelo 3D (cm).



As simulações foram realizadas no DIANA FEA 10.5, em análise faseada com duas etapas construtivas: (i) concretagem da base e (ii) concretagem da parede. O modelo incluiu inicialmente uma análise térmica, destinada a registrar a produção interna de calor decorrente da hidratação do cimento, possibilitando o cálculo da temperatura, da idade equivalente e do grau de hidratação. Em seguida, uma análise mecânica, com o objetivo de determinar as deformações e tensões no concreto ao longo do tempo. Não foi considerado a contribuição da armadura nem a mecânica da fratura, limitando-se ao comportamento elástico-linear do concreto.

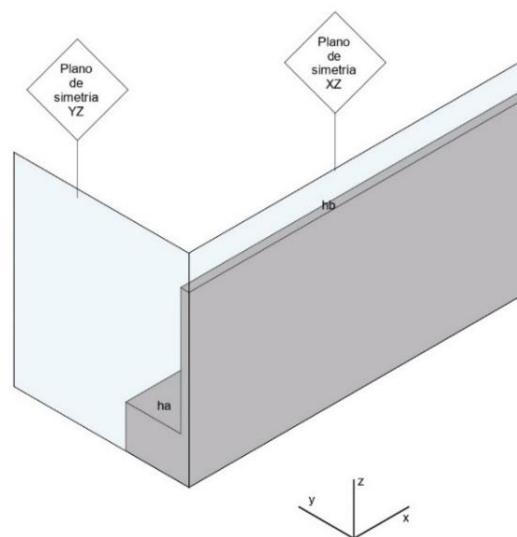
As condições de contorno do modelo térmico consideraram o contato do concreto com o ar, com fôrma interposta nas primeiras 72 horas (faces h_a), exceto no topo da parede (fase h_b), que permaneceu em contato direto com o ar durante toda a análise (Figura 3.30). Para superfícies em contato com as fôrmas, foi adotado um coeficiente de convecção térmica inicial de $h_a = 3,1 \text{ W/K}^2 \cdot \text{m}^2$, valor representativo da condição de menor troca térmica proporcionada pela presença de fôrmas. Após o período de desforma, esse coeficiente foi aumentado para $5 \text{ W/K}^2 \cdot \text{m}^2$, de modo a representar o incremento de dissipação de calor para o ambiente externo. Para as superfícies em contato direto com o ar ambiente, o coeficiente de convecção foi considerado constante e igual a $h_b = 5 \text{ W/K}^2 \cdot \text{m}^2$ ao longo de toda a simulação. Esses valores estão em consonância com aqueles adotados por Azenha (2004) em estudos de modelagem de estruturas de concreto em idades iniciais. A temperatura inicial do concreto e a temperatura ambiente foram mantidas em $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 3.30 – Condições fronteira do modelo térmico adotadas no modelo 3D (cm).



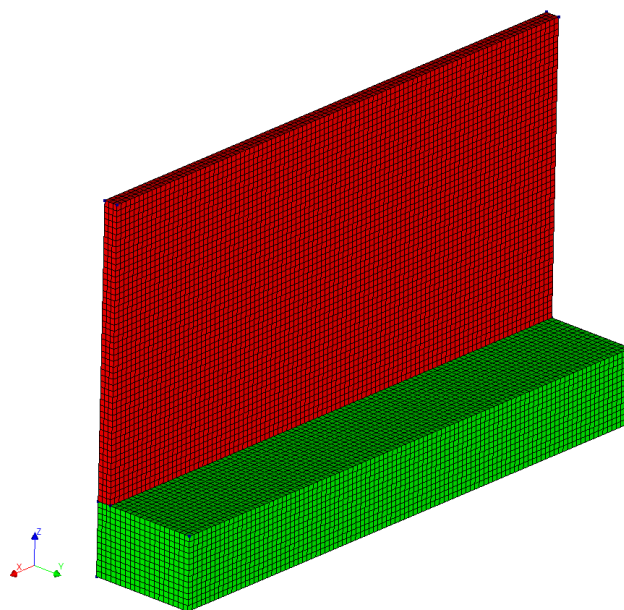
As condições de contorno do modelo mecânico (Figura 3.31), consideraram apoios rígidos nos planos de simetria YZ (restrição na direção X), XZ (restrição na direção Y) e na base (restrição na direção Z). O peso próprio foi aplicado de forma diferida, a partir de um instante em que o concreto já apresentava rigidez suficiente para suportar as tensões iniciais sem o desenvolvimento de deformações excessivas. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de evitar instabilidades numéricas e representar de maneira mais realista a sequência construtiva nas idades iniciais. A interação entre a base e o solo foi modelada por meio de uma interface não linear, permitindo a simulação do levantamento parcial da fundação, quando aplicável, em função da evolução das deformações e das tensões internas.

Figura 3.31 – Condições fronteira do modelo térmico adotadas no modelo 3D.



As propriedades das malhas foram definidas utilizando elementos hexaédricos lineares de 8 nós, com tamanhos desejados de 0,08 m para a base e 0,07 m para a parede. As fronteiras térmicas foram representadas por elementos quadriláteros de 4 nós, e a interface da base foi modelada com elementos quadriláteros de 4+4 nós entre dois planos (Figura 3.32).

Figura 3.32 – Malhas dos elementos finitos adotadas no modelo 3D.



Após a definição das malhas, foi configurada a análise por fases, dividida em etapas construtivas definidas como premissas da pesquisa, com o objetivo de representar, de forma simplificada e controlada, a sequência de execução do muro de arrimo e avaliar a evolução das tensões e deformações ao longo do tempo. Em cada fase, realizou-se uma análise transiente de transferência de calor, seguida de uma análise estrutural não linear. As análises termomecânicas abrangeram um período total de 35 dias (840 horas). Os primeiros 28 dias (672 horas) corresponderam à fase de concretagem da base, com intervalos de tempo de 0,20 h até 32 horas e de 4 h até 640 horas (totalizando 320 etapas). Os 7 dias subsequentes referiram-se à fase de concretagem da parede, executada após os 28 dias da base (672 horas), estendendo-se até 840 horas de idade, com intervalos de 0,20 h até 702 horas e de 1 h até 840 horas (total de 288 etapas). Ao término da análise termodinâmica, os resultados foram avaliados e, quando necessário, ajustaram-se as propriedades e critérios de modelagem, garantindo a consistência dos parâmetros utilizados nas etapas da simulação.

3.4.3 Propriedades dos materiais

Nesta seção são apresentadas as propriedades termomecânicas adotadas na modelagem numérica. Sempre que não especificado em contrário, os parâmetros térmicos e mecânicos do concreto foram extraídos do *benchmark* experimental apresentado por Jędrzejewska *et al.* (2018), amplamente utilizado em estudos de modelagem de concreto em idades iniciais. As adaptações realizadas no presente trabalho referem-se exclusivamente à incorporação das curvas de retração/expansão, obtidas experimentalmente nesta tese, as quais foram introduzidas como deformações impostas no modelo numérico.

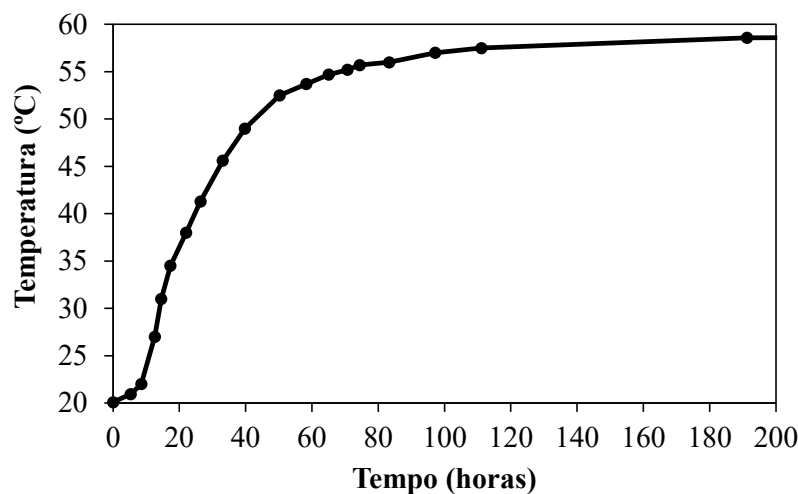
As propriedades térmicas adotadas foram diretamente extraídas de Jędrzejewska *et al.* (2018), que reporta a caracterização termomecânica realizada no iBMB TU Braunschweig por Hermerschmidt (2016), incluindo a evolução da temperatura adiabática e propriedades dependentes da idade equivalente. A caracterização termomecânica do concreto foi realizada no iBMB TU Braunschweig por Hermerschmidt (2016) e incluiu a evolução da temperatura adiabática e propriedades mecânicas ao longo do tempo. As principais propriedades térmicas do concreto estão apresentadas na Tabela 3.15. Além disso, a curva de temperatura adiabática foi inserida diretamente para simular o calor liberado (Figura 3.33).

Tabela 3.15 – Propriedades térmicas do concreto consideradas na análise.

Condutibilidade térmica	2,4 W/(K.m ³)
Calor específico	2500 kJ/(K.m ³)
Energia de ativação aparente	46 (kJ/mol)
Coefficiente de Poisson	0,2
Coefficiente de dilatação térmica	10 x 10 ⁻⁶ (1/K)

Fonte: Jędrzejewska *et al.* (2018).

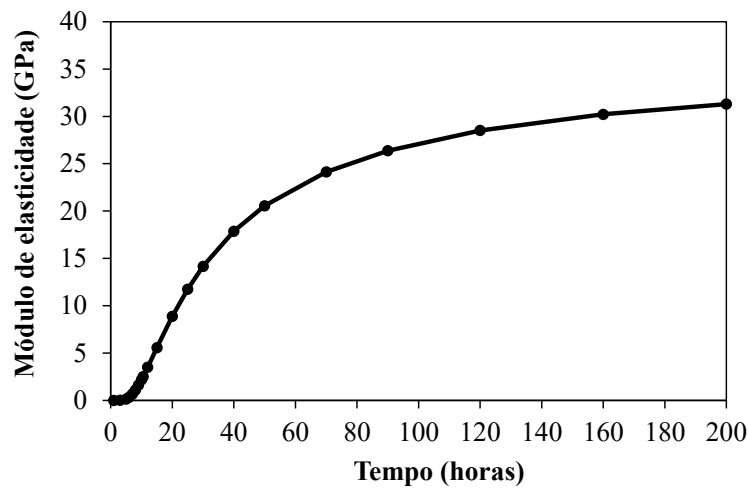
Figura 3.33 – Evolução da temperatura adiabática no concreto.



Fonte: Jędrzejewska *et al.* (2018).

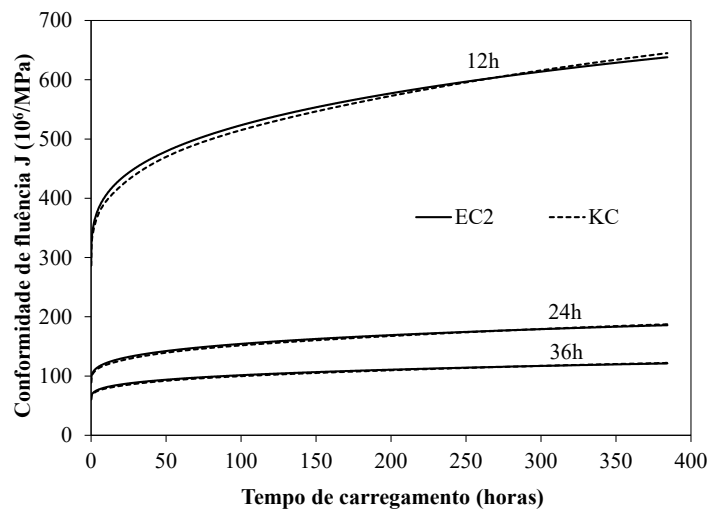
A evolução do módulo de elasticidade e o comportamento viscoelástico também foram adotados a partir do modelo de referência apresentado por Jędrzejewska *et al.* (2018), no qual a fluência básica foi representada com base na formulação do Eurocódigo 2 (2004). O comportamento viscoelástico do concreto foi representado com base na formulação de fluência básica do Eurocódigo 2 (2004), conforme descrito na literatura. A partir dos parâmetros definidos no estudo de referência, umidade relativa de 60%, tamanho nominal de 0,125 mm, classe de concreto C50, seção transversal de 625 cm², agregados quartzitos, cimento tipo 42,5N e temperatura de 20 °C, foram consideradas curvas de conformidade de fluência para diferentes idades de carregamento (4,8; 7,2; 9,6; 12; 16,8; 20,4; 24; 36; 48; 72; 120; 240; 360; 480; 600; 720 e 2400 horas), conforme apresentadas no referido trabalho. As funções de conformidade obtidas segundo o modelo do Eurocódigo 2 foram ajustadas, no estudo original, a uma cadeia de Kelvin envelhecida composta por 8 termos, com tempos de retardo de 10¹, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶, 10⁷ e 10⁸ segundos. Exemplos desses ajustes são apresentados na Figura 3.35.

Figura 3.34 – Evolução do módulo de elasticidade.



Fonte: Jędrzejewska *et al.* (2018)

Figura 3.35 – Função de conformidade de fluência para cargas em 14, 24 e 36h.



Fonte: Jędrzejewska *et al.* (2018)

Na modelagem numérica, a retração foi introduzida como uma deformação imposta dependente do tempo, associada à idade equivalente do concreto. Para esse fim, utilizaram-se curvas constitutivas de retração/expansão representativas de cada mistura, derivadas dos resultados experimentais obtidos nesta tese em pastas cimentícias equivalentes aos traços estudados.

A extrapolação das deformações da escala de pasta para a escala de concreto foi realizada com base em relações consagradas na literatura, que correlacionam a retração do concreto à retração

da pasta em função do volume relativo de agregados e da razão entre os módulos de elasticidade dos constituintes. O procedimento experimental e a fundamentação teórica dessa abordagem são apresentados detalhadamente no capítulo experimental.

No contexto da simulação, as curvas de retração equivalentes do concreto foram inseridas de forma incremental ao longo do tempo como deformações livres de tensões, aplicadas uniformemente aos elementos finitos correspondentes ao material cimentício. Essa estratégia permitiu incorporar diretamente os resultados experimentais ao modelo termomecânico, assegurando coerência entre a caracterização experimental e os parâmetros utilizados na análise numérica.

3.4.4 Estudo paramétrico

Com o objetivo de aprofundar a compreensão do comportamento de concretos contendo agentes expansores nas primeiras idades, foi desenvolvido um estudo paramétrico voltado à análise da influência da expansão e de sua relação temporal com o desenvolvimento da rigidez sobre o estado de tensões do concreto. O estudo foi concebido de forma controlada, permitindo avaliar isoladamente o efeito da sincronia entre a ocorrência da expansão e a evolução do módulo de elasticidade no comportamento estrutural.

A definição dos parâmetros investigados baseou-se na síntese sistematizada da literatura apresentada na Tabela 2.1, na qual foram reunidos resultados experimentais de estudos envolvendo agentes expansores com características químicas semelhantes às dos materiais analisados nesta tese. A partir dessa compilação, foram identificadas as faixas típicas de expansão, os intervalos temporais de ocorrência das deformações máximas e as condições experimentais mais recorrentes.

Com base nessas informações, foram definidos os cenários paramétricos adotados nas simulações numéricas, considerando diferentes magnitudes de expansão e distintas relações temporais entre a ocorrência da expansão e o desenvolvimento da rigidez do concreto. Essa abordagem permitiu avaliar de forma isolada o impacto desses parâmetros no estado de tensões e no risco de fissuração nas primeiras idades, garantindo coerência entre os dados experimentais da literatura e as hipóteses adotadas na modelagem.

A partir da Tabela 2.1, observa-se que os estudos reportados na literatura apresentam ampla variação nos tipos e teores de agentes expansores empregados, bem como nas metodologias

experimentais e faixas de deformação obtidas. A maioria dos expansores apresenta composições ricas em óxidos de cálcio e enxofre (CaO e SO_3), geralmente associados a fases de anidrita e aluminato cálcico, características de agentes do tipo CSA ou mistos (CaO-MgO). Em termos de dosagem, os teores variam predominantemente entre 3 e 12 %, situando-se na faixa em que a expansão inicial é suficiente para compensar parcialmente a retração autógena sem provocar instabilidade volumétrica.

As metodologias mais empregadas baseiam-se no método do tubo corrugado e em moldes de PVC, que permitem o confinamento da amostra e o monitoramento contínuo da deformação desde o tempo de pega. De modo geral, o início das medições ocorre entre o tempo de início e o fim de pega, e as expansões máximas são registradas nas primeiras 24 a 48 horas, com magnitudes típicas entre +100 e +920 $\mu\text{m/m}$, dependendo da composição e do teor do agente expensor. Em idades posteriores, as curvas tendem à estabilização, apresentando deformações finais positivas ou ligeiramente negativas, o que indica compensação parcial da retração por secagem.

Esses resultados indicam que o comportamento expansivo é altamente dependente da composição química e da cinética de hidratação do agente, além das condições de restrição e da relação a/aglomerante adotada. As informações compiladas nessa tabela forneceram subsídios para a definição dos parâmetros do estudo paramétrico subsequente, especialmente quanto à faixa de expansão esperada e à influência da rigidez e do volume de pasta sobre a eficácia do agente expensor.

3.4.4.1 Descrição do estudo paramétrico

Com o objetivo de investigar, de forma controlada, a influência da relação temporal entre a expansão autógena e o desenvolvimento do módulo de elasticidade sobre o comportamento tensional do concreto nas primeiras idades, foi definido um estudo paramétrico a ser incorporado às análises numéricas desta pesquisa.

A concepção desse estudo baseou-se em evidências reportadas na literatura técnica, que indicam que a eficácia de agentes expansores não depende exclusivamente da magnitude da deformação desenvolvida, mas também do instante em que essa expansão ocorre em relação à evolução da rigidez do material. Dessa forma, o estudo paramétrico foi estruturado para avaliar diferentes cenários hipotéticos, nos quais a expansão autógena ocorre em instantes distintos ao longo do processo de endurecimento do concreto.

Como referência para a forma da curva expansiva, adotou-se uma das curvas de deformação em concreto consideradas nesta pesquisa, representativa de materiais contendo agentes expansores à base de óxidos de cálcio e magnésio, cuja ordem de grandeza e evolução temporal são compatíveis com as faixas comumente reportadas na literatura. Essa curva foi utilizada exclusivamente como referência geométrica para a geração dos cenários paramétricos, sem pressupor, neste estágio metodológico, qualquer desempenho superior, comportamento específico ou resultado experimental associado à mistura de origem.

A evolução temporal do módulo de elasticidade foi mantida constante em todos os cenários analisados, sendo definida de acordo com a metodologia adotada para a modelagem numérica termomecânica. Essa escolha permite isolar o efeito da variação temporal da expansão, eliminando interferências associadas a alterações simultâneas nas propriedades mecânicas do material.

A estratégia paramétrica consistiu em modificar o instante relativo de ocorrência da expansão máxima, por meio do deslocamento temporal da curva de deformação de referência, de modo a simular diferentes cenários possíveis de cinética expansiva. Essa abordagem é compatível com a variabilidade observada na literatura, que aponta que o pico de expansão de agentes expansores pode ocorrer em diferentes idades, dependendo da composição química do material e das condições de hidratação.

Foram definidos quatro cenários paramétricos principais, correspondentes a diferentes instantes de ocorrência da expansão máxima, selecionados com base nas faixas temporais comumente reportadas em estudos experimentais. Além desses, foi incluído um cenário adicional de referência, representado por uma curva idealizada sem retração ou expansão, correspondente a um concreto sem qualquer adição expansiva, utilizado como base de comparação. As curvas paramétricas construídas foram posteriormente incorporadas ao modelo numérico termomecânico, possibilitando a avaliação sistemática do impacto do instante de ocorrência da expansão sobre o desenvolvimento de tensões e sobre a propensão à fissuração em estruturas de concreto jovem. A análise dos efeitos associados a cada cenário é apresentada e discutida no capítulo de resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados das etapas desenvolvidas neste estudo, abrangendo os ensaios em materiais cimentícios, a análise numérica e, por fim, um resumo dos principais resultados.

4.1 ENSAIOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A dosagem dos materiais cimentícios foi realizada para as pastas de cimentos contendo agente expensor comercial (AE), aditivo redutor de retração (ARR) e resíduos de mármore tratados termicamente, provenientes do estado da Bahia (BA) e do Espírito Santo (ES). Nos itens seguintes, são apresentados os resultados obtidos para esses materiais.

4.1.1 Pastas cimentícias

4.1.1.1 Avaliação das propriedades do estado fresco

A determinação da consistência das pastas cimentícias foi realizada a partir do ensaio de mini slump, em que foi verificado se o espalhamento era correspondente a 90 ± 20 mm. Na Tabela 4.1, para cada pasta avaliada, está apresentado os resultados de consistência e os tempos de pega.

Tabela 4.1 – Resultados de ensaios das propriedades do estado fresco das pastas de cimento avaliadas.

Pasta de cimento	Consistência (mm)	Tempo de pega (hora:minuto)	
		Inicial	Final
REF	90,65	6:15	7:15
AE2	91,83	6:45	8:15
ARR2	91,84	7:45	9:30
RMBA1	88,69	6:10	7:50
RMBA2	82,14	6:15	7:35
RMBA5	73,02	5:20	6:35
RMES1	84,99	5:20	6:50
RMES2	80,20	5:30	6:50
RMES5	71,78	5:15	6:25

Conforme observado nos resultados apresentados na Tabela 4.1, todas as pastas apresentaram consistência dentro do limite de espalhamento estabelecido como premissa de pesquisa (90 ± 20 mm). Além disso, foi identificada uma tendência para os traços que continham resíduos de mármore, na qual o aumento do teor de adição promoveu redução progressiva do espalhamento das pastas de cimento, aproximando-se do limite inferior da faixa especificada no nível de substituição de 5%. Esse comportamento está associado não apenas à finura do resíduo de

mármore tratado termicamente, conforme mostrado na Figura 3.15, mas também às características morfológicas nas partículas, como o índice de forma das partículas, que influenciam a mobilidade da mistura e demanda de água. Observa-se, inclusive, que o resíduo do Espírito Santo, embora apresente granulometria menos fina que o da Bahia, resultou em menores valores de consistência, indicando que fatores adicionais, como reatividade e cinética de hidratação, também desempenham papel relevante. Entretanto, como uma das premissas deste estudo foi evitar o uso de superplastificantes e manter a relação água/cimento constante ($a/c = 0,5$), e considerando que todos os resultados permaneceram dentro da faixa aceitável de consistência, o desempenho obtido pode ser considerado satisfatório para este parâmetro.

Em comparação com agentes expansores convencionais, como à base de óxidos de cálcio ou aluminatos, o resíduo de mármore tratado termicamente apresentou um efeito relativamente moderado sobre a consistência, especialmente considerando sua granulometria fina. Esse comportamento está associado ao baixo teor de adição do resíduo adotado e às características das partículas do resíduo. Nos traços avaliados neste estudo, não foram necessários ajustes adicionais no teor de água ou no consumo de aditivo superplastificante para manter a trabalhabilidade, indicando que o resíduo testado provocou apenas pequenas alterações na consistência, o que representa uma vantagem prática do ponto de vista reológico.

A análise dos tempos de pega em relação à pasta de referência revelou uma tendência de comportamento nas misturas modificadas avaliadas neste estudo. A incorporação tanto do agente expensor comercial (AE) quanto do aditivo redutor de retração (ARR) promoveu o retardo dos tempos de início e fim de pega, sendo o atraso mais pronunciado no caso do ARR, em consonância com o comportamento reportado na literatura para esses aditivos (Yuan *et al.*, 2018; Zhan; He, 2019; Zhang *et al.*, 2022). Por outro lado, a adição do resíduo de mármore tratado termicamente apresentou efeitos distintos conforme o tipo e o teor empregado.

Para o resíduo de mármore da Bahia (RMBA), observou-se um ligeiro aumento do tempo de fim de pega nos teores de 1% e 2%, ensaiados sob as mesmas condições ambientais, enquanto, no teor de 5%, ambos os tempos diminuíram. Esse comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de CaO reativo associada à elevada finura do resíduo, que atua não apenas acelerando as reações de hidratação, mas também fornecendo pontos adicionais de nucleação para a formação dos produtos hidratados. Já o resíduo de mármore do Espírito Santo (RMES) promoveu a redução dos tempos de início e fim de pega em todas as proporções avaliadas, efeito que pode estar relacionado à combinação entre o maior teor de MgO reativo e a elevada

finura do material, favorecendo tanto a cinética de hidratação quanto o aumento dos sítios de nucleação, mesmo considerando a hidratação mais lenta do MgO em comparação ao CaO.

Resultados com tendência semelhante foram relatados por Rashad et al. (2025) em sistemas de escória ativada alcalinamente contendo resíduo de mármore calcinado, nos quais baixas dosagens do resíduo promoveram ligeiro aumento dos tempos de pega, enquanto maiores teores de resíduo aceleraram as reações de hidratação, resultando na redução desses tempos. Esses resultados reforçam que o comportamento observado nesta pesquisa está associado à reatividade das fases óxidas formadas durante a calcinação, em conjunto com a elevada finura e a morfologia das partículas do resíduo, que influenciam tanto a cinética das reações quanto a disponibilidade de sítios de nucleação. Assim, o efeito observado depende simultaneamente da dosagem, da composição mineralógica e das características físicas do resíduo incorporado.

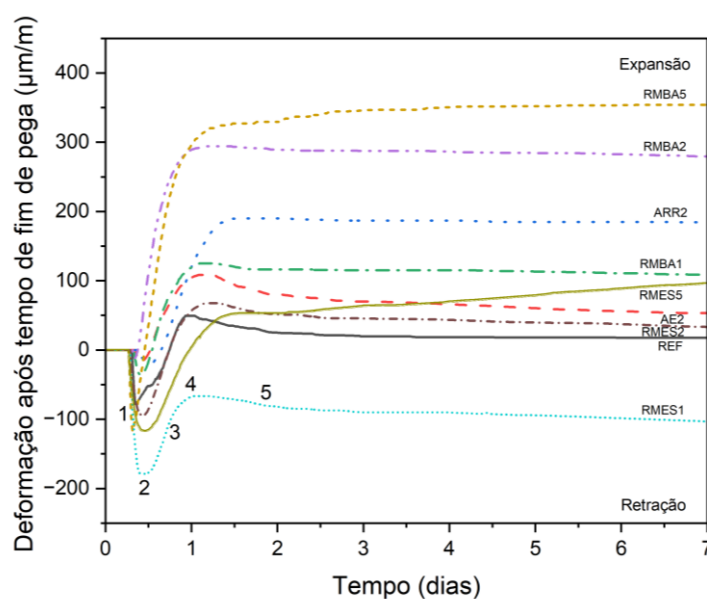
Em comparação com os aditivos expansores comerciais, especialmente os à base de sulfoaluminato de cálcio, que tendem a acelerar significativamente o início de pega em função da rápida formação de etringita, o resíduo de mármore tratado demonstrou um comportamento mais equilibrado, permitindo maior controle sobre o tempo de aplicação do cimento sem comprometer a trabalhabilidade ou demandar o uso de retardadores, conforme amplamente reportado na literatura para agentes expansores do tipo CSA (Tao *et al.*, 2024). Essa característica representa uma vantagem prática relevante, sobretudo em condições de clima quente, em que o controle do tempo de pega constitui um desafio operacional importante.

4.1.1.2 Avaliação da expansibilidade

Neste estudo, foi realizado experimentalmente o acompanhamento da deformação linear de pastas de cimento ao longo de 7 dias, com relação água/cimento (a/c) de 0,5, utilizando o método do tubo corrugado proposto por Jensen e Hansen (1995) e normatizado pela ASTM C1698 (2019). O ensaio foi conduzido em sistema fechado, com temperatura controlada e sem restrição externa. Na Figura 4.1 são apresentados os resultados de deformação obtidos ao longo do tempo, tendo como referência o instante de contato entre a água e o cimento, adotado como origem do eixo temporal ($t = 0$). O tempo final de pega, determinado conforme o critério estabelecido pela ASTM C1698 (2019), é utilizado neste estudo como marco de interpretação do início efetivo das deformações autógenas, uma vez que, a partir desse instante, a matriz cimentícia adquire rigidez suficiente para desenvolver retrações e/ou expansões mensuráveis. Assim, embora o eixo x esteja definido a partir do instante de mistura, as deformações são

analisadas em relação ao tempo final de pega, sendo as variações positivas de comprimento associadas à expansão e as variações negativas à retração. Essa abordagem permite comparar adequadamente os diferentes sistemas a partir de um estado mecânico equivalente, sem comprometer a coerência temporal com os demais ensaios realizados, nos quais as idades são contabilizadas desde o contato água–cimento.

Figura 4.1 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas de cimento propostas.



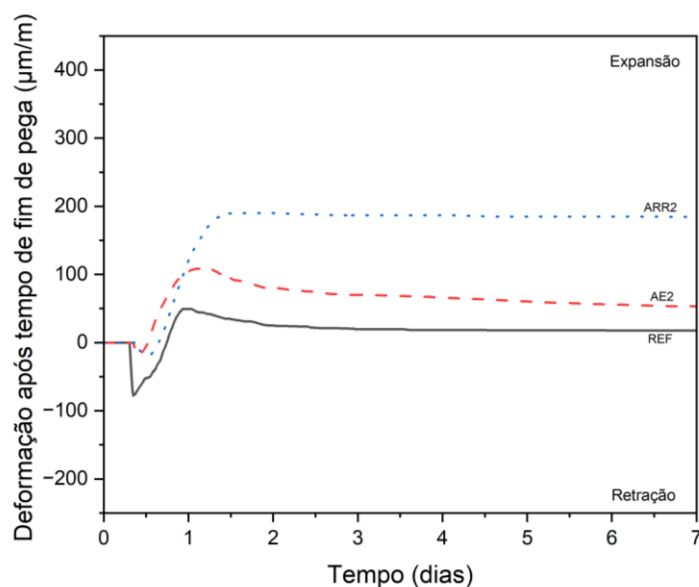
Em todas as pastas, observa-se que, após o término do tempo de pega, as deformações apresentam um comportamento de retração (1), representado por valores negativos. Imediatamente depois, ocorre um curto período de constância (2), seguido por uma expansão crescente (3) até estabilizar novamente (4) e, por fim, a expansão volta a se reduzir (5). Comparando-se as curvas entre todas as pastas, observa-se que apenas a pasta RMES1 não apresentou conversão completa da retração para expansão durante o período (3), permanecendo com retração residual de aproximadamente 67 $\mu\text{m/m}$, valor insuficiente para compensar a retração máxima previamente desenvolvida, da ordem de 178 $\mu\text{m/m}$. Em contraste, as demais pastas apresentaram comportamento predominantemente expansivo a partir do período (3), destacando-se as adições de RMBA2 e RMBA5, que atingiram os maiores valores de expansão.

A predominância do comportamento expansivo observado nas pastas não pode ser atribuída a diferenças na relação água/cimento, uma vez que todas as misturas foram produzidas com a mesma relação a/c de 0,5. A evolução observada, caracterizada por retração inicial seguida de

expansão, está associada, sobretudo, às transformações físico-químicas que ocorrem após o tempo de pega, envolvendo a mudança do estado termodinâmico da água nos poros e a formação progressiva dos produtos de hidratação. Como a formação de cristais de portlandita é uma das explicações mais recorrentes para o surgimento de expansão em idades iniciais, sugere-se que, no presente estudo, a relação a/c de 0,5 favoreceu a mobilidade iônica necessária à precipitação e ao crescimento desses produtos de hidratação, sem que isso represente uma variável diferenciadora entre as misturas. Esse fenômeno foi corroborado por Pereira *et al.* (2022), que observaram, por meio de análises de difração de raios X, maior intensidade de portlandita em pastas com relação a/c de 0,5 à medida que a hidratação progredia.

Ao analisar a pasta contendo aditivos comerciais mitigadores de retração, como melhor visualizado na Figura 4.2, observa-se que ambas as misturas apresentaram retração durante os primeiros 0,40 dias (9,6 horas).

Figura 4.2 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas contendo aditivos comerciais mitigadores de retração.



A retração máxima observada foi de 60 $\mu\text{m/m}$ para a pasta REF e 16 $\mu\text{m/m}$ para a AE2, indicando que a AE2 reduziu a retração em aproximadamente 73% em comparação à pasta REF. A expansão máxima ocorreu no primeiro dia, com a AE2 atingindo 100 $\mu\text{m/m}$ e a pasta REF atingindo 50 $\mu\text{m/m}$. Isso representa uma expansão para a AE2 100% maior que a da pasta REF. Após a quarta etapa, a expansão diminuiu para ambas as misturas, com a AE2 terminando em 54 $\mu\text{m/m}$ e a pasta REF em 18 $\mu\text{m/m}$. Esses resultados demonstram que a AE2 foi mais

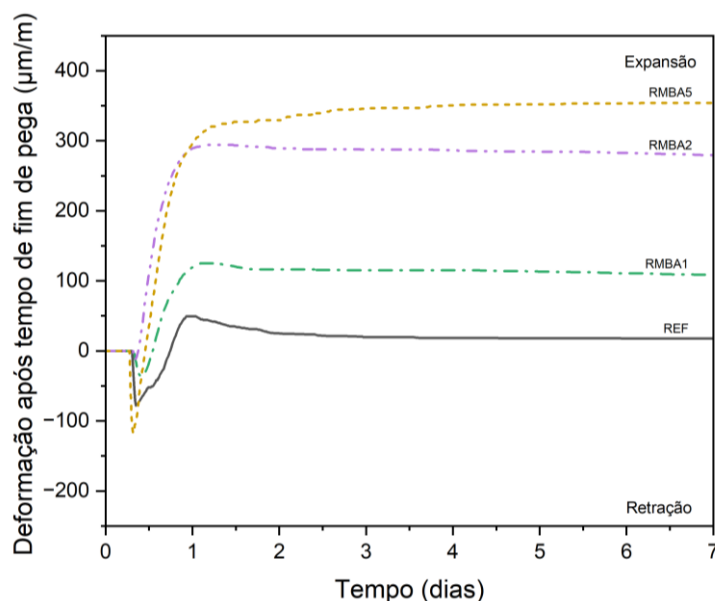
eficaz no controle da retração e na manutenção da expansão ao longo das etapas do ensaio em comparação com a pasta de referência.

A ARR2 apresentou comportamento distinto tanto da AE2 quanto da REF. Enquanto a REF atingiu expansão máxima de aproximadamente 50 $\mu\text{m/m}$ e a AE2 inicialmente alcançou 100 $\mu\text{m/m}$ antes de reduzir com o tempo, a ARR2 atingiu uma expansão máxima significativamente maior, de cerca de 190 $\mu\text{m/m}$ após 1,25 dias (30 horas), o que representa 280% a mais que a REF. Diferentemente da AE2, cuja expansão diminuiu após a quarta etapa, a ARR2 manteve seu efeito expansivo praticamente constante a partir desse ponto. Esse desempenho superior está associado, no presente estudo, à formação e ao crescimento de cristais prismáticos alongados de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), bem como ao aumento da supersaturação de hidróxido de cálcio na solução dos poros. Esses processos favorecem o desenvolvimento de pressões internas de cristalização, contribuindo para a compensação da retração autógena observada experimentalmente

A maior estabilidade da expansão ao longo do tempo indica que o mecanismo atuante não se limita a um efeito inicial transitório, mas envolve a evolução contínua dos produtos de hidratação e a redução progressiva das tensões capilares na matriz cimentícia. Comportamento semelhante foi reportado por Zhan e He (2019), que associaram a mitigação da retração à formação controlada de portlandita e à redistribuição das tensões internas. Adicionalmente, Anshuang *et al.* (2017) observaram que aditivos redutores de retração podem apresentar maior eficácia na mitigação da retração autógena quando comparados a agentes expansores convencionais, resultado compatível com o comportamento identificado neste estudo por meio dos ensaios em tubo corrugado.

A adição do resíduo de mármore da Bahia tratado termicamente (RMBA), Figura 4.3, gerou maiores expansões em comparação com a pasta REF, atingindo expansões máximas de aproximadamente 125 $\mu\text{m/m}$, 294 $\mu\text{m/m}$ e 320 $\mu\text{m/m}$ nos primeiros 1,25 dias, para teores de 1%, 2% e 5%, respectivamente. Esses resultados indicam que, à medida que o teor de resíduo aumentou, maiores expansões finais foram geradas, comportamento já observado na literatura para agentes expansores comerciais. Comparativamente, a RMBA gerou expansões até 540% maiores (para 5% de adição) em relação à pasta REF. Nota-se que, a partir de certo ponto, há uma tendência de saturação nesses materiais, em que o crescimento da expansão torna-se mais modesto, embora para a pasta RMBA5% a expansão tenha continuado a crescer após 1,25 dias, alcançando aproximadamente 350 $\mu\text{m/m}$ após 5 dias.

Figura 4.3 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas contendo resíduo de mármore da Bahia tratado termicamente (RMBA).

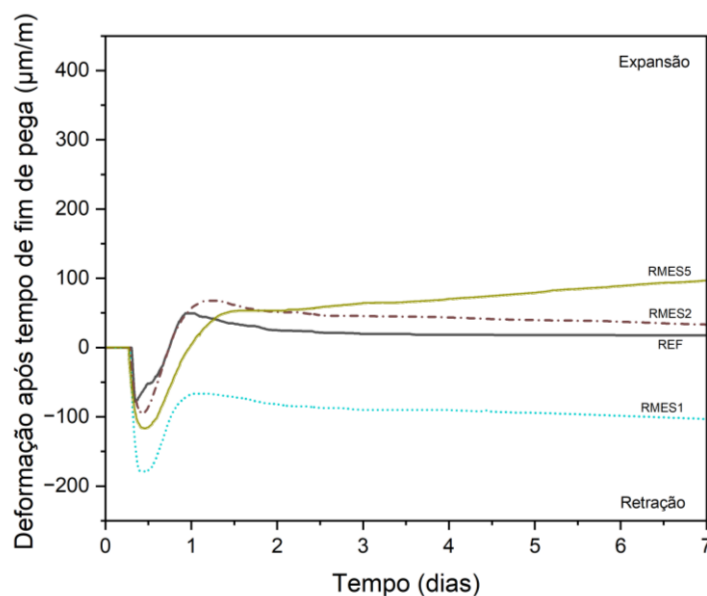


Para as demais misturas, a expansão começou a diminuir após a segunda etapa. Esse comportamento expansivo nas pastas contendo RMBA pode estar associado à pressão exercida pela formação de produtos de hidratação, provavelmente relacionada à hidratação do CaO e à formação de cristais de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), conforme indicado pelos resultados de caracterização química e mineralógica. Além da maior disponibilidade de CaO reativo, a elevada finura do resíduo tratado favorece o aumento da reatividade e a atuação das partículas como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, intensificando a precipitação de portlandita e, conseqüentemente, o efeito expansivo. Assim, o maior teor de CaO aliado à finura do RMBA contribui para explicar seu comportamento expansivo mais significativo em comparação com os demais materiais avaliados.

Ao analisar os resultados das pastas contendo RMES, Figura 4.4, são observadas expansões de menor magnitude em comparação às misturas com RMBA. Para a pasta RMES1, a expansão máxima não compensou a retração inicial de 178 $\mu\text{m/m}$, resultando em uma retração residual de 69 $\mu\text{m/m}$. Esse comportamento indica que a RMES1 foi ineficaz em anular a retração. De forma semelhante, a pasta RMES2 atingiu uma expansão máxima de 67 $\mu\text{m/m}$ no primeiro dia, posicionando-se entre a AE2 e a REF. No entanto, após a quarta etapa, a expansão diminuiu, terminando em 33 $\mu\text{m/m}$. Já a pasta RMES5 teve expansão máxima de apenas 40 $\mu\text{m/m}$, inferior

à da RMES2. Apesar de continuar expandindo, a RMES5 atingiu expansão final de 96 $\mu\text{m/m}$, aproximadamente 72,5% menor que a observada na RMBA5, demonstrando eficácia limitada.

Figura 4.4 – Deformação após determinação do tempo de fim de pega para as pastas contendo resíduo de mármore do Espírito Santo tratado termicamente (RMES).



As diferenças de desempenho entre as pastas RMES e RMBA podem ser atribuídas à combinação de efeitos químicos e físicos associados às suas composições mineralógicas. A RMBA, por apresentar caráter predominantemente calcítico, possui maior teor de CaO reativo após o tratamento térmico, o que favorece a hidratação rápida e a formação intensa de portlandita, resultando em maior potencial expansivo. Além disso, a maior finura do resíduo tratado contribui para o aumento da reatividade e para a atuação das partículas como pontos de nucleação, intensificando a precipitação dos produtos de hidratação. Em contraste, a RMES, de natureza dolomítica, apresenta maior teor de MgO, cuja cinética de hidratação é mais lenta, levando a uma expansão mais gradual e a uma saturação mais precoce do efeito expansivo ao longo do tempo. Assim, os resultados sugerem que a RMBA é mais eficaz que a RMES na geração de expansão, especialmente em maiores teores de adição.

Os resultados de deformação confirmam que o comportamento expansivo observado nos sistemas com resíduo tratado termicamente resulta da combinação entre efeitos químicos e físicos, e não apenas da composição química isolada. Tanto o RMBA quanto o RMES apresentaram expansão com o aumento do teor adicionado, porém com magnitudes distintas e comportamento não linear no teor de 5% de RMES. Do ponto de vista químico, essa diferença

está associada à predominância de CaO na RMBA e de MgO na RMES, conforme caracterizado nas Tabelas 3.4 e 3.5. Do ponto de vista físico, a maior finura dos resíduos tratados e sua atuação como pontos de nucleação favorecem a precipitação dos produtos de hidratação, intensificando os efeitos expansivos.

Experimentalmente, observou-se que o RMBA promoveu uma expansão mais precoce e intensa, enquanto o RMES apresentou um crescimento volumétrico mais gradual e distribuído ao longo do tempo, indicando mecanismos expansivos distintos associados à cinética de hidratação dos óxidos presentes. Esse comportamento observado experimentalmente é coerente com a literatura, que descreve a hidratação rápida do CaO nas primeiras idades, com formação de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e geração de expansão inicial associada à pressão de cristalização, enquanto o MgO apresenta cinética mais lenta, hidratando-se progressivamente em brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), resultando em expansão de menor magnitude e mais distribuída ao longo do tempo (Higuchi *et al.*, 2014; Mo *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2022; Hua *et al.*, 2022a; Jia *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024). Essa diferença de cinética explica por que o RMBA apresentou expansão precoce mais pronunciada, enquanto o RMES contribuiu de forma mais gradual para a mitigação da retração em idades mais avançadas.

O CaO apresenta hidratação rápida nas primeiras 48 h, formando portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e promovendo expansão inicial intensa devido à pressão de cristalização (Higuchi *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020; Hua *et al.*, 2022a; Jia *et al.*, 2023). Já o MgO, de cinética mais lenta, hidrata-se gradualmente em brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), o que resulta em expansão tardia e de menor magnitude, mas mais estável ao longo do tempo (Mo *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024). Essa diferença cinética explica o comportamento observado: o RMBA apresentou expansão precoce mais pronunciada, enquanto o RMES exibiu crescimento volumétrico progressivo, contribuindo para a mitigação de retração em idades mais avançadas.

Quando comparado a agentes expansores comerciais à base de CaO, o resíduo de mármore tratado termicamente apresenta comportamento expansivo de mesma natureza física, porém com cinética dependente da composição mineralógica e da finura do material. Enquanto agentes comerciais são formulados para promover expansão rápida e concentrada nas primeiras idades, o resíduo tratado permite uma expansão mais modulada, especialmente no caso do RMES, o que pode ser vantajoso em sistemas sujeitos a restrições internas elevadas. Dessa forma, o resíduo de mármore tratado atua como um agente expensor alternativo capaz de fornecer expansão compensatória sem induzir efeitos deletérios associados a expansões excessivamente

rápidas, mantendo desempenho mecânico compatível com concretos convencionais. Novos estudos devem aprofundar a análise quantitativa da cinética de hidratação e da eficiência expansiva em função da temperatura de calcinação do resíduo, bem como das condições de restrição estrutural impostas ao material.

4.1.1.3 Avaliação das propriedades mecânicas

4.1.1.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão média de três corpos de prova das pastas de cimento, incorporando dois mitigadores de retração comerciais e dois tipos de resíduo de mármore tratado termicamente, curados em câmara úmida aos 1, 3, 7 e 28 dias, é apresentada na Tabela 4.2. A tabela também inclui o índice de desempenho de cada mistura, calculado como a razão entre sua resistência à compressão média e a da pasta de referência (sem adições) na idade correspondente.

Tabela 4.2 – Resistência à compressão média das pastas de cimento avaliadas e índice de desempenho em relação à pasta de referência.

Pasta de cimento	Resistência à compressão (MPa) – Índice de desempenho (%)											
	DP ^(a)	1 dia		DP ^(a)	3 dias		DP ^(a)	7 dias		DP ^(a)	28 dias	
REF	0,84	12,8	100,0	1,44	21,6	100,0	1,17	28,9	100,0	0,87	34,0	100,0
AE2	1,30	12,7	99,6	0,17	18,4	85,3	1,34	27,3	94,4	0,92	33,6	98,8
ARR2	0,27	8,1	63,4	1,35	17,4	80,3	0,57	24,1	83,3	0,98	29,3	86,0
RMBA1	0,36	11,4	89,5	1,09	22,0	101,9	0,41	28,0	96,7	0,15	31,3	91,8
RMBA2	0,28	12,4	97,1	0,45	24,7	114,2	1,19	28,8	99,7	0,77	34,4	101,2
RMBA5	0,25	16,0	125,1	0,47	27,5	127,1	0,44	31,0	106,9	0,95	33,0	97,1
RMES1	0,17	13,5	105,8	0,12	23,1	106,7	1,06	25,2	87,0	1,36	34,8	102,4
RMES2	0,11	13,9	109,1	0,99	25,5	118,0	0,42	29,5	101,9	0,35	35,4	104,0
RMES5	1,73	14,7	115,5	0,47	26,9	124,6	0,48	29,4	101,6	0,02	34,7	101,9

^(a) DP: Desvio Padrão.

Os valores de resistência à compressão das pastas de cimento contendo agentes mitigadores de retração comerciais apresentaram tendência de redução em comparação à pasta de referência (REF), conforme mostrado na Tabela 4.2. Essa redução foi mais acentuada no caso do ARR, que resultou na maior perda percentual de resistência à compressão em todas as idades de cura. No caso do AE2, a diminuição de resistência pode estar associada aos efeitos da hidratação do CaO, que tende a intensificar a formação inicial de produtos e pode alterar a microestrutura, favorecendo a ocorrência de tensões internas e redução do desempenho mecânico. Para o ARR2, a perda de resistência está relacionada ao retardo das reações de hidratação e à formação

de uma matriz menos densa, com maior porosidade, o que compromete o ganho de resistência ao longo do tempo. Tendências semelhantes de redução de resistência em sistemas com agentes expansores e aditivos redutores de retração também foram relatadas na literatura (Oliveira *et al.*, 2014; Yoo *et al.*, 2015; Anshuang *et al.*, 2017; Treesuwan e Maleesee, 2017; Jia *et al.*, 2018; Zhan; He, 2019).

Em contraste, a incorporação de resíduos de mármore tratados termicamente, em diferentes porcentagens, apresentou comportamento distinto em relação aos agentes comerciais, contribuindo para o aumento da resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades para as misturas RMBA5 e RMES5, sendo o RMBA o que apresentou maior ganho. Os resultados das demais pastas indicaram uma redução pouco significativa da resistência à compressão para RMBA1 e RMBA2 em comparação à pasta de referência, comportamento coerente com o ligeiro aumento do tempo de fim de pega observado para esses teores na Tabela 4.1, o que indica retardo inicial da hidratação. À medida que o teor de RMBA foi aumentado, observou-se a redução desse efeito e a consequente recuperação e incremento da resistência à compressão, evidenciando uma tendência positiva com o aumento do teor de adição.

Para as pastas RMES1 e RMES2, verificou-se aumento da resistência em relação à referência, tendência que também se intensificou com o teor de adição, embora com magnitudes inferiores às observadas para o RMBA. As diferenças de comportamento entre os dois resíduos estão associadas não apenas à sua composição química, mas também aos efeitos físicos induzidos pelo tratamento térmico, como aumento da reatividade, maior finura efetiva, geração de defeitos cristalinos e criação de sítios de nucleação para os produtos de hidratação. Esses achados são particularmente relevantes quando comparados aos aditivos comerciais, como o ARR, que embora eficazes na mitigação da retração, tendem a reduzir a resistência mecânica do compósito, especialmente nas primeiras idades, em função do retardo das reações de hidratação. Em contraste, os resíduos de mármore tratados termicamente apresentam a vantagem de contribuir simultaneamente para a mitigação da retração e para a manutenção ou incremento da resistência mecânica inicial, além de potencial vantagem econômica associada à disponibilidade local e ao reaproveitamento de um resíduo industrial.

Devido às suas características físicas e químicas, as alterações na resistência à compressão observadas nas pastas contendo RMBA e RMES podem estar associadas ao efeito filer das partículas do resíduo de mármore, especialmente quando comparadas aos mitigadores comerciais. Embora o resíduo de mármore tratado termicamente não apresente atividade

pozolânica, sua incorporação provavelmente promoveu as reações de hidratação, fenômeno também observado por Pereira *et al.* (2022) em estudos com resíduos de mármore e granito não tratados. Além disso, a geração de óxidos de magnésio e cálcio durante o tratamento térmico auxilia o processo de hidratação, como corroboram os resultados de tempos de pega e resistência.

Esses efeitos positivos são atribuídos principalmente ao efeito filer das partículas finas de resíduo de mármore, que melhoram o empacotamento das partículas, refinam a estrutura de poros e aumentam a densidade da matriz endurecida. Além de preencherem os poros maiores da mistura, as partículas finas atuam como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, favorecendo a formação inicial de C–S–H e portlandita, o que leva a uma melhor compactação e densificação da pasta de cimento hidratada e, conseqüentemente, a melhores propriedades mecânicas. Resultados semelhantes foram relatados em outros estudos com resíduos de mármore não tratados, que observaram ganhos de desempenho com adições de até 5% (Zhang *et al.*, 2020; Mahmoud *et al.*, 2025). Além disso, a presença de CaO e MgO reativos gerados pelo tratamento térmico pode ter acelerado a hidratação inicial, contribuindo para o desenvolvimento da resistência mecânica. Portanto, o aumento da resistência à compressão observado com a adição de resíduos de mármore pode ser atribuído a dois fatores principais: o efeito filer associado ao empacotamento e à nucleação heterogênea, e a ativação térmica decorrente do tratamento.

Vale destacar que, embora RMBA e RMES contenham CaO e MgO gerados pelo tratamento térmico, compostos também presentes no agente expansor comercial AE2, o efeito desses materiais sobre o desempenho mecânico foi distinto. Essa diferença pode ser atribuída não apenas à natureza química, mas também às diferenças na concentração, na reatividade e, sobretudo, nas características físicas das partículas, em especial o tamanho e a distribuição granulométrica, conforme evidenciado na Tabela 3.7.

Observa-se que o agente expansor AE apresenta diâmetro médio significativamente superior aos resíduos tratados, com valores de D_{50} da ordem de 33,6 μm , enquanto o RMBA T1000_1h e o RMES T1000_1h apresentam D_{50} de aproximadamente 8,0 μm e 18,8 μm , respectivamente. Essa granulometria mais grossa do AE favorece uma liberação mais concentrada da reatividade do CaO e MgO, podendo intensificar efeitos localizados e adversos na microestrutura, enquanto os óxidos presentes nos resíduos de mármore, por estarem finamente dispersos em uma matriz mineral, apresentam reatividade mais moderada e progressiva, mitigando tais efeitos. Além

disso, a granulometria significativamente mais fina dos resíduos de mármore favorece o efeito fíler e a nucleação heterogênea, contribuindo para o refinamento dos poros, a densificação da matriz e a melhora das propriedades mecânicas. Assim, a sinergia entre o efeito fíler, os pontos de nucleação proporcionados pelas partículas finas e a expansão moderada associada à hidratação dos óxidos reativos explica o ganho de resistência observado com as adições de RMBA e RMES, em contraste com o comportamento do agente expansor comercial.

4.1.1.3.2 Módulo de elasticidade por meio do método EMM-IRM

A evolução média do módulo de elasticidade ao longo do tempo, obtida a partir de três corpos de prova das pastas cimentícias avaliadas por meio do método EMM-IRM (*Elastic Modulus Measurement through Impulse Response Method*), é apresentada na Figura 4.5, conforme a metodologia desenvolvida por Araghi *et al.* (2024). Esse método possibilitou acompanhar, de forma contínua e não destrutiva, o ganho de rigidez das misturas desde as idades iniciais de hidratação, permitindo identificar diferenças de comportamento entre os diferentes materiais incorporados. Observa-se que as pastas apresentaram distintas taxas de ganho de rigidez ao longo do tempo, como melhor visualizado na Figura 4.6, evidenciando a influência dos diferentes aditivos e resíduos tratados termicamente incorporados na cinética de hidratação e no desenvolvimento estrutural da matriz cimentícia.

Figura 4.5 – Curva de evolução do módulo de elasticidade para as pastas de cimento propostas.

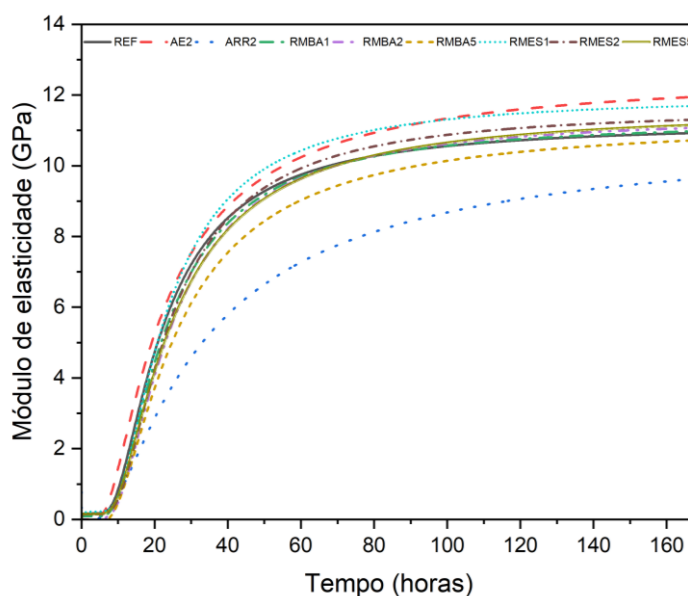
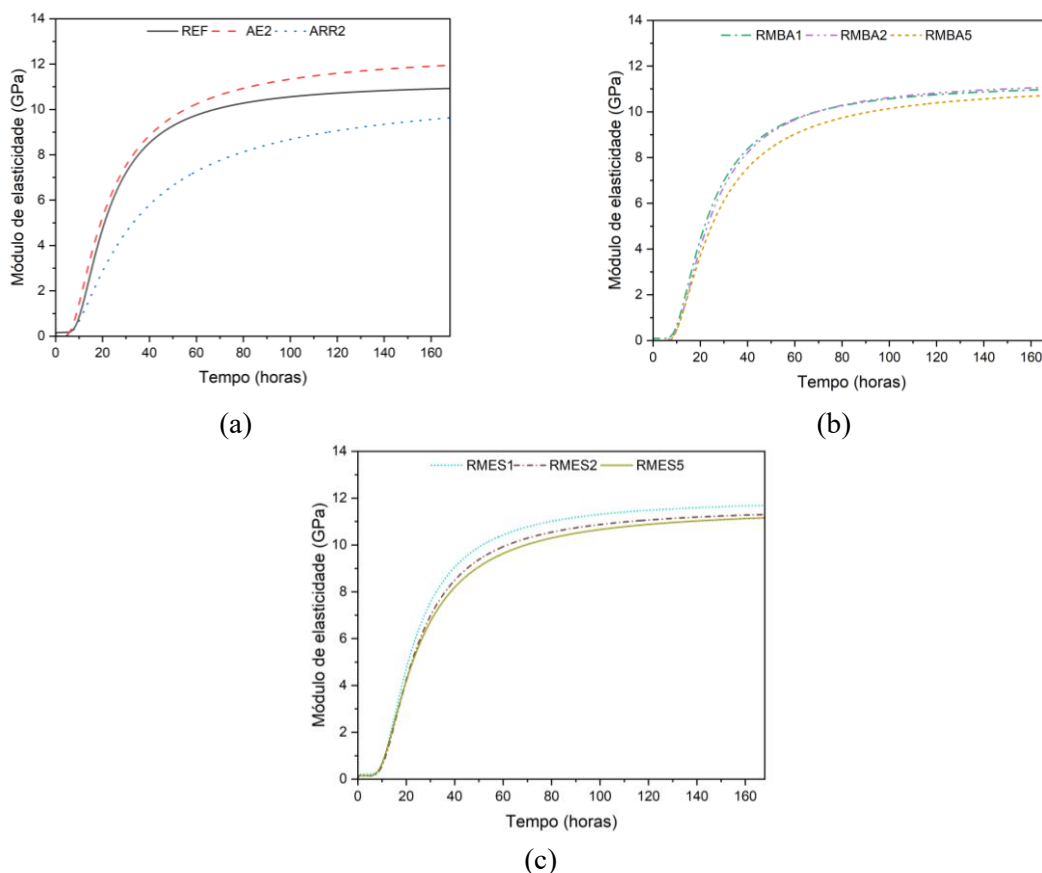


Figura 4.6 – Curva de evolução do módulo de elasticidade para as pastas de cimento estudadas: (a) aditivos comerciais; (b) resíduo de mármore da Bahia; (c) resíduo de mármore do Espírito Santo.



De modo geral, as pastas AE2 e RMES1 apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade aos 7 dias, alcançando aproximadamente 11,95 GPa e 11,69 GPa, respectivamente. Embora esses valores sejam próximos entre si, indicando desempenhos mecânicos semelhantes nessa idade, observa-se que a AE2 apresentou evolução mais acelerada desde as primeiras idades, atingindo cerca de 6,3 GPa em 24 h. Esse comportamento é compatível com a redução da retração inicial observada, ainda que sem o desenvolvimento de expansão significativa. A RMES1 também demonstrou ganho inicial expressivo ($\approx 6,1$ GPa em 24 h), sugerindo que, do ponto de vista da rigidez inicial, ambas as misturas apresentam comportamento comparável. Em contraste, a pasta ARR2 apresentou valores significativamente inferiores aos das demais misturas, atingindo apenas 3,6 GPa em 24 h e cerca de 9,6 GPa aos 7 dias. Essa diferença é claramente relevante do ponto de vista mecânico e está associada ao retardo das reações de hidratação e ao aumento da porosidade promovidos pelo aditivo redutor de retração, resultando em uma matriz menos rígida nas idades iniciais.

As misturas com resíduos de mármore da Bahia (RMBA1, RMBA2 e RMBA5) apresentaram comportamento intermediário, com rigidez levemente inferior à da pasta de referência (REF) nas primeiras idades e valores próximos ou ligeiramente superiores a ela aos 7 dias ($\approx 10,7$ a $11,1$ GPa). Esse comportamento é fisicamente esperado, uma vez que as maiores expansões observadas nessas misturas tendem a promover uma microestrutura inicialmente menos densa, o que pode refletir em menores valores de módulo de elasticidade nas idades iniciais. Entre elas, a RMBA5 apresentou os menores valores do grupo, indicando que, embora a maior incorporação de resíduo intensifique a expansão, isso não se traduz necessariamente em incremento proporcional da rigidez inicial.

Já as pastas com resíduos do Espírito Santo (RMES2 e RMES5) apresentaram módulos finais semelhantes ou ligeiramente superiores à REF, atingindo cerca de $11,3$ e $11,2$ GPa, respectivamente. No entanto, ressalta-se que as diferenças observadas entre as misturas com resíduos e a pasta de referência não são relevantes do ponto de vista mecânico, especialmente quando analisadas em conjunto com os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, nos quais, à exceção da ARR, todas as misturas apresentaram desempenhos equivalentes. Assim, os resíduos tratados termicamente não comprometeram a rigidez global das pastas, mantendo comportamento mecânico comparável ao da matriz de referência.

Comparando os resultados de módulo com os de deformação, nota-se que as maiores expansões não corresponderam necessariamente aos maiores valores de rigidez aos 7 dias. Enquanto as pastas com RMBA apresentaram expansões elevadas (especialmente RMBA5), seus módulos permaneceram intermediários. Por outro lado, a RMES1, que exibiu expansão reduzida e não compensou totalmente a retração inicial, alcançou um dos maiores módulos do conjunto. Esse comportamento indica que a magnitude da expansão não foi determinante para o ganho de rigidez, reforçando que o desenvolvimento do módulo de elasticidade está mais associado à densificação microestrutural e à cinética de hidratação do que à expansão em si.

Esse resultado está em consonância com os achados de Gupta *et al.* (2024), que ao avaliar pastas com aditivos expansores por meio do método EMM-ARM, constataram que, em condições não restritas, expansões intensas podem reduzir significativamente o módulo elástico inicial devido ao aumento da porosidade. Em contrapartida, sob condições restritas, a precipitação dos produtos de hidratação tende a compensar esse efeito, mantendo valores de módulo próximos aos de pastas convencionais. De forma semelhante, no presente estudo, verificou-se que a RMBA, embora apresente maior teor de CaO e, portanto, maior potencial expansivo, não

proporcionou ganhos expressivos de módulo em relação à REF. Já a RMES, com menor potencial de expansão, exibiu evolução mais estável de rigidez, sugerindo um equilíbrio mais favorável entre expansão moderada e densificação da matriz.

Por fim, ao relacionar os resultados de módulo com os de resistência à compressão, observa-se coerência entre os comportamentos: tanto RMBA quanto RMES mantiveram resistências iguais ou superiores à REF, confirmando que os resíduos tratados termicamente podem ser incorporados sem comprometer a rigidez ou a resistência. Em contrapartida, a ARR2 apresentou os piores desempenhos para ambos os parâmetros, enquanto a AE2 combinou retração reduzida com rigidez elevada desde as primeiras idades, reforçando seu efeito diferenciado na fase inicial de hidratação.

Assim, os resultados indicam que a incorporação dos resíduos de mármore tratados termicamente contribuiu para o desenvolvimento do módulo de elasticidade sem comprometer a rigidez inicial, ao mesmo tempo em que promoveu expansão capaz de reduzir retrações. Esses resultados reforçam o potencial desses resíduos como adições que, além de promoverem expansão e reduzir retrações, podem contribuir para a rigidez inicial da matriz cimentícia.

4.1.1.3.3 Método de frequência ressonante

Para validar os resultados obtidos pelo método EMM-IRM, foi realizada uma comparação direta com os valores de módulo de elasticidade estática medidos por meio da técnica de frequência ressonante (*Sonelastic*), conduzida em idades específicas. Essa comparação permite verificar a consistência dos métodos, uma vez que o ensaio de frequência ressonante é normatizado e amplamente utilizado para a determinação do módulo dinâmico de elasticidade em materiais cimentícios (ASTM C215:2022).

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade obtidos por meio do método de frequência ressonante (*Sonelastic*) e pelo método EMM-IRM, bem como os desvios percentuais entre eles. Os resultados indicam que, de forma geral, houve boa concordância entre as duas metodologias, especialmente a partir de 3 dias de idade, quando as diferenças relativas tenderam a se reduzir para valores inferiores a 10% na maioria das misturas.

Tabela 4.3 – Comparação entre os resultados do *Sonelastic* e EMM-IRM em pastas de cimento.

Pasta de cimento	Sonelastic (GPa)						EMM-IRM (GPa)					
	1 dia	DP ^(a)	3 dias	DP ^(a)	7 dias	DP ^(a)	1 dia	DRR ^(b)	3 dias	DRR ^(b)	7 dias	DRR ^(b)
REF	5,1	0,21	9,1	0,32	10,3	0,32	5,9	16%	10,1	11%	10,9	6%
AE2	6,5	0,43	10,6	0,55	11,7	0,49	6,3	-3%	10,7	1%	11,9	2%
ARR2	4,5	0,21	9,2	0,31	9,5	0,38	3,6	-20%	7,8	-15%	9,6	1%
RMBA1	7,1	0,24	10,4	0,31	10,9	0,41	5,6	-21%	10,1	-3%	11,0	1%
RMBA2	7,1	0,33	10,7	0,10	11,1	0,37	5,3	-25%	10,1	-6%	11,1	0%
RMBA5	7,2	0,27	11,1	0,30	11,9	0,24	4,8	-33%	9,5	-14%	10,7	-10%
RMES1	6,8	0,14	10,6	0,27	11,4	0,18	6,1	-10%	10,8	2%	11,7	3%
RMES2	6,3	0,18	10,3	0,31	11,2	0,27	5,5	-13%	10,4	1%	11,3	1%
RMES5	6,5	0,48	10,9	0,48	11,7	0,50	5,4	-17%	10,1	-7%	11,2	-4%

^(a) DP: Desvio Padrão.

^(b) DRR: Desvio em relação à referência, dado por: $[(\text{Média do EMM-IRM}) - (\text{Média do Sonelastic})] / (\text{Média do Sonelastic})$.

Em idades iniciais (1 dia), observou-se maior dispersão nos resultados, com o EMM-IRM apresentando valores inferiores aos medidos pelo *Sonelastic* em quase todas as pastas, exceto no caso da AE2, cuja diferença foi mínima (-3%). Esse comportamento foi mais evidente para as pastas contendo RMBA, nas quais os desvios chegaram a -21% (RMBA1), -25% (RMBA2) e -33% (RMBA5). Resultados semelhantes foram verificados também em misturas com RMES, embora em menor magnitude (-10 a -17%). Tais diferenças podem estar associadas à maior sensibilidade dos métodos dinâmicos em captar variações iniciais de empacotamento e da microestrutura em formação.

Com o avanço da hidratação, a concordância entre os métodos aumentou. Aos 3 dias, a maioria das misturas apresentou diferenças próximas de zero ou ligeiramente negativas, como observado para AE2 (1%), RMES1 (2%) e RMES2 (1%). Apenas ARR2 (-15%) e RMBA5 (-14%) mantiveram discrepâncias mais elevadas, possivelmente refletindo o retardo de hidratação no caso da ARR2 e a maior heterogeneidade introduzida pelas altas adições de RMBA. Aos 7 dias, a tendência de convergência entre os métodos ficou ainda mais evidente: em praticamente todas as misturas as diferenças foram iguais ou inferiores a 3%, indicando que ambos os procedimentos captaram de forma consistente o ganho de rigidez ao longo do tempo.

Esses resultados corroboram o apontado por Araghi *et al.* (2024), que destacam a confiabilidade do método EMM-IRM não apenas por sua capacidade de monitoramento contínuo do desenvolvimento do módulo, mas também pela sua boa equivalência em relação às técnicas

convencionais de ensaio em idades representativas. Dessa forma, a comparação realizada neste estudo confirma que o EMM-IRM é adequado para acompanhar a evolução da rigidez em pastas cimentícias, inclusive na presença de adições minerais e aditivos comerciais. Portanto, a análise conjunta demonstra que, apesar de algumas divergências nas idades iniciais, ambos os métodos apresentam coerência ao capturar a evolução do módulo, reforçando a validade do EMM-IRM como alternativa robusta e não destrutiva para acompanhamento do ganho de rigidez em pastas cimentícias.

De forma geral, os resultados obtidos nos ensaios de consistência, expansão e propriedades mecânicas evidenciam que os aditivos comerciais e os resíduos de mármore tratados termicamente influenciam de maneira distinta o comportamento das pastas de cimento, seja na trabalhabilidade inicial, no desenvolvimento das deformações ou no ganho de rigidez e resistência. Esses resultados ressaltam o potencial dos resíduos como alternativas viáveis aos aditivos tradicionais, ainda que apresentem mecanismos de atuação próprios. No entanto, a compreensão mais aprofundada dessas diferenças requer microanálises, apresentada nas seções seguintes, que permitirá correlacionar os resultados macroscópicos com os processos físicos e químicos que governam a hidratação e a evolução da matriz cimentícia.

4.1.1.4 Ensaios de microanálises

4.1.1.4.1 Difração de raios X (DRX)

Nas Figuras 4.7 a 4.15 são apresentados os difratogramas de DRX das amostras de pastas de cimento contendo mitigadores de retração e resíduos de mármore tratados termicamente, avaliadas após 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. Essas figuras ilustram a influência de diferentes dosagens na formação dos produtos cristalinos de hidratação. A análise dos padrões de difração de raios X (DRX) das pastas com resíduos de mármore tratados termicamente (RMBA e RMES), em comparação com a pasta de referência (REF), o agente expansivo (AE) e o aditivo redutor de retração (ARR), forneceu informações relevantes sobre os produtos de hidratação formados e sua relação com as deformações observadas e o desempenho das propriedades mecânicas. As principais fases cristalinas identificadas nesses difratogramas foram: etringita (E), portlandita ou hidróxido de cálcio (P), dolomita (D), quartzo (Q), silicato tricálcico ou alita (A), silicato dicálcico ou belita (B) e calcita (Cc). A nomenclatura utilizada (por exemplo, "1%_1D") indica claramente a porcentagem de adição do mitigador de retração e a idade de hidratação (1 dia), facilitando a interpretação dos resultados.

Especificamente, nas Figuras 4.7 a 4.9 apresentam os resultados de DRX das pastas de referência, utilizadas para fins de comparação, enquanto na Tabela 4.4 apresenta os índices de cristalinidade (*CrI*) dessas pastas, determinados por meio da análise de difração de raios X.

Figura 4.7 – Difratoograma de raios X para REF nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

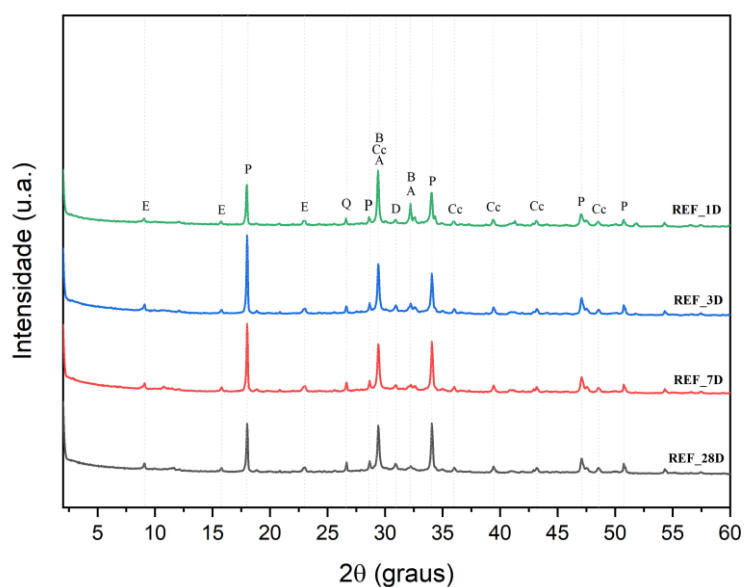


Figura 4.8 – Difratoograma de raios X para AE2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. E-

ettringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

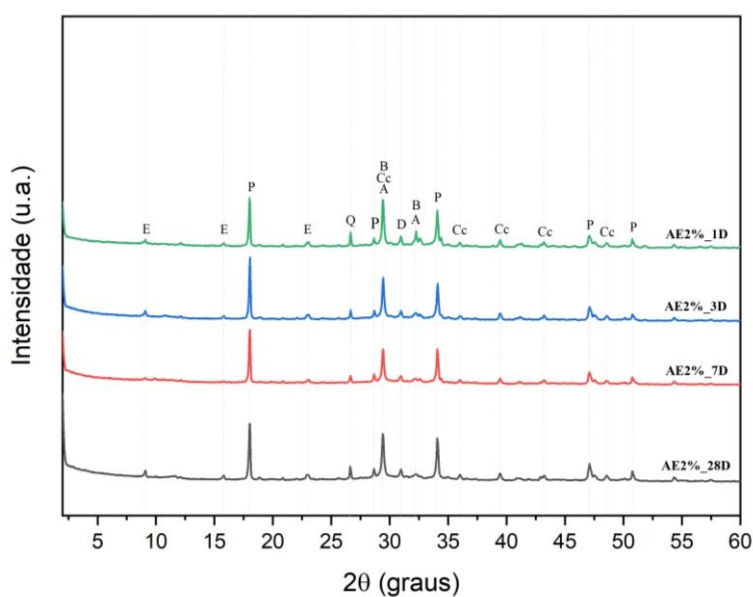


Figura 4.9 – Difratoograma de raios X para ARR2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação. E-tringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

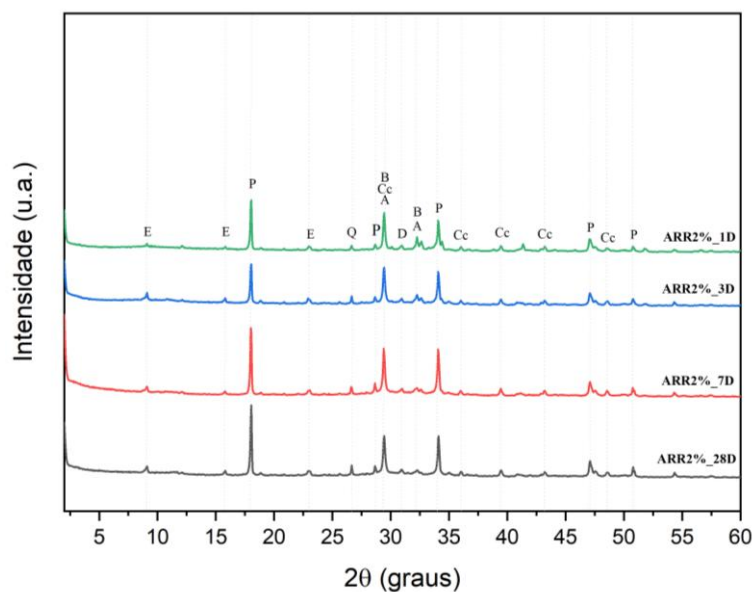


Tabela 4.4 – Índice de cristalinidade para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Idade (dias)	Pasta de cimento	Índice de cristalinidade (%)
1	REF	88,39
	AE2	89,30
	ARR2	90,11
3	REF	86,51
	AE2	88,94
	ARR2	89,32
7	REF	88,73
	AE2	89,68
	ARR2	90,65
28	REF	88,26
	AE2	88,37
	ARR2	89,61

Na pasta REF, os picos mais intensos de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nas posições de 2θ de aproximadamente 18° , 34° e 47° refletem a hidratação típica, com formação consistente dos produtos esperados e ausência de aditivos que alterem o processo. O pico de calcita em $2\theta \approx 29^\circ$ também é visível, inerente à composição do cimento e possivelmente associado ao fíler calcário ou a pequenas fases de calcita já presentes no clínquer, conforme discutido por Pereira *et al.* (2022). O índice de cristalinidade (*CrI*) da REF variou entre 86,5% e 88,7% ao longo do

período monitorado, mantendo-se praticamente estável. Esses resultados representam o desempenho típico de uma matriz bem hidratada em condições padrão, coerente com a expansão limitada observada nos ensaios de deformação, bem como com os valores consistentes de resistência e módulo de elasticidade, que servem como referência para comparação com as demais misturas.

A pasta com AE apresentou picos de portlandita com intensidade semelhante ou ligeiramente superior aos da REF, indicando a formação adicional de Ca(OH)_2 decorrente da hidratação do CaO presente no agente expensor. Essa maior disponibilidade de portlandita favorece o ambiente alcalino e a formação de produtos expansivos, como etringita, sem alterações expressivas na mineralogia global do sistema. Os valores de índice de cristalinidade (*CrI*) mantiveram-se próximos aos da REF em todas as idades ($\approx 89,3\%$ em 1 dia, $\approx 88,9\%$ aos 3 dias; $\approx 89,7\%$ aos 7 dias; $\approx 88,4\%$ aos 28 dias), confirmando que a adição de AE promoveu apenas modificações limitadas na estrutura cristalina dos produtos de hidratação. Esse comportamento está em consonância com os resultados de deformação, nos quais a pasta AE apresentou apenas uma leve expansão adicional em relação à REF, sem efeito expressivo na mitigação da retração.

Em termos de propriedades mecânicas, a redução da resistência à compressão foi discreta e o módulo de elasticidade apresentou evolução próxima à da REF, indicando que, na dosagem utilizada, o agente expensor não comprometeu significativamente a integridade da matriz cimentícia. Esse quadro geral é sustentado por Jia *et al.* (2018), que apontam que agentes expansores à base de CaO promovem a formação acelerada de portlandita e contribuem para o controle da retração, mas em alguns casos podem induzir microfissuração interna. Além disso, Zhang *et al.* (2024) complementam esses achados ao observar que a rápida hidratação do CaO gera maiores teores de portlandita, potencialmente contribuindo para microfissuração interna e redução da resistência, especialmente em dosagens mais elevadas.

A pasta com ARR, por sua vez, apresentou picos de portlandita mais intensos que os da REF e AE, sobretudo em $2\theta \approx 18^\circ$, indicando maior preservação de Ca(OH)_2 livre devido ao retardo das reações de hidratação. Isso é corroborado pelos valores mais elevados de *CrI* em todas as idades ($\approx 90,1\%$ em 1 dia; $\approx 89,3\%$ aos 3 dias; $\approx 90,7\%$ aos 7 dias; $\approx 89,6\%$ aos 28 dias), sugerindo maior proporção de fases cristalinas e menor transformação em C-S-H amorfo. Esse comportamento se refletiu nos ensaios de deformação, nos quais a pasta com ARR exibiu expansão mais elevada e sustentada, associada à formação e ao crescimento de cristais prismáticos alongados de portlandita (Ca(OH)_2) e ao aumento da pressão de cristalização no

interior da matriz. Contudo, apresentou reduções acentuadas de resistência à compressão e módulo de elasticidade em todas as idades, efeito associado ao aumento da porosidade e à menor densidade estrutural da matriz, como consequência direta do retardo da hidratação. Esses achados estão de acordo com os estudos de Zhang *et al.* (2022) e Zhan & He (2019), que destacam que aditivos redutores de retração podem intensificar a expansão, mas frequentemente comprometem o desempenho mecânico. De forma geral, os resultados confirmam que a expansão, por si só, não é suficiente para avaliar o desempenho global; é fundamental compreender como cada aditivo interfere na cinética de hidratação e, consequentemente, na formação da microestrutura e no desenvolvimento das propriedades mecânicas do compósito.

Nas Figuras 4.10 a 4.12, são apresentadas a seguir, correspondem às pastas com diferentes teores de resíduo tratado termicamente proveniente da Bahia, enquanto na Tabela 4.5 está apresentado os índices de cristalinidade (*CrI*) dessas pastas, determinados por meio da análise de difração de raios X.

Figura 4.10 – Difrátograma de raios X para RMBA1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

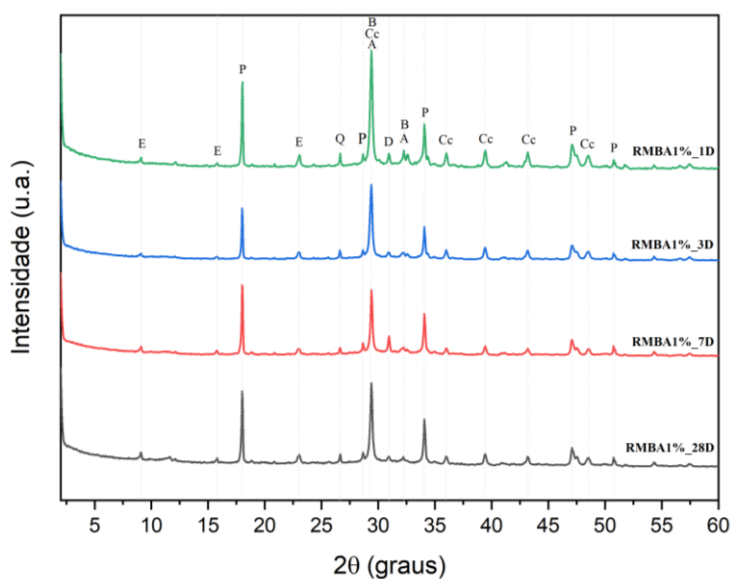


Figura 4.11 – Difratoograma de raios X para RMBA2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

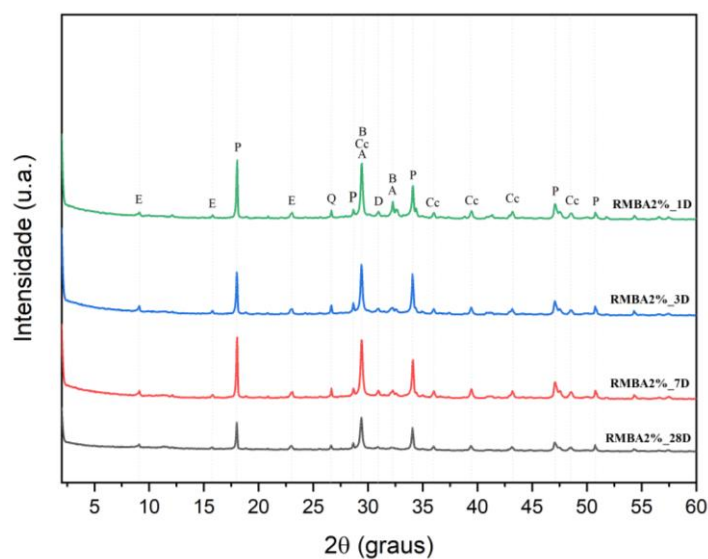


Figura 4.12 – Difratoograma de raios X para RMBA5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

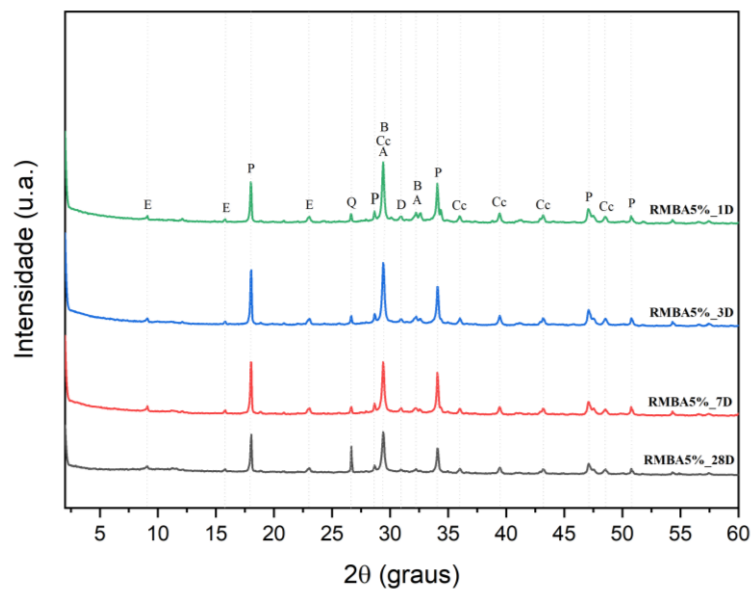


Tabela 4.5 – Índice de cristalinidade para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Idade (dias)	Pasta de cimento	Índice de cristalinidade (%)
1	RMBA1	88,81
	RMBA2	87,41
	RMBA5	85,74
3	RMBA1	88,07
	RMBA2	87,01
	RMBA5	85,49
7	RMBA1	89,34
	RMBA2	87,88
	RMBA5	87,14
28	RMBA1	88,99
	RMBA2	84,72
	RMBA5	88,69

Para as pastas com resíduo de mármore da Bahia (RMBA), observou-se que o aumento do teor de adição esteve associado a alterações na intensidade dos picos de portlandita e também de etringita. De modo geral, os teores de 2% e 5% apresentaram redução na intensidade relativa dos picos de portlandita, indicando maior consumo ao longo da hidratação ou redistribuição dessas fases em função do avanço das reações. Em relação à etringita, a variação não foi uniforme entre as dosagens: a mistura com 1% de RMBA apresentou picos mais pronunciados em idades iniciais, especialmente em 1 dia, enquanto esse efeito não se manteve de forma significativa para os teores mais elevados.

Dentre as dosagens testadas, a adição de 2% apresentou o melhor desempenho global, exibindo níveis de expansão próximos aos da mistura com 5%, porém com maior resistência à compressão, o que indica um equilíbrio mais favorável entre comportamento expansivo e desempenho mecânico. Além disso, a expansão observada na mistura com 2% foi superior à obtida com os agentes comerciais, sem prejuízo à resistência da pasta. Esses resultados ressaltam a atuação combinada de efeitos químicos, associados à hidratação do CaO, e efeitos físicos, relacionados à elevada finura do RMBA, que favorecem o empacotamento das partículas, a ação filer e a densificação da matriz cimentícia.

A evolução do índice de cristalinidade (*CrI*) confirmou diferenças relevantes na microestrutura das pastas com RMBA. Nas idades iniciais (1 e 3 dias), a mistura com 2% apresentou valores de *CrI* inferiores aos das pastas RMBA1 e RMBA5 ($\approx 87,4\%$ e $87,0\%$, respectivamente),

indicando maior fração de fases amorfas, possivelmente associadas à formação inicial de C–S–H. Essa tendência foi mantida aos 7 dias ($\approx 87,9\%$) e tornou-se mais evidente aos 28 dias, quando a RMBA2 apresentou o menor valor de *CrI* ($84,7\%$), sugerindo uma microestrutura mais refinada. No entanto, em termos de desempenho mecânico, observa-se que a RMBA5 apresentou os maiores ganhos de resistência à compressão nas idades iniciais, superando a REF em 25%, 27% e 7% aos 1, 3 e 7 dias, respectivamente, evidenciando que o maior teor de resíduo favoreceu o desenvolvimento precoce da resistência.

Aos 28 dias, embora a RMBA2 tenha apresentado resistência ligeiramente superior à da REF (34,4 MPa), a RMBA5 manteve desempenho comparável, indicando que ambas as dosagens conduzem a resistências finais semelhantes. Dessa forma, os resultados indicam que a RMBA5 é mais eficiente para o ganho de resistência nas primeiras idades, enquanto a RMBA2 apresenta uma microestrutura mais refinada, associada a menor cristalinidade e comportamento expansivo suficientemente elevado para compensar a retração sem prejuízo mecânico. Em termos de deformação, a RMBA2 apresentou expansões próximas às da RMBA5, porém com menor intensidade, configurando um compromisso mais equilibrado entre expansão e estabilidade mecânica da pasta

Em contraste, a RMBA1 manteve valores de *CrI* estáveis e próximos aos da REF ($\approx 88\text{--}89\%$), com comportamento intermediário tanto em termos de expansão quanto de propriedades mecânicas, indicando que a baixa dosagem de resíduo não alterou significativamente a proporção entre fases cristalinas e amorfas. Esse resultado é compatível com seu desempenho mecânico, que se manteve próximo ao da pasta de referência, sem ganhos expressivos de expansão ou resistência. Já a pasta RMBA5 apresentou redução do *CrI* nas idades iniciais ($\approx 85,5\text{--}87,1\%$), o que indica uma maior fração de fases amorfas no início da hidratação, associada à maior incorporação de resíduo e ao efeito físico das partículas finas. Esse comportamento, contudo, não está associado a um retardo de hidratação, uma vez que a RMBA5 apresentou os maiores ganhos de resistência à compressão nas primeiras idades, conforme evidenciado na Tabela 4.2.

Aos 28 dias, observou-se a recuperação do *CrI* ($\approx 88,7\%$), indicando a progressiva reorganização dos produtos de hidratação. Apesar da elevada capacidade expansiva da RMBA5, o ganho em expansão não se traduziu em um aumento proporcional do módulo de elasticidade e da resistência à compressão aos 28 dias, idade em que a RMBA2 apresentou valor ligeiramente superior. Ainda assim, a RMBA5 manteve desempenho mecânico elevado e

superior à REF nas idades iniciais, evidenciando que o aumento do teor de resíduo favorece principalmente o desenvolvimento precoce das propriedades mecânicas.

De forma geral, os resultados das pastas com RMBA confirmam que o comportamento expansivo observado está associado à combinação entre o maior teor de CaO presente no resíduo e os efeitos físicos decorrentes de sua elevada finura. O CaO reativo favorece a formação precoce de portlandita e o desenvolvimento de pressões de cristalização, enquanto a granulometria fina contribui com pontos de nucleação adicionais e com o efeito filer, promovendo o refinamento da microestrutura.

A análise integrada dos resultados de DRX, expansão e propriedades mecânicas evidencia que a adição de 2% de RMBA apresentou um equilíbrio favorável entre ação expansiva, densificação da matriz e desempenho mecânico, especialmente quando consideradas simultaneamente a magnitude da expansão, os valores de CrI e a resistência à compressão. Embora teores mais elevados tenham promovido maiores expansões e ganhos mecânicos em idades iniciais, a dosagem de 2% destacou-se por mitigar a retração de forma eficiente sem induzir alterações excessivas na rigidez ou na resistência à compressão em idades mais avançadas. Esse comportamento está alinhado com a literatura (Vardhan *et al.*, 2019; Siddique *et al.*, 2021; Kuoribo & Mahmoud, 2022; Gencel *et al.*, 2022; Ahmad & Zhou, 2023), que aponta que resíduos de mármore finamente moídos podem atuar simultaneamente por mecanismos químicos e físicos, favorecendo a estabilidade volumétrica e a melhoria da microestrutura sem comprometer o desempenho mecânico..

As Figuras 4.13 a 4.15, a seguir, correspondem às pastas com diferentes teores de resíduo tratado termicamente provenientes do Espírito Santo, enquanto na Tabela 4.6 está apresentado os índices de cristalinidade (CrI) dessas pastas, determinados por meio da análise de difração de raios X.

Figura 4.13 – Difratoograma de raios X para RMES1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

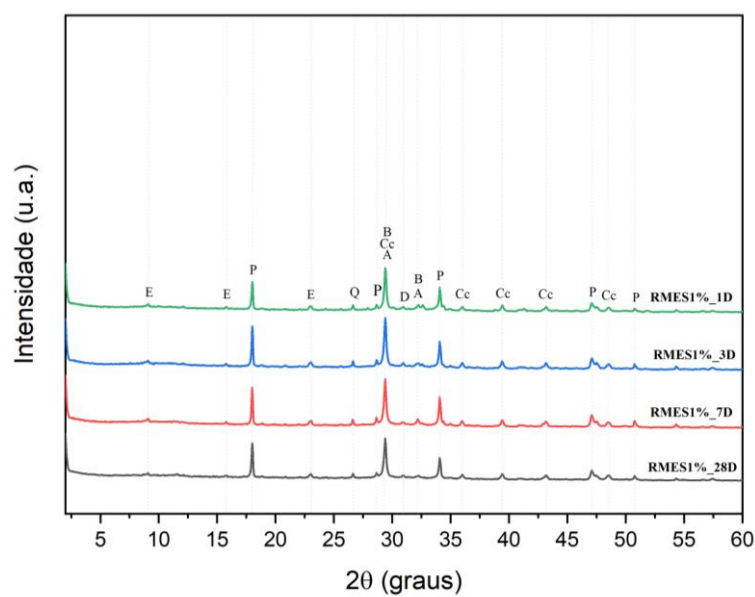


Figura 4.14 – Difratoograma de raios X para RMES2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

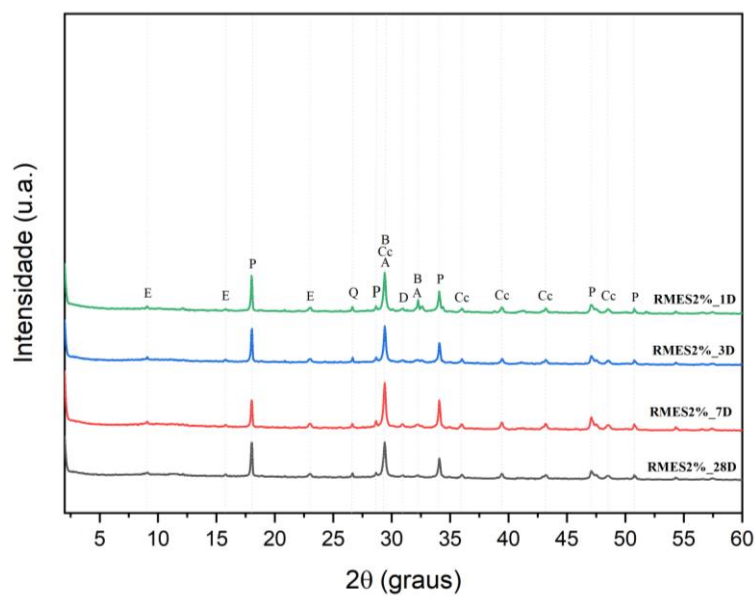


Figura 4.15 – Difratoograma de raios X para RMES5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

E- etringita, P-portlandita, Q-quartzo, B-belita, Cc-calcita, A-alita, D-dolomita.

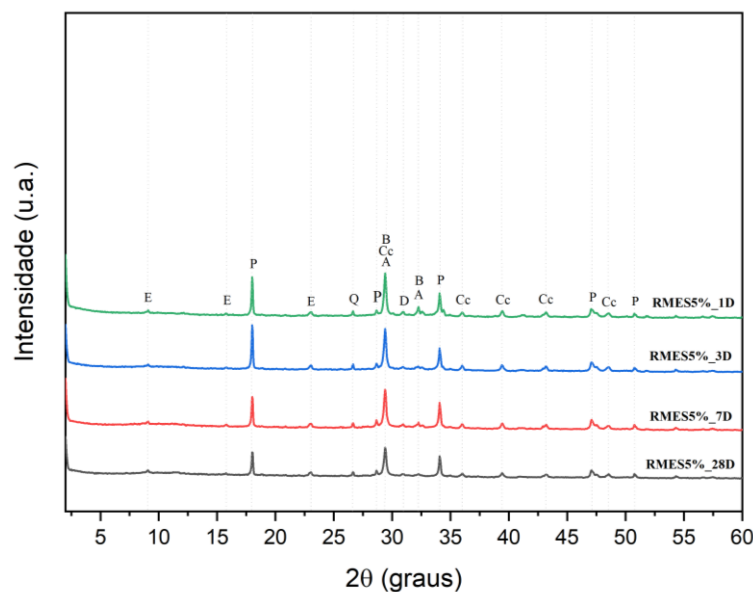


Tabela 4.6 – Índice de cristalinidade para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Idade (dias)	Pasta de cimento	Índice de cristalinidade (%)
1	RMES1	87,34
	RMES2	82,27
	RMES5	80,39
3	RMES1	86,38
	RMES2	81,68
	RMES5	80,14
7	RMES1	86,16
	RMES2	83,37
	RMES5	82,60
28	RMES1	80,56
	RMES2	80,50
	RMES5	81,38

Para as pastas com resíduo de mármore do Espírito Santo (RMES), observou-se uma redução gradual na intensidade dos picos de portlandita com o aumento do teor de adição, indicando maior consumo ou transformação em reações secundárias. Esse efeito foi acompanhado por valores consistentemente mais baixos de índice de cristalinidade (CrI), que variaram entre $\approx$ 80% e 87% ao longo das idades avaliadas, sugerindo maior proporção de fases amorfas e favorecimento da formação de C–S–H. Entre as dosagens testadas, a adição de 5% apresentou

o melhor desempenho global, combinando a maior expansão entre as misturas com RMES e resistência à compressão equivalente ou ligeiramente superior à da REF. Esse comportamento indica que um teor mais elevado de RMES é necessário para compensar a retração inicial acentuada, resultando em um equilíbrio mais favorável do ponto de vista volumétrico.

A maior presença de MgO no RMES, que se hidrata lentamente para formar brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), explica a expansão mais controlada e retardada, conforme já discutido por Lv *et al.* (2024) e Jiang *et al.* (2024). Além disso, a diminuição da intensidade dos picos de etringita com o aumento da dosagem sugere a participação do resíduo em reações com aluminatos, alterando ligeiramente a evolução das fases cristalinas. Os valores de *CrI* reforçam a interpretação referente as misturas RMES2 e RMES5, que apresentaram valores próximos a 80% desde as primeiras idades, confirmando a predominância de fases amorfas e a menor formação de portlandita cristalina. Essa tendência se relaciona com o desempenho mecânico observado, já que tanto a RMES2 quanto a RMES5 alcançaram resistências superiores à REF em todas as idades, atingindo 35,4 MPa e 34,7 MPa aos 28 dias, respectivamente.

Em termos de módulo de elasticidade, as pastas com RMES demonstraram evolução estável e valores finais próximos ou ligeiramente superiores aos da REF. A RMES1 destacou-se pelo ganho inicial mais rápido ($\approx 6,1$ GPa em 1 dia) e pelo maior valor final entre as misturas com RMES ($\approx 11,7$ GPa aos 7 dias), enquanto a RMES2 e a RMES5 também apresentaram módulos consistentes ($\approx 11,3$ e $11,2$ GPa). Esse comportamento sugere que, apesar do menor potencial expansivo, a incorporação do RMES contribuiu para a densificação da matriz e manutenção da rigidez, resultado da combinação entre efeito filer e formação progressiva de C–S–H.

Do ponto de vista volumétrico, a capacidade expansiva do RMES mostrou-se limitada, especialmente nas misturas RMES1 e RMES2, que não compensaram integralmente a retração inicial. Entretanto, mesmo com expansões modestas, as misturas mantiveram ou superaram o desempenho mecânico da REF, em especial a RMES5, cuja resistência aos 28 dias (34,7 MPa) confirma o papel positivo do resíduo na compactação da matriz e na estabilidade estrutural. Assim, enquanto o RMES demonstrou eficácia restrita como agente expensor, sua contribuição foi clara na melhoria da resistência à compressão e da rigidez, evidenciando que sua principal vantagem está associada à microestrutura mais refinada e ao balanço entre hidratação lenta e densificação progressiva, em consonância com os achados de Pereira *et al.* (2021).

De forma geral, os resultados de DRX confirmaram e complementaram as observações dos ensaios de deformação e resistência. O RMBA, caracterizado pelo maior teor de CaO e maior reatividade, promoveu expansões mais intensas e ganhos de resistência, especialmente na dosagem de 2%, que apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho volumétrico e propriedades mecânicas. Em contraste, o RMES, mais rico em MgO, exigiu uma dosagem mais elevada (5%) para compensar de forma efetiva a retração inicial, resultando em uma expansão mais controlada, porém acompanhada de resistência à compressão satisfatória. Os valores de *CrI* reforçaram esses resultados, indicando padrões de cristalinidade distintos, associados tanto à cinética de hidratação quanto ao processo de densificação da matriz. Em conjunto, essas análises confirmam o potencial técnico de ambos os resíduos como agentes expansores alternativos e evidenciam a importância da composição mineralógica para adequar o desempenho. Além disso, ao selecionar um agente expensor, é essencial considerar não apenas seu comportamento expansivo, mas também sua influência na cinética de hidratação do cimento Portland, pois esta afeta diretamente o desenvolvimento microestrutural e as propriedades mecânicas da matriz.

4.1.1.4.2 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

Outra forma de analisar o conjunto de hidratos formados em materiais à base de cimento é por meio das análises termogravimétricas (TG) e derivadas (DTG), que permitem quantificar os produtos de hidratação a partir da perda de massa associada à liberação de água não evaporada e de gases durante o aumento controlado da temperatura. As curvas DTG representam as derivadas das curvas TG, evidenciando os picos correspondentes às etapas de início, máximo e término das decomposições térmicas. Em sistemas cimentícios, devido à presença simultânea de diversos minerais e produtos hidratados, os picos de decomposição frequentemente se sobrepõem, dificultando a distinção e a quantificação individual de cada fase (Taylor, 1997).

Conforme apresentado nas Figuras 4.16 a 4.24, o aumento progressivo da temperatura (de aproximadamente 40 °C a 1000 °C) provoca transformações típicas das pastas cimentícias, observadas pelas curvas TG e DTG obtidas para os materiais estudados. De modo geral, foram identificadas quatro principais faixas de perda de massa, associadas às seguintes transformações. A primeira transição (40-240°C) corresponde à liberação de água combinada, resultante da desidratação das fases de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita (AFt), aluminatos e monossulfatos (AFm). Essa faixa foi considerada de forma integrada, uma vez que esses processos ocorrem em temperaturas parcialmente sobrepostas, tornando imprecisa a

quantificação isolada de cada fase. Com o avanço da idade de hidratação, observou-se um aumento progressivo da fração de fases aquosas ligadas. A segunda e terceira transições (300-380 °C e 380-480 °C) são associadas à desidroxilação da brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), respectivamente. Finalmente, a quarta transição (520°-780°C) relaciona à decomposição de carbonatos (CaCO_3). Essas faixas de temperatura características são corroboradas com as faixas reportada por diversos autores para pastas e concretos contendo agentes expansores à base de CaO e MgO (Taylor, 1997; Scrivener *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2020a; Oliveira *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2025a; Li *et al.*, 2025a). A discussão detalhada de cada comportamento é apresentada a seguir, iniciando-se com as Figuras 4.16 a 4.18, as quais exibem as curvas TG/DTG obtidas para as pastas REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias de idade.

Figura 4.16 – Curvas de TG e DTG para REF nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

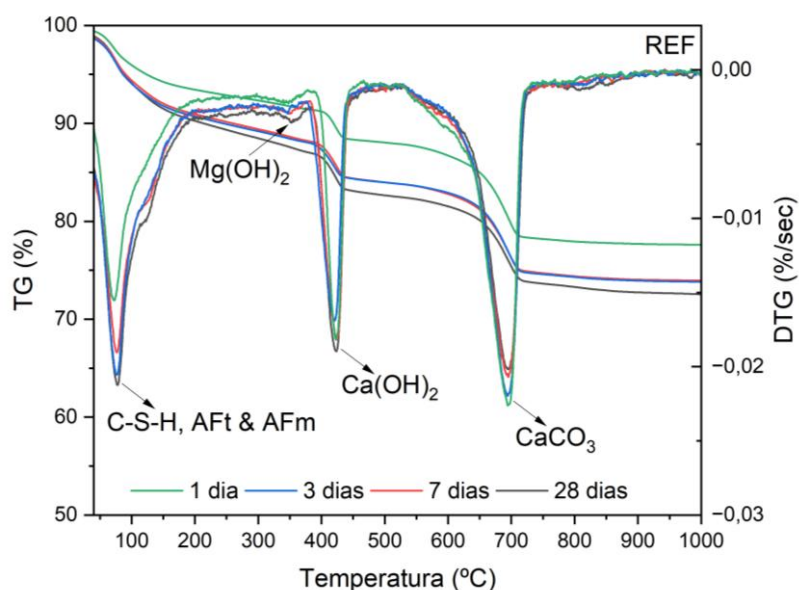


Figura 4.17 – Curvas de TG e DTG para AE2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

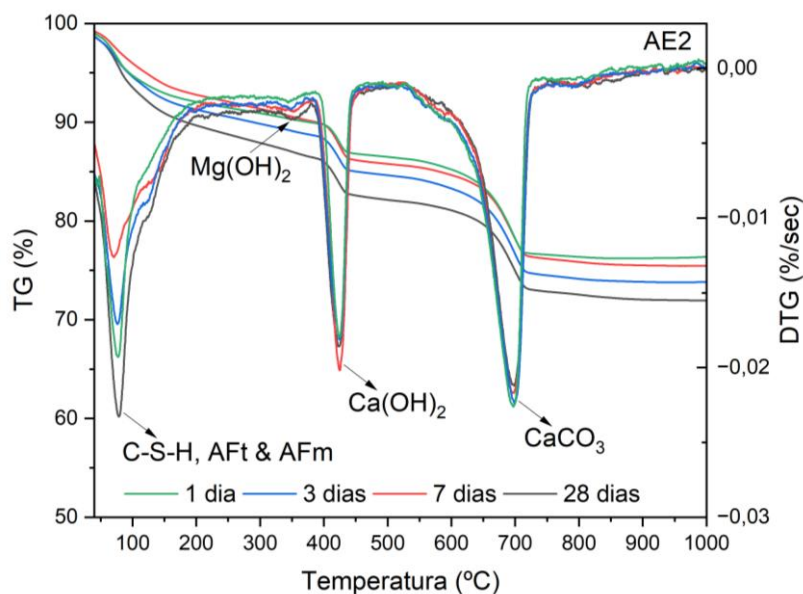
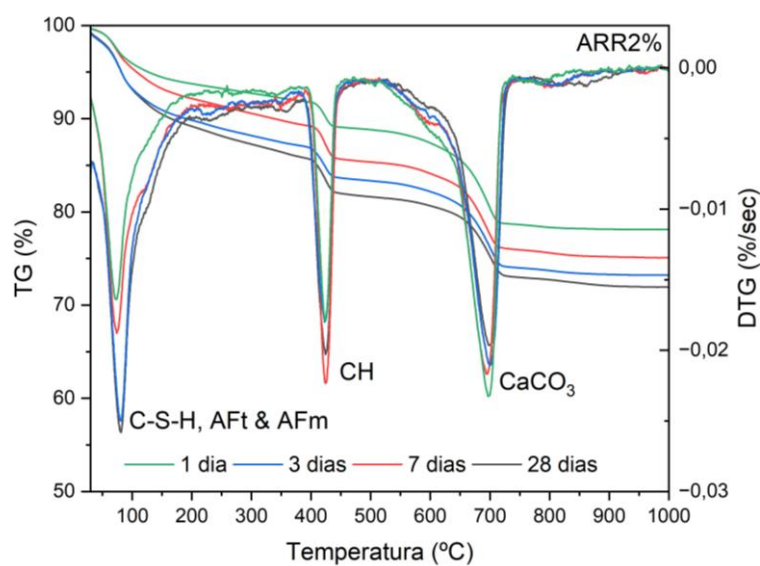


Figura 4.18 – Curvas de TG e DTG para ARR2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.



Na Tabela 4.7 mostra as frações de massas registradas para as pastas de cimento com diferentes proporções de mistura em cada faixa de temperatura. Com base na Tabela 4.7 e nas Equações 5 a 8, foram calculados os teores de água combinada, $Mg(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ e $CaCO_3$ em cada idade, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.8. Adicionalmente, os valores da Tabela 4.8 foram corrigidos para a mesma base de não voláteis, conforme as recomendações de Taylor (1997), a fim de permitir a comparação direta entre as misturas analisadas. Para tanto, a

massa residual resultante do ensaio termogravimétrico foi normalizada para 100%, o que implicou um ajuste proporcional nas perdas de massa de cada faixa de temperatura. Os valores corrigidos são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.7 – Frações de massa em cada temperatura (%) para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Temperatura (°C)		40	240	300	380	480	520	780	M.R. (%) ^(a)	F.N. ^(b)
REF	1d	99,43	92,98	92,34	91,43	88,16	87,91	78,03	77,60	1,289
	3d	98,72	90,07	89,20	88,02	84,10	83,84	74,42	73,81	1,355
	7d	98,82	90,30	89,41	88,18	84,13	83,83	74,52	73,93	1,353
	28d	98,95	89,52	88,48	87,02	82,82	82,51	73,44	72,55	1,378
AE2	1d	99,02	91,59	90,91	89,97	86,62	86,35	76,45	76,37	1,309
	3d	98,65	90,69	89,84	88,72	84,77	84,48	74,29	73,82	1,355
	7d	99,23	92,22	91,36	90,12	85,91	85,65	75,99	75,46	1,325
	28d	98,72	88,95	87,91	86,47	82,30	82,00	72,67	71,95	1,390
ARR2	1d	99,46	93,34	92,73	91,94	88,93	88,69	78,46	78,11	1,280
	3d	98,59	89,11	88,19	87,13	83,45	83,22	73,84	73,21	1,366
	7d	99,48	91,53	90,57	89,41	85,46	85,24	75,75	75,08	1,332
	28d	98,73	88,34	87,26	85,92	81,74	81,50	72,83	71,93	1,390

^(a) Massa residual (M.R.)

^(b) Fator de normalização (F.N.) = 100/Massa Residual

Tabela 4.8 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Produto	Idade (dias)	REF	AE2	ARR2
Água combinada (%)	1	6,45	7,44	6,11
	3	8,65	7,95	9,48
	7	8,52	7,01	7,95
	28	9,43	9,78	10,39
Mg(OH) ₂ (%)	1	2,93	3,01	2,55
	3	3,81	3,61	3,41
	7	3,97	4,00	3,73
	28	4,69	4,65	4,32
Ca(OH) ₂ (%)	1	13,41	13,79	12,35
	3	16,10	16,22	15,10
	7	16,62	17,28	16,24
	28	17,28	17,14	17,16
CaCO ₃ (%)	1	22,43	22,47	23,23
	3	21,39	23,14	21,28
	7	21,15	21,94	21,54
	28	20,58	21,16	19,68

Tabela 4.9 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para REF, AE2 e ARR2 aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Produto	Idade (dias)	REF	AE2	ARR2
Água combinada (%)	1	8,31	9,74	7,83
	3	11,72	10,77	12,95
	7	11,52	9,29	10,59
	28	12,99	13,59	14,45
Mg(OH) ₂ (%)	1	3,78	3,94	3,26
	3	5,16	4,89	4,66
	7	5,37	5,29	4,97
	28	6,46	6,47	6,01
Ca(OH) ₂ (%)	1	17,29	18,05	15,81
	3	21,82	21,97	20,62
	7	22,47	22,90	21,62
	28	23,82	23,83	23,86
CaCO ₃ (%)	1	28,90	29,42	29,74
	3	28,98	31,34	29,06
	7	28,61	29,08	28,69
	28	28,37	29,41	27,36

A análise termogravimétrica (Figura 16 a 18) associada à quantificação das fases hidratadas (Tabelas 4.7 a 4.9), permitiu avaliar de forma integrada a evolução dos produtos de hidratação das pastas REF, AE2 e ARR2 ao longo do tempo.

Para a pasta de referência (REF), observa-se um comportamento típico de sistemas cimentícios convencionais. O evento térmico abaixo de 200 °C, associado à liberação de água quimicamente combinada proveniente da decomposição de C–S–H, AFt e AFm, apresenta aumento progressivo de intensidade com a idade, refletindo o avanço contínuo das reações de hidratação. Essa tendência é confirmada quantitativamente pelo aumento da água combinada de 8,31% em 1 dia para 12,99% aos 28 dias (Tabela 4.9). O pico relacionado à desidroxilação do Mg(OH)₂ (300–380 °C) manteve-se relativamente estável ao longo do tempo, indicando que essa fase, associada a impurezas do cimento, não participa de forma significativa da cinética de hidratação. Já o evento correspondente à decomposição da portlandita (Ca(OH)₂), entre 400 e 460 °C, apresenta intensidade semelhante ou levemente crescente com a idade, em consonância com o aumento progressivo do teor de Ca(OH)₂, que atingiu 23,82% aos 28 dias. O evento de descarbonatação do CaCO₃ (600–780 °C) mostrou leve redução com o tempo, comportamento compatível com variações graduais no teor relativo de carbonatos.

Nas pastas contendo agente expensor à base de CaO (AE2), observa-se uma cinética de hidratação diferenciada, especialmente nas idades iniciais. Na faixa abaixo de 200 °C, a elevada perda de massa aos 1 dia indica formação expressiva de etringita, associada à hidratação rápida do CaO. Essa intensidade diminui aos 3 e 7 dias, refletindo a transformação progressiva da etringita e a reorganização dos produtos hidratados, e volta a aumentar aos 28 dias, quando a formação de C–S–H se torna predominante. Essa evolução é consistente com os valores de água combinada, que apresentam máximo inicial (9,74% em 1 dia), redução intermediária (10,77% e 9,29% aos 3 e 7 dias) e recuperação aos 28 dias (13,59%). A faixa correspondente à decomposição da portlandita (400–480 °C) apresenta picos mais intensos em todas as idades quando comparada à REF, confirmando a maior formação de Ca(OH)_2 decorrente da hidratação do CaO do agente expensor. Contudo, apesar do maior teor inicial, os valores de Ca(OH)_2 convergem aos da pasta REF aos 28 dias, indicando que o agente expensor altera principalmente a distribuição temporal da hidratação, sem modificar de forma significativa o teor final de portlandita. Os eventos associados ao Mg(OH)_2 e ao CaCO_3 apresentaram comportamento semelhante ao da pasta de referência, indicando que o AE2 não interferiu de forma relevante nas fases secundárias ou nos processos de carbonatação.

A pasta contendo aditivo redutor de retração (ARR2) apresentou comportamento distinto, caracterizado por retardo inicial da hidratação seguido de maior formação de produtos hidratados em idades avançadas. Na região abaixo de 200 °C, observa-se perda de massa mais intensa que nas pastas REF e AE2, sobretudo aos 1 e 3 dias, indicando a presença de fases hidratadas ricas em água estrutural. Esse comportamento é compatível com os valores de água combinada, que foram inferiores aos da REF em 1 dia (7,83%), confirmando o retardo inicial, mas se tornaram os mais elevados aos 3 dias (12,95%) e aos 28 dias (14,45%). Na faixa correspondente à decomposição da portlandita, observa-se um pico mais intenso e persistentemente elevado ao longo das idades, refletindo maior preservação de Ca(OH)_2 livre no sistema, coerente com a cinética mais lenta de conversão dessa fase em produtos secundários. Quantitativamente, embora o teor de Ca(OH)_2 seja inferior ao da REF em 1 dia, os valores convergem aos 28 dias (23,86%), indicando grau de hidratação final semelhante. O comportamento observado para o Mg(OH)_2 foi semelhante ao dos demais traços, com evolução progressiva e menores teores para a ARR2, enquanto o evento de descarbonatação do CaCO_3 manteve-se estável, sem influência significativa do aditivo.

De forma integrada, os resultados de TG/DTG e da quantificação das fases hidratadas demonstram que tanto o agente expansor (AE2) quanto o aditivo redutor de retração (ARR2) não alteram substancialmente os teores finais dos principais produtos de hidratação, mas modificam de maneira significativa a evolução temporal desses produtos. O AE2 promove maior formação inicial de etringita e portlandita, associada à expansão nas primeiras idades, enquanto o ARR2 retarda a hidratação inicial e favorece maior formação de produtos hidratados em idades mais avançadas, resultando em expansão mais sustentada ao longo do tempo. Esses efeitos tornam-se mais claros quando a análise quantitativa é interpretada em conjunto com as curvas TG/DTG, evidenciando os diferentes mecanismos de atuação dos aditivos sobre a cinética de hidratação do cimento.

A seguir, nas Figuras 4.19 a 4.21 são apresentadas as curvas TG/DTG obtidas para as pastas RMBA1, RMBA2 e RMBA5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, a análise qualitativa dessas curvas permitiu identificar os quatros principais eventos térmicos associados à decomposição dos produtos de hidratação e avaliar a evolução microestrutural das pastas ao longo do tempo.

Figura 4.19 – Curvas de TG e DTG para RMBA1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

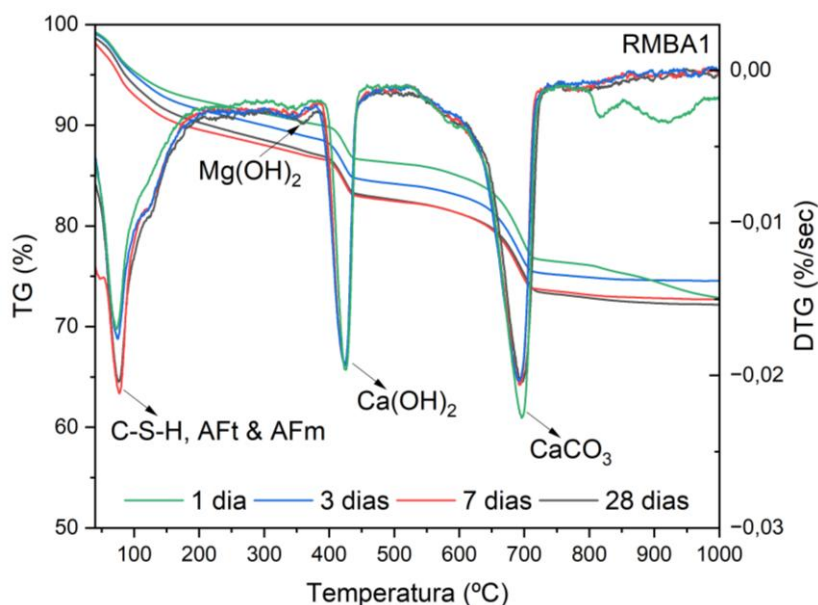


Figura 4.20 – Curvas de TG e DTG para RMBA2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

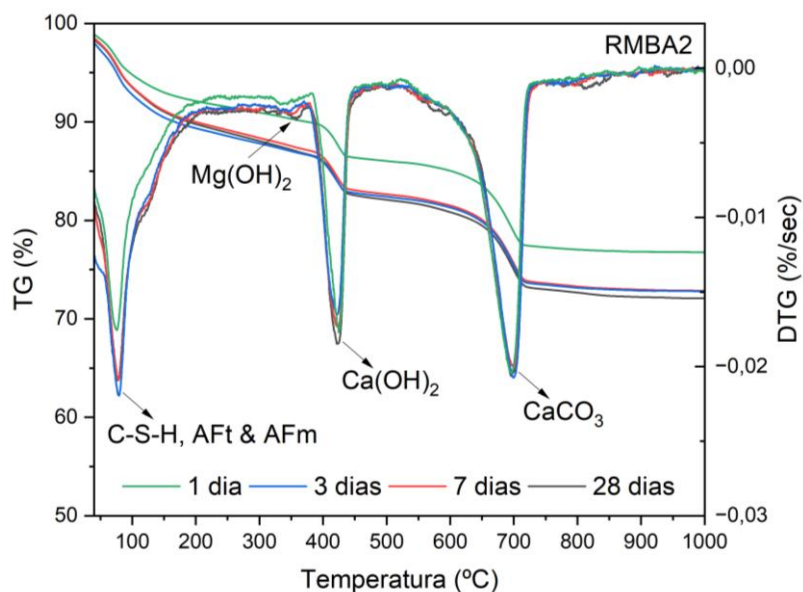
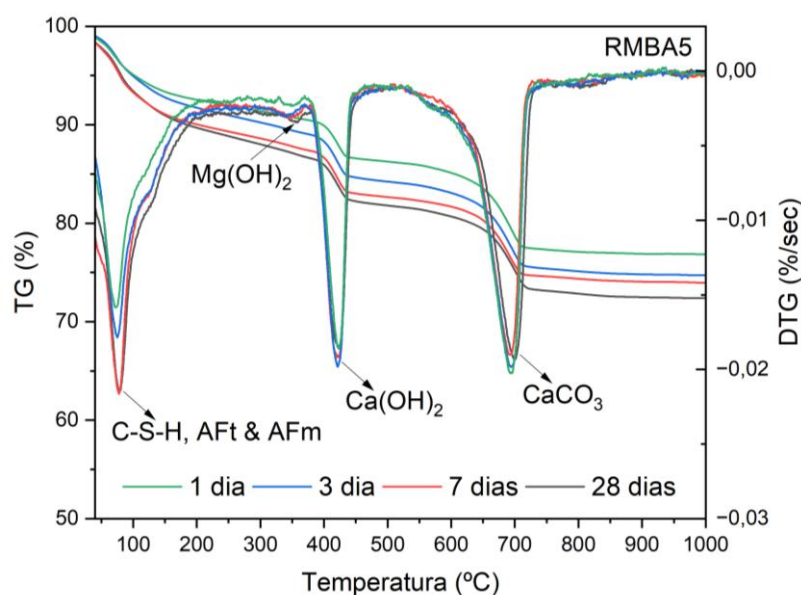


Figura 4.21 – Curvas de TG e DTG para RMBA5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.



A Tabela 4.10 reúne as frações de massas registradas para as pastas de cimento em cada faixa de temperatura. Na Tabela 4.11 são apresentados os teores de água combinada, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 em cada idade, enquanto na Tabela 4.12 mostra os valores corrigidos para a mesma base de não voláteis, conforme o procedimento descrito anteriormente.

Tabela 4.10 – Frações de massa em cada temperatura (%) para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Temperatura (°C)		40	240	300	380	480	520	780	M.R. (%) ^(a)	F.N. ^(b)
RMBA1	1d	99,26	91,92	91,15	90,09	86,38	86,12	76,25	72,83	1,373
	3d	99,11	90,94	89,99	88,67	84,33	84,04	75,00	74,55	1,341
	7d	98,16	88,95	88,03	86,76	82,63	82,32	73,30	72,70	1,375
	28d	98,68	89,55	88,54	87,10	82,79	82,41	73,00	72,16	1,386
RMBA2	1d	98,90	91,64	90,95	89,95	86,16	85,91	77,12	76,75	1,303
	3d	98,03	88,73	87,82	86,58	82,54	82,25	73,27	72,81	1,373
	7d	98,54	89,34	88,37	87,07	82,81	82,51	73,42	72,85	1,373
	28d	98,38	89,08	88,06	86,65	82,25	81,94	72,80	72,08	1,387

Tabela 4.10 – Frações de massa em cada temperatura (%) para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.

(Continuação)

Temperatura (°C)		40	240	300	380	480	520	780	M.R. (%) ^(a)	F.N. ^(b)
RMBA5	1d	98,88	92,07	91,39	90,42	86,39	86,13	77,17	76,84	1,301
	3d	99,04	91,12	90,23	88,98	84,38	84,09	75,23	74,72	1,338
	7d	98,39	89,45	88,62	87,34	82,79	82,53	74,46	73,95	1,352
	28d	98,42	89,01	88,03	86,58	81,95	81,66	72,97	72,40	1,381

^(a) Massa residual (M.R.)^(b) Fator de normalização (F.N.) = 100/Massa Residual

Tabela 4.11 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Produto	Idade (dias)	RMBA1	RMBA2	RMBA5
Água combinada (%)	1	7,34	7,26	6,81
	3	8,17	9,31	7,92
	7	9,21	9,20	8,94
	28	9,13	9,30	9,40
Mg(OH) ₂ (%)	1	3,41	3,22	3,13
	3	4,25	4,00	4,05
	7	4,10	4,20	4,12
	28	4,63	4,54	4,65
Ca(OH) ₂ (%)	1	15,22	15,58	16,58
	3	17,84	16,58	18,91
	7	16,97	17,52	18,70
	28	17,72	18,06	19,01
CaCO ₃ (%)	1	22,40	19,97	20,33
	3	20,53	20,39	20,12
	7	20,48	20,64	18,31
	28	21,36	20,73	19,72

Tabela 4.12 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Produto	Idade (dias)	RMBA1	RMBA2	RMBA5
Água combinada (%)	1	10,08	9,46	8,86
	3	10,96	12,78	10,60
	7	12,67	12,63	12,09
	28	12,65	12,90	12,99
Mg(OH) ₂ (%)	1	4,69	4,19	4,07
	3	5,70	5,49	5,42
	7	5,64	5,76	5,57
	28	6,41	6,30	6,43
Ca(OH) ₂ (%)	1	20,90	20,30	21,57
	3	23,92	22,77	25,31
	7	23,35	24,06	25,28
	28	24,55	25,05	26,26

Tabela 4.12 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para RMBA aos 1, 3, 7 e 28 dias. (Continuação)

Produto	Idade (dias)	RMBA1	RMBA2	RMBA5
CaCO ₃ (%)	1	30,76	26,02	26,46
	3	27,54	28,00	26,92
	7	28,16	28,34	24,77
	28	29,60	28,77	27,23

Nas Figuras 4.19 a 4.21 e na Tabela 4.12, observa-se que a incorporação do RMBA tratado termicamente modifica a evolução dos produtos de hidratação de maneira dependente do teor adicionado. Nas idades iniciais, as curvas apresentam perdas de massa acentuadas na faixa entre 40 e 240 °C, associadas à decomposição de C–S–H, AFt e AFm, indicando hidratação ativa nas primeiras horas. Aos 1 dia, nota-se redução progressiva do teor de água combinada com o aumento do teor de RMBA (10,08% para RMBA1; 9,46% para RMBA2; 8,86% para RMBA5), sugerindo efeito inicial de substituição parcial do cimento, com menor quantidade de produtos hidratados formados nesse estágio.

Aos 3 dias, ocorre inversão desse comportamento: a RMBA2 apresenta o maior teor de água combinada (12,78%), superando RMBA1 (10,96%) e RMBA5 (10,60%), indicando aceleração das reações de hidratação para o teor intermediário. Esse resultado sugere que o CaO proveniente do tratamento térmico contribui para elevar o pH e favorecer a dissolução das fases do cimento, redistribuindo a cinética de hidratação. A partir de 7 dias, os valores tornam-se mais próximos entre os traços, e aos 28 dias convergem para teores semelhantes ($\approx 12,6$ – $13,0\%$), indicando que, a longo prazo, o grau global de hidratação tende a se equiparar independentemente da dosagem.

Na faixa entre 300 e 380 °C, correspondente à desidroxilação do $\text{Mg}(\text{OH})_2$, observa-se aumento progressivo do teor ao longo do tempo, passando de cerca de 4% em 1 dia para aproximadamente 6,4% aos 28 dias. As diferenças entre os traços são discretas, mas nota-se leve incremento com o aumento do teor de RMBA, especialmente aos 28 dias. Esse comportamento confirma a hidratação gradual do MgO reativo presente no resíduo, formando brucita de maneira controlada e progressiva, sem gerar picos abruptos nas primeiras idades.

Na região entre 380 e 480 °C, associada à decomposição da portlandita, verifica-se crescimento consistente do teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em todas as misturas ao longo do tempo. A RMBA5 apresenta os maiores valores em praticamente todas as idades (21,57% em 1 dia e 26,26% aos 28 dias), confirmando a contribuição adicional do CaO livre proveniente do resíduo tratado. A diferença é mais pronunciada aos 3 dias, sugerindo hidratação mais intensa do CaO nessa fase. Aos 28 dias, os valores permanecem superiores na RMBA5, enquanto RMBA1 e RMBA2 apresentam teores ligeiramente menores, mas ainda próximos entre si.

O teor de CaCO_3 , associado à faixa entre 530 e 780 °C, mantém-se elevado desde 1 dia e apresenta apenas pequenas variações ao longo do tempo, convergindo para valores próximos aos 28 dias ($\approx 27\text{--}29\%$). Esse comportamento indica que o carbonato atua predominantemente como fase residual estrutural, sem participação direta relevante na diferenciação da reatividade entre os traços.

De forma integrada, os resultados de TG/DTG e da Tabela 4.12 indicam que o RMBA tratado termicamente participa ativamente do processo de hidratação, fornecendo CaO e MgO que se convertem progressivamente em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $\text{Mg}(\text{OH})_2$. As três formulações apresentam comportamentos distintos: RMBA1 apresenta evolução próxima à referência, com participação mais moderada das fases formadas; RMBA5 gera os maiores teores de portlandita e brucita, indicando maior potencial expansivo e maior contribuição química do resíduo; RMBA2 representa condição intermediária, com aceleração da hidratação aos 3 dias e evolução equilibrada dos produtos ao longo do tempo.

Em termos globais, a diferenciação entre as misturas está mais associada à evolução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $\text{Mg}(\text{OH})_2$ do que a variações no teor de carbonato. A dosagem intermediária (2%) apresenta comportamento mais equilibrado entre redistribuição da cinética de hidratação e desenvolvimento progressivo das fases hidratadas, enquanto a maior dosagem (5%) intensifica a formação de portlandita e brucita, refletindo maior contribuição química do resíduo tratado.

A seguir, nas Figuras 4.22 a 4.24 são apresentadas as curvas TG/DTG obtidas para as pastas RMES1, RMES2 e RMES5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, com destaque para as quatro regiões principais de perda de massa, características de pastas de cimento hidratadas com presença de adições minerais.

Figura 4.22 – Curvas de TG e DTG para RMES1 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

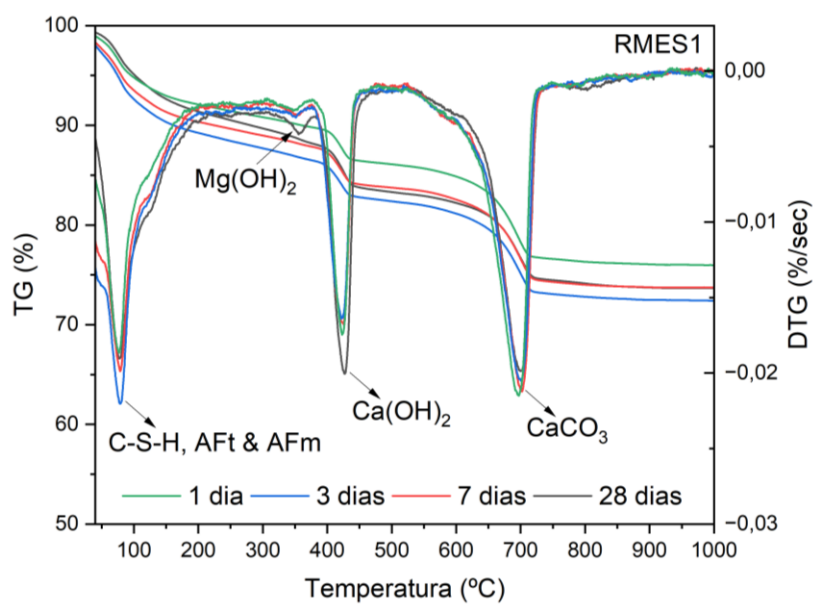


Figura 4.23 – Curvas de TG e DTG para RMES2 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.

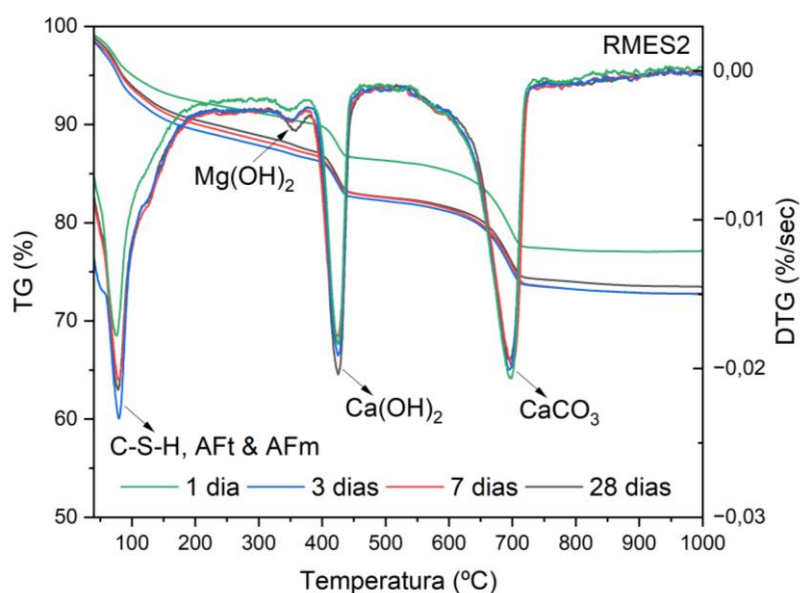
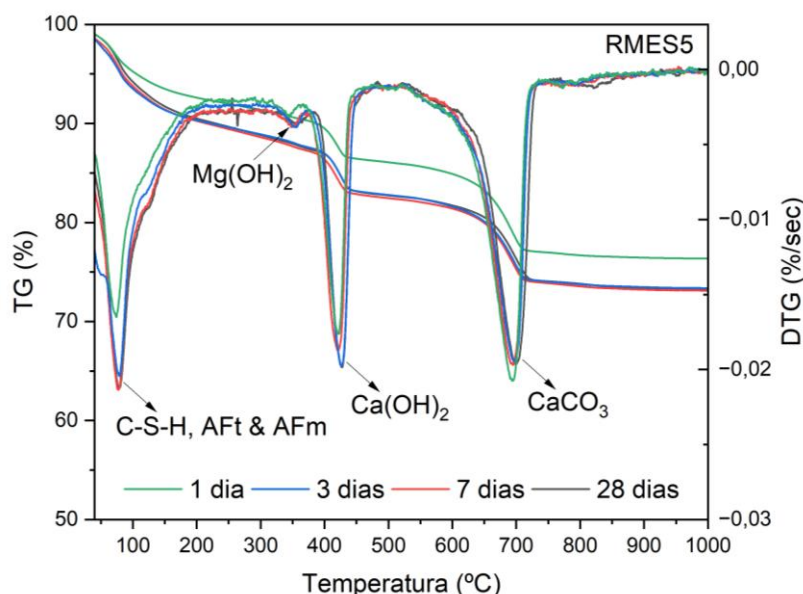


Figura 4.24 – Curvas de TG e DTG para RMES5 nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de hidratação.



A Tabela 4.13 reúne as frações de massas registradas para as pastas de cimento em cada faixa de temperatura. Na Tabela 4.14 são apresentados os teores de água combinada, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 em cada idade, enquanto a Tabela 4.15 mostra os valores corrigidos para a mesma base de não voláteis, conforme o procedimento descrito anteriormente.

Tabela 4.13 – Frações de massa em cada temperatura (%) para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Temperatura (°C)		40	240	300	380	480	520	780	M.R. (%) ^(a)	F.N. ^(b)
RMES1	1d	98,98	91,57	90,82	89,76	86,23	85,94	76,43	75,98	1,316
	3d	98,05	88,59	87,70	86,44	82,54	82,23	72,91	72,40	1,381
	7d	98,35	89,80	88,98	87,81	83,87	83,62	74,11	73,74	1,356
	28d	99,33	90,70	89,69	88,12	83,47	83,15	74,28	73,67	1,357
RMES2	1d	99,13	91,88	91,18	90,14	86,45	86,20	77,27	77,13	1,297
	3d	98,51	88,82	87,88	86,52	82,36	82,06	73,32	72,74	1,375
	7d	98,55	89,40	88,41	87,02	82,69	82,40	73,33	72,78	1,374
	28d	98,86	89,86	88,89	87,39	82,74	82,47	74,07	73,48	1,361
RMES5	1d	98,99	92,11	91,38	90,18	86,22	85,93	76,79	76,36	1,310
	3d	98,55	89,75	88,90	87,50	82,93	82,64	73,88	73,37	1,363
	7d	98,61	89,60	88,62	87,12	82,60	82,32	73,68	73,12	1,368
	28d	99,04	89,83	88,84	87,35	82,87	82,60	73,93	76,37	1,309

^(a) Massa residual (M.R.)

^(b) Fator de normalização (F.N.) = 100/Massa Residual

Tabela 4.14 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Produto	Idade (dias)	RMES1	RMES2	RMES5
Água combinada (%)	1	7,41	7,26	6,89
	3	9,45	9,69	8,80
	7	8,55	9,16	9,01
	28	8,63	9,00	9,21
Mg(OH) ₂ (%)	1	3,38	3,36	3,86
	3	4,06	4,38	4,51
	7	3,77	4,46	4,83
	28	5,05	4,83	4,81
Ca(OH) ₂ (%)	1	14,52	15,13	16,25
	3	16,02	17,09	18,81
	7	16,16	17,78	18,54
	28	19,10	19,13	18,42
CaCO ₃ (%)	1	21,61	20,27	20,75
	3	21,15	19,84	19,90
	7	21,59	20,59	19,61
	28	20,13	19,07	19,67

Tabela 4.15 – Frações de massa dos principais produtos de hidratação (%) na mesma base de não voláteis para RMES aos 1, 3, 7 e 28 dias.

Produto	Idade (dias)	RMES1	RMES2	RMES5
Água combinada (%)	1	9,75	9,41	9,02
	3	13,06	13,33	11,99
	7	11,60	12,58	12,32
	28	11,72	12,25	12,07
Mg(OH) ₂ (%)	1	4,45	4,36	5,06
	3	5,61	6,02	6,14
	7	5,12	6,13	6,61
	28	6,86	6,57	6,30
Ca(OH) ₂ (%)	1	19,11	19,62	21,28
	3	22,12	23,49	25,64
	7	21,91	24,43	25,36
	28	25,93	26,03	24,12
CaCO ₃ (%)	1	28,44	26,28	27,17
	3	29,22	27,27	27,12
	7	29,28	28,29	26,82
	28	27,32	25,95	25,76

Nas Figuras 4.22 a 4.24 e na Tabela 4.15 correspondente, observa-se que a incorporação do RMES tratado termicamente modifica a evolução dos produtos de hidratação de forma

dependente do teor adicionado. Na faixa entre 40 e 240 °C, associada à decomposição de C–S–H, AFt e AFm, verifica-se que, aos 1 dia, há redução progressiva do teor de água combinada com o aumento do teor de RMES (9,75% para RMES1; 9,41% para RMES2; 9,02% para RMES5). Esse comportamento indica efeito inicial de substituição parcial do cimento, com menor quantidade de produtos hidratados formados nas primeiras idades nas maiores dosagens.

Aos 3 dias, ocorre incremento significativo da água combinada, com destaque para RMES2 (13,33%) e RMES1 (13,06%), enquanto RMES5 apresenta valor inferior (11,99%). Esse resultado sugere que a dosagem intermediária favorece a aceleração da hidratação nessa idade, enquanto a maior substituição tende a redistribuir a cinética do processo. A partir de 7 dias, os valores tornam-se mais próximos entre si, e aos 28 dias convergem para uma faixa relativamente estreita ($\approx 11,7$ – $12,3\%$), indicando que, no longo prazo, o grau global de hidratação tende a se equilibrar entre os traços.

Na região entre 300 e 380 °C, correspondente à desidroxilação do $\text{Mg}(\text{OH})_2$, observa-se comportamento marcante para o RMES. Os teores aumentam progressivamente com a idade, partindo de aproximadamente 4,4–5,1% em 1 dia e atingindo 6,3–6,9% aos 28 dias. Diferentemente do RMBA, aqui a formação de brucita é mais pronunciada e constitui a principal assinatura termogravimétrica do material, refletindo o maior teor de MgO no resíduo dolomítico. O crescimento contínuo e relativamente estável desses valores indica hidratação gradual do MgO ao longo do tempo, sem picos abruptos nas primeiras idades.

Na faixa de 380 a 480 °C, associada à decomposição da portlandita, verifica-se aumento progressivo do teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em todas as misturas até 7 dias. RMES5 apresenta os maiores valores nas idades iniciais (21,28% em 1 dia; 25,64% em 3 dias; 25,36% em 7 dias), evidenciando maior contribuição inicial do CaO presente no resíduo. Entretanto, aos 28 dias ocorre inversão desse comportamento: RMES1 (25,93%) e RMES2 (26,03%) superam RMES5 (24,12%). Esse resultado indica que, embora maiores teores de resíduo promovam maior formação inicial de portlandita, a evolução final do sistema não é proporcional ao aumento da dosagem. A redistribuição da cinética pode estar associada à interação simultânea entre a hidratação do CaO e do MgO, que ocorre de maneira progressiva ao longo do tempo.

O teor de CaCO_3 , associado à faixa entre 530 e 780 °C, apresenta valores elevados desde 1 dia (≈ 26 – 28%) e variações moderadas ao longo das idades. Observa-se leve tendência de redução aos 28 dias em todos os traços, com valores finais entre 25,8% e 27,3%. Esse comportamento

indica que o carbonato atua predominantemente como fase residual estrutural, herdada do sistema, sem papel decisivo na diferenciação da reatividade entre as dosagens.

De forma integrada, os resultados mostram que o RMES tratado termicamente participa ativamente da hidratação por meio da conversão progressiva de CaO e MgO em Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 . Diferentemente do comportamento observado para o RMBA, no qual a portlandita é a fase dominante na diferenciação entre teores, no RMES a brucita assume papel mais relevante na evolução microestrutural, especialmente devido ao maior teor de MgO.

Entre as formulações, a RMES2 apresenta comportamento mais equilibrado: maior teor de água combinada aos 3 dias, evolução consistente de Ca(OH)_2 até 28 dias e formação progressiva de Mg(OH)_2 sem excessos iniciais. A RMES5 apresenta maior reatividade inicial em termos de portlandita, mas menor teor final aos 28 dias. Já a RMES1 apresenta evolução estável e intermediária ao longo do tempo. Em síntese, o RMES atua como adição dolomítica reativa, promovendo formação simultânea e gradual de portlandita e brucita. A diferenciação entre os traços está mais associada ao equilíbrio entre essas duas fases hidratadas do que a variações no teor de carbonato, e a dosagem intermediária demonstra comportamento mais homogêneo na redistribuição da cinética de hidratação ao longo do tempo.

4.1.1.4.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

Com o objetivo de avaliar o efeito do agente expansor, redutor de retração e resíduos de mármore tratados termicamente na estrutura dos poros das pastas cimentícias, realizou-se a análise porosimétrica por intrusão de mercúrio aos 28 dias de cura. Nas Figuras 4.25 e 4.26 são apresentadas, respectivamente, as curvas de distribuição diferencial e volume acumulado de poros. Na Tabela 4.16, também está apresentado os principais parâmetros quantitativos da estrutura porosa. A pasta REF apresentou porosidade total de 29,43%, diâmetro médio de 37,9 nm, volume total intrudido de 0,2205 mL/g e área superficial de 23,29 m²/g.

Figura 4.25 – Curvas de distribuição de tamanho de poros por porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) das pastas cimentícias: (a) aditivos comerciais; (b) resíduo de mármore da Bahia; (c) resíduo de mármore do Espírito Santo.

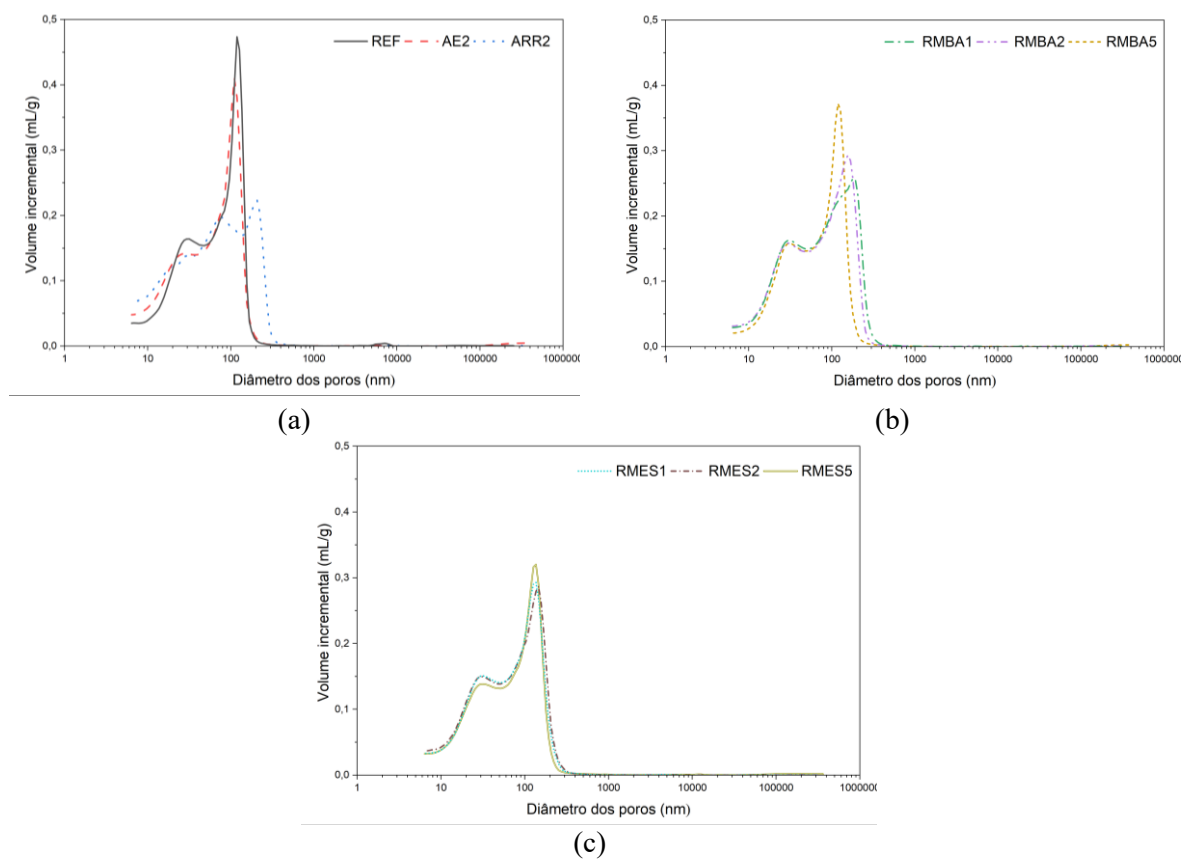
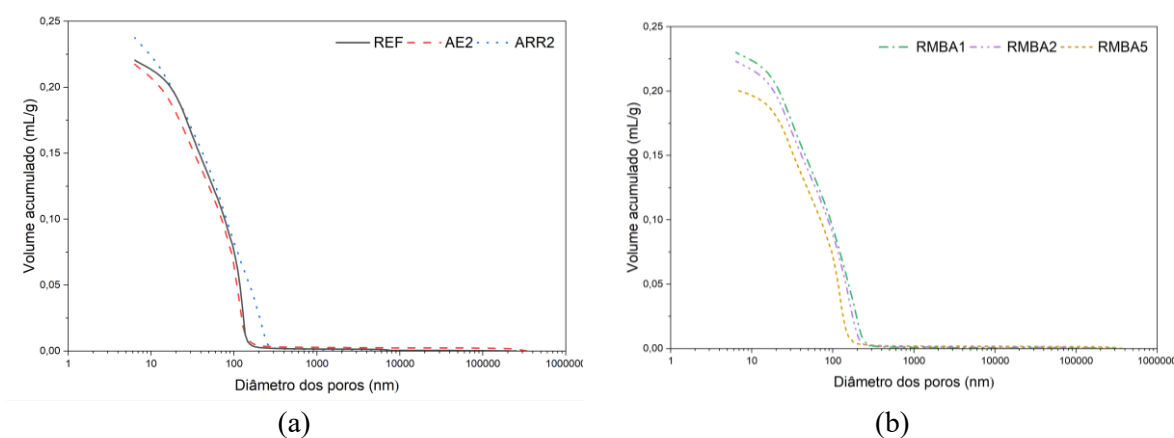
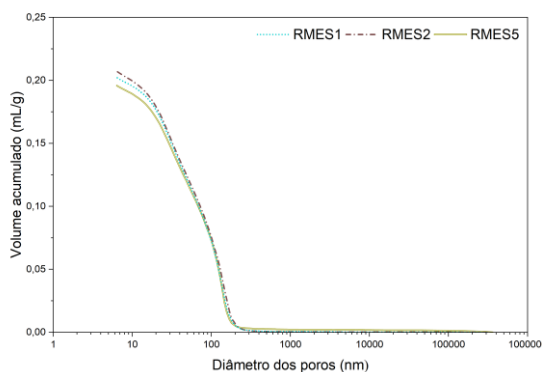


Figura 4.26 – Curvas de volume acumulado intrudido em função do diâmetro dos poros por PIM das misturas das pastas cimentícias: (a) aditivos comerciais; (b) resíduo de mármore da Bahia; (c) resíduo de mármore do Espírito Santo.





(c)

Tabela 4.16 – Características da estrutura porosa das pastas cimentícias obtidas por PIM.

Pasta	Porosidade total (%)	Diâmetro médio dos poros (nm)	Volume total intrudido (mL/g)	Área total dos poros (m ² /g)	Volume de mercúrio intrudido					
					Capilar grande (50-10000 nm)		Capilar médio (10-50 nm)		Poros de gel (6,1 - 10-nm)	
					(mL/g)	(%) em relação ao REF	(mL/g)	(%) em relação ao REF	(mL/g)	(%) em relação ao REF
REF	29,43	37,9	0,2205	23,29	0,1297	100,00	0,0827	100,00	0,0076	100,00
AE2	28,37	33,5	0,2173	25,92	0,1207	93,06	0,0832	100,60	0,0110	144,74
ARR2	30,35	33,1	0,2375	28,75	0,1363	105,09	0,0857	103,63	0,0150	197,37
RMBA1	30,12	41,7	0,2299	22,07	0,1421	109,56	0,0808	97,70	0,0066	86,84
RMBA2	30,15	40,1	0,2231	22,24	0,1350	104,09	0,0802	96,98	0,0070	92,11
RMBA5	28,14	40,8	0,2011	19,73	0,1191	91,83	0,0754	91,17	0,0049	64,47
RMES1	27,77	38,0	0,2022	21,30	0,1184	91,29	0,0763	92,26	0,0073	96,05
RMES2	27,98	37,3	0,2071	22,18	0,1212	93,45	0,0774	93,59	0,0082	107,89
RMES5	27,41	38,1	0,1958	20,55	0,1147	88,43	0,0720	87,06	0,0072	94,74

As curvas de distribuição diferencial de poros (Figura 4.25) indicam que todas as pastas apresentam pico principal na faixa de 100–200 nm, característica típica de pastas cimentícias hidratadas aos 28 dias. A pasta de referência (REF) apresenta o pico de maior intensidade ($\approx 0,47$ mL/g), com porosidade total de 29,43% e diâmetro médio de 37,9 nm, representando a estrutura capilar de base para comparação.

A incorporação do agente expensor (AE2) promoveu redução da intensidade do pico principal, mantendo-o na mesma faixa de diâmetro da REF, com leve alargamento da base da curva. Os dados quantitativos confirmam esse refinamento: redução de 3,6% na porosidade total (28,37%), diminuição de 6,94% nos capilares grandes e aumento expressivo de 44,74% nos poros de gel. Apesar da redução do volume total intrudido, houve aumento de 11,3% na área superficial, indicando segmentação dos poros maiores em poros menores dentro da mesma faixa capilar. Esse comportamento está associado à formação de produtos expansivos, como

portlandita e etringita, que preenchem parcialmente os vazios capilares. Resultados semelhantes foram relatados por Guo *et al.* (2025) e Liu *et al.* (2024), que associam o refinamento estrutural à hidratação controlada de sistemas contendo CaO–MgO.

O aditivo redutor de retração (ARR2) apresentou comportamento distinto, com alteração significativa do formato da curva diferencial e redistribuição ampla do volume poroso. Observa-se aumento simultâneo da porosidade total (30,35%), incremento de 5,09% nos capilares grandes, 3,63% nos capilares médios e expressivo aumento de 97,37% nos poros de gel. O diâmetro médio foi reduzido (33,1 nm), mas com aumento substancial da área superficial (+23,4%), indicando rede mais complexa e tortuosa. Diferentemente do AE2, o ARR2 não promove refinamento monotônico, mas reorganização estrutural ampla, com coexistência de aumento de poros maiores e menores. Esse comportamento é consistente com a atuação do ARR via modificação da solução dos poros e redução da tensão superficial, alterando a dinâmica de hidratação (He *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2022).

As misturas com resíduos de mármore apresentaram comportamento dependente do tipo e teor de resíduo. Para o RMBA, os teores de 1% e 2% resultaram em aumento da porosidade total (~30,1%), aumento do diâmetro médio (40–42 nm) e incremento dos capilares grandes (+9,56% e +4,09%), com redução da área superficial e dos poros de gel. As curvas indicam deslocamento para a direita, evidenciando aumento relativo de poros maiores, possivelmente associado ao efeito de diluição do cimento e às tensões internas iniciais geradas pela hidratação do CaO. Em contraste, o teor de 5% (RMBA5) promoveu redução da porosidade total (28,14%) e diminuição em todas as classes de poros (–8,17% grandes; –8,83% médios; –35,53% gel), indicando que, nessa dosagem, o efeito filer e a nucleação heterogênea tornam-se predominantes, resultando em matriz mais compacta. Esse comportamento é coerente com o mecanismo descrito por Siddique *et al.* (2021), no qual partículas finas atuam como pontos de nucleação e promovem densificação microestrutural.

Para o RMES, observou-se comportamento mais progressivo e consistente. Todas as dosagens apresentaram redução da porosidade total (27,77%–27,41%) e diminuição dos capilares grandes (91,29%–88,43% do REF) e médios (92,26%–87,06% do REF). Embora as curvas indiquem leve deslocamento para diâmetros maiores dentro da faixa capilar, o volume total de capilares grandes não aumentou, evidenciando que houve redistribuição interna e não ampliação da macroporosidade. O RMES5 apresentou a menor porosidade total (27,41%) e o menor volume total intrudido (0,1958 mL/g), indicando estrutura mais compacta entre os

sistemas avaliados. Esse comportamento pode ser associado à cinética mais lenta de hidratação do MgO em comparação ao CaO, promovendo reorganização gradual da rede porosa, conforme discutido por Guo *et al.* (2025).

Em síntese, os resultados de porosimetria indicam que as modificações na estrutura porosa são diretamente dependentes do tipo de adição e da dosagem incorporada. O agente expensor promoveu refinamento estrutural com redução da porosidade total e aumento da fração de poros de gel, enquanto o ARR2 resultou em reorganização mais ampla da rede capilar, com aumento simultâneo da porosidade total e da área superficial. Para os resíduos de mármore, o comportamento foi dependente da composição e do teor: o RMBA apresentou tendência de aumento de poros maiores em baixos teores e densificação em 5%, enquanto o RMES demonstrou redução consistente da porosidade total e reorganização progressiva da rede capilar. Esses resultados evidenciam que o equilíbrio entre efeito fíler, nucleação heterogênea e expansão controlada é determinante para a otimização da microestrutura.

4.1.2 Concretos convencionais

A dosagem dos concretos foi conduzida com o objetivo de analisar o efeito dos mitigadores de retração nas propriedades no estado fresco e endurecido, bem como de obter os parâmetros mecânica necessários para as simulações numéricas termomecânicas. As composições foram determinadas segundo o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), adotando-se relação água/cimento (a/c) de 0,50.

Inicialmente, foi elaborado um traço piloto com o intuito de determinar o teor ideal de argamassa, definido em 54%. A partir desse valor e com a consistência fixada em 130 ± 20 mm de abatimento, ensaio de tronco de cone, definiram-se as demais composições. Para atingir a consistência desejada, utilizou-se um teor de 0,55% de aditivo superplastificante em massa de cimento, valor mantido constante para todos os traços.

Cabe destacar que não foram realizados ajustes de dosagem em função das massas específicas do cimento e dos mitigadores de retração, ou seja, as substituições foram feitas em base mássica, sem considerar variações volumétricas. Foram produzidos cinco traços de concreto, mantendo-se a nomenclatura utilizada nas pastas: REF, AE2, ARR2, RMBA5 e RMES5. Na Tabela 4.17 estão apresentadas as composições das misturas produzidas nesta etapa, evidenciando a uniformidade do método de dosagem.

Tabela 4.17 – Composições dos traços unitários de concreto.

Traço	Cimento	Mitigador de retração	Areia composta	Brita 12,5	Aditivo Superplastificante (%)	a/c	Consumo de cimento (kg/m³)
REF	1,00	-	2,24	2,76	0,55	0,50	363,62
AE2	1,00	0,02	2,24	2,76	0,55	0,50	364,67
ARR2	1,00	0,02	2,24	2,76	0,55	0,50	367,17
RMBA5	1,00	0,05	2,24	2,76	0,55	0,50	364,30
RMES5	1,00	0,05	2,24	2,76	0,55	0,50	367,10

4.1.2.1 Avaliação das propriedades do estado fresco

Para analisar o comportamento dos concretos no estado fresco, foram realizados os ensaios de consistência e de massa específica, conforme as normas ABNT NBR 16889 (2020) e o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Considerando que as porcentagens de adição dos materiais empregados foram relativamente baixas e que suas características físicas apresentaram semelhanças, obteve-se o mesmo teor de aditivo superplastificante em todos os traços. Essa condição assegurou que as variações observadas nos resultados pudessem ser atribuídas predominantemente ao efeito dos mitigadores de retração, e não à diferença no teor de aditivo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios no estado fresco.

Traço	Consistência (mm)	Massa específica (kg/m³)
REF	130	2363,51
AE2	120	2377,65
ARR2	140	2393,92
RMBA5	130	2386,14
RMES5	110	2404,53

Observa-se uma tendência geral de uniformidade entre os resultados de consistência e massa específica, indicando boa reprodutibilidade das misturas. Entretanto, nota-se que o concreto ARR2 apresentou a maior consistência (140 mm), comportamento associado à redução da tensão superficial da água promovida pelo aditivo redutor de retração, o que favorece maior mobilidade da mistura. Em contraste, o concreto RMES5 registrou a menor consistência (110 mm), possivelmente associada ao caráter dolomítico do resíduo e ao maior teor de MgO, que pode aumentar a demanda de água e reduzir a fluidez da mistura. Ambos os traços apresentaram, simultaneamente, maiores valores de massa específica, refletindo o empacotamento mais eficiente dos sólidos e a baixa incorporação de ar na mistura.

4.1.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas dos concretos foi realizada por meio dos ensaios de resistência à compressão axial simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão, conforme as normas ABNT NBR 5739 (2018), NBR 7222 (2011) e NBR 8522 (2017), respectivamente. Os resultados médios são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Resultados dos ensaios de propriedades mecânicas.

Ensaio	Resultados		REF	AE2	ARR2	RMBA5	RMESS
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	Média	18,1	16,6	14,6	16,8	18,2
		DP	0,16	0,69	0,79	0,54	0,61
	3 dias	Média	24,5	23,3	21,3	22,4	22,4
		DP	0,23	0,63	0,18	0,35	0,97
	7 dias	Média	28,0	27,8	24,4	24,5	25,6
		DP	0,29	0,64	0,19	0,55	1,35
	28 dias	Média	34,2	31,9	27,7	30,1	31,4
		DP	0,35	1,26	0,29	0,28	1,47
Resistência à tração (MPa)	28 dias	Média	3,7	3,3	3,0	4,1	3,0
		DP	0,17	0,09	0,14	0,16	0,39
Módulo de elasticidade (GPa)	28 dias	Média	35,8	36,7	36,3	38,6	39,8
		DP	1,33	0,95	1,19	0,93	1,38

Os resultados demonstram que todas as composições apresentaram aumento progressivo de resistência com a idade, refletindo o avanço da hidratação do sistema cimentício. O concreto de referência (REF) manteve valores elevados e estáveis ao longo das idades analisadas; contudo, algumas misturas modificadas apresentaram desempenho equivalente ou superior em idades específicas, como observado para o RMES5 em 1 dia e para o AE2 em 7 dias. As variações entre os traços refletem a influência do tipo de mitigador incorporado e sua interação com a matriz cimentícia no contexto do compósito concreto, considerando também o papel dos agregados e da zona de transição interfacial. Assim, o comportamento mecânico observado não reproduz integralmente as tendências das pastas, evidenciando que os efeitos dos aditivos se manifestam de maneira distinta no sistema concreto.

A resistência à compressão aumentou progressivamente em todas as misturas, com ganhos médios de 88% entre 1 e 28 dias. O agente expensor (AE2) apresentou valores ligeiramente inferiores aos da referência, diferença atribuída à expansão inicial e à redistribuição de produtos de hidratação, o que pode retardar o ganho de resistência nas primeiras idades. Este comportamento é típico de sistemas contendo CaO-MgO, em que parte da energia de hidratação

é direcionada à formação de produtos expansivos (Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2), conforme descrito por Liu *et al.* (2024) e Guo *et al.* (2025). Hua *et al.* (2022a) confirmam que dosagens reduzidas de agente expansivo à base de CaO podem inclusive incrementar a resistência inicial, ao passo que teores elevados promovem redução progressiva de resistência devido à expansão excessiva e danos microestruturais internos.

É importante ressaltar que os resultados obtidos em concreto diferem parcialmente daqueles observados nas pastas. Enquanto nas pastas os efeitos dos aditivos se manifestam de forma mais direta na matriz cimentícia, no concreto o desempenho é influenciado também pela presença dos agregados e pela zona de transição interfacial. Assim, as variações de resistência observadas no concreto refletem não apenas a cinética de hidratação da pasta, mas também as interações microestruturais no compósito como um todo.

O agente redutor de retração (ARR2) apresentou as menores resistências médias em todas as idades, atingindo 27,7 MPa aos 28 dias, o que é equivalente a uma redução de 19% em relação ao REF. Tal desempenho está associado ao efeito de retardamento da hidratação causado pela modificação da tensão superficial da água e redução da difusividade iônica nos poros, fenômeno já relatado por He *et al.* (2020). Aghaee *et al.* (2023b) ressaltam que, embora agentes redutores de retração sejam eficazes no controle volumétrico, eles podem prejudicar a microestrutura do concreto e a zona de transição interfacial (ZTI) em teores elevados, comprometendo o desempenho mecânico, o que corrobora os resultados obtidos com o ARR2.

Os concretos contendo resíduo de mármore tratado termicamente, RMBA5 e RMES5, apresentaram comportamento intermediário, com desempenho mecânico inferior ao concreto de referência, porém mantendo níveis satisfatórios de resistência. O RMBA5 atingiu 30,1 MPa aos 28 dias e o RMES5 31,4 MPa, valores cerca de 12% e 8% inferiores ao REF, respectivamente. Esses resultados indicam que, embora a incorporação dos resíduos não tenha superado a resistência da mistura de referência, também não comprometeu de forma significativa o desempenho estrutural. Observa-se leve redução nas idades iniciais (1 a 7 dias), seguida de ganho progressivo até 28 dias, comportamento coerente com a hidratação gradual dos óxidos reativos (CaO e MgO), conforme indicado pelos resultados de TG/DTG.

Alguns estudos explicam as diferenças observadas entre RMBA5 e RMES5: Hua *et al.* (2022a) demonstram que o hidróxido de cálcio adicional produzido pela hidratação de agentes à base de CaO acelera a hidratação de adições minerais, promovendo a formação de gel C-S-H e

densificação microestrutural, o que fundamenta o ganho de resistência observado nos concretos com resíduos tratados. Zhao *et al.* (2021) explicam que, em sistemas com agentes expansivos compostos de CaO-MgO, o efeito de expansão do CaO é predominante nos estágios iniciais, enquanto o MgO contribui principalmente com expansão mais gradual ao longo do tempo, o que justifica o comportamento diferenciado entre RMBA5 e RMES5 nas idades iniciais. Shrestha *et al.* (2024) observaram em compósitos cimentícios de alta resistência que a incorporação de agentes expansivos à base de CaO e MgO em dosagens de 3-6% foi eficaz na redução da retração autógena, validando a estratégia de utilização de teores moderados.

Na resistência à tração aos 28 dias, observa-se que, com exceção do traço RMBA5, todas as misturas apresentaram valores inferiores ao concreto de referência, comportamento condizente com os resultados obtidos em compressão. O RMBA5 destacou-se com 4,1 MPa, superando em aproximadamente 11% o REF (3,7 MPa), indicando que a expansão moderada promovida pelo resíduo calcítico pode ter contribuído para a redução de microfissuras internas e para a melhoria da coesão da matriz cimentícia.

Por outro lado, AE2 (3,3 MPa), ARR2 (3,0 MPa) e RMES5 (3,0 MPa) apresentaram reduções em relação ao REF, o que pode estar associado à redistribuição da porosidade e, no caso do RMES5, à cinética mais lenta de hidratação do MgO, que não resultou em ganho adicional de resistência à tração nas idades avaliadas.

Na resistência à tração aos 28 dias, observa-se que, com exceção do traço RMBA5, todas as misturas apresentaram valores inferiores ao concreto de referência, comportamento condizente com os resultados obtidos em compressão. O RMBA5 destacou-se com 4,1 MPa, superando em aproximadamente 11% o REF (3,7 MPa), indicando que a expansão moderada promovida pelo resíduo calcítico pode ter contribuído para a redução de microfissuras internas e para a melhoria da coesão da matriz cimentícia. Por outro lado, AE2 (3,3 MPa), ARR2 (3,0 MPa) e RMES5 (3,0 MPa) apresentaram reduções em relação ao REF, o que pode estar associado à redistribuição da porosidade e, no caso do RMES5, à cinética mais lenta de hidratação do MgO, que não resultou em ganho adicional de resistência à tração nas idades avaliadas.

O módulo de elasticidade aos 28 dias apresentou variação relativamente discreta entre os traços, situando-se entre 35,8 e 39,8 GPa. Diferentemente do comportamento observado na resistência à compressão, todos os concretos modificados apresentaram módulo igual ou superior ao da referência, inclusive o ARR2, que havia mostrado redução em resistência. Esse resultado indica

que, para este conjunto experimental, o módulo não acompanhou diretamente a tendência da resistência à compressão. O maior valor foi registrado para o RMES5 (39,8 GPa), seguido do RMBA5 (38,6 GPa). Esse comportamento pode estar associado não apenas à resistência da matriz, mas também à reorganização da estrutura porosa e à possível contribuição da rigidez dos produtos formados (Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2), que podem aumentar a rigidez global do compósito mesmo sem incremento proporcional da resistência à compressão.

De forma comparativa, observa-se que os sistemas modificados apresentaram comportamentos mecânicos distintos em função do tipo de mitigador incorporado. O AE2 promoveu leve redução na resistência à compressão em relação à referência, mantendo módulo de elasticidade discretamente superior, indicando que a expansão controlada não comprometeu significativamente a rigidez global do compósito. O ARR2 apresentou as menores resistências à compressão e à tração, embora com módulo de elasticidade superior ao da referência, sugerindo que a reorganização da microestrutura alterou a deformabilidade do material sem ganho proporcional de resistência.

Entre os resíduos tratados termicamente, o RMBA5 destacou-se pelo melhor desempenho em resistência à tração e módulo de elasticidade, apesar de apresentar resistência à compressão inferior à referência. Já o RMES5 apresentou comportamento mais equilibrado entre compressão e rigidez, com módulo de elasticidade mais elevado entre os traços e resistência à compressão próxima aos demais modificados, ainda que inferior ao concreto de referência.

Assim, em termos comparativos, os resíduos tratados demonstraram desempenho mecânico intermediário e estável, sem perdas estruturais significativas, sendo que o RMBA5 apresentou melhor resposta em tração e o RMES5 maior rigidez global. Esses resultados indicam que a substituição parcial por RMBA ou RMES é mecanicamente viável, desde que em dosagens controladas.

4.1.3 Estratégia de extrapolação das deformações experimentais em pastas cimentícias para a escala do concreto

Com base na estratégia descrita na metodologia, foi realizada a homogeneização das curvas de retração/expansão das pastas cimentícias para representar o comportamento esperado do concreto, utilizando-se as relações teóricas entre ambas, conforme proposto por Hansen (1987) e Bissonnette *et al.* (1999).

A Equação (11) foi aplicada individualmente a cada mistura, utilizando: (i) as curvas experimentais de retração/expansão das pastas correspondentes, obtidas conforme a ASTM C1698; (ii) os módulos de elasticidade das pastas determinados pelo ensaio EMM-IRM ao longo do tempo; e (iii) as composições volumétricas dos concretos apresentadas na Tabela 4.17. Para cada traço, a evolução temporal da deformação medida nas pastas ($\epsilon_{sh,p}$) foi utilizada como dado de entrada para o cálculo da deformação equivalente do concreto ($\epsilon_{sh,c}$). Embora a Equação (11) tenha sido originalmente proposta para estimar a deformação última ($\epsilon_{sh,c, ult}$), neste estudo ela foi adaptada para aplicação incremental ao longo do tempo, permitindo estimar a evolução temporal da retração e/ou expansão equivalente do concreto a partir dos resultados experimentais das pastas cimentícias. O volume relativo de agregados (V_a) foi determinado a partir das proporções volumétricas de cada traço. A razão m , correspondente ao quociente entre o módulo de elasticidade dos agregados e o da pasta, foi calculada utilizando os valores experimentais do módulo das pastas (EMM-IRM) e assumindo-se módulo de elasticidade dos agregados igual a 39 GPa, conforme reportado por Azenha et al. (2017).

Na etapa de homogeneização das curvas de retração, foram considerados apenas os teores selecionados para a produção dos concretos, ou seja, REF, AE2, ARR2, RMBA5 e RMES5, definidos com base na coerência observada entre trabalhabilidade, deformação, desempenho mecânico e evolução da hidratação nas pastas. A escolha das maiores porcentagens de resíduo teve como objetivo avaliar o comportamento sob condições mais críticas, considerando o potencial expansivo identificado experimentalmente.

Na Figura 4.27 apresenta as curvas de deformação obtidas experimentalmente para as pastas cimentícias, enquanto na Figura 4.28 ilustra as curvas homogeneizadas correspondentes, calculadas por meio da Equação 11, com base nos parâmetros determinados a partir das composições dos concretos e das propriedades das pastas. A análise comparativa entre as curvas de deformação por retração/expansão antes e após a aplicação do procedimento de homogeneização evidenciou aspectos importantes sobre a viabilidade da metodologia proposta para representar o comportamento do concreto a partir dos ensaios em pastas cimentícias.

Figura 4.27 – Curvas de retração/expansão das pastas cimentícias antes da homogeneização.

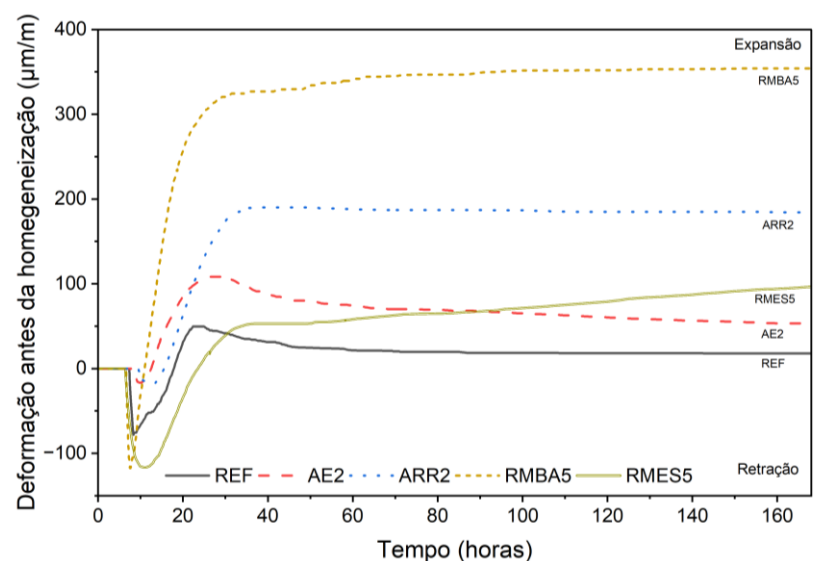
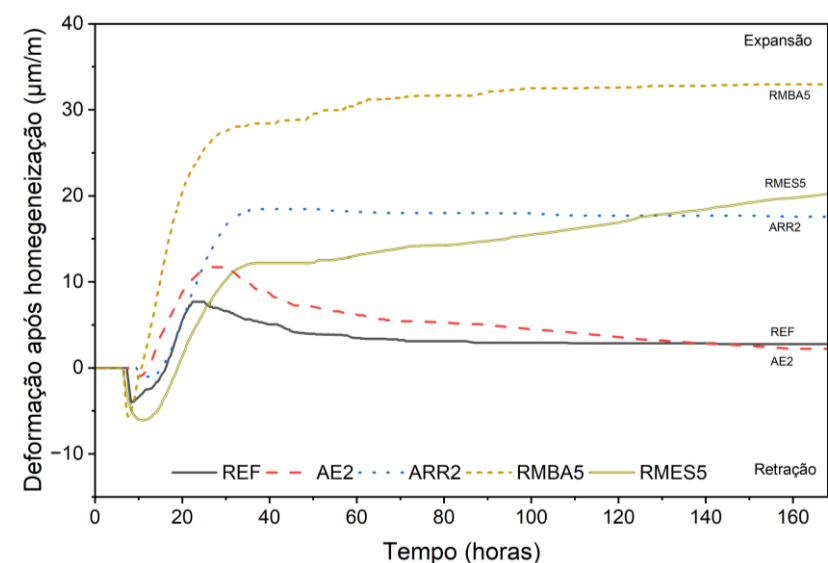


Figura 4.28 – Curvas de retração/expansão equivalentes do concreto após a homogeneização.



A aplicação incremental da Equação 11 (Hansen, 1987) resultou em uma redução da magnitude das deformações. Enquanto as pastas puras apresentaram valores máximos da ordem de 350 $\mu\text{m/m}$ (RMBA5), as curvas homogeneizadas, representativas do concreto, apresentaram valores próximos de 33 $\mu\text{m/m}$, correspondendo a uma redução média de aproximadamente 90% ou, de forma equivalente, a uma razão $\epsilon_{sh,c}/\epsilon_{sh,p} \approx 0,10$. Esse resultado é fisicamente coerente com o princípio de que os agregados, por constituírem a fase rígida e não retrátil do compósito, restringem as deformações da matriz cimentícia. No entanto, a razão obtida apresenta-se ligeiramente inferior às faixas reportadas por Bissonnette *et al.* (1999) e Hansen (1987), que

indicam valores típicos entre 0,15 e 0,25 (ou reduções de 75%-85%) para concretos com 25%-35% de volume de pasta. Mesmo considerando diferenças de materiais, proporções e condições experimentais, a discrepância observada requer uma análise crítica dos parâmetros empregados na extrapolação.

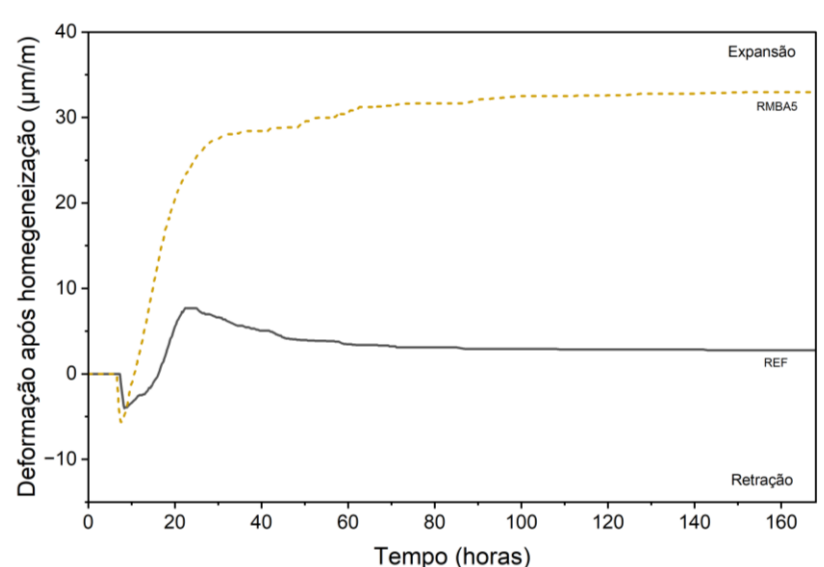
A Equação 11, fundamentada na teoria dos compósitos elásticos, depende essencialmente de dois parâmetros: o volume relativo dos agregados (V_a) e a razão entre os módulos de elasticidade dos agregados e da pasta (m). A relação $\epsilon_{sh,c, ult}/\epsilon_{sh,p, ult}$ é inversamente proporcional tanto a V_a quanto a m , refletindo o efeito de restrição imposto pelos agregados. No contexto deste estudo, os concretos analisados apresentaram baixo teor de pasta, em torno de 0,30, e pastas com baixos módulos de elasticidade nas idades iniciais, principalmente nas misturas ARR2, RMBA5 e RMES5. Nessas condições, a razão m assume valores significativamente altos, em alguns casos superiores a 7, o que acentua o termo $(1,72 V_a/m)$ na Equação 11 e, consequentemente, amplifica a redução relativa. Além disso, deve-se considerar a diferença de escala temporal: a equação original descreve a retração final por secagem (longo prazo), enquanto, neste estudo, foi aplicada à evolução temporal da retração autógena, o que pode superestimar o efeito restritivo nas primeiras idades. Dessa forma, a redução média de 90% obtida nas misturas é compatível com o limite superior reportado pela literatura, refletindo a forte influência do esqueleto granular e a elevada rigidez relativa do concreto estudado.

Observa-se ainda que, apesar da expressiva redução de magnitude, a homogeneização preservou as tendências qualitativas entre as misturas, mantendo a hierarquia de comportamento observada nas pastas: a mistura RMBA5 permaneceu como a mais expansiva, ARR2 apresentou expansão intermediária, RMES5 demonstrou expansão mais moderada, AE2 exibiu expansão inicial seguida de retração, e REF manteve-se praticamente neutra, com leve retração estabilizada. Ou seja, a proporcionalidade relativa entre as misturas foi preservada, indicando que a metodologia, embora tenha reduzido as magnitudes absolutas, manteve a fidelidade comparativa entre sistemas.

Apesar dos aspectos favoráveis observados na extrapolação baseada em pastas, a principal questão decorrente desses resultados refere-se à adequação dos valores homogeneizados para representar o comportamento real dos concretos nas simulações termomecânicas. As curvas homogeneizadas apresentaram limitações associadas à razão $\epsilon_{sh,c, ult}/\epsilon_{sh,p, ult}$ inferior à reportada por Bissonnette *et al.* (1999), o que sugere uma possível subestimação das deformações. Além

disso, a equação é sensível aos parâmetros V_a e m , cuja determinação experimental precisa é fundamental; e as hipóteses simplificadas de Hansen, coeficientes de Poisson fixos e material bifásico ideal, podem não capturar plenamente a complexidade de sistemas com múltiplas adições minerais. Dessa forma, optou-se pela implementação das curvas REF e RMBA5, Figura 4.29, nas análises numéricas, de modo a avaliar a condição mais crítica e verificar a confiabilidade dos modelos termomecânicos propostos nesta pesquisa.

Figura 4.29 – Curvas de retração/expansão homogeneizadas para as misturas REF e RMBA5



4.1.4 Análises complementares para validação da estratégia de homogeneização

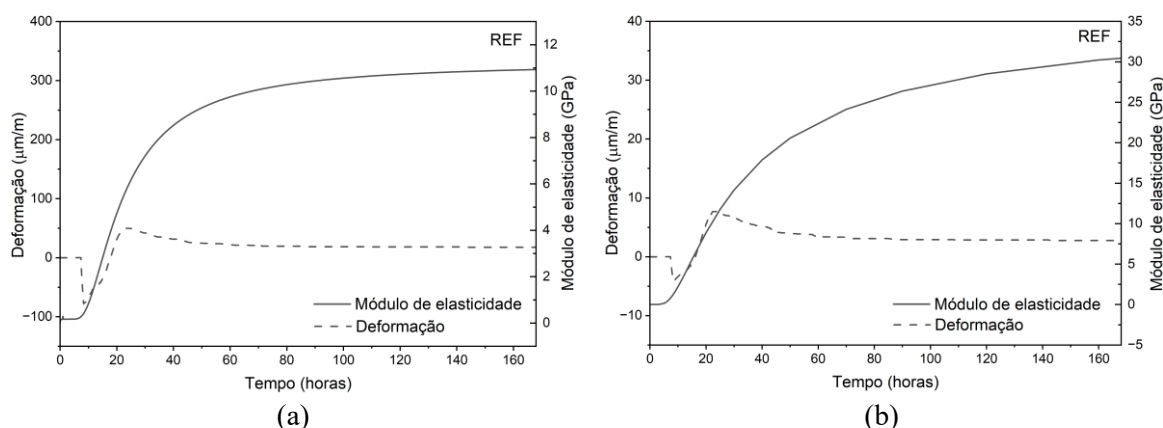
4.1.4.1 Avaliação da relação entre ganho de rigidez e ocorrência da expansão

Esta análise teve como objetivo avaliar a relação entre o ganho de rigidez do material e o instante de ocorrência das deformações expansivas nas idades iniciais. Para esse fim, foram selecionadas duas misturas representativas, REF e RMBA5, de forma a permitir a comparação entre padrões distintos de evolução volumétrica. Inicialmente, foram considerados os resultados obtidos em pastas cimentícias, que representam o comportamento intrínseco das misturas, sem a influência da restrição imposta pelos agregados. Em seguida, esses resultados foram comparados com aqueles obtidos a partir da extrapolação das curvas de deformação para a escala de concreto, conforme a metodologia de homogeneização descrita anteriormente.

Na Figura 4.30 apresenta a evolução da deformação em função do módulo de elasticidade para a mistura de referência (REF). A Figura 4.30(a) corresponde aos resultados experimentais

obtidos em pasta, enquanto a Figura 4.30(b) apresenta os resultados obtidos após a aplicação do procedimento de homogeneização para a escala de concreto.

Figura 4.30 – Relação entre deformação e módulo de elasticidade para a mistura de referência (REF): (a) resultados experimentais em pasta; (b) resultados homogeneizados em concreto.



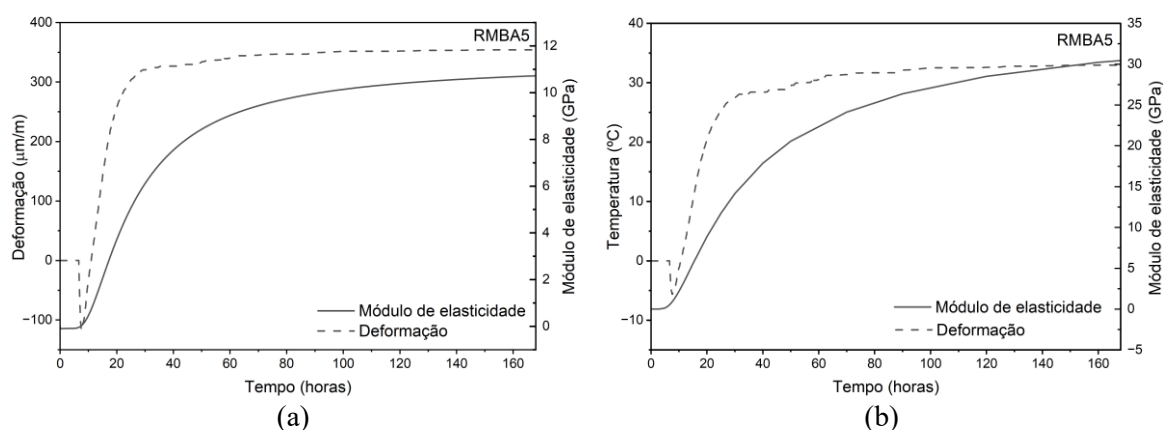
Nos ensaios realizados em pasta, observa-se inicialmente uma retração, seguida por uma expansão moderada, da ordem de aproximadamente 50 $\mu\text{m/m}$ por volta de 24 h, com posterior estabilização em valores próximos de 17 $\mu\text{m/m}$ ao final do período analisado. Essa expansão ocorre em um intervalo no qual o módulo de elasticidade da pasta ainda apresenta valores relativamente baixos ($\approx 5,45$ GPa), indicando que a matriz cimentícia se encontra em estágio inicial de consolidação. Nessa fase, a estrutura ainda possui elevada capacidade de acomodação de deformações, de modo que o desenvolvimento da expansão ocorre concomitantemente ao ganho progressivo de rigidez do material.

Para a escala de concreto, a deformação obtida a partir da curva homogeneizada apresenta comportamento qualitativamente semelhante, porém com magnitudes significativamente menores, com variações discretas em torno de valores próximos de zero e uma expansão máxima da ordem de 7 $\mu\text{m/m}$. Em contrapartida, observa-se um crescimento mais acelerado do módulo de elasticidade, atingindo valores próximos a 11 GPa nas mesmas idades, refletindo o efeito da presença dos agregados e da redução do volume relativo de pasta na mistura. Nota-se ainda que o ganho de rigidez ocorre praticamente de forma simultânea ao início da expansão, em um intervalo aproximado entre 10 e 30 horas, caracterizando uma fase de transição microestrutural do material.

De modo geral, observa-se uma evolução simultânea entre o ganho de rigidez e a deformação homogeneizada, porém com magnitudes de deformação reduzidas, indicando que a expansão ocorre enquanto o material ainda se encontra em processo de consolidação.

Para a mistura contendo resíduo de mármore tratado termicamente (RMBA5), na Figura 4.31 apresenta a evolução da deformação em função do módulo de elasticidade, sendo a Figura 4.31(a) referente aos resultados experimentais em pasta e a Figura 4.31(b) correspondente aos resultados obtidos após a homogeneização para a escala de concreto.

Figura 4.31 – Relação entre deformação e módulo de elasticidade para a mistura de RMBA5: (a) resultados experimentais em pasta; (b) resultados homogeneizados em concreto.



Nos ensaios em pasta (Figura 4.31(a)), observa-se uma tendência de expansão contínua ao longo do tempo, atingindo aproximadamente 320 µm/m em cerca de 30 h e alcançando valores próximos de 350 µm/m ao final do período monitorado. O módulo de elasticidade da pasta apresenta crescimento progressivo, partindo de valores iniciais próximos de 3 GPa e estabilizando-se em torno de 11 GPa. Nota-se que a expansão ocorre majoritariamente enquanto o material ainda apresenta rigidez relativamente baixa, indicando que uma parcela significativa da deformação se desenvolve em um estágio inicial de formação da microestrutura.

Ao analisar o comportamento após a homogeneização para a escala de concreto (Figura 4.31(b)), observa-se a manutenção do padrão evolutivo, porém com redução expressiva das magnitudes. A deformação máxima reduz-se para cerca de 33 µm/m, valor correspondente a aproximadamente 9,4% da expansão observada na pasta, evidenciando o efeito de restrição associado à presença dos agregados e ao menor volume relativo de pasta. O módulo de

elasticidade apresenta crescimento acelerado, alcançando valores próximos de 14 GPa nas primeiras 30 h, caracterizando um endurecimento precoce do compósito.

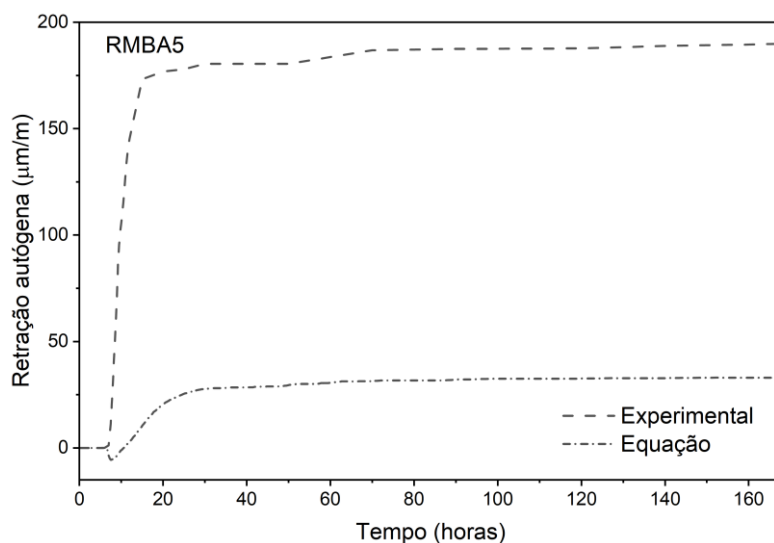
Observa-se, ainda, que a expansão ocorre predominantemente enquanto o módulo de elasticidade ainda está em fase de crescimento, isto é, antes que o material atinja níveis elevados de rigidez. À medida que o módulo se aproxima da estabilização, as curvas de deformação e rigidez tornam-se praticamente paralelas, indicando uma redução progressiva da taxa de variação das deformações.

Em síntese, os resultados experimentais indicam que o potencial expansivo observado em pasta é significativamente atenuado quando analisado em escala de concreto, em função do efeito de restrição interna e da evolução da rigidez do compósito nas idades iniciais. A análise conjunta da deformação e do módulo de elasticidade ao longo do tempo fornece, assim, subsídios importantes para a compreensão do comportamento volumétrico das misturas estudadas, servindo de base para as análises estruturais apresentadas nos capítulos subsequentes.

4.1.4.2 Ensaio experimental de retração autógena em concreto

Na Figura 4.32 apresenta a curva experimental de retração autógena obtida para o concreto correspondente ao traço considerado mais crítico em termos de potencial expansivo (RMBA5), comparada com a curva homogeneizada previamente estimada por meio da Equação 11. Observa-se que o comportamento experimental evidencia uma tendência claramente expansiva nas idades iniciais, com ganho volumétrico logo após o tempo de pega e posterior estabilização gradual das deformações ao longo do tempo, aproximadamente após 50 horas.

Figura 4.32 – Comparação entre a deformação autógena experimental e a curva homogeneizada para o concreto RMBA5.



A expansão máxima medida experimentalmente atingiu cerca de 190 $\mu\text{m/m}$, valor substancialmente superior ao estimado pela homogeneização ($\approx 33 \mu\text{m/m}$). Esse resultado indica que a Equação 11 subestima de forma significativa a magnitude real da expansão quando aplicada a concretos contendo adições minerais ativas com potencial expansivo. Ainda assim, nota-se que a evolução temporal das deformações apresenta boa coerência qualitativa entre as curvas experimental e homogeneizada, com ocorrência do pico expansivo nas primeiras idades e tendência de estabilização em intervalos de tempo semelhantes.

Do ponto de vista físico, o resultado experimental confirma que o concreto RMBA5 desenvolve uma expansão efetiva e duradoura, associada à atuação do resíduo de mármore tratado termicamente, cuja hidratação promove a formação de produtos expansivos. A discrepância observada entre as magnitudes experimental e estimada pode ser atribuída às hipóteses simplificadoras inerentes à Equação 11, que representa o concreto como um compósito elástico bifásico, não incorporando explicitamente a interação entre os processos de hidratação, expansão química e evolução microestrutural da matriz cimentícia.

De modo geral, o ensaio experimental evidencia que a metodologia de homogeneização empregada é capaz de reproduzir adequadamente a tendência evolutiva da deformação autógena, porém apresenta limitações relevantes na quantificação da magnitude da expansão para concretos com agentes expansores não comerciais. Esse comportamento indica a

necessidade de calibração ou ajuste da estratégia de extrapolação quando aplicada a materiais com mecanismos expansivos mais complexos.

Além disso, os resultados reforçam que a efetividade da expansão na mitigação da retração autógena e das tensões iniciais não depende apenas da magnitude da deformação, mas também da relação temporal entre a ocorrência da expansão e o desenvolvimento da rigidez do material. Observou-se que a expansão ocorre predominantemente em idades muito iniciais, quando o módulo de elasticidade ainda se encontra em evolução, o que pode limitar sua conversão em tensões compressivas efetivas.

Diante dessas evidências, torna-se pertinente avaliar como as curvas de deformação extrapoladas influenciam o comportamento estrutural do concreto quando inseridas em um contexto termomecânico representativo. Assim, a seção seguinte apresenta os resultados da análise numérica desenvolvida, na qual se investigam os efeitos do agente expensor sobre a evolução das tensões e a resposta estrutural de um muro de arrimo nas primeiras idades.

4.2 ANÁLISES NUMÉRICAS

As análises numéricas apresentadas neste capítulo foram conduzidas com base nas estratégias de modelagem descritas no Capítulo 3, utilizando o software DIANA FEA 10.5. O objetivo principal desta etapa consiste em avaliar o comportamento termomecânico de um muro de arrimo nas primeiras idades, considerando os efeitos combinados da evolução térmica, das deformações autógenas e da ação de um agente expensor não comercial.

O modelo numérico foi implementado de forma consistente com as hipóteses, condições de contorno e propriedades dos materiais previamente definidas, assegurando a coerência entre a etapa metodológica e a fase de análise. Dessa forma, busca-se investigar como as diferenças observadas experimentalmente entre as misturas refletem-se no desenvolvimento de tensões, deformações e potenciais mecanismos de fissuração em escala estrutural.

4.2.1 Simulações numéricas

As simulações numéricas desenvolvidas nesta seção baseiam-se em uma abordagem termomecânica desacoplada, estruturada em duas etapas sequenciais. Inicialmente, um modelo térmico foi empregado para determinar a evolução da temperatura no concreto em função do calor liberado pelo processo de hidratação. Em seguida, os resultados térmicos obtidos foram

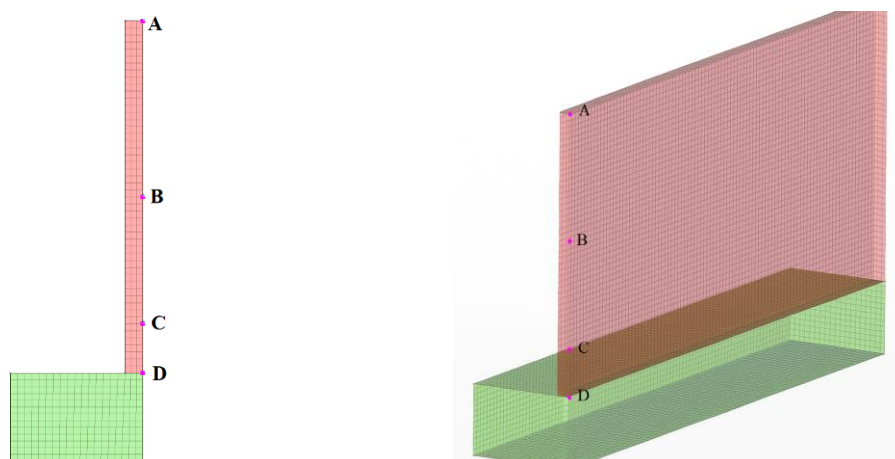
utilizados como entrada em um modelo mecânico não linear, destinado à avaliação dos estados de tensão e dos possíveis mecanismos de fissuração da estrutura ao longo do tempo.

A representação das deformações autógenas e expansivas foi realizada a partir das curvas de retração/expansão homogeneizadas (Figura 4.29), obtidas experimentalmente e adaptadas conforme a Equação 11 proposta por Hansen (1987). Essa estratégia permitiu incorporar, de forma diferenciada, o comportamento das misturas sem agente expensor (REF) e com agente expensor não comercial (RMBA5), possibilitando a análise da influência do mecanismo expansivo sobre a evolução das tensões e deformações no muro de arrimo durante as primeiras idades.

Foram realizados cálculos numéricos com o objetivo de avaliar qualitativamente o impacto do agente expansivo sobre a distribuição de tensões e deformações em um muro de arrimo idealizado, representativo das condições de estudo. As análises referem-se ao período compreendido entre o instante de concretagem da parede (aos 28 dias de idade da base) e o término dos 7 dias subsequentes (168 horas), considerando-se duas condições distintas: concreto sem agente expensor (REF) e concreto com agente expensor não comercial (RMBA5).

Para a interpretação dos resultados térmicos e mecânicos, foram selecionados quatro pontos principais ao longo do plano de simetria YZ da parede: (A) o topo da parede, (B) a região de maior temperatura, (C) a região próxima à base e (D) a interface entre a parede e a base, conforme ilustrado na Figura 4.33. A seleção desses pontos baseou-se em critérios físicos e estruturais, visando capturar regiões representativas de diferentes condições de restrição e gradientes térmicos ao longo do elemento. O ponto A foi escolhido por representar uma região com menor restrição e maior exposição ao ambiente, sensível à dissipação térmica e à deformação livre. O ponto B corresponde à região de temperatura máxima, relevante para avaliar os efeitos da hidratação e o desenvolvimento de tensões térmicas. O ponto C foi definido próximo à base para representar zonas com maior restrição estrutural, nas quais se esperam maiores níveis de tensões induzidas. Por fim, o ponto D foi selecionado na interface parede-base, região crítica do ponto de vista estrutural, caracterizada pela transferência de esforços e pela possível concentração de tensões devido à restrição imposta pela fundação.

Figura 4.33 – Pontos analisados no plano de simetria YZ do muro de arrimo.

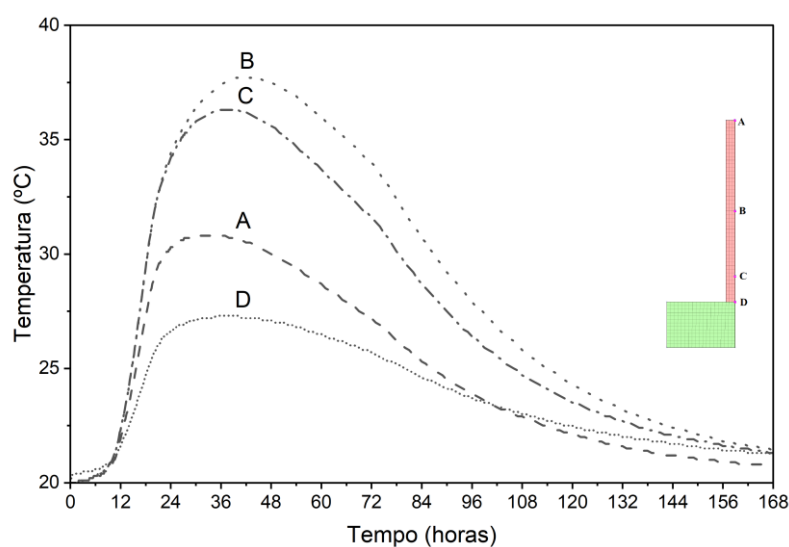


As simulações numéricas foram então conduzidas com base nos parâmetros definidos, possibilitando avaliar a coerência dos resultados térmicos e mecânicos obtidos para o concreto de referência (REF) e compreender o comportamento diferenciado do concreto contendo o agente expansor não comercial (RMBA5), proposto nesta pesquisa.

4.2.1.1 Efeitos no modelo térmico

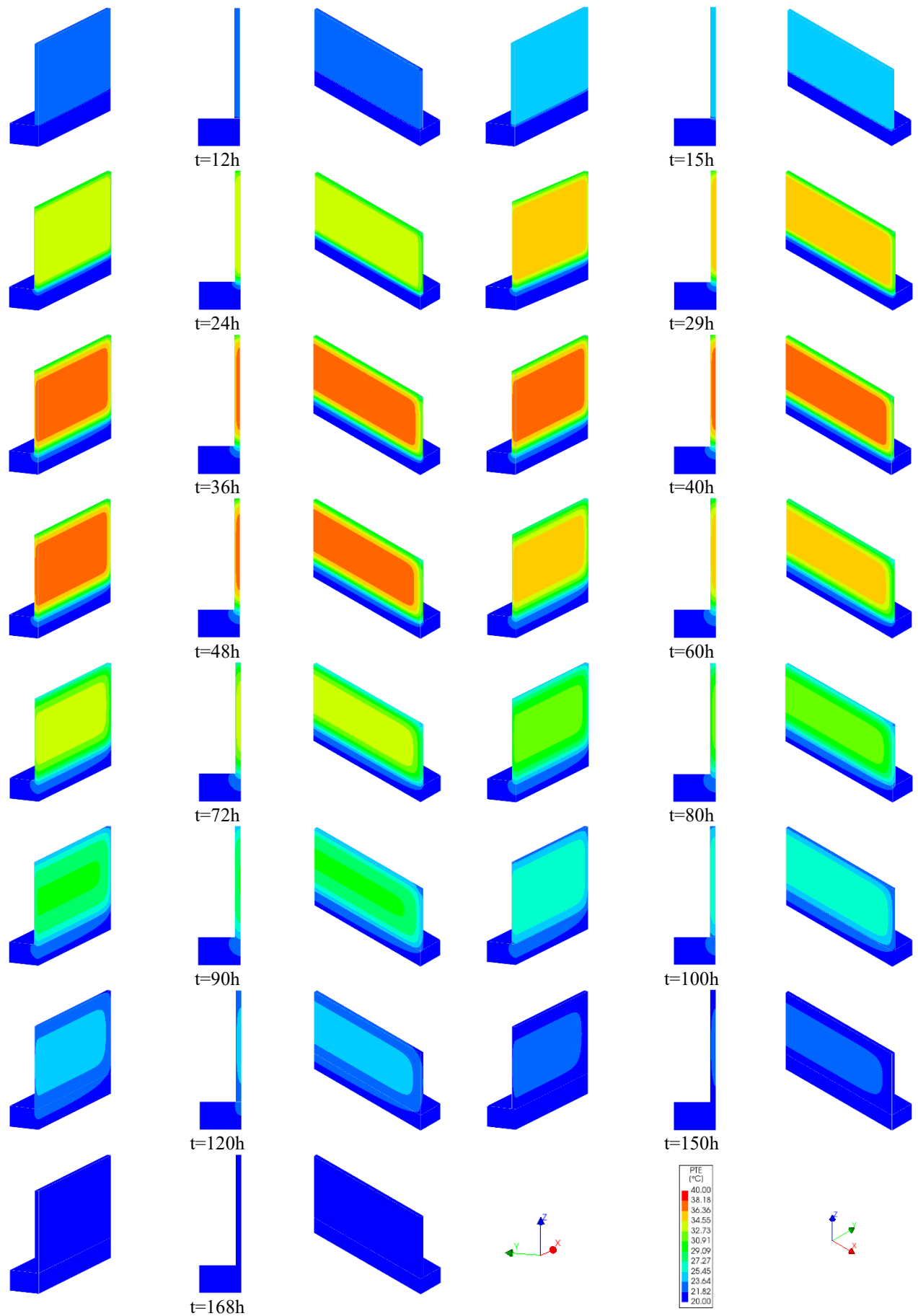
Na Figura 4.34 está apresentado os resultados térmicos obtidos para os pontos selecionados, no muro de arrimo, evidenciando comportamento semelhante entre os concretos analisados, REF e RMBA5, uma vez que ambos utilizaram a mesma curva de temperatura adiabática (Figura 3.33).

Figura 4.34 – Evolução da temperatura nos pontos A, B, C e D ao longo do tempo.



Observa-se um comportamento esperado entre os pontos avaliados: o ponto B atingiu as temperaturas mais elevadas, aproximadamente 36 °C, por volta de 36 horas, registrando diferenças de cerca de 10°C em relação ao ponto D, que apresentou os valores mínimos de temperatura, localizado no eixo de simetria da parede. Com o resfriamento, nota-se que os pontos B e D passam a registrar temperaturas próximas, resultado da transferência de calor na interface entre parede e base. Em relação aos demais pontos, o ponto A encontra-se em uma região intermediária, mas ao final da análise apresenta-se como a região mais fria, devido ao contato direto com o ambiente. O ponto C, por sua vez, é a segunda região mais quente, o que se explica por sua proximidade com a região de maior temperatura (ponto B). Na Figura 4.35 apresentam-se os mapas de evolução da temperatura para alguns instantes selecionados, considerando três posições do muro de arrimo: a lateral correspondente ao plano de simetria, a seção transversal do plano de simetria e a lateral oposta ao plano de simetria.

Figura 4.35 – Mapas tridimensionais da evolução da temperatura para alguns instantes selecionados.¹⁵⁴



A representação na Figura 4.35 permitiu visualizar a variação térmica no tempo e os efeitos da dissipação de calor através das superfícies expostas, evidenciando a formação e o gradiente de temperatura ao longo da espessura e da altura da parede, bem como a influência da base como reservatório térmico durante o processo de resfriamento. Esse resultado reforça que, nas condições analisadas, o campo térmico não constitui o principal fator diferenciador entre os traços, sendo a resposta estrutural mais sensível à evolução das deformações volumétricas e da rigidez do material.

4.2.1.2 Efeitos no modelo mecânico

Para a análise mecânica é necessário considerar alguns pontos importantes: (i) as propriedades de retração e expansão não foram inseridas na caracterização de concreto para o elemento estrutural da base; (ii) Peso próprio da base é introduzido após 5 horas de análise, instante em que o concreto possui módulo de elasticidade igual à 0,19 GPa; (iii) devido à algumas limitações do *software*, para o peso próprio da parede ser introduzido, inseriu-se apoios rígidos em todas as direções e em todos os pontos pertencentes ao elemento estrutural da parede durante as primeiras 5 horas de análise. Com isso, o efeito do peso próprio neste elemento foi considerado na simulação a partir do instante que os apoios rígidos foram desativados, ou seja, 5 horas.

As análises apresentadas a seguir para o comportamento das tensões longitudinais são referentes a partir do instante em que a parede é construída, ou seja, após 28 dias, até o fim de 7 dias (168 horas). Na 4.36 e 4.37 apresenta-se os resultados das tensões longitudinais (σ_{xx}) ao muro na seção nos pontos selecionados, para os concretos REF e RMBA5, respectivamente.

Figura 4.36 – Evolução da tensão longitudinal (σ_{xx}) no plano de simetria para o concreto REF.

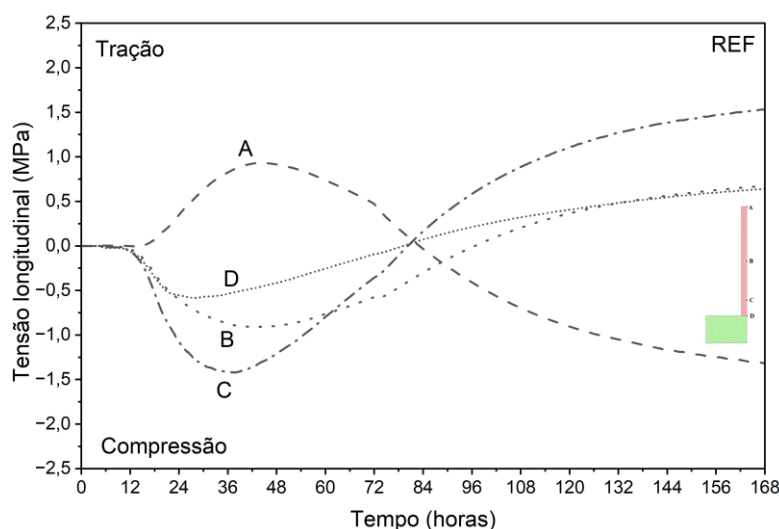
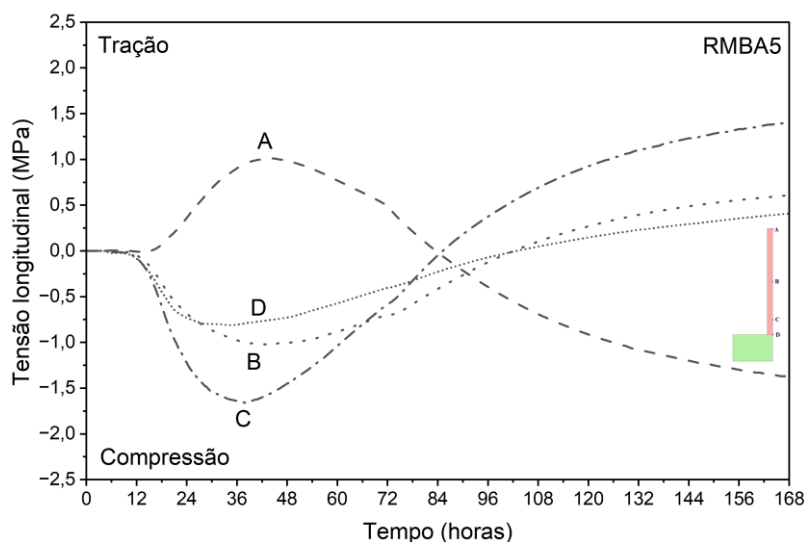
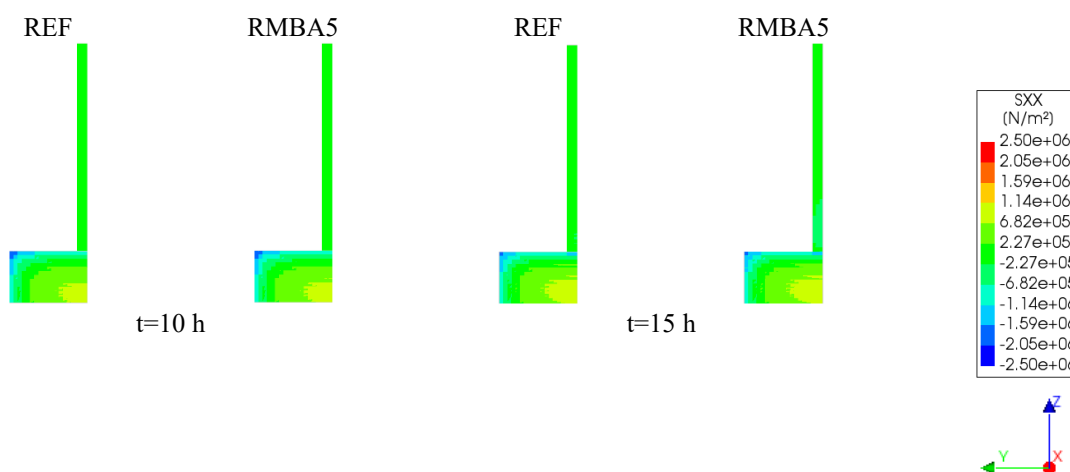


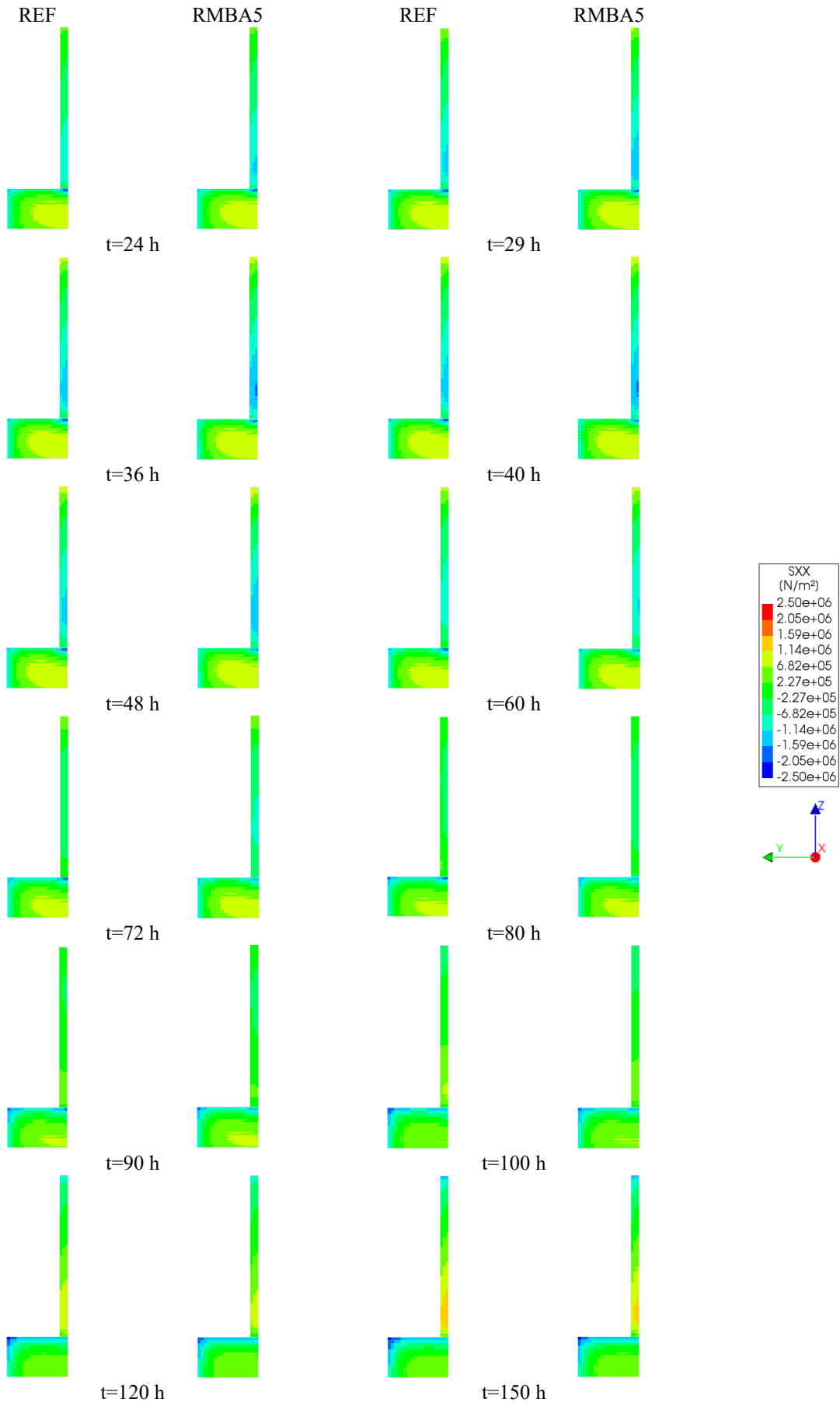
Figura 4.37 – Evolução da tensão longitudinal (σ_{xx}) no plano de simetria para o concreto RMBA5.



Antes da análise das tensões longitudinais nos pontos selecionados (A, B, C e D), torna-se importante visualizar a distribuição espacial das tensões ao longo da parede. Para isso, nas Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 apresentam os mapas tridimensionais dos campos de tensões longitudinais obtidos para os concretos REF e RMBA5, em diferentes instantes representativos da evolução térmica e mecânica. Esses mapas permitem identificar as regiões mais solicitadas ao longo da altura da parede, evidenciando a formação de zonas de compressão e tração e auxiliando na interpretação dos resultados apresentados anteriormente nos gráficos das Figuras 4.36 e 4.37.

Figura 4.38 – Mapas tridimensionais dos campos de tensões no plano YZ, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo para os concretos REF e RMBA5.





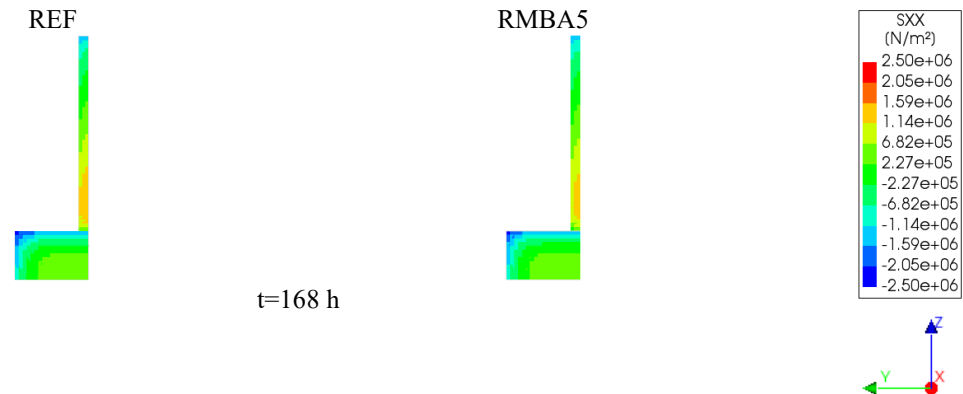
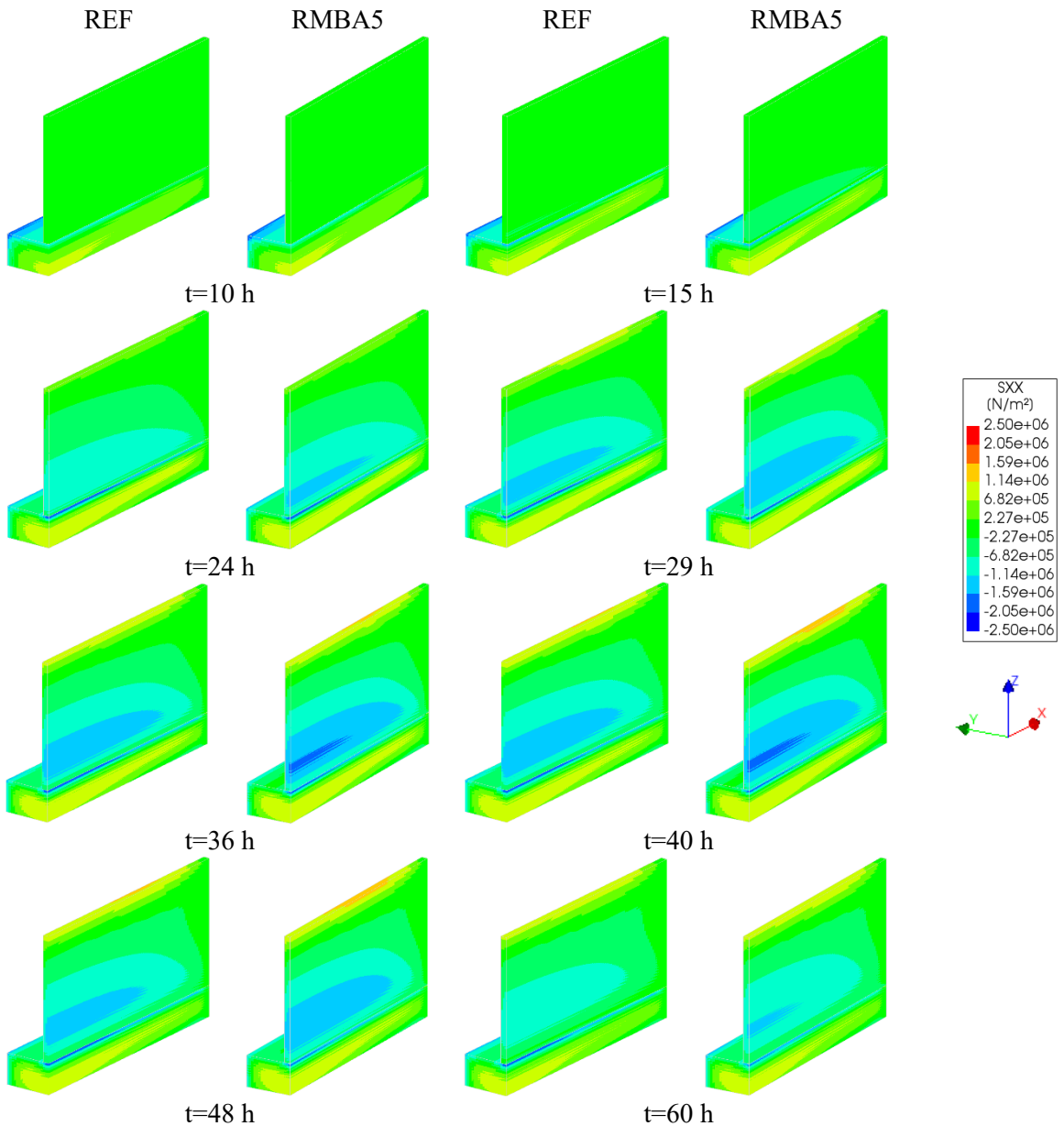


Figura 4.39 – Mapa tridimensional dos campos de tensões no plano de simetria, destacando as variações ao longo do muro de arrimo para os concretos REF e RMBA5.



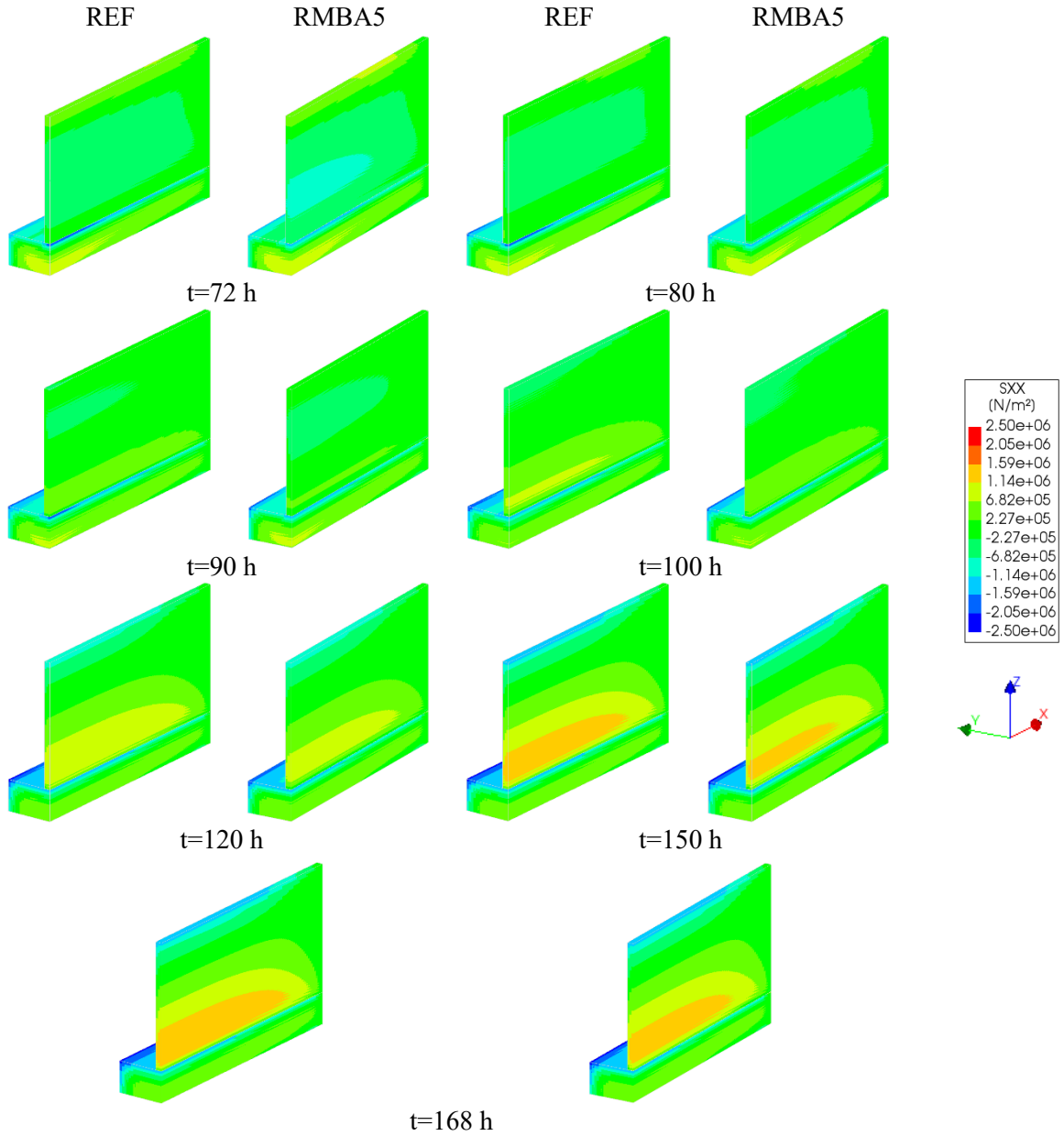
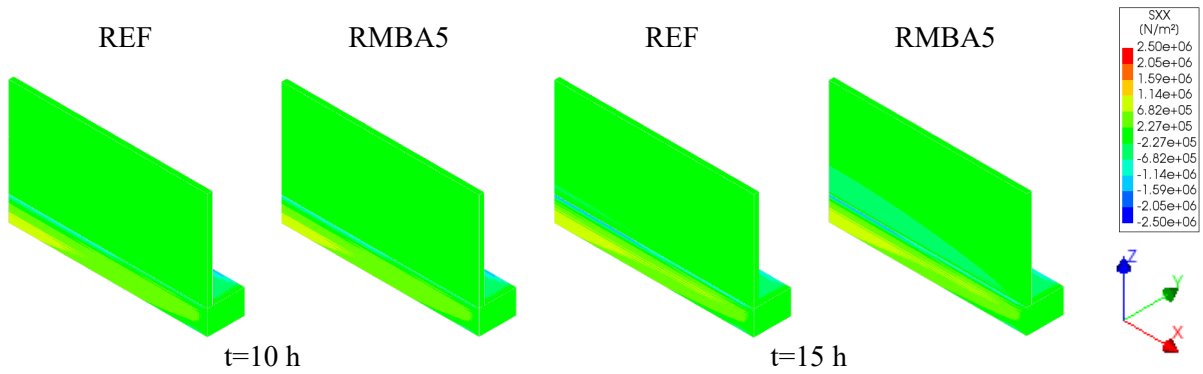
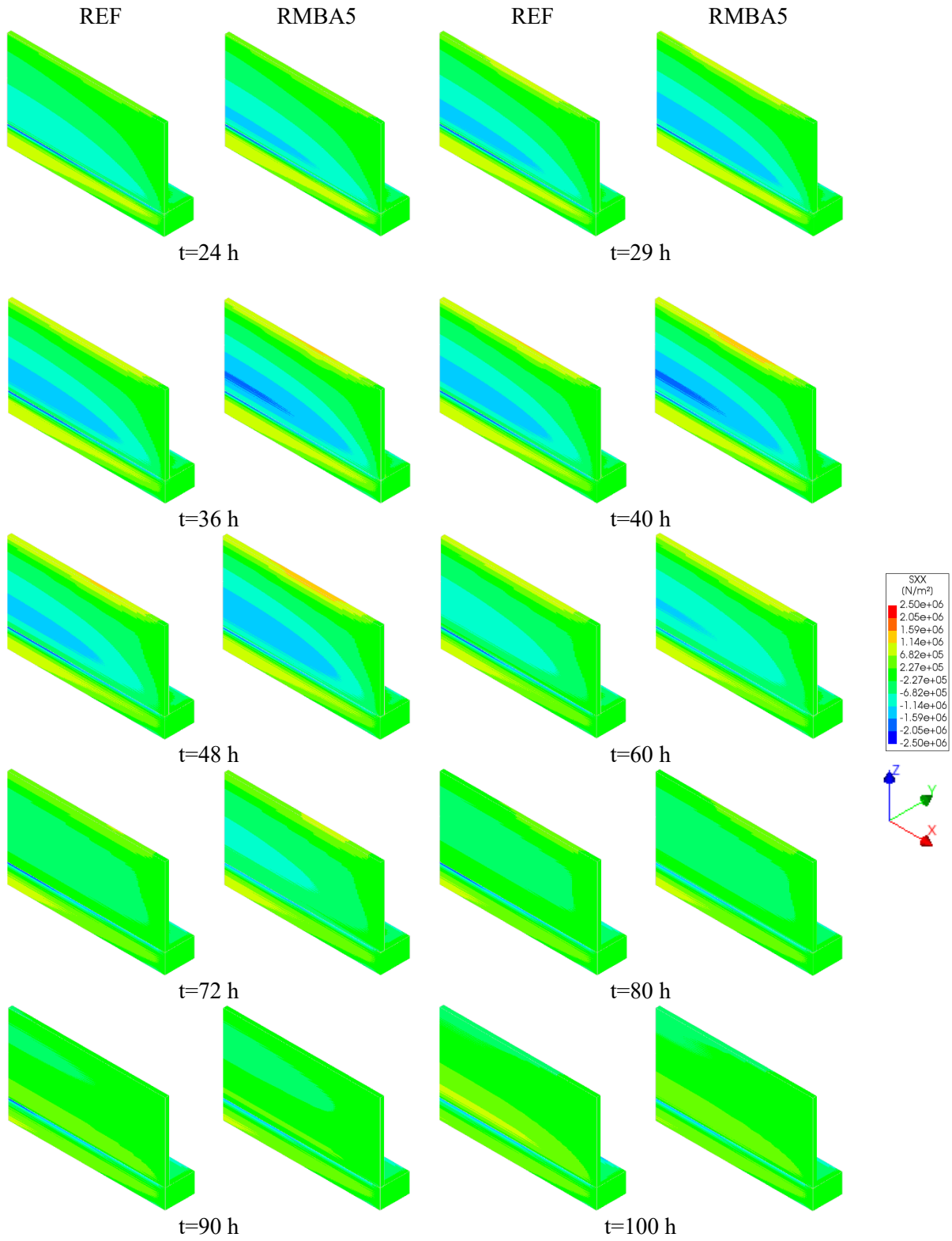
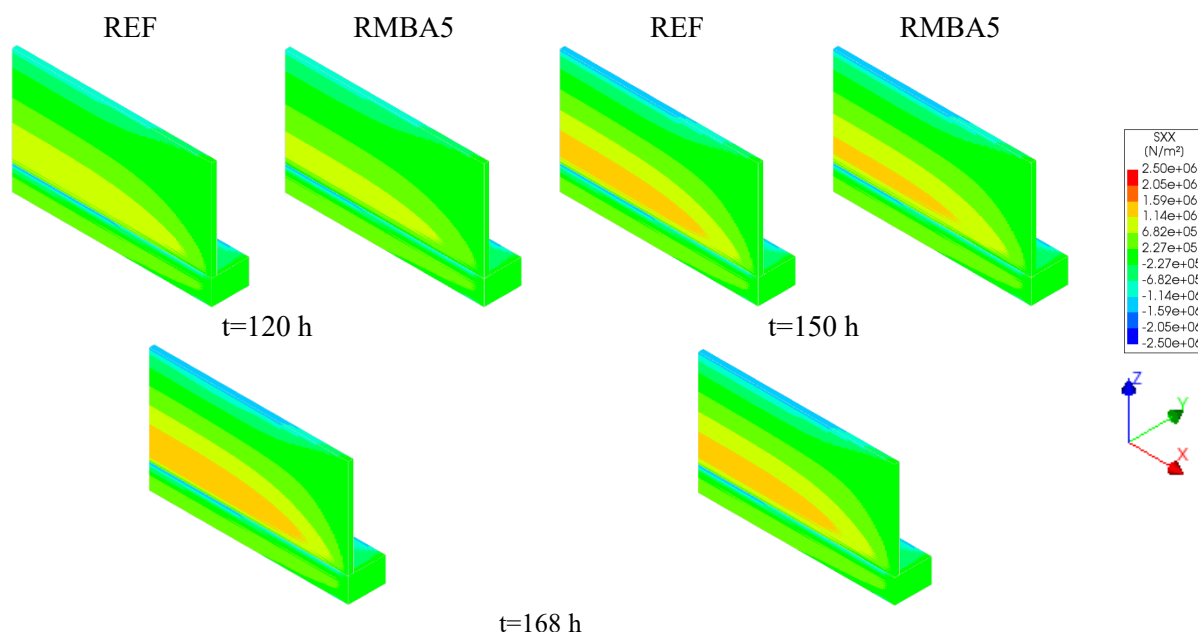


Figura 4.40 – Mapa tridimensional dos campos de tensões no plano invertido ao plano simétrico, destacando as variações ao longo do muro de arrimo para os concretos REF e RMBA5.







A análise conjunta das Figuras 4.36 e 4.37 revela que, de maneira geral, as evoluções de tensão ao longo do tempo apresentam comportamentos bastante semelhantes para os concretos REF e RMBA5, mesmo diante das diferenças observadas previamente nas curvas de deformação homogeneizadas ($\approx 33 \mu\text{m/m}$ para RMBA5 e $\approx 7 \mu\text{m/m}$ para o REF). Essa proximidade entre os resultados numéricos é explicada, em grande parte, pela utilização da mesma curva adiabática para ambos os traços, Figura 3.33, o que implica históricos térmicos praticamente idênticos. Assim, o efeito do agente expansor não comercial se manifesta de forma sutil, refletido principalmente em pequenas mudanças de nível nas tensões máximas, sem alterar significativamente o padrão geral de comportamento.

No topo do muro, ponto A, região livre e em contato direto com o ambiente, as tensões de tração iniciais são mais expressivas. Após a remoção das fôrmas (72 h) e o progressivo resfriamento da parede, essas tensões convertem-se gradualmente em compressão, estabilizando-se após aproximadamente 84 h. Tanto no REF quanto no RMBA5 observa-se o mesmo padrão temporal, embora o traço com agente expansor demonstre um aumento das trações iniciais, coerente com sua expansão adicional.

O ponto B, localizado na zona de maior temperatura do painel, apresenta um comportamento intermediário, atuando como uma transição entre o topo (ponto A) e a região da interface (ponto D). Pelo fato de permanecer por mais tempo sob temperaturas elevadas, a inversão de sinal ocorre mais tardiamente, com tensões inicialmente compressivas que evoluem para tração

apenas após cerca de 100 h. O RMBA5, embora siga a mesma tendência, produz tensões ligeiramente menores, especialmente durante o período crítico de resfriamento.

A análise do ponto C é particularmente relevante, pois ele se situa em uma área onde coexistem um gradiente térmico acentuado e restrições de movimentação. Para o REF, essa região apresenta inicialmente as maiores tensões compressivas, resultado da tentativa de expansão térmica da zona interna contra superfícies mais frias. Após o pico de temperatura e início do resfriamento, as tensões compressivas diminuem, abrindo espaço para o surgimento de tração interna. No caso do RMBA5, percebe-se uma compressão inicial discretamente maior, reflexo da expansão adicional induzida pelo resíduo tratado termicamente. Entretanto, essa expansão não foi suficiente para neutralizar as trações que surgem na fase final da análise.

Na interface, ponto D, onde o gradiente térmico é moderado e a restrição imposta pela base é significativa, o concreto REF desenvolve tração ainda durante a fase de aquecimento, devido ao impedimento à movimentação da parede. Já o final do resfriamento, as tensões tendem a valores semelhantes aos observados no ponto B. Para o RMBA5, nota-se um leve incremento de compressão na fase inicial, seguido por tensões finais marginalmente inferiores às do REF, indício de que a expansão homogênea contribui para redistribuir parte das restrições impostas pela base, embora de forma limitada.

De modo geral, observa-se que, embora a mistura RMBA5 apresente maior expansão quando comparada ao concreto de referência, o impacto dessa deformação adicional sobre o estado de tensões simuladas mostrou-se relativamente discreto. O agente expensor não comercial resultou apenas em reduções moderadas nos níveis de tração, especialmente nas regiões B, C e D, sem alterar de forma significativa a hierarquia espacial das tensões nem neutralizar completamente os efeitos das restrições mecânicas que contribuem para o risco de fissuração. Essa tendência é corroborada pelos mapas de tensões, nos quais as diferenças entre os cenários analisados permanecem pouco pronunciadas ao longo do tempo.

Esses resultados indicam que a expansão associada ao RMBA5, embora expressiva em escala de pasta, tem sua efetividade reduzida quando extrapolada para a escala de concreto por meio do processo de homogeneização adotado. Tal comportamento pode estar relacionado, por um lado, às hipóteses simplificadoras inerentes à Equação 11 e, por outro, à elevada restrição mecânica imposta pelo esqueleto granular do concreto, que limita a conversão da deformação expansiva em compressões internas efetivas.

Diante desse cenário, torna-se pertinente aprofundar a análise dos mecanismos envolvidos, investigando de forma isolada e controlada a influência da sincronia temporal entre a ocorrência da expansão e o desenvolvimento da rigidez do concreto. Nesse contexto, o estudo paramétrico apresentado na sequência busca avaliar como variações no instante de ocorrência da expansão podem alterar a resposta tensional do material, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do potencial dos agentes expansores no controle das tensões iniciais em estruturas de concreto jovem.

4.2.2 Estudo paramétrico

Com base na metodologia apresentada no Capítulo 3, esta seção apresenta os resultados do estudo paramétrico desenvolvido para avaliar a influência do instante de ocorrência da expansão autógena sobre o comportamento tensional do concreto nas primeiras idades.

Para a aplicação do estudo paramétrico nas análises numéricas, adotou-se como curva de referência a deformação em concreto associada ao traço RMBA5. Essa escolha se justifica pelo fato de essa mistura apresentar uma expansão máxima da ordem de $190 \mu\text{m/m}$, valor compatível com as faixas reportadas na literatura para agentes expansores à base de óxidos de cálcio e magnésio, além de representar a condição mais crítica entre as misturas avaliadas nesta pesquisa.

A análise dos resultados experimentais indicou que, embora a deformação máxima absoluta seja atingida em idades mais avançadas, a maior parcela da expansão ocorre em idades iniciais. Entre aproximadamente 12 h e 15 h, a deformação já alcança valores entre 145 e $173 \mu\text{m/m}$, próximos do patamar final, evidenciando que o processo expansivo efetivo se desenvolve de forma antecipada, quando o módulo de elasticidade do concreto ainda se encontra em crescimento.

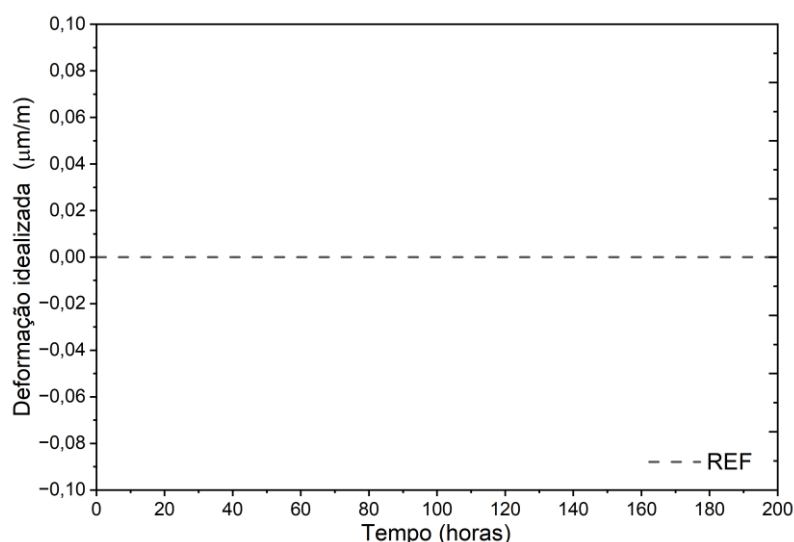
Diante desse comportamento, o estudo paramétrico foi estruturado para investigar o efeito do deslocamento temporal da expansão, mantendo-se inalterada a evolução do módulo de elasticidade definida na modelagem numérica. Para isso, a curva de deformação de referência foi transladada no tempo, de modo a simular diferentes cenários hipotéticos de cinética expansiva.

Foram considerados quatro cenários paramétricos: (i) pico de expansão às 15 horas (cenário compatível com o RMBA5 real); (ii) pico às 24 horas (valor típico reportado em diversos

estudos experimentais); (iii) pico às 36 horas (valor intermediário); (iv) pico às 48 horas (limite superior observado na literatura). Essa abordagem permite avaliar sistematicamente como adiantar ou retardar a ocorrência do pico expansivo afeta a capacidade do concreto de gerar compressão inicial e, conseqüentemente, mitigar tensões de tração ao longo do resfriamento e da retração autógena.

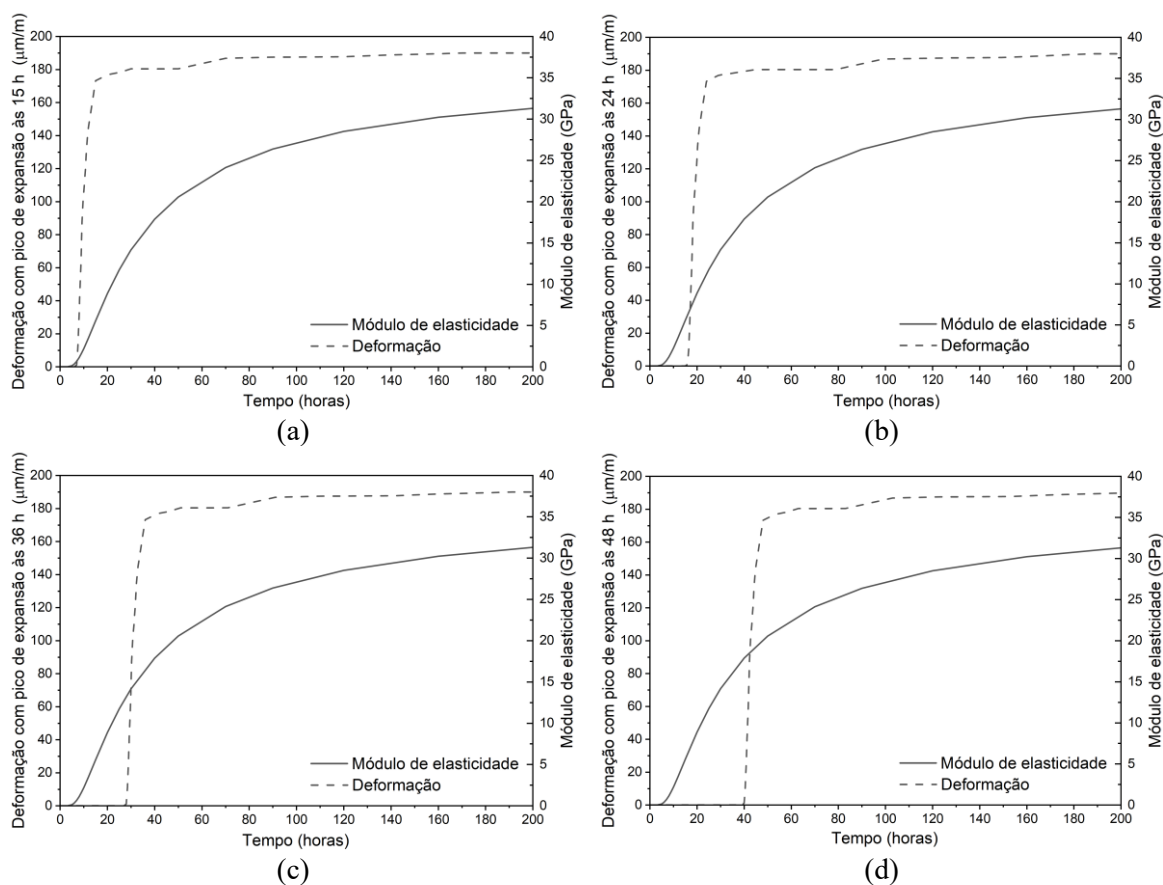
Para fins comparativos, foi incluído também um cenário adicional, representado por uma curva idealizada sem retração ou expansão, representando um concreto sem qualquer adição expansiva (REF), que funciona como linha de base para quantificar o efeito isolado da expansão em cada caso (Figura 4.41).

Figura 4.41 – Curva idealizada de deformação do concreto de referência (REF), adotada no estudo paramétrico como cenário sem retração ou expansão, com deformação nula ao longo do tempo.



As curvas paramétricas utilizadas nas simulações são apresentadas na Figura 4.42, permitindo visualizar a redistribuição temporal da expansão para cada cenário analisado. A partir dessas definições, os resultados numéricos discutidos a seguir avaliam de forma comparativa como a antecipação ou o retardo da expansão influencia a geração de tensões, a redistribuição dos estados de tração e compressão e a propensão à fissuração em estruturas de concreto nas primeiras idades.

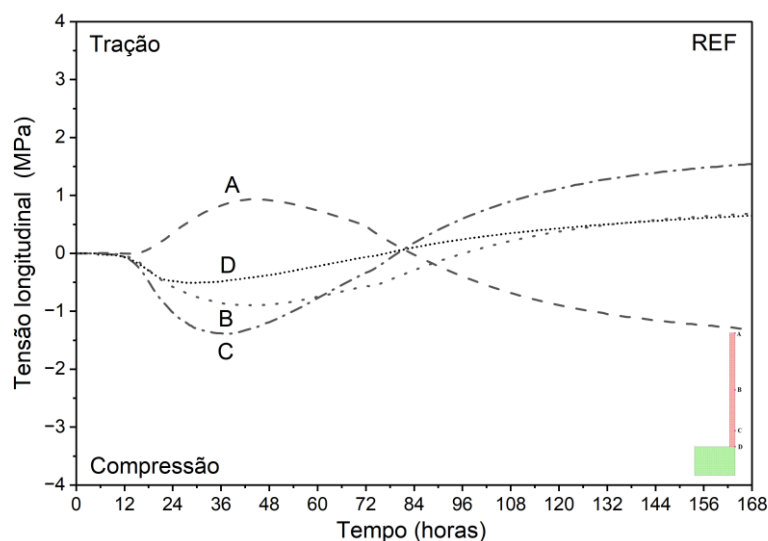
Figura 4.42 –Curvas paramétricas de deformação geradas a partir da translação temporal da curva experimental do concreto RMBA5, simulando diferentes instantes de ocorrência da expansão máxima: (a) 15 h; (b) 24 h; (c) 36 h; e (d) 48 h.



4.2.2.1 Resultados das tensões longitudinais

Na Figura 4.43 está apresentado o comportamento das tensões longitudinais para o cenário REF idealizado, adotado como referência no estudo paramétrico. Como esperado para um concreto sem retração autóloga e sem qualquer contribuição expansiva, o padrão obtido é idêntico ao observado anteriormente para o traço REF no caso homogeneizado. Isso confirma que o comportamento mecânico nesta condição é governado exclusivamente pelos efeitos térmicos e pelas restrições impostas pela geometria e condições de contorno.

Figura 4.43 – Evolução das tensões longitudinais (σ_{xx}) para o cenário referência (REF) no estudo paramétrico, considerando curva idealizada sem retração ou expansão.



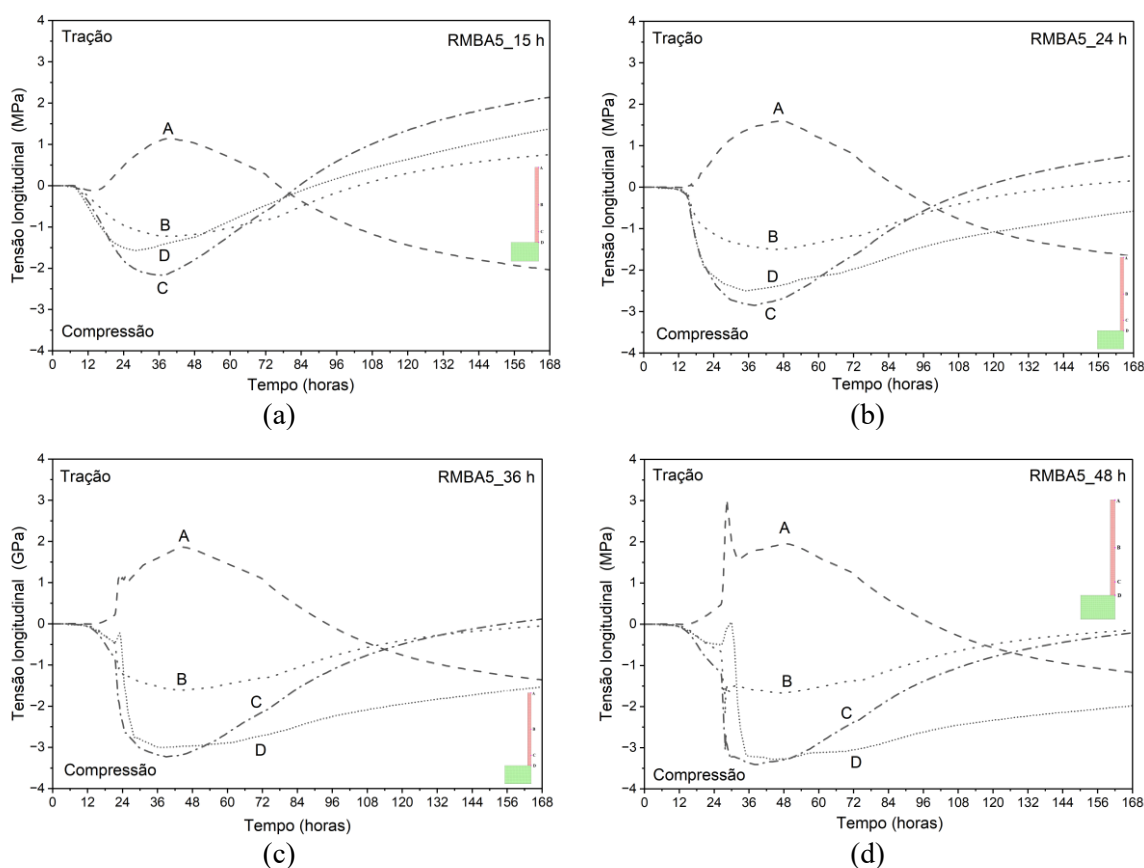
O ponto A, localizado na região superior do muro, apresenta inicialmente tensões de tração decorrentes da livre movimentação da superfície durante o aquecimento, convertendo-se progressivamente em compressão à medida que se inicia o resfriamento (aproximadamente 72–84 h). Essa transição marca o inverso de curvatura térmica típico de elementos submetidos a gradientes de temperatura. Os pontos B e C, situados no interior da parede, registram tensões mais intensas de compressão durante o pico térmico, refletindo o confinamento interno. Com o avanço do resfriamento, ocorre a gradual reversão de sinal, com o ponto C sendo o mais suscetível à tração tardia, como já observado nas análises anteriores. O ponto D (interface parede–base) apresenta comportamento intermediário, com níveis moderados de compressão durante o aquecimento e tração crescente após o início do resfriamento, associado à restrição imposta pela base.

A reprodução exata desse comportamento confirma que o modelo paramétrico está adequadamente calibrado: na ausência de deformações autógenas, as tensões resultantes refletem exclusivamente os mecanismos termomecânicos, servindo como linha de base para comparação com os cenários em que a expansão é introduzida.

A Figura 4.44 permite observar, de forma integrada, o comportamento das tensões longitudinais resultantes dos quatro cenários paramétricos avaliados, revelando que o desempenho estrutural não depende apenas da magnitude da expansão, mas sobretudo do instante relativo em que ela

ocorre em comparação com o desenvolvimento da rigidez do concreto. Esse aspecto confirma a hipótese levantada anteriormente: a sincronização entre expansão e ganho de módulo de elasticidade é determinante para a eficácia do agente expensor na mitigação das tensões de tração formadas nas primeiras idades.

Figura 4.44 – Evolução das tensões longitudinais (σ_{xx}) para o concreto RMBA5, simulando diferentes instantes de ocorrência da expansão máxima: (a) 15 h; (b) 24 h; (c) 36 h; e (d) 48 h.



No caso em que o pico expansivo ocorre às 15 h, observa-se que a maior parte da deformação expansiva coincide com um estágio em que o concreto apresenta baixa rigidez. Nessa condição, parte considerável da expansão é absorvida pela matriz ainda pouco consolidada, o que limita a capacidade de conversão da deformação em compressão residual. Como consequência, as tensões obtidas se aproximam do comportamento da mistura de referência, com tração ligeiramente maior na superfície e compressões discretas nas regiões internas, sem efeito significativo na redução final das tensões de tração. Esse cenário representa, portanto, a condição menos eficiente entre as analisadas, pois a expansão atua cedo demais para produzir efeito mecânico relevante.

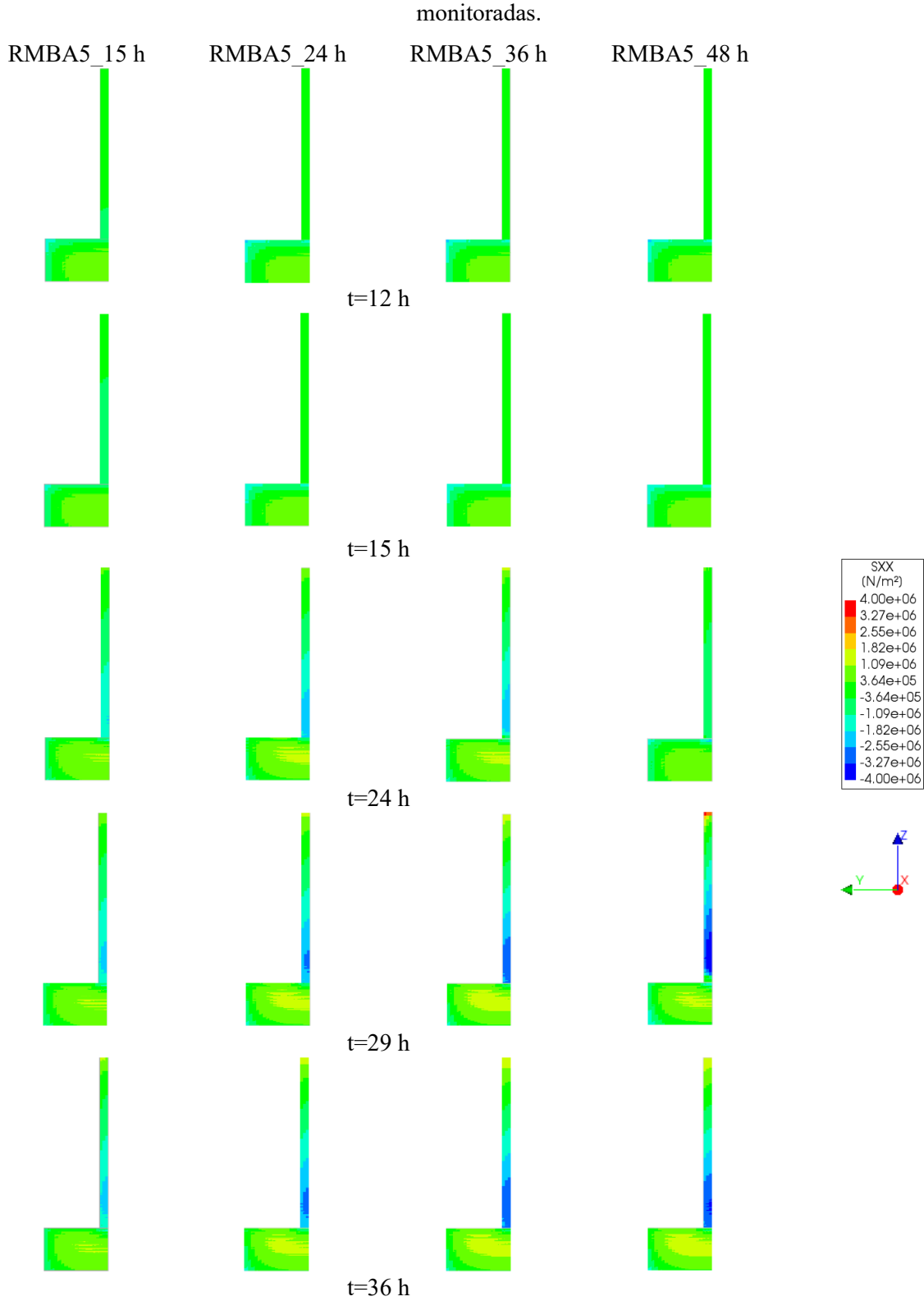
Quando o pico é deslocado para 24 h, nota-se que o concreto já apresenta um módulo de elasticidade mais elevado, de modo que parte da expansão passa a ser convertida de forma mais eficaz em compressão interna. Entre aproximadamente 20 e 40 horas, verifica-se um aumento expressivo das tensões compressivas nas regiões internas, atingindo valores próximos de -2,5 a -3 MPa. Ao final da análise, essa ação resulta em redução perceptível das tensões de tração e menor propensão à fissuração. Trata-se de um comportamento coerente com a cinética típica dos agentes expansores à base de CaO, frequentemente associados a expansões máximas nas primeiras 24 horas.

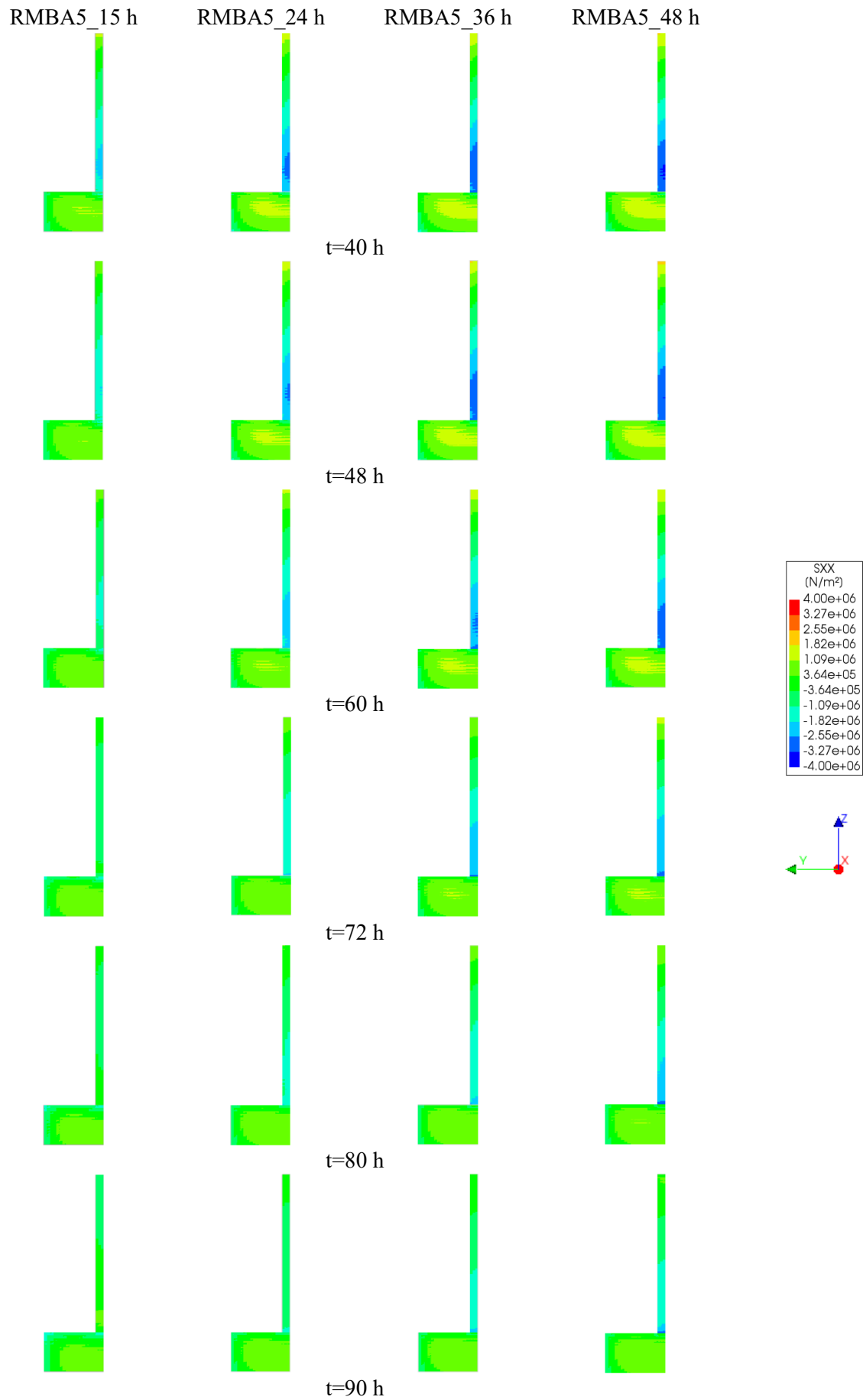
No cenário com pico às 36 h, essa tendência é intensificada. Como a expansão ocorre quando a rigidez já atingiu um nível ainda mais elevado, observa-se uma contribuição mais efetiva para alteração do estado tensional. Surge um leve pico de tração nos pontos A e D por volta de 24 h, possivelmente associado à interação entre o resfriamento local e a ausência de expansão naquele intervalo, comportamento que requer investigação detalhada. Apesar disso, as regiões internas apresentam substancial redução das tensões de tração, aproximando-se de tensões próximas de zero. Esse cenário representa a melhor combinação entre coerência física e eficácia mecânica, uma vez que a expansão ocorre dentro de uma janela ainda compatível com o fenômeno expansivo real e com a rigidez suficientemente desenvolvida para gerar compressão útil.

Por fim, quando o pico é deslocado para 48 h, o comportamento deixa de apresentar ganhos estruturais relevantes. Observa-se um pico mais acentuado de tração na região superior da parede e na interface com a base, comportamento que se destaca de maneira não proporcional aos demais pontos. Embora o módulo já seja elevado, a expansão tardia parece interagir mais com o formato da curva imposta do que com um fenômeno físico plausível, gerando picos localizados sem proporcionar melhora significativa nas tensões internas. Entre as regiões internas, as diferenças em relação ao cenário de 36 h tornam-se pouco expressivas, sugerindo saturação da eficácia mecânica da expansão tardia.

Em complemento à discussão dos resultados para cada pico de expansão, nas Figuras 4.45, 4.46 e 4.47 apresentam os mapas tridimensionais de tensões para diferentes localizações: plano YZ, plano de simetria e plano oposto ao de simetria, respectivamente. Os mapas tridimensionais reforçam a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo, destacando as regiões dos pontos selecionados. As análises confirmam a redução das tensões de tração quando o pico de expansão ocorre a partir das 24 horas e evidenciam que, para o pico de expansão às 48 horas, a parede superior apresenta maior solicitação de tração.

Figura 4.45 – Mapas tridimensionais dos campos de tensões no plano YZ, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.





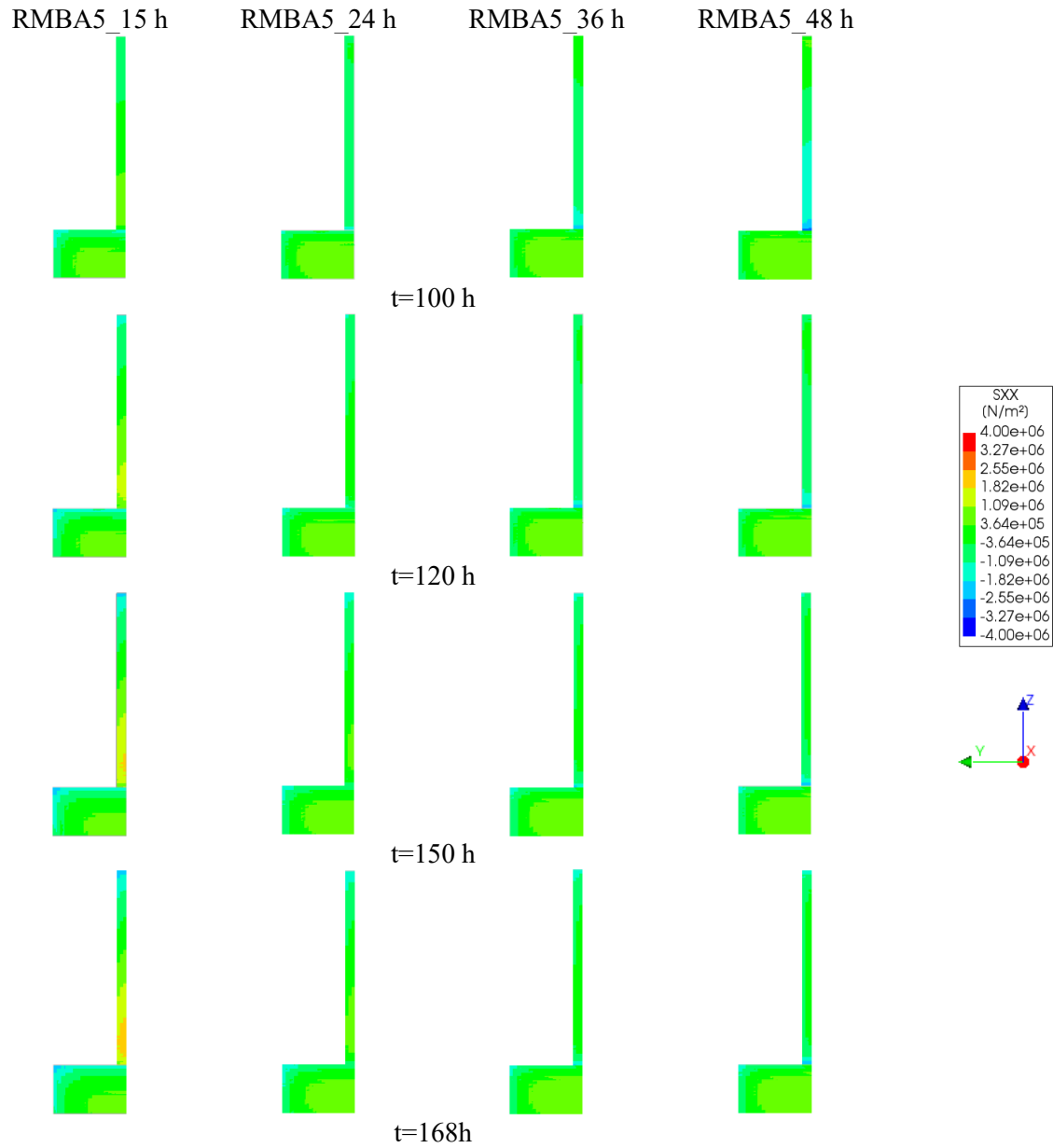
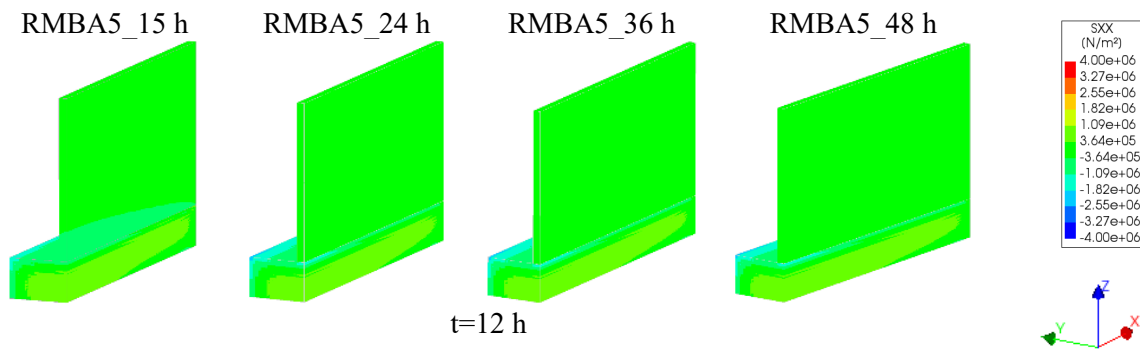
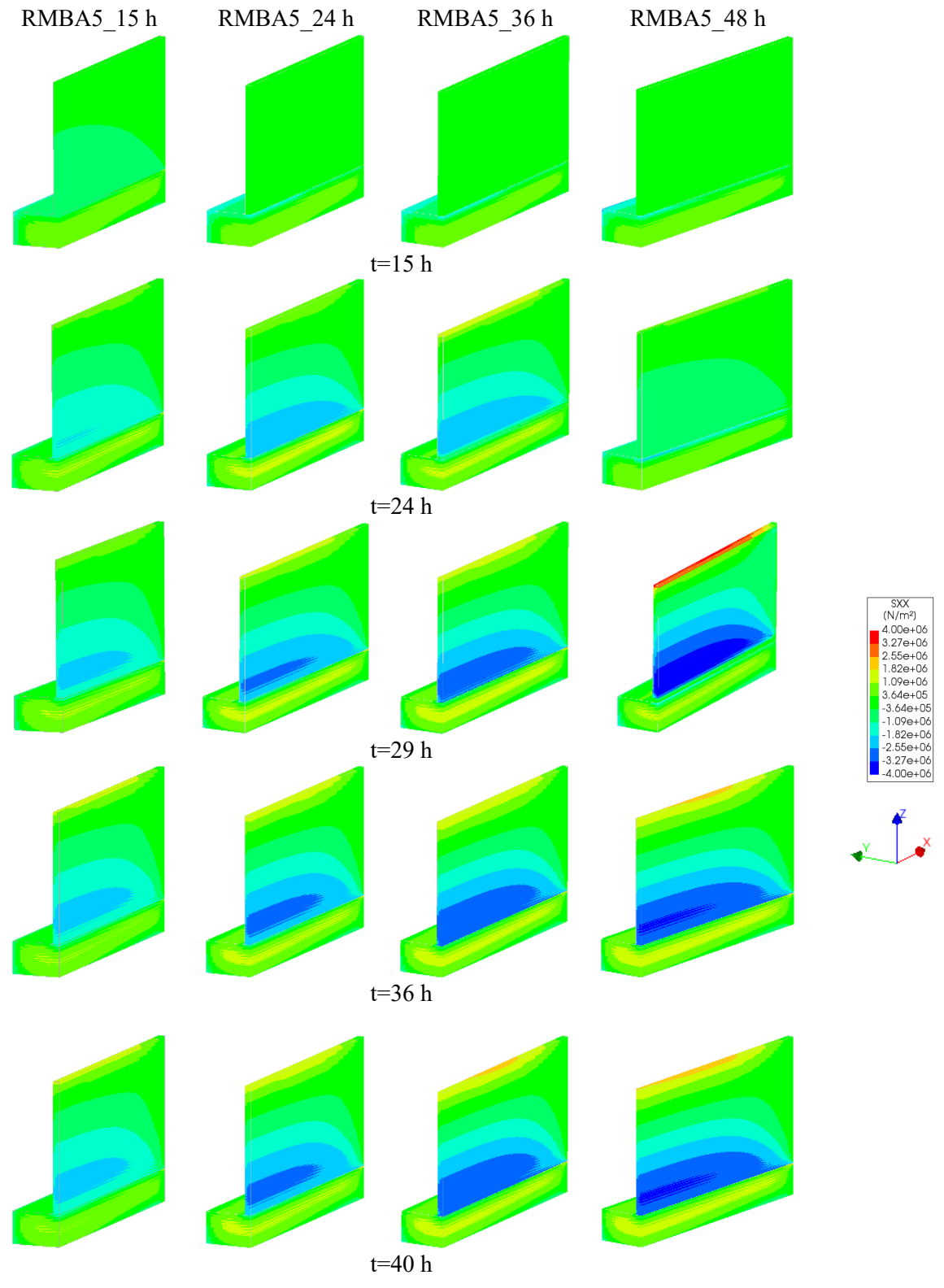
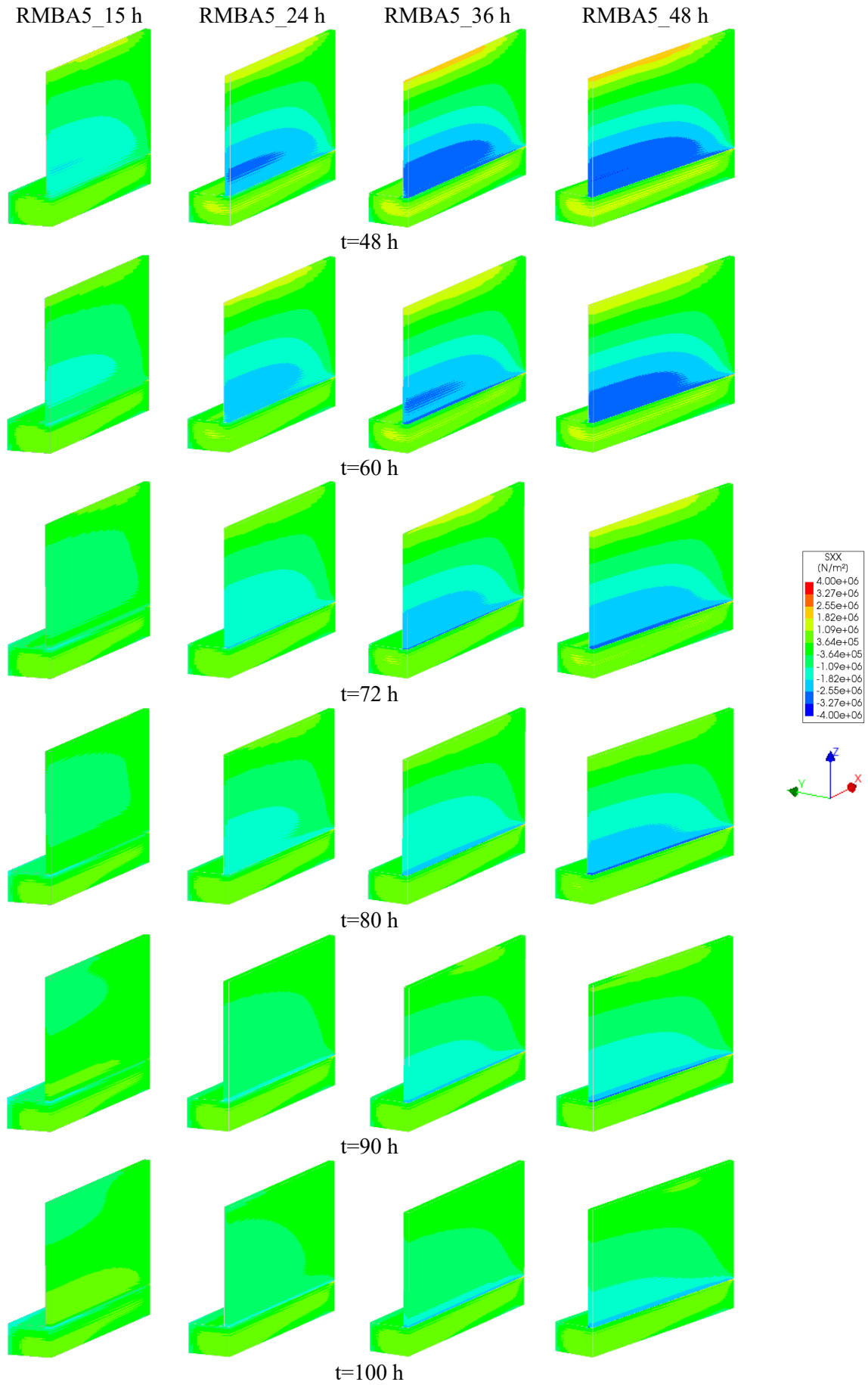


Figura 4.46 – Mapas tridimensionais no campo de tensões no plano de simetria, destacando as variações ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.







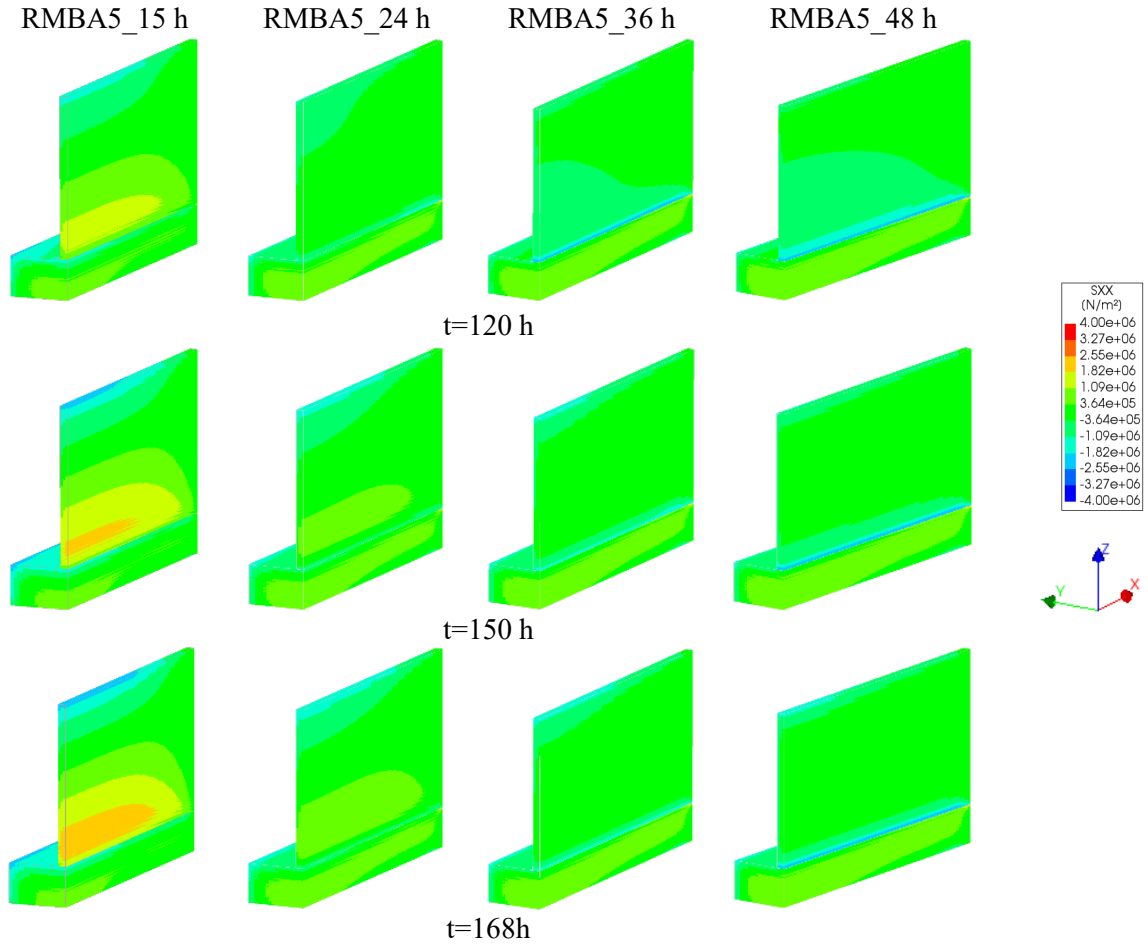
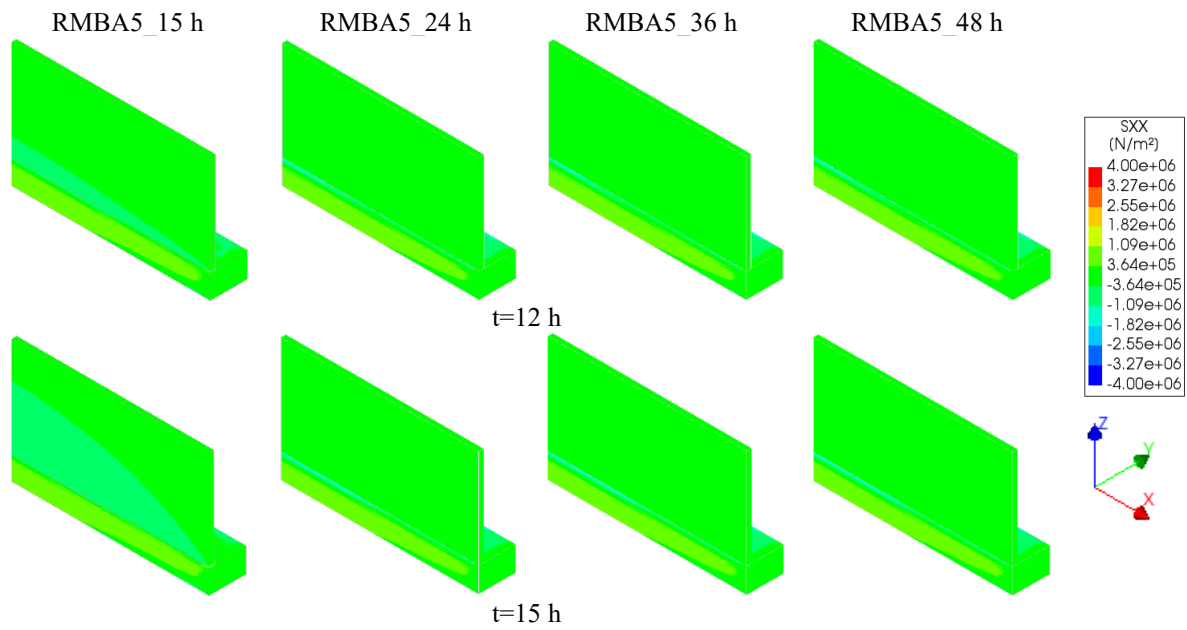
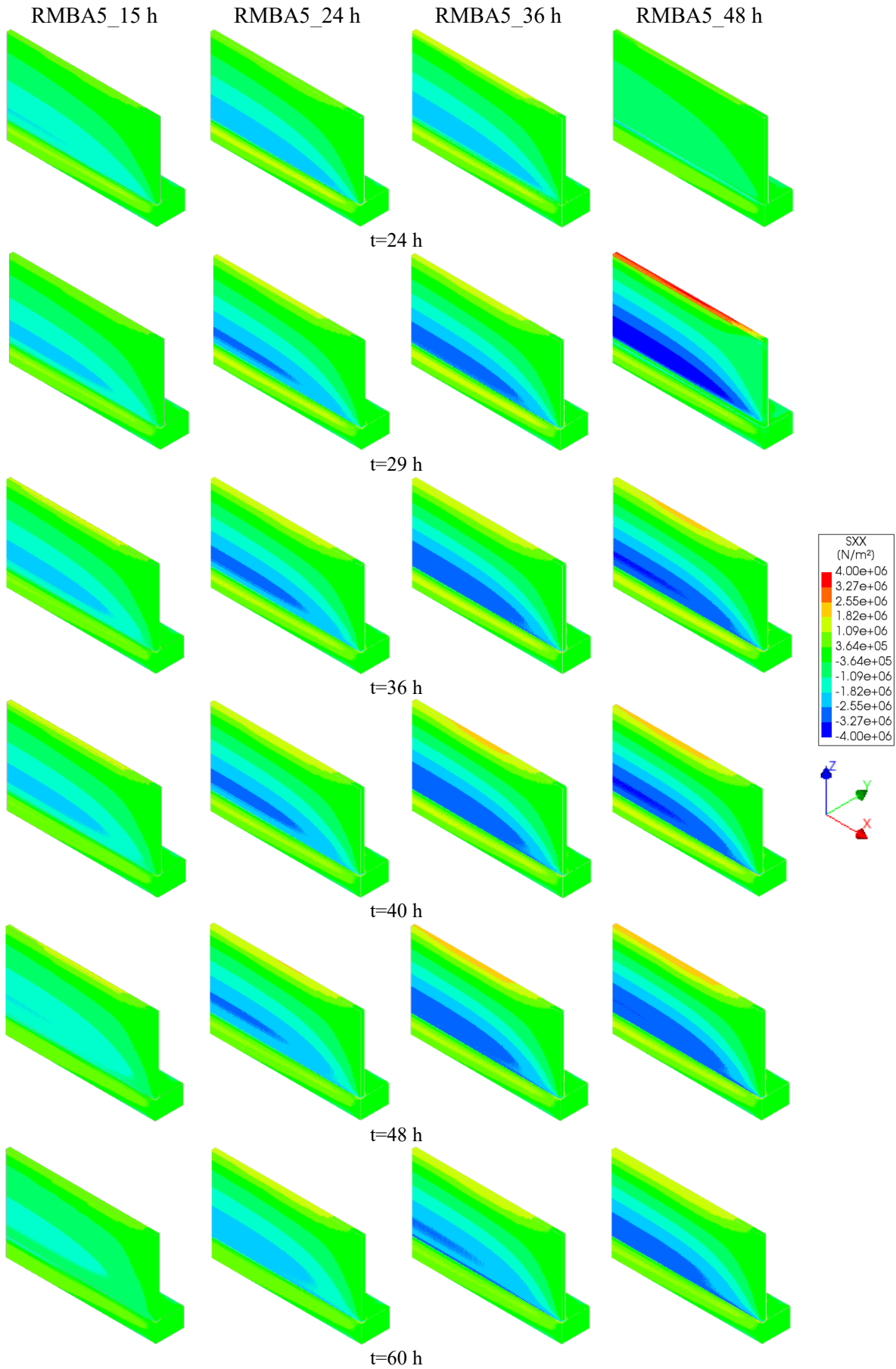
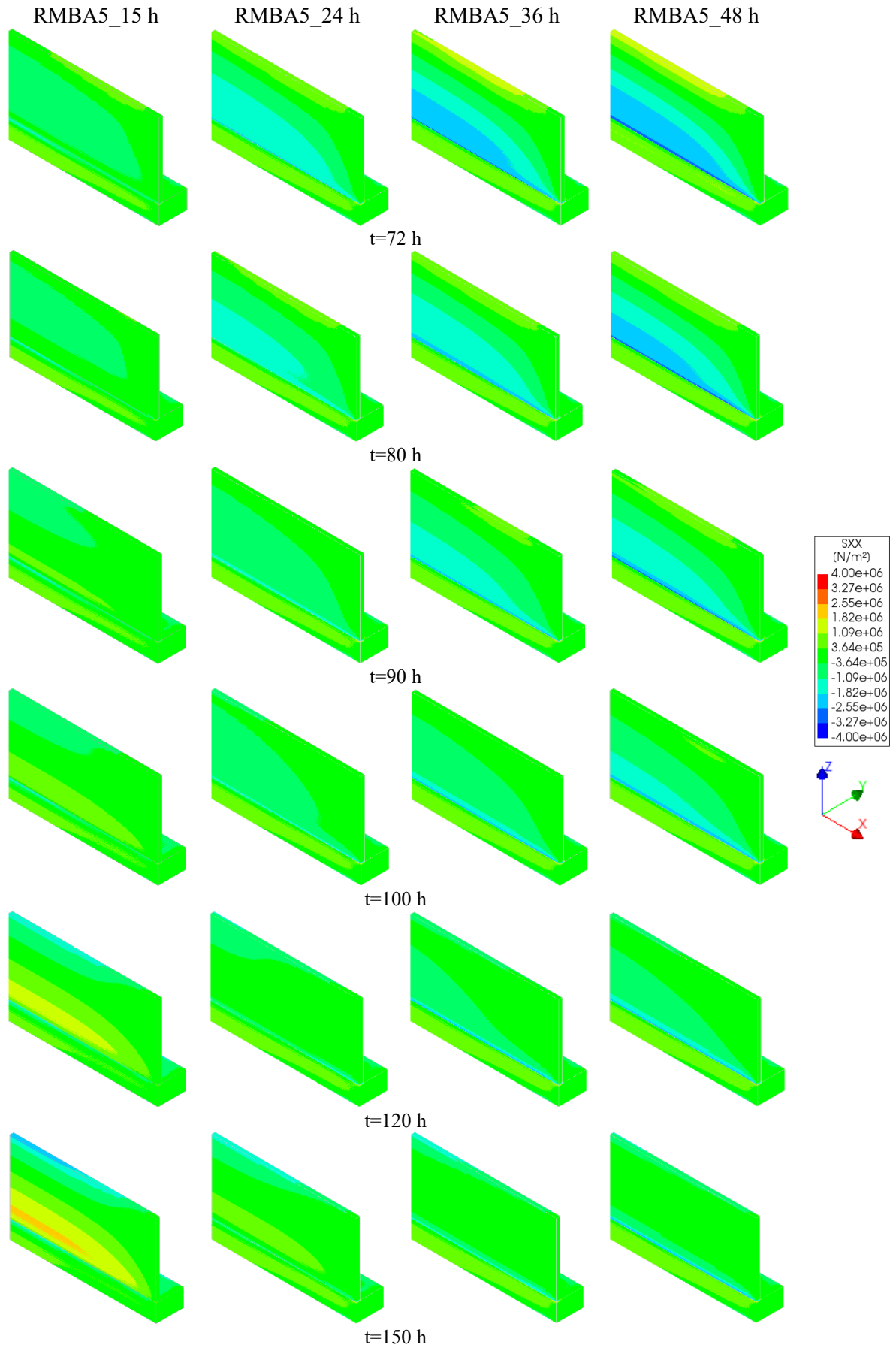
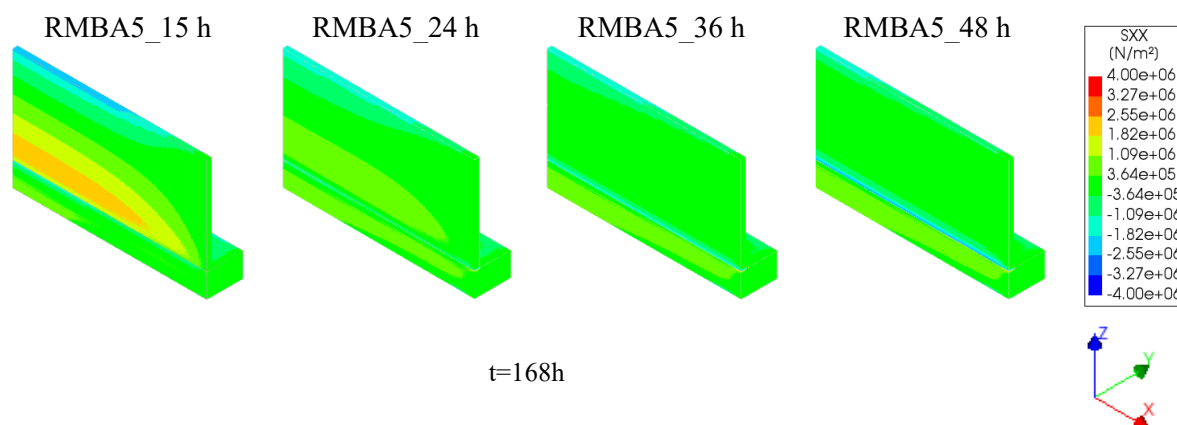


Figura 4.47 – Mapas tridimensionais dos campos de tensões no plano invertido ao plano de simetria, destacando as variações ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.









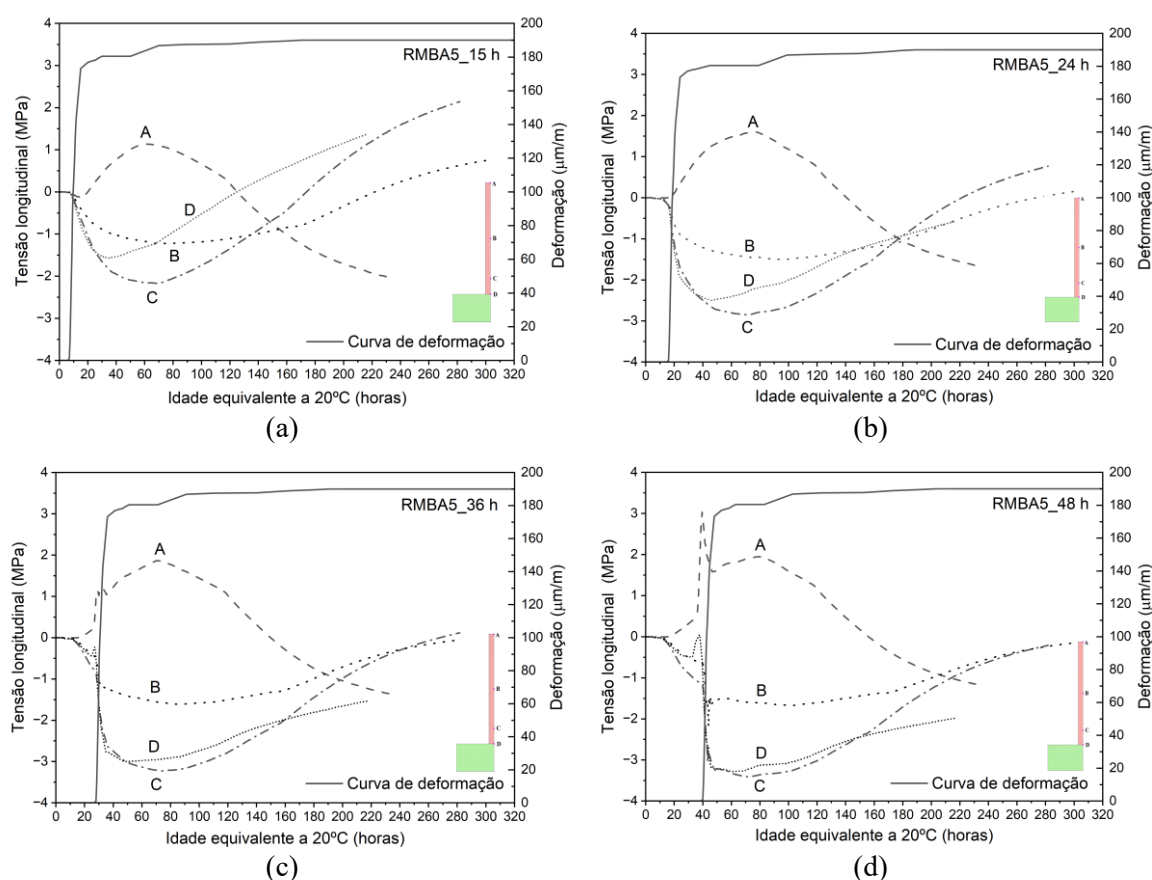
De forma geral, os resultados indicam que expansões muito precoces tendem a ser pouco eficazes devido ao baixo nível de rigidez; expansões intermediárias, especialmente entre 24 h e 36 h, apresentam o melhor equilíbrio entre realismo físico e capacidade de redução das tensões de tração; e expansões tardias produzem efeitos localizados e não se traduzem em mitigação global das tensões. Esse comportamento reforça a importância de considerar, de maneira integrada, a cinética de hidratação, o desenvolvimento do módulo de elasticidade e a curva de deformação imposta.

Por fim, os picos observados nos pontos A e D nos cenários de expansão mais tardia, especialmente no caso de 48 h, motivam uma investigação complementar para compreender a origem desse comportamento. Para isso, adotou-se uma avaliação integrada entre a deformação expansiva e a evolução das tensões ao longo da idade equivalente, permitindo interpretar cada evento tensional dentro do estágio maturacional correspondente do concreto. Essa abordagem possibilita identificar de forma direta quando e por que determinadas regiões passam a ser tracionadas ou comprimidas, bem como a influência da expansão deslocada no tempo sobre esse processo. Os resultados dessa análise, apresentados a seguir, esclarecem os mecanismos associados aos cenários paramétricos e consolidam a interpretação estrutural do efeito do agente expensor não comercial.

A interpretação integrada da deformação expansiva, do módulo de elasticidade e das tensões longitudinais torna-se mais clara quando os resultados são avaliados em função da idade equivalente, parâmetro que permite comparar regiões da estrutura sujeitas a diferentes temperaturas dentro de uma mesma escala maturacional. A idade equivalente sintetiza a aceleração da hidratação induzida por temperaturas elevadas, permitindo analisar cada ponto (A, B, C e D) conforme a idade real que ele possui quando a expansão ocorre. Dessa forma, a

análise conjunta dos gráficos de tensões x deformação expansiva x idade equivalente revela como o instante relativo entre o pico expansivo e o desenvolvimento do módulo controla a resposta estrutural do concreto. Na Figura 4.48 apresenta os gráficos correspondentes a cada cenário paramétrico.

Figura 4.48 – Relação entre tensões longitudinais (σ_{xx}) e deformação expansiva em função da idade equivalente para o concreto RMBA5, considerando os quatro cenários paramétricos de deslocamento temporal do pico expansivo: (a) 15 h; (b) 24 h; (c) 36 h; e (d) 48 h..

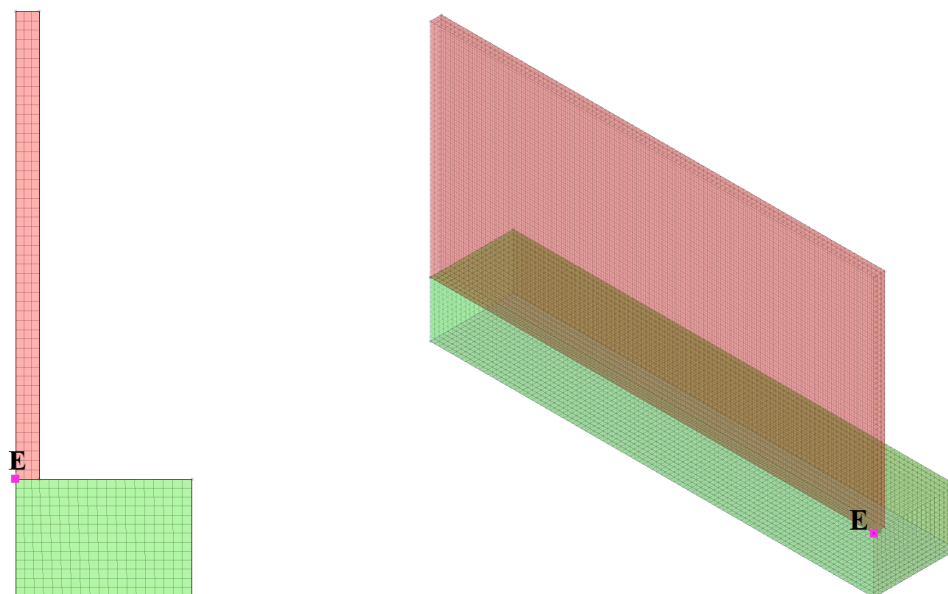


Observando cada cenário paramétrico, verifica-se que, para os picos expansivos aos 15 h e 24 h, o surgimento das tensões ocorre de forma coerente com a evolução simultânea da expansão e da temperatura. Nesses casos, as regiões internas B e C, que apresentam maiores temperaturas, também exibem maior idade equivalente, desenvolvendo rigidez mais rapidamente e respondendo com níveis crescentes de compressão à expansão imposta. Por outro lado, quando o pico de expansão é deslocado para 36 h e 48 h, emerge um comportamento distinto. Nas regiões internas B e C, que são as mais quentes e já apresentam maior maturidade, formam-se tensões de compressão exatamente no instante inicial da expansão. Esse aumento localizado de

compressão desencadeia um mecanismo de redistribuição tensional que se propaga para as regiões mais externas da parede. Como consequência, os pontos A e D, mais frios e menos maturados, respondem com um pico de tração, mesmo em um instante em que a expansão máxima e os principais eventos térmicos ainda não ocorreram. Assim, o surgimento antecipado desses picos nas regiões externas não está associado a um efeito direto da expansão local, tampouco indica inconsistência do modelo, mas sim um processo de equilíbrio mecânico induzido pela forte compressão interna nas zonas B e C, reforçando o papel dominante do instante em que ocorre a expansão máxima e do gradiente de rigidez no desenvolvimento das tensões longitudinais.

Embora a análise anterior tenha demonstrado que o deslocamento temporal do pico de expansão modifica principalmente o equilíbrio tensional entre as regiões internas (B e C) e externas (A e D), um comportamento adicional e particularmente relevante emerge quando se observa o plano oposto ao de simetria. Conforme apresentado na Figura 4.45, destacou-se um ponto situado na interface parede/base (E), uma região geometricamente crítica, rigidamente restringida e diretamente influenciada pelo gradiente térmico proveniente do núcleo aquecido.

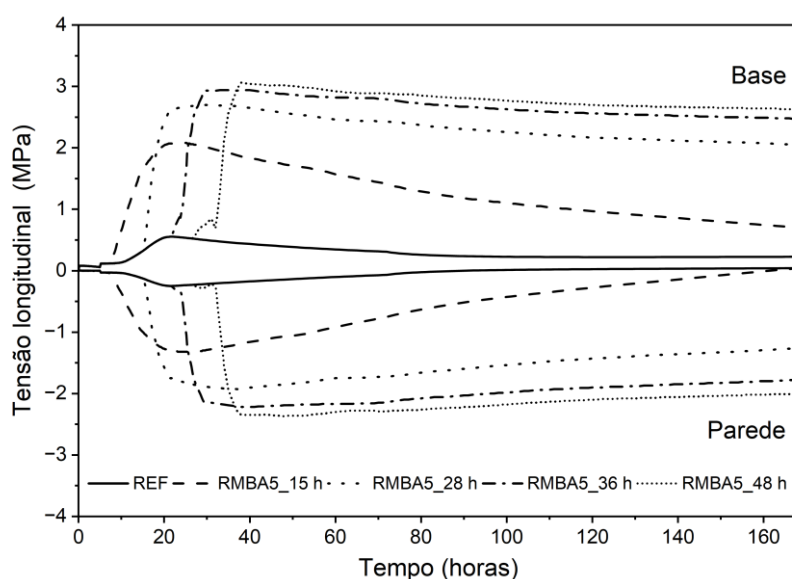
Figura 4.49 – Localização do ponto analisado no plano invertido ao plano simétrico.



Ao comparar os resultados para todos os concretos analisados (REF e RMBA5 com picos às 15 h, 24 h, 36 h e 48 h), verifica-se que o concreto de referência apresenta comportamento estável, sem formação de tração expressiva nessa região. As tensões permanecem dentro do intervalo esperado para paredes massivas sem ação expansiva, com valores moderados ($\approx 0,5$ MPa),

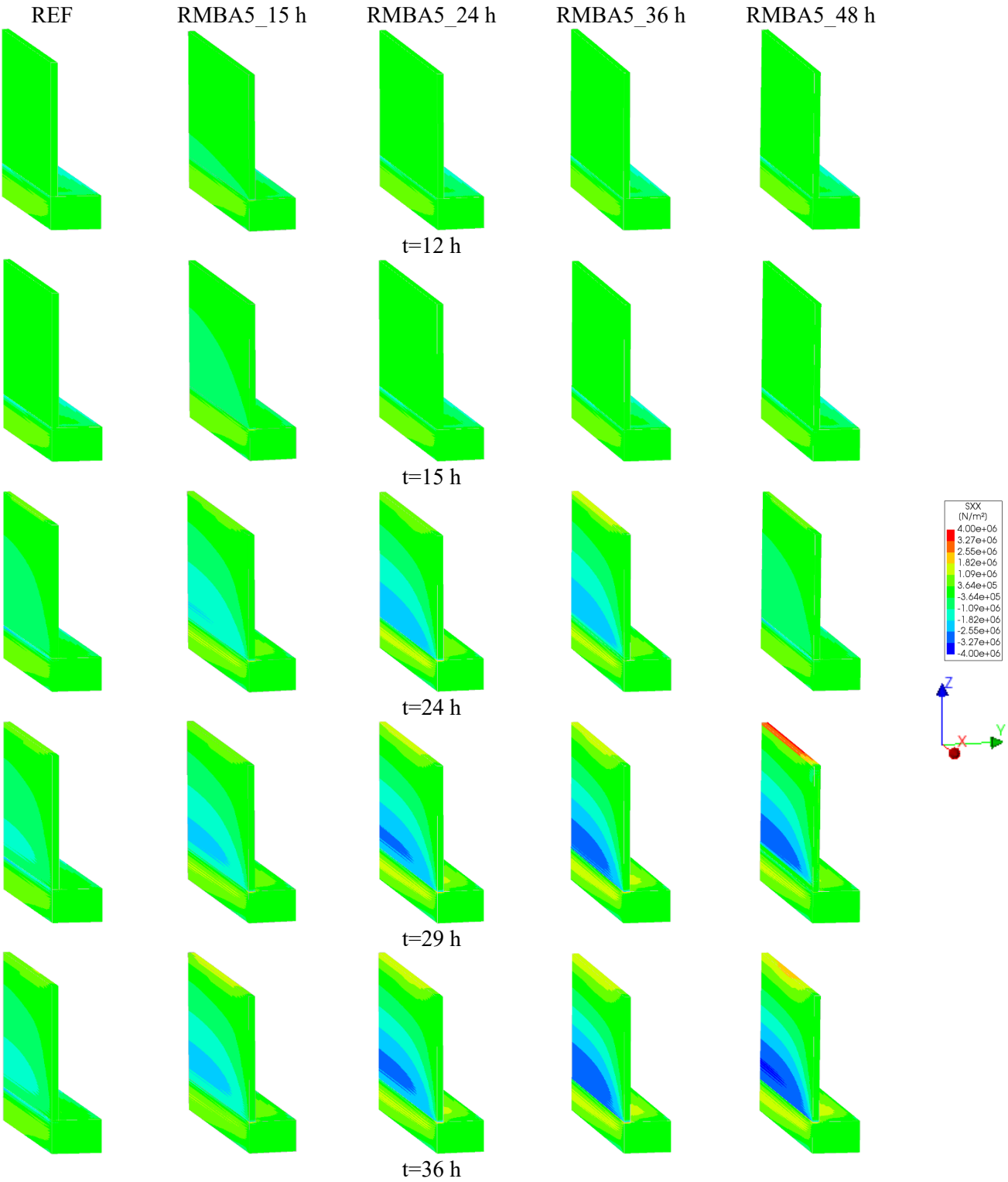
coerentes com o histórico térmico aplicado. No entanto, a introdução do agente expensor, especialmente nos cenários com picos tardios (36 h e 48 h), altera significativamente esse quadro, como apresentado na Figura 4.50. O ponto selecionado permite avaliar simultaneamente o comportamento na parede e base, revelando que a parede permanece predominantemente comprimida, enquanto a base passa a experimentar tração crescente.

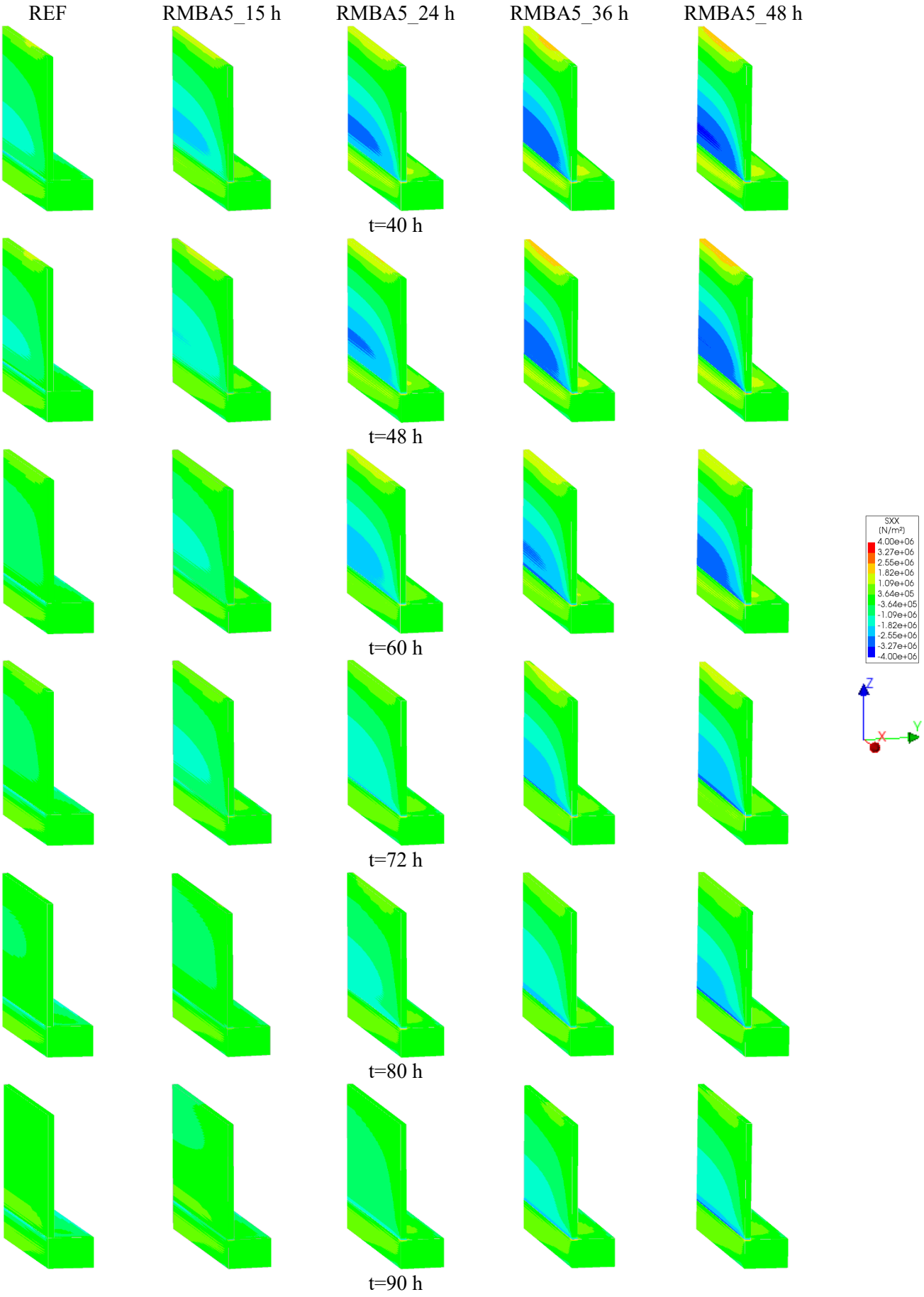
Figura 4.50 – Evolução das tensões longitudinais (σ_{xx}) no plano invertido ao plano simétrico, para um ponto selecionado na interface parede/base.

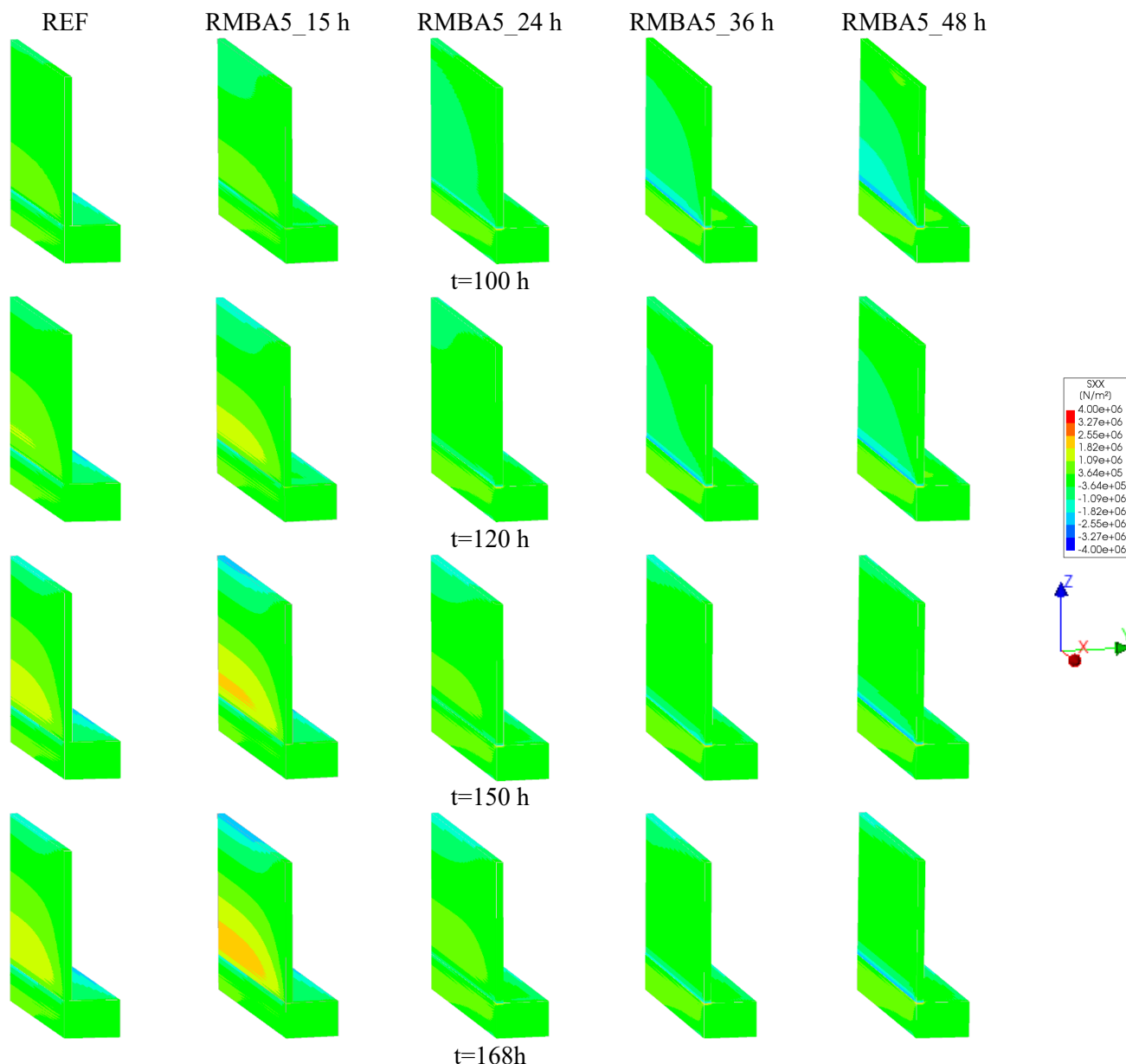


Nos concretos RMBA5, evidencia-se o surgimento de tensões de tração elevadas na interface parede/base, atingindo valores próximos de 3 MPa ao final da análise. Esse comportamento inexistente no REF, está diretamente associado à interação entre expansão autógena e o avanço da rigidez do concreto. Para complementar a análise nodal e compreender a distribuição espacial das tensões, apresentam-se na Figura 4.51 os mapas tridimensionais correspondentes a diferentes instantes da evolução das tensões. Esses mapas permitem verificar a coerência volumétrica das respostas observadas no plano oposto ao plano de simetria, além de identificar regiões críticas que não seriam detectadas apenas pela análise em pontos isolados.

Figura 4.51 – Mapas tridimensionais de tensões correspondentes a diferentes instantes da evolução mecânica no plano invertido ao plano simétrico, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do muro de arrimo e a influência do pico de expansão nas regiões monitoradas.







Nos cenários com pico às 15 h e 24 h, observa-se que as tensões na base aumentam apenas de forma moderada, alcançando valores de até 2,5 MPa, permanecendo compatíveis com o comportamento do concreto REF. Nessa condição, a expansão ocorre quando a rigidez ainda é relativamente baixa, o que permite maior acomodação deformacional sem impor sobrecargas significativas à interface.

Por outro lado, quando o pico de expansão é deslocado para 36 h e 48 h, a interface passa a registrar tensões de tração mais pronunciadas. Nesse intervalo, o concreto já se encontra em estágio maturacional avançado, e a expansão coincide com um módulo de elasticidade significativamente maior, aumentando a capacidade do material de transmitir esforços para

regiões restritas. Assim, parte da compressão desenvolvida anteriormente nas regiões internas (B e C), conforme evidenciado pela análise em função da idade equivalente, é transferida para a base, cuja restrição total impede a acomodação volumétrica. O resultado é a tração acumulada e persistente ao longo do tempo na interface. A diferença entre os cenários de 36 h e 48 h é relativamente pequena, sugerindo que, a partir de determinado ponto, o deslocamento tardio do pico expansivo deixa de produzir ganhos mecânicos adicionais e passa a atuar em regime de saturação estrutural.

Esse comportamento revela um ponto crítico no emprego de agentes expansores não comerciais: expansões tardias podem favorecer a redução de tensões de tração internas no volume da parede, mas, simultaneamente intensificam tensões de tração em regiões altamente restritas, especialmente na interface parede/base. Dessa forma, a mitigação da retração não ocorre de maneira uniforme ao longo da estrutura, dependendo fortemente da compatibilidade entre o instante da expansão e as condições locais de rigidez e restrição. Esses resultados reforçam a necessidade de aprofundar análises complementares no modelo numérico, especialmente relacionadas ao levantamento e às tensões principais, que permitem avaliar com maior precisão o risco de fissuração nessas regiões críticas.

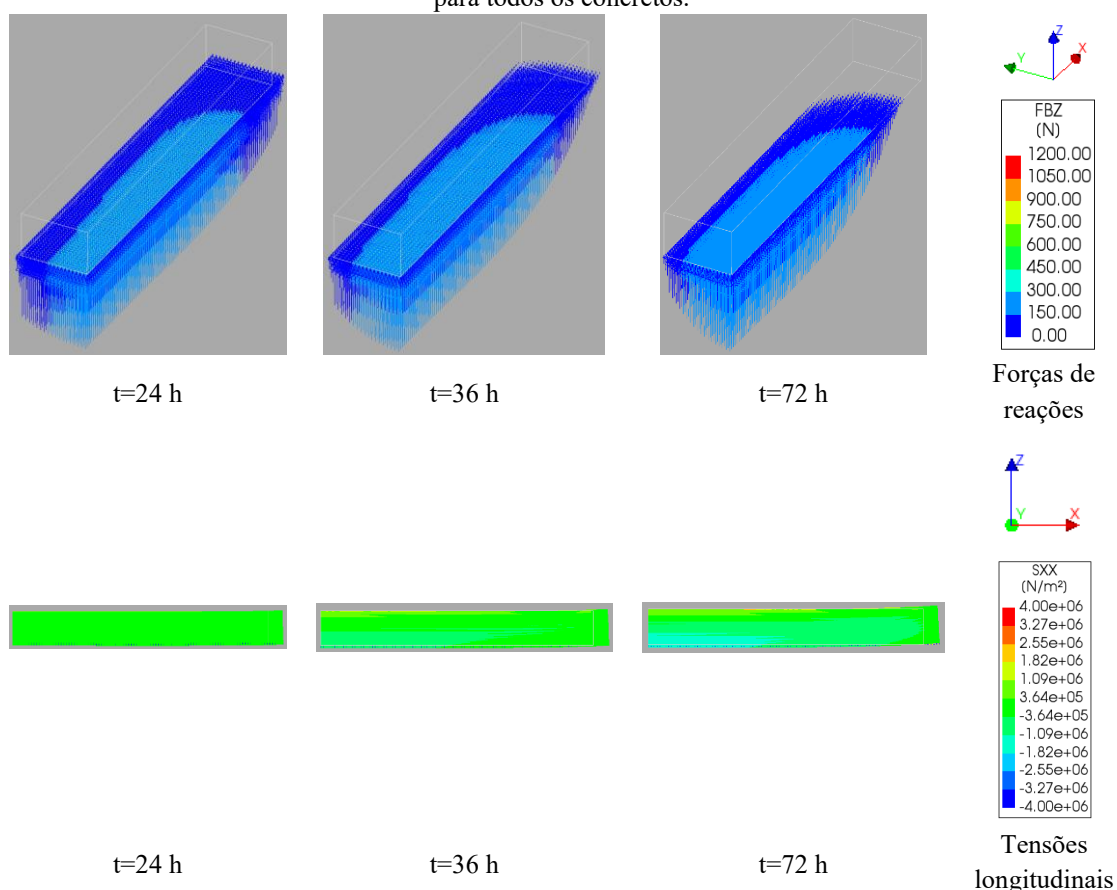
4.2.2.2 Resultados das reações de levantamento

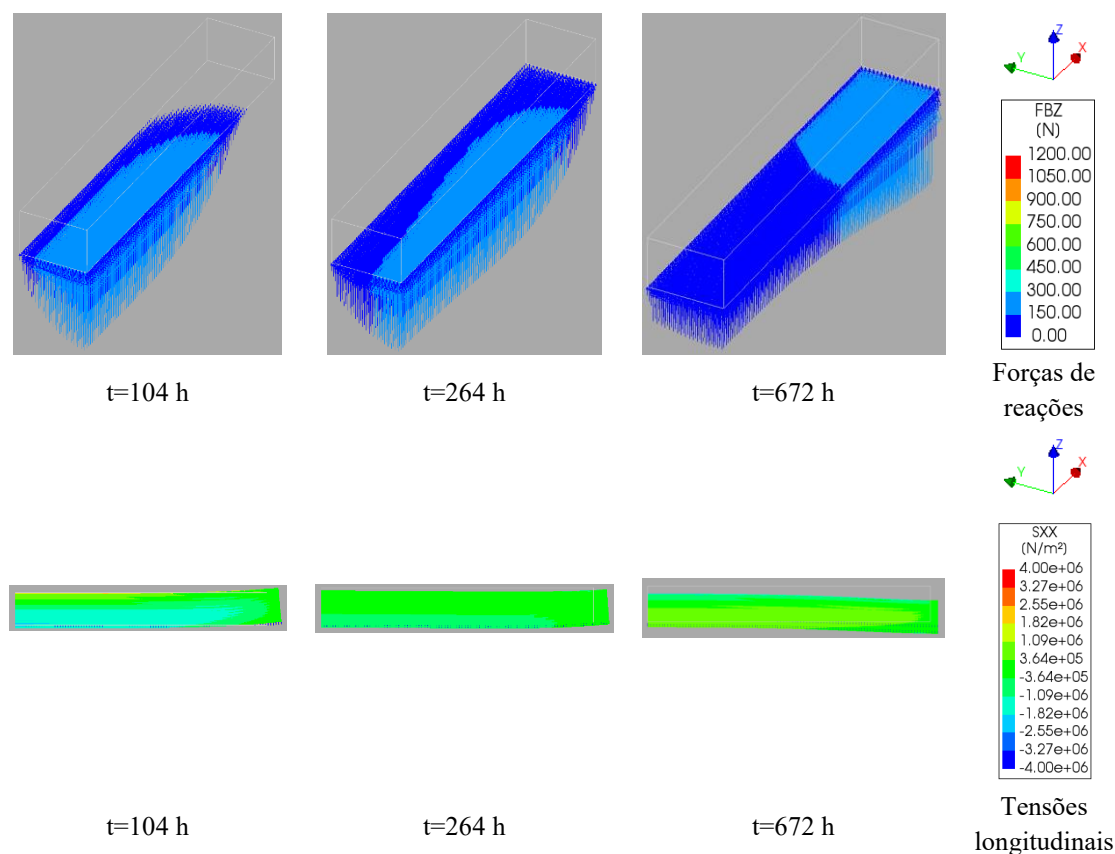
Uma das premissas adotadas nas simulações do muro de arrimo foi permitir o levantamento da base da sapata de fundação, visto que, em análises preliminares, havia sido verificado que a restrição desse comportamento gerava reações de apoio superiores ao valor correspondente ao peso próprio da parede e base. Para isso, a condição de interface solo-estrutura foi modelada pelo critério *non-tension*, segundo o qual o solo resiste apenas à compressão, não fornecendo qualquer tração que mantenha o muro aderido quando a estrutura tende a se afastar da base. Nessa configuração, regiões com levantamento apresentam automaticamente reação igual a zero, refletida graficamente pela ausência de setas na representação das forças na base, enquanto regiões sem levantamento aparecem com setas, indicando contato ativo e transmissão de reação compressiva transmitida ao solo. Para analisar esse comportamento, considerou-se todo o período compreendido entre a concretagem da base e o fim da simulação, totalizando 35 dias (840 h), incluindo-se também a etapa de construção da parede.

A interpretação do levantamento torna-se mais consistente quando os resultados são avaliados de forma integrada com as tensões longitudinais e com as condições de contato solo-estrutura.

Como premissa da pesquisa, não foram consideradas curvas de retração ou expansão para o concreto da base, de modo que os efeitos de levantamento observados decorrem essencialmente da interação entre a parede e a base. Assim, nesta etapa, a análise na base é feita considerando-se que todos os concretos apresentam comportamento equivalente, concentrando a diferenciação apenas na parede. Na Figura 4.52 apresenta, para todos os concretos, os mapas de forças de reação e das tensões longitudinais na base, para instantes representativos da primeira fase (apenas base), permitindo compreender de que forma a perda de contato na interface influencia a distribuição das tensões ao longo da sapata, além de visualizar por meio dos mapas de tensões o levantamento da peça. Os tempos foram selecionados de forma a englobar: (i) um instante sem levantamento; (ii) o início do levantamento; (iii) um instante intermediário de evolução do fenômeno; (iv) o instante de levantamento máximo; (v) o instante em que a base volta a aderir totalmente ao solo; e (vi) o instante final da análise.

Figura 4.52 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (primeira fase) para todos os concretos.





Na primeira fase, observa-se na Figura 4.48 que o levantamento ocorre na extremidade oposta ao plano de simetria, coincidindo com o gradiente térmico típico de um elemento estrutural massivo aquecido pelo próprio calor de hidratação. O levantamento inicia-se em aproximadamente 36 h, coincidindo com o período de pico térmico, atingindo seu máximo em torno de 104 h. A partir desse instante, com o resfriamento da peça, o levantamento decai gradualmente até desaparecer por completo em 264 h. Trata-se, portanto, de um fenômeno transitório, compatível com efeitos térmicos e reológicos iniciais da própria base.

Para analisar a segunda fase, correspondente à construção da parede sobre a base, nas Figuras 4.53 a 4.57 apresentam a evolução das forças de reação e das tensões longitudinais para cada situação avaliada (REF, RMBA5_15 h, RMBA5_24 h, RMBA5_36 h e RMBA5_48 h).

Figura 4.53 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase) para o concreto REF.

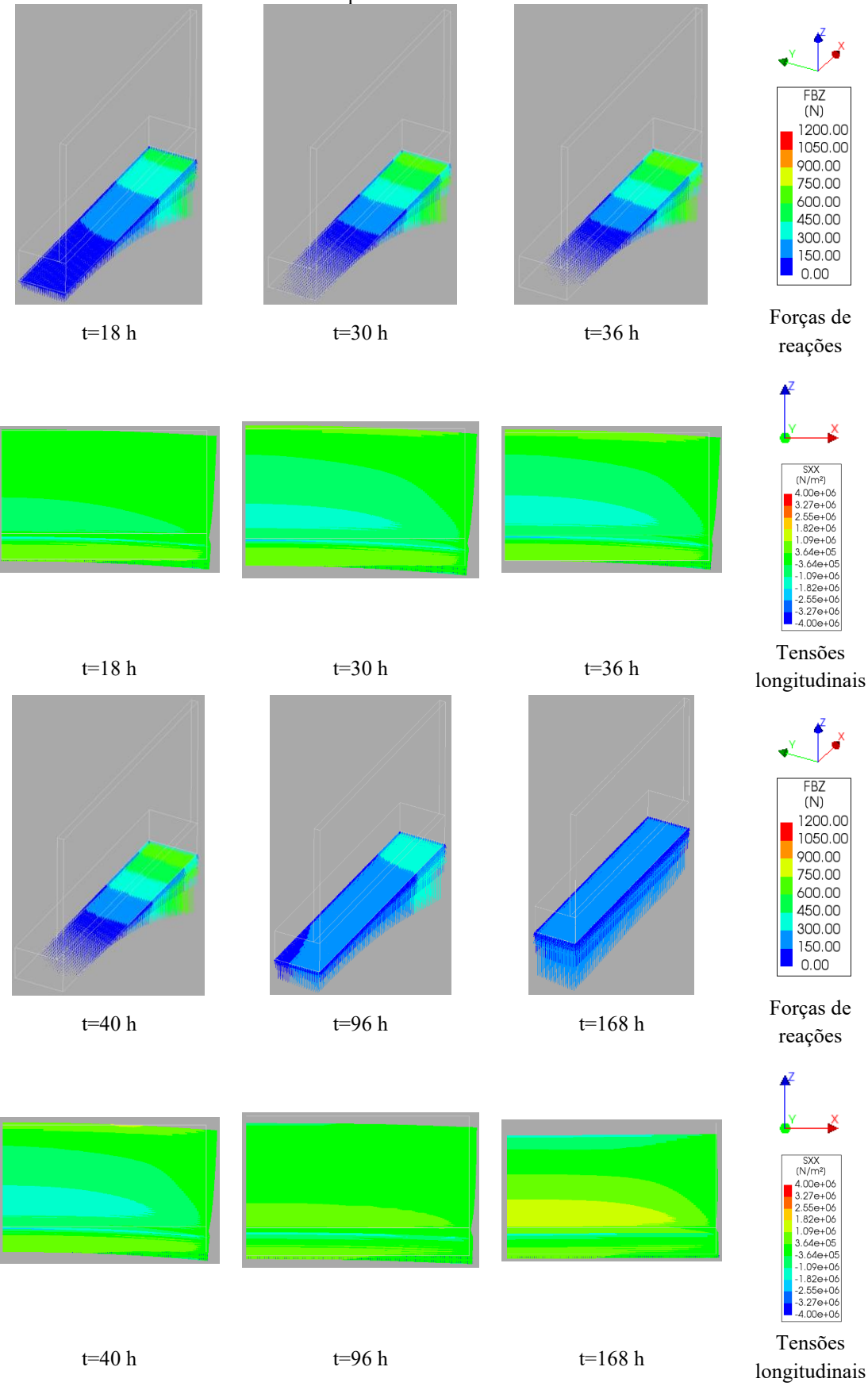


Figura 4.54 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase)
para o concreto RMBA5 15 h.

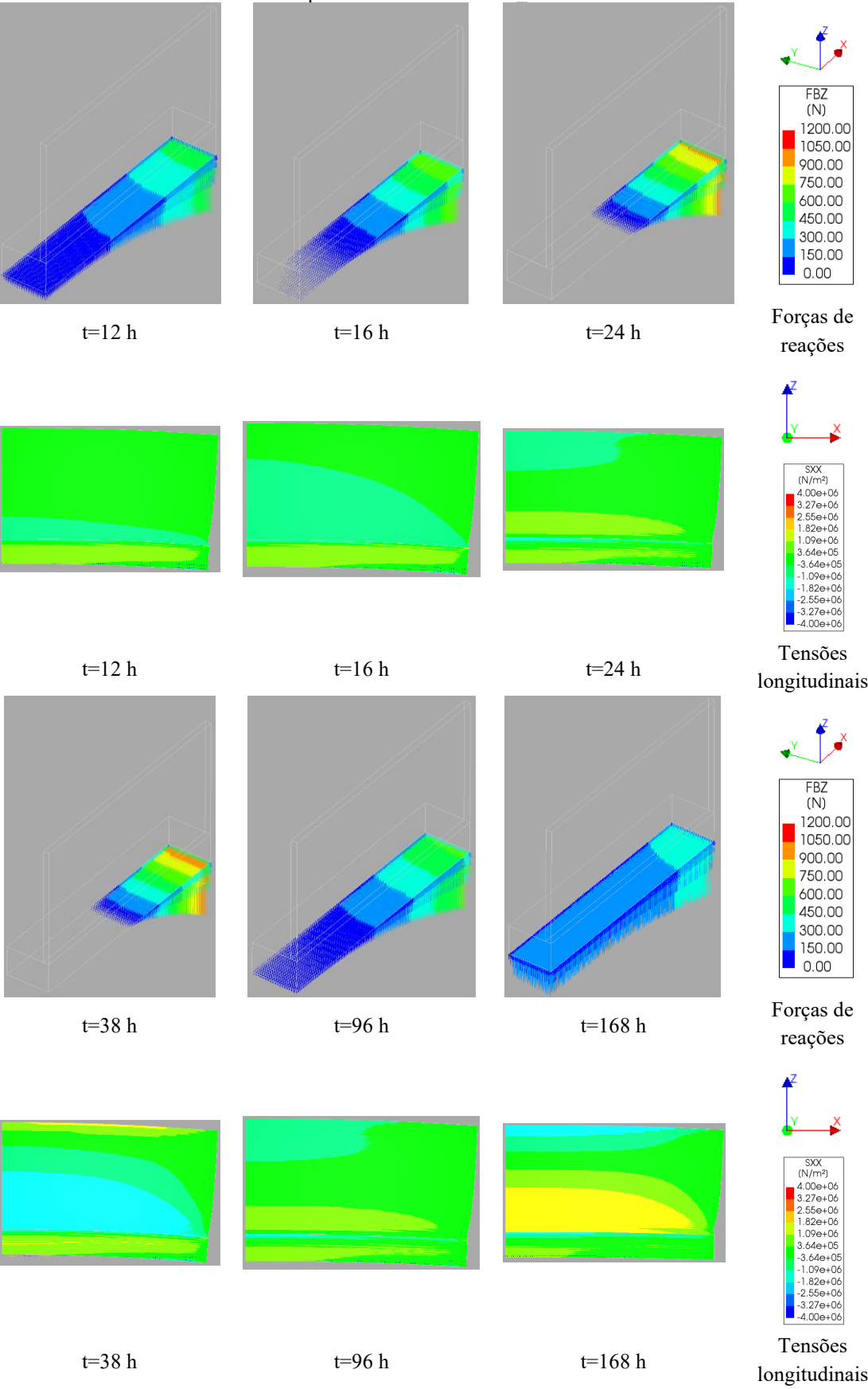


Figura 4.55 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase)
para o concreto RMBA5_24 h.

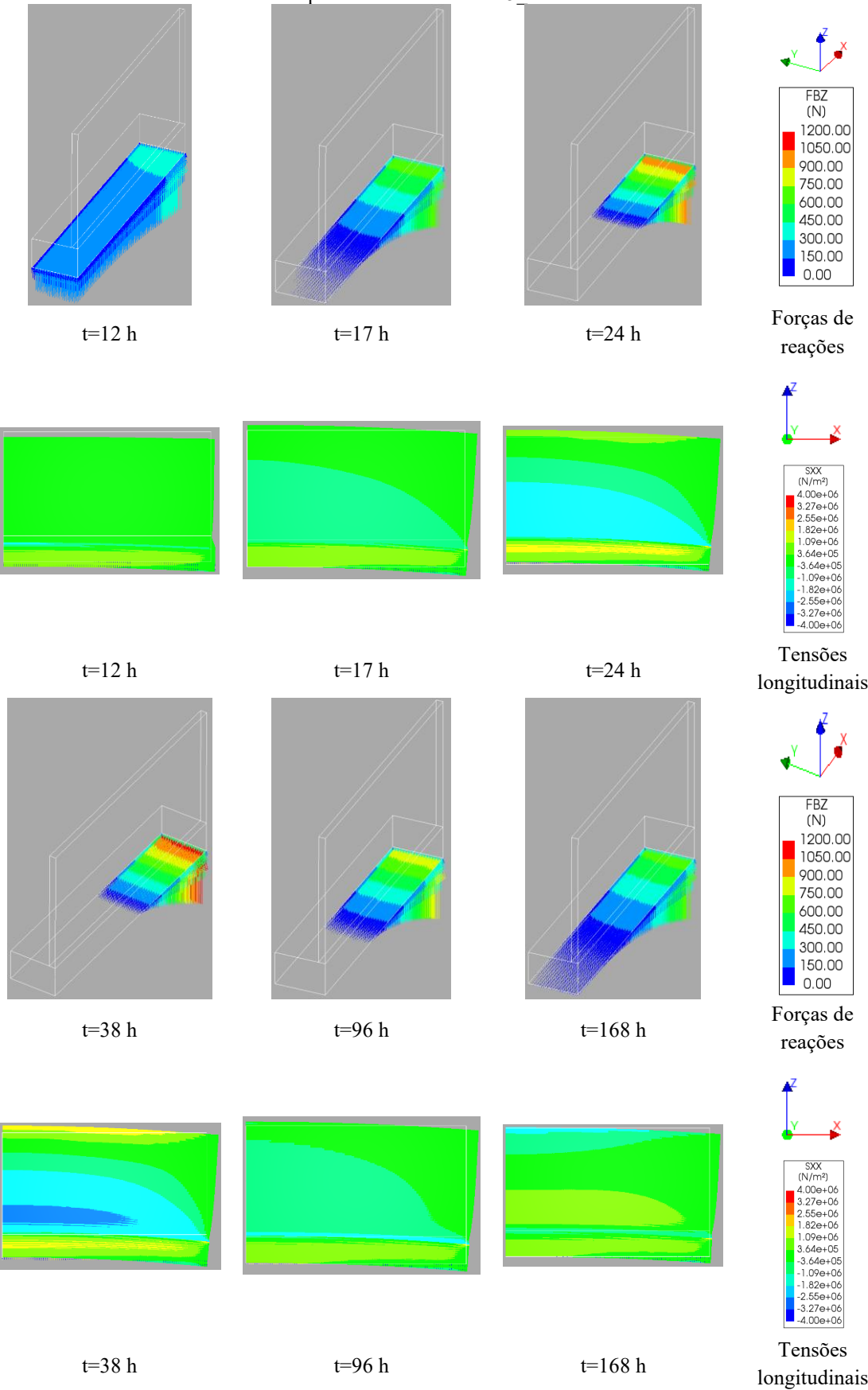


Figura 4.56 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase)
para o concreto RMBA5 36 h.

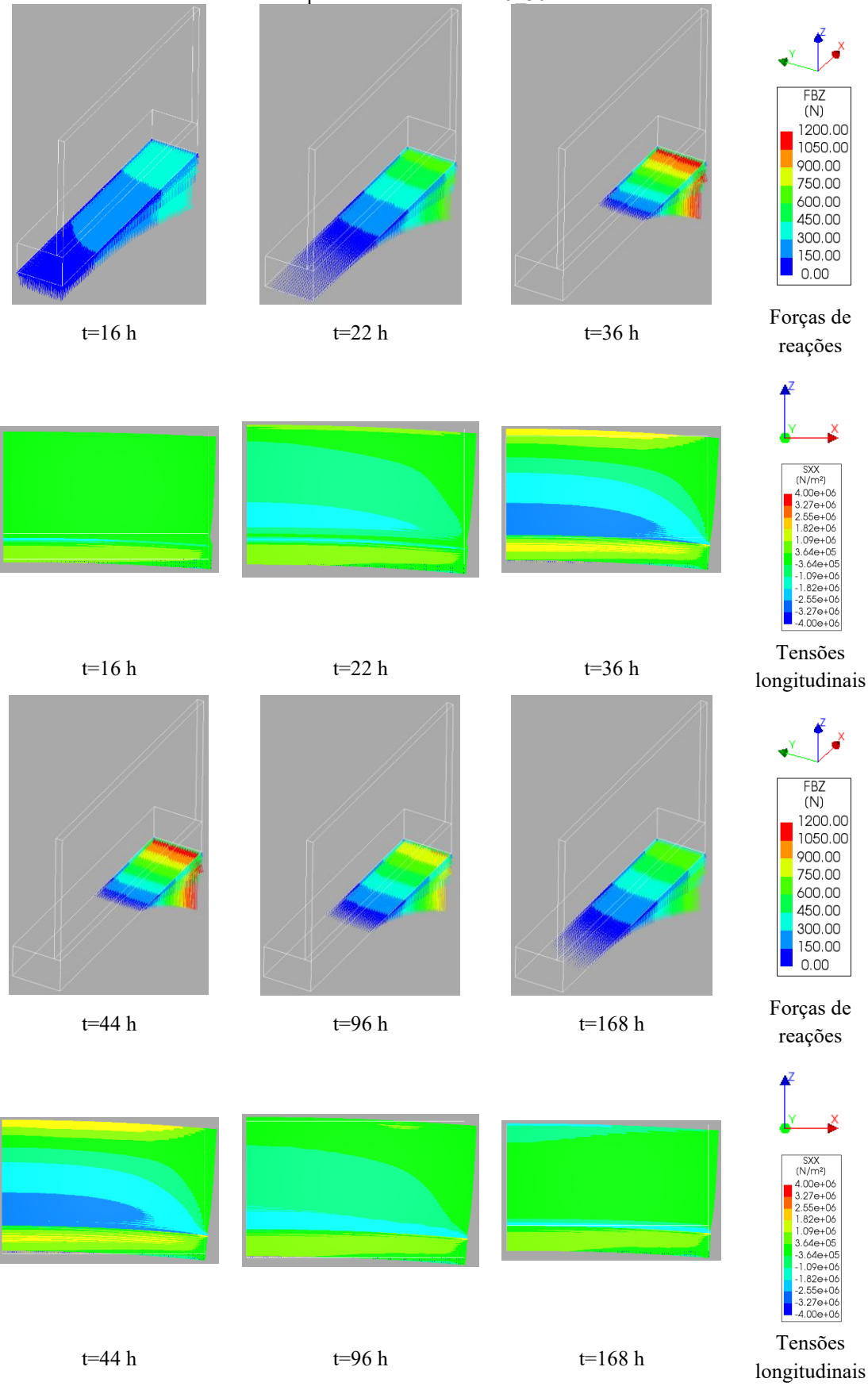
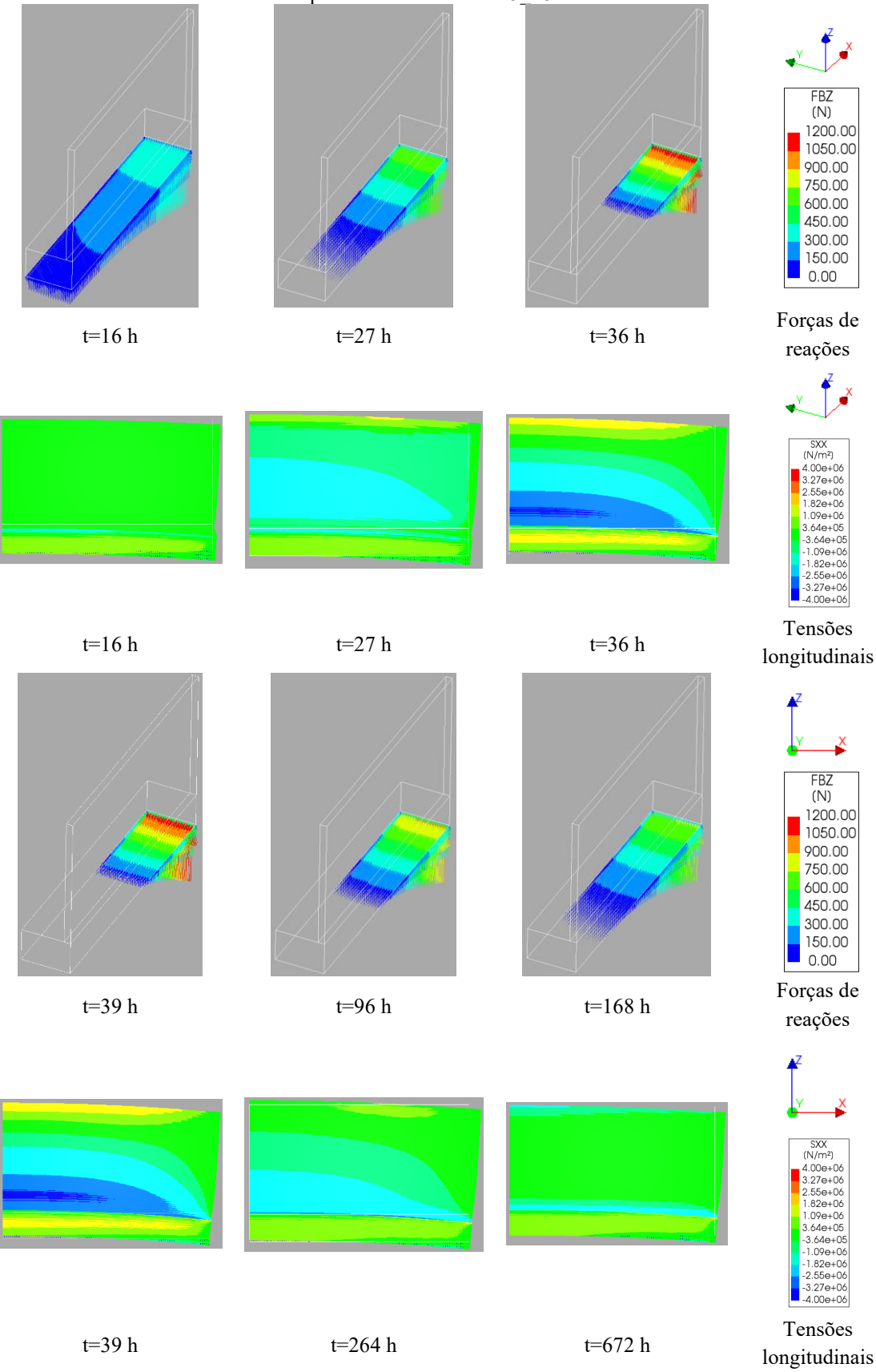


Figura 4.57 – Mapas de evolução das forças de reações e tensões longitudinais na base (segunda fase)
para o concreto RMBA5 48 h.



Nos instantes relativos à segunda fase, observa-se que o levantamento volta a se manifestar na base para todos os concretos analisados. Diferentemente da fase anterior, o levantamento passa a ocorrer predominantemente no plano de simetria, refletindo o fato de que a parede, mais quente e mais rígida nessa região, apresenta maior tendência de expansão vertical e horizontal, provocando perda de contato na base central.

Para o concreto de referência (Figura 4.53), nota-se que o levantamento na segunda fase se inicia por volta de 30 h, alcança o seu máximo em torno de 40 h e, em seguida, diminui progressivamente devido ao resfriamento, desaparecendo por completo no instante de 60 h. Esse comportamento é alterado quando se inclui o efeito do expansivo do RMBA5. No cenário com pico de expansão às 15 h (Figura 4.54), o levantamento inicia-se por volta de 16 h, atinge máximo às 38 h e retorna a zero por volta de 96h. No caso do pico às 24 h (Figura 4.55), o levantamento se mantém por um período mais longo: às 96 h ainda se observa base parcialmente deslocada, e ao final da análise ainda permanece um leve levantamento residual. Para os cenários com picos às 36 h e 48 h (Figura 4.56 e Figura 4.57), o impacto torna-se mais expressivo, em linha com as análises anteriores. O levantamento inicia-se cerca de 22 h e 27 h, respectivamente, e persiste até o fim da simulação, sem que a base volte a aderir completamente ao solo. Essa persistência é coerente com as tensões de tração observadas anteriormente na interface parede/base no plano oposto ao plano simétrico: como a base se encontra levantada na região do plano de simetria, a transferência de esforços concentra-se na face oposta, gerando aumento de tração na interface parede/base.

Para compreender esse comportamento, é importante lembrar que a formação de levantamento é acompanhada por redistribuições significativas das tensões horizontais (σ_{xx}). Os resultados mostram que, à medida que os gradientes de temperatura e de expansão se intensificam, a parede tende a se expandir lateralmente. Essa expansão é parcialmente impedida pela base, sobretudo nas regiões onde ainda existe contato solo-base. Como consequência, formam-se tensões de compressão nas zonas mais restritas, próximas ao contato ativo, e tensões de tração nas regiões em que o contato é perdido. Assim, as áreas em que o levantamento ocorre apresentam simultaneamente: (i) reação igual a zero, indicando perda de contato; e (ii) tensões horizontais mais tracionadas, o que evidencia que o fenômeno é coerente com o mecanismo físico, a base deixa de conter a parede na região onde se forma a separação, gerando alívio de compressão e aumento relativo de tração na transição parede/base. Esse mecanismo explica por que, nos concretos RMBA5_36 h e RMBA5_48 h, a tração acumulada na interface atinge

valores próximos de 3 MPa, enquanto o concreto REF permanece predominantemente em compressão.

Os cenários com picos expansivos tardios apresentam levantamentos mais amplos e persistentes porque, nesses casos, o concreto já possui rigidez suficiente para transmitir a expansão como tensão efetiva, ao mesmo tempo em que ainda há deformação expansiva significativa. Essa combinação faz com que as regiões internas, mais quentes, entrem em forte compressão; parte dessa compressão é transferida para a base, que reage aumentando as forças de contato apenas onde o apoio ainda está ativo. Isso induz levantamento localizado nas demais regiões e aumento de tração horizontal na interface, principalmente no plano não simétrico, onde a parede encontra menor confinamento. No concreto REF, essas condições não ocorrem de forma simultânea, motivo pelo qual o levantamento é menor, dura menos tempos e não produz trações elevadas.

De forma integrada, os resultados demonstram que o levantamento é uma resposta coerente ao acoplamento entre gradientes térmicos, expansão autógena e rigidez evolutiva do concreto. A perda de contato ocorre exatamente nas regiões onde a parede apresenta maior demanda de expansão e o solo, por não resistir à tração, deixa de fornecer reação. Esse mecanismo altera o campo de tensões horizontais, produzindo compressão onde o contato é mantido e tração onde o levantamento se estabelece. Nos cenários de expansão tardia (36 h e 48 h), esse mecanismo torna-se mais pronunciado, pois a combinação entre elevada maturidade e expansão favorece a transferência de compressão interna para a base, intensificando tração na interface parede/base, especialmente no plano oposto ao simétrico, onde a parede é menos confinada. Esses resultados esclarecem as dúvidas levantadas e confirmam que o local e a intensidade do levantamento são controlados pelo equilíbrio entre maturidade, restrição e evolução térmica, em plena coerência com o comportamento físico da estrutura.

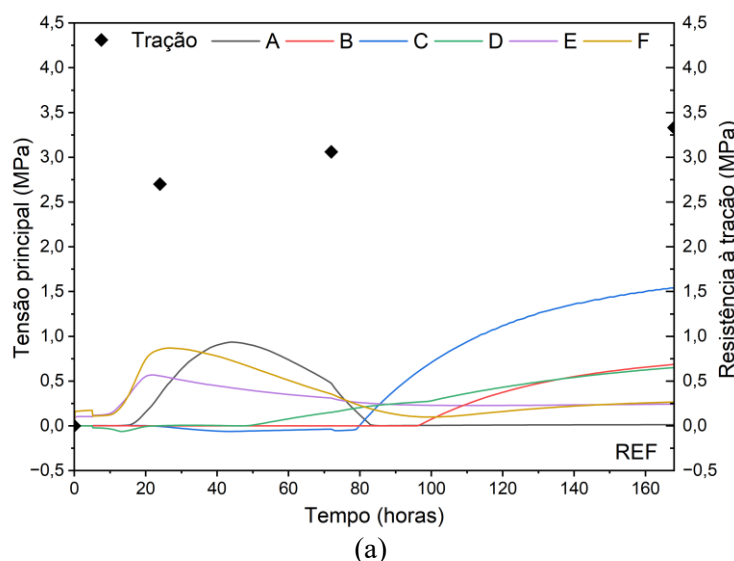
4.2.2.3 Tensões principais

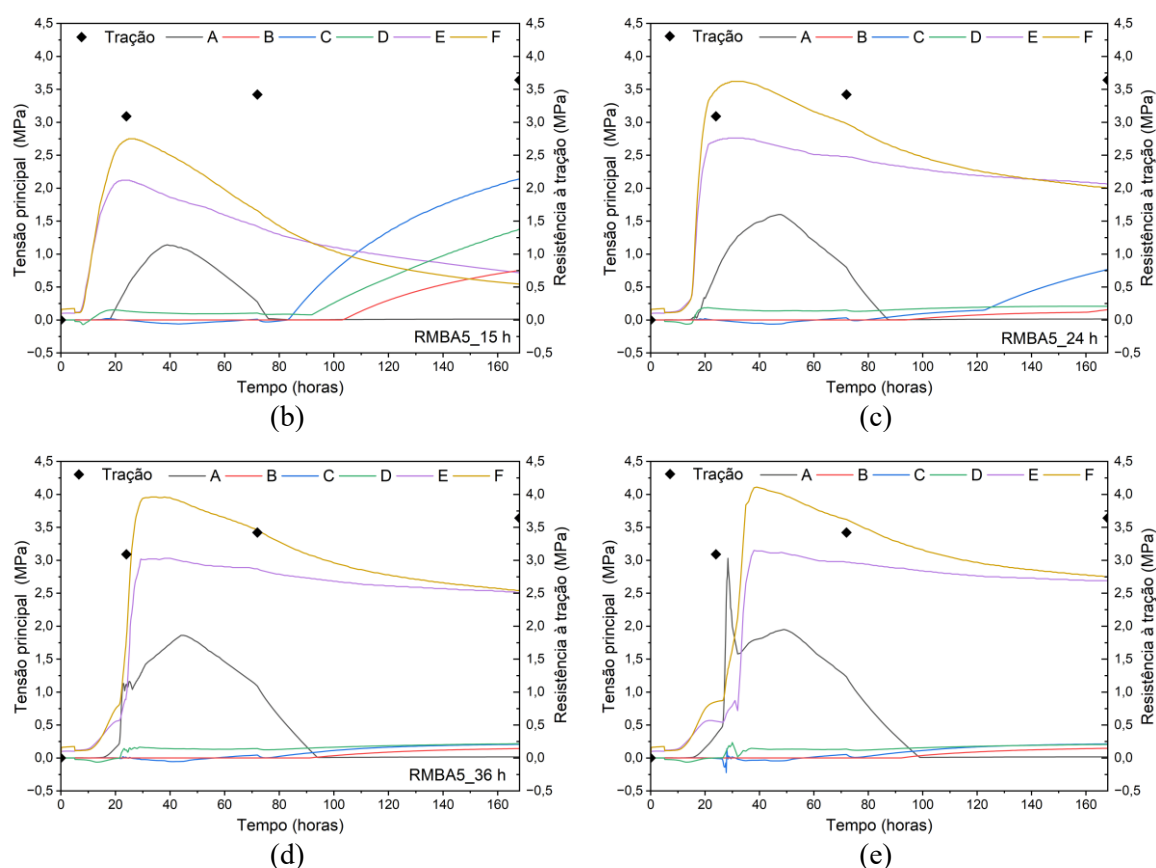
Com o objetivo de avaliar não apenas a evolução das tensões principais, mas também o risco efetivo de fissuração, os resultados numéricos foram comparados diretamente à resistência à tração do concreto. Como os ensaios de resistência à tração foram realizados apenas aos 28 dias, para os concretos REF e RMBA5, a evolução dessa propriedade em idades iniciais foi estimada a partir dos valores médios de resistência à compressão, conforme recomendado pelo *Eurocode 2* (EN 1992-1-1) e pelo *fib Model Code 2010*, os quais estabelecem que a resistência à tração segue a mesma lei de maturidade da resistência à compressão.

Assim, adotou-se o coeficiente experimental entre $f_{ct,28}$ e $f_{c,28}$, medido para cada traço, e esse coeficiente foi aplicado às resistências à compressão obtidas em idades iniciais. Partindo dos valores experimentais de resistência à tração aos 28 dias, 3,7 MPa para o traço REF e 4,1 MPa para o RMBA5, e utilizando-se a razão $f_{ct,28}/f_{c,28}$ determinada para cada concreto, estimaram-se as resistências à tração nas idades de 1, 3 e 7 dias. Dessa forma, o concreto REF apresentou valores aproximados de 2,7 MPa (1 dia), 3,06 MPa (3 dias) e 3,3 MPa (7 dias), enquanto o concreto RMBA5 apresentou cerca de 3,09 MPa, 3,42 MPa e 3,64 MPa nas mesmas idades. A partir desses valores, torna-se possível comparar diretamente as tensões principais obtidas nas simulações numéricas com a capacidade resistente ao longo do tempo, permitindo avaliar o risco de fissuração em idades iniciais e identificar os momentos mais críticos da história termomecânica do muro.

Na Figura 4.58 está apresentado a evolução das tensões principais (σ_1) nos pontos A, B, C, D, E e F, juntamente com a resistência à tração nas idades iniciais, para os concretos analisados no estudo paramétrico. Os pontos A, B, C e D correspondem às regiões já analisadas anteriormente no plano de simetria da parede, enquanto o ponto E representa um ponto na interface parede/base no plano oposto ao simétrico, onde foram observadas trações elevadas nas análises de tensões longitudinais, e o ponto F corresponde a um ponto na superfície da base, também próximo a essa região crítica. A inclusão de E e F na análise das tensões principais permite avaliar, de forma mais completa, os efeitos combinados da expansão autóloga e do levantamento na interface.

Figura 4.58 – Relação entre tensões principais e a resistência à tração, considerando REF e os quatro cenários paramétricos de deslocamento temporal do pico expansivo: (a) REF; (b) 15 h; (c) 24 h; (d) 36 h; e (e) 48 h.





No concreto REF, Figura 4.58 (a), as curvas de σ_1 nos pontos A, B, C e D apresentam o comportamento típico de paredes massivas submetidas a gradientes térmicos. Os pontos internos B e C permanecem majoritariamente em compressão ao longo de quase toda a análise, com picos compressivos nas primeiras 36–48 h associados ao aquecimento do núcleo, atingindo tensões da ordem de 2 MPa. Os pontos A e D, localizados em regiões superficiais, desenvolvem picos de tração durante o resfriamento, porém com magnitudes inferiores à resistência à tração estimada em todas as idades, indicando baixo risco de fissuração nessas regiões. Nos pontos E e F, situados na interface e na superfície da base no plano oposto, as tensões principais de tração permanecem baixas, com σ_1 bem distante de $f_t(t)$. Isso confirma que, na ausência de expansão autógena significativa, a interface parede/base não se torna uma região crítica do ponto de vista de fissuração, mesmo com a ocorrência de levantamentos transitórios associados à Fase 1.

Quando o pico de expansão do RMBA5 é antecipado para 15 h, Figura 4.58 (b), observa-se que a maior parte da deformação expansiva ocorre em um estágio em que o módulo ainda é relativamente baixo. Como consequência, as tensões principais permanecem próximas às do REF nos pontos A e D; nos pontos B e D, prevalecem compressões moderadas; e no ponto C a

curva de σ_1 segue um padrão semelhante ao do REF, com trações ligeiramente maiores. Nos pontos E e F, durante o período do aquecimento as tensões atingem valores da ordem de 2-3MPa, porém ainda em níveis não críticos, inferiores à resistência à tração estimada. Esse cenário confirma que, quando a expansão ocorre muito precocemente, parte significativa da deformação é acomodada em regime de baixa rigidez, limitando a conversão em compressão residual e mantendo o risco de fissuração em patamares semelhantes ao concreto de referência.

Com o deslocamento do pico expansivo para 24 h, Figura 4.58 (c), o concreto já se encontra em um estágio maturacional mais avançado, com módulo de elasticidade mais elevado. Nessa condição, as compressões internas em B, C e D tornam-se mais intensas na fase inicial, e as tensões de tração em A aumentam em relação a REF e o caso de 15 h, principalmente no período de aquecimento e início do resfriamento. Nos pontos E e F, as tensões principais máximas crescem em relação ao REF, chegando a valores ligeiramente superiores à resistência à tração em torno do pico de expansão e mantendo-se nesse patamar até o início de resfriamento, quando σ_1 passa a decair. O comportamento global indica uma melhora no estado tensional em regiões internas da parede, em comparação aos cenários sem expansão ou com pico precoce, porém à custa de um aumento sensível do risco de fissuração na interface parede/base, refletindo o efeito observado anteriormente na análise de levantamento, sobretudo no plano oposto ao simétrico.

Quando o pico de expansão é deslocado para 36 h, Figura 4.58 (d), estabelece-se uma condição em que há maior sincronia entre expansão e rigidez desenvolvida. As compressões nas regiões B, C e D tornam-se mais pronunciadas, atuando de forma efetiva na compensação das tensões de tração que tenderiam a se desenvolver por retração e resfriamento, evidenciando o efeito mitigador da expansão quando aplicada em idade intermediária. No ponto A, a magnitude de σ_1 aumenta durante o aquecimento, mas permanece inferior a resistência a tração. Nas regiões de interface E e F, contudo, há um incremento significativo das tensões de tração em relação ao concreto de referência, com valores de σ_1 superiores à resistência à tração estimada em determinados instantes, até o início do resfriamento. Esse comportamento indica um risco real de fissuração, ainda que escala localizada e de caráter transitório. Com o resfriamento, as tensões principais reduzem e finalizam com valores inferiores à resistência à tração, sugerindo uma tendência de fechamento das fissuras formadas na fase crítica. Dessa forma, observa-se que, no cenário de 36 h, coexistem dois efeitos: mitigação das trações no interior da parede e aumento temporário do risco de fissuração na interface parede/base.

No cenário mais tardio, com pico às 48 h, Figura 4.58 (e), observa-se comportamento qualitativamente semelhante ao do caso de 36 h, porém com efeito ainda mais concentrado nas regiões de interface. A maturidade do concreto nos pontos internos já é significativamente elevada, e a expansão passa a atuar em um sistema com rigidez altamente desenvolvida. Os pontos B e C permanecem predominantemente em compressão, contribuindo para a mitigação de trações no interior da parede; entretanto, os efeitos mais críticos se concentram novamente nos pontos E e F, associados à interface parede/base no plano oposto ao simétrico. Nesses pontos, as tensões principais atingem valores sistematicamente superiores à resistência à tração estimada para as idades correspondentes, por intervalo de tempo mais prolongado em relação ao cenário de 36 h. A combinação entre alta rigidez, forte compressão interna em B e C, levantamento parcial da base e restrição geométrica da interface gera um estado tensional altamente desfavorável, sugerindo também elevada propensão à fissuração na interface parede/base para o cenário RMBA5_48 h.

Dessa forma, a inclusão dos pontos E e F na análise das tensões principais reforça a conclusão de que expansões tardias, embora possam reduzir tensões de tração no interior da parede, tendem a transferir esforços para regiões altamente restritas, como a interface com a base, aumentando significativamente o risco de fissuração local. Em síntese, a eficácia do agente expensor para mitigação de retração não é uniforme ao longo da estrutura e depende fortemente do alinhamento temporal entre o pico de expansão, a evolução da rigidez e as condições de restrição impostas pela geometria e pela fundação.

5 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Com a análise dos resultados obtidos após o desenvolvimento do programa experimental e numérico dessa pesquisa, é apresentada uma síntese das principais considerações:

- Do ponto de vista químico-mineralógico, ambos os resíduos de mármore apresentaram composição essencialmente carbonática antes do tratamento térmico (T0), com predominância de CaO, MgO e pequenas frações de SiO₂ e outros óxidos. O resíduo de mármore da Bahia (RMBA) mostrou caráter mais cálcico, com maior teor de CaO e presença de Al₂O₃, enquanto o resíduo do Espírito Santo (RMES) exibiu caráter mais dolomítico, com teores significativamente mais elevados de MgO. Os difratogramas de raios X confirmaram esses comportamentos, com picos dominantes de calcita (CaCO₃) e presença de quartzo e dolomita para o RMBA, e picos predominantes de dolomita com

calcita para o RMES. Em ambos os casos, a ausência de halo amorfo indicou materiais essencialmente cristalinos.

- As análises termogravimétricas (TG/DTG) evidenciaram, para os dois resíduos, um evento endotérmico principal entre 600°C e 800°C, com pico em torno de 750°C, associado à decomposição dos carbonatos e liberação de CO₂. Acima de 800°C, a perda de massa tende à estabilização, sugerindo a conclusão da descarbonatação das fases majoritárias. A partir desses resultados, foram definidos três regimes de tratamento térmico: T800_0h, T800_1h e T1000_1h.
- Os tratamentos a 800°C (com e sem patamar) não promoveram alterações químicas e mineralógicas significativas: as perdas de massa permaneceram elevadas e os difratogramas continuaram apresentando picos marcantes de calcita e dolomita, com apenas indícios iniciais de formação de MgO. Em contraste, o tratamento T1000_1h resultou em perdas de massa residuais muito baixas e difratogramas dominados por óxidos de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), com desaparecimento dos picos de carbonatos. As análises de FRX após esse tratamento confirmaram a manutenção da predominância de CaO para o RMBA e de MgO para o RMES, agora na forma de óxidos livres, corroborando a completa decomposição do carbonato de cálcio.
- Em síntese, a combinação de TG/DTG, DRX e FRX demonstrou que apenas o tratamento térmico a 1000 °C por 1 h (T1000_1h) foi eficaz em promover a transformação integral dos carbonatos em CaO e MgO reativos, condição essencial para conferir potencial expansivo aos resíduos quando incorporados a matrizes cimentícias. Por esse motivo, o resíduo de mármore calcinado em T1000_1h foi selecionado como agente expensor não comercial para as etapas subsequentes da tese.
- A avaliação conjunta dos resultados em pastas cimentícias evidencia que as adições estudadas modificam a evolução volumétrica e o desenvolvimento mecânico das pastas, por mecanismos consistentes com as transformações identificadas nas análises de DRX, TG/DTG e PIM. Do ponto de vista do estado fresco, todas as misturas atenderam ao intervalo de espalhamento (90 ± 20 mm), com tendência de redução do abatimento à medida que aumentou o teor de resíduos. Esse efeito foi moderado e compatível com a premissa de não utilizar superplastificante, sinalizando boa viabilidade de aplicação nas dosagens adotadas.
- No comportamento volumétrico, as curvas de deformação indicaram que o aumento do teor de RMBA elevou sistematicamente as expansões, com destaque para 5%, enquanto

o RMES produziu expansões menores e mais graduais, coerentes com a cinética mais lenta do MgO. Os aditivos comerciais tiveram efeitos distintos, o AE2 reduziu a retração inicial e gerou expansão moderada, enquanto o ARR2 produziu expansão mais elevada e sustentada após o retardo inicial de hidratação.

- Nas propriedades mecânicas, emergem três grupos de resultados: (i) o ARR2 apresentou os menores valores relativos, compatíveis com maior porosidade e retardo de hidratação; (ii) o AE2 manteve desempenho próximo à referência, com rigidez inicial alta; e (iii) os resíduos tratados manteram ou elevaram as resistências com evolução estável do módulo, destacando-se o RMBA2, com equilíbrio entre expansão e resistência, e RMES2 e RMES5, com ganhos de resistência sem perda de rigidez. A comparação do EMM-IRM e frequência ressonante demonstrou boa concordância a partir de 3 dias, reforçando a consistência da leitura de módulo e a confiabilidade do acompanhamento contínuo pelo EMM-IRM.
- Os resultados das microanálises mantiveram esses comportamentos. Em DRX, observou-se para RMBA redução progressiva de picos de portlandita com o aumento do teor e, para RMES, menores índices de cristalinidade ao longo do tempo. Em TG/DTG, os resíduos tratados mostraram-se ativos, em que formaram Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 adicionais, com destaque para a evolução gradual de Mg(OH)_2 nas misturas com RMES e incremento de Ca(OH)_2 mais pronunciado em RMBA. Esses resultados explicam a combinação da expansão e densificação observada para RMBA2 e a expansão mais controlada do RMES. Em PIM, o AE2 diminuiu o diâmetro médio e aumentou a área superficial, sinalizando refinamento, o ARR2 elevou todas as classes de poros, o que representa uma estrutura mais complexa, porém mais porosa; o RMBA mostrou resposta dependente do teor, com RMBA1 e RMBA2 deslocando a distribuição para poros maiores e RMBA5 invertendo para um regime dominado por efeito filer; o RMES apresentou reduções consistentes de porosidade e volumes intrudidos em todos os teores, com RMES5 atingindo os menores valores globais, coerentes com sua cinética mais lenta e refinamento progressivo.
- Por fim, a coerência observada entre trabalhabilidade, deformação, desempenho mecânico e evolução da hidratação permitiu selecionar os teores mais representativos para a etapa subsequente do estudo. Optou-se por empregar nos concretos as maiores porcentagens de adição de resíduo, de modo a avaliar o comportamento dessas misturas sob condições mais críticas, considerando o potencial expansivo identificado nas pastas.

Assim, foram selecionados o teor de 5% para o RMBA e RMES, além das misturas de referências (REF, AE2, ARR2). Essa síntese encerra a análise de pastas e estabelece, de forma criteriosa, a transição para a investigação dos concretos convencionais produzidos a partir desses sistemas.

- Tendo caracterizado quimicamente os resíduos tratados termicamente e analisado seu comportamento em pastas cimentícias, estende-se agora a avaliação para o nível de concreto, a fim de verificar se as tendências observadas na microescala se mantêm em sistemas mais representativos das aplicações estruturais. No estado fresco, os concretos apresentaram comportamento homogêneo, com abatimentos dentro da faixa especificada e massas específicas semelhantes. As diferenças observadas foram diretamente associadas ao tipo de mitigador empregado.
- Quanto as propriedades mecânicas, observou-se evolução contínua da resistência à compressão em todas as composições, com tendência semelhante à observada nas pastas cimentícias. O concreto REF apresentou as maiores resistências em todas as idades. O traço AE2 demonstrou pequena redução de resistência, especialmente nas primeiras idades, decorrente da expansão inicial e da redistribuição dos produtos de hidratação. O traço ARR2 registrou os menores valores, resultado esperado devido ao retardo de hidratação característico dos aditivos redutores de retração. Já os concretos contendo resíduo de mármore tratado termicamente (RMBA5 e RMES5) apresentaram desempenho intermediário. Esses traços exibiram retardo inicial entre 1 e 7 dias, compensado por ganho mais pronunciado entre 7 e 28 dias, comportamento compatível com a liberação gradual de hidratos provenientes das fases reativas de CaO e MgO.
- Na resistência à tração, o concreto RMBA5 superou o concreto de referência, indicando que a expansão moderada contribuiu para reduzir microfissuras internas e melhorar a coesão da matriz. Os traços ARR2 e RMES5 apresentaram os menores valores, possivelmente devido à menor compactação na zona de transição pasta-agregado e à hidratação mais lenta do MgO no caso do RMES. O módulo de elasticidade apresentou pouca variação entre os traços, com maior valor observado no concreto RMES5, sugerindo uma matriz mais densa e com menor volume de vazios estruturais. De forma geral, os resultados demonstram que os concretos contendo resíduos de mármore tratados termicamente apresentam desempenho mecânico equilibrado, mantendo resistência e rigidez compatíveis com o concreto convencional e evidenciando boa estabilidade volumétrica.

- As análises numéricas permitiram compreender de forma integrada o efeito da expansão autógena e da evolução da rigidez nas primeiras idades do concreto, bem como a sensibilidade do sistema estrutural ao instante em que ocorre a expansão. Inicialmente, observou-se que a homogeneização das curvas de deformação das pastas, embora preserve a hierarquia entre os materiais, subestima significativamente a magnitude da expansão no concreto, uma vez que os valores experimentais para o RMBA5 mostraram deformações muito superiores às previstas pela Equação de Hansen. Ainda assim, a simulação com curvas homogeneizadas evidenciou o comportamento típico de paredes massivas, com gradientes térmicos marcados e picos compressivos no núcleo (B e C) e trações moderadas em regiões superficiais (A e D), sem risco de fissuração para o concreto de referência.
- A incorporação da curva experimental motivou o estudo paramétrico, no qual a posição temporal do pico expansivo foi deslocada para 15 h, 24 h, 36 h e 48 h. Os resultados mostraram que a eficácia da expansão está diretamente condicionada à sincronia com o desenvolvimento da rigidez: expansões muito precoces (15 h) ocorrem em regime de baixa rigidez e produzem efeitos mínimos no estado tensional; expansões intermediárias (24 h–36 h) geram compressões internas mais pronunciadas e contribuem para reduzir trações na região central da parede; e expansões tardias (48 h) atuam sobre um material já muito rígido, produzindo respostas mais intensas, porém concentradas em zonas restritas.
- A análise detalhada das tensões principais revelou que a interface parede/base é a região mais sensível ao efeito expansivo. Nos cenários de 24 h, 36 h e 48 h, os pontos localizados no plano oposto ao simétrico (E e F) apresentaram tensões principais superiores à resistência à tração estimada para as idades correspondentes, indicando risco potencial de fissuração localizado. Ainda assim, observou-se que parte dessas tensões diminui após o resfriamento, sugerindo possibilidade de fechamento parcial de fissuras. Nas regiões internas e superficiais da parede, mesmo sob expansão, as tensões permaneceram abaixo da resistência à tração, confirmando que o impacto mais crítico do agente expensor ocorre em zonas rigidamente confinadas.
- A análise das reações de apoio reforçou esse mecanismo: o levantamento observado nas expansões tardias intensifica a concentração de esforços de tração na interface, enquanto expansões precoces tendem a ser absorvidas sem efeitos estruturais relevantes. De forma geral, os resultados demonstram que o instante em que ocorre a expansão é o

principal parâmetro controlador do comportamento tensional nas primeiras idades. Expansões intermediárias favorecem a mitigação das tensões internas, enquanto expansões tardias maximizam o risco de fissuração na base.

- Em síntese, as simulações numéricas mostraram que o uso do resíduo de mármore tratado termicamente pode contribuir para reduzir tensões no interior da parede, desde que sua expansão ocorra em janela compatível com o desenvolvimento da rigidez. Contudo, destaca-se que expansões tardias amplificam o risco de fissuração na interface parede/base, ressaltando a necessidade de calibração cuidadosa do agente expensor para aplicações estruturais.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral investigar a influência do tratamento térmico do resíduo de mármore, como proposta de agente expensor alternativo, na mitigação da retração em materiais cimentícios, por meio de uma abordagem conjunta experimental e numérica. A seguir, apresentam-se as conclusões gerais estruturadas de acordo com o atendimento aos objetivos específicos definidos no início da pesquisa.

A caracterização físico-química e mineralógica demonstrou que os resíduos de mármore apresentam natureza essencialmente carbonática antes do tratamento térmico, com perfis distintos entre si: o RMBA possui caráter predominantemente cálcico, enquanto o RMES apresenta caráter dolomítico, com teores mais elevados de MgO.

As análises TG/DTG, DRX e FRX revelaram que apenas o tratamento térmico a 1000 °C por 1 h (T1000_1h) foi capaz de promover a completa decomposição das fases carbonatadas, originando CaO e MgO reativos, indispensáveis ao comportamento expansivo desejado. Os tratamentos a 800 °C, com ou sem patamar, não promoveram transformações significativas. Assim, conclui-se que o T1000_1h é o regime necessário para conferir funcionalidade expansiva aos resíduos, tornando-os aptos para aplicação como aditivos mitigadores de retração em materiais cimentícios.

Os resultados experimentais evidenciaram que os resíduos tratados atuam de forma distinta sobre as propriedades das pastas, de acordo com a predominância de CaO (RMBA) ou MgO (RMES). O RMBA apresentou maiores expansões iniciais, coerentes com a hidratação mais rápida do CaO e o RMES exibiu expansão mais gradual e prolongada, refletindo a cinética lenta do MgO. As microanálises (TG/DTG, DRX, PIM) confirmaram a formação progressiva de Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 , associada ao refinamento microestrutural, especialmente evidente para RMES.

Nos concretos, os resíduos tratados mantiveram a boa trabalhabilidade e apresentaram desempenho mecânico compatível ou superior ao concreto de referência, especialmente para o RMBA5 e RMES5, que demonstraram evolução estável de resistência e módulo de elasticidade. O RMBA5 apresentou melhor desempenho em resistência à tração, sugerindo que uma expansão moderada e controlada contribui para reduzir microfissuração interna. O RMES5 apresentou maior rigidez, coerente com suas transformações microestruturais. De modo geral, conclui-se que ambos os resíduos tratados termicamente podem ser incorporados a concretos

convencionais sem comprometer o desempenho mecânico, ao mesmo tempo em que fornecem expansão útil à mitigação volumétrica.

Os aditivos comerciais avaliados nesta pesquisa desempenharam papel importante como referência de desempenho. O agente expensor comercial apresentou comportamento coerente com sua finalidade, promovendo expansão inicial controlada e compatível com a mitigação de retração. Em contraste, o aditivo redutor de retração resultou em expansão mais pronunciada nas pastas, porém associada a impactos negativos nas propriedades mecânicas. Dessa forma, ambos se mostraram eficazes em modificar o comportamento volumétrico, mas com limitações distintas, evidenciando a relevância de soluções alternativas que conciliem expansão útil e desempenho mecânico, como observado para o resíduo tratado termicamente.

O modelo tridimensional não linear permitiu reproduzir adequadamente a evolução térmica, a expansão autógena e o acoplamento dessas ações ao desenvolvimento estrutural das tensões no muro analisado. A análise paramétrica demonstrou que o instante em que ocorre o pico de expansão é determinante para o estado tensional final, em que expansões precoces (≈ 15 h) ocorrem com módulo baixo, gerando baixa conversão tensional e risco reduzido de fissuração; expansões intermediárias (≈ 36 h), apresentam melhor equilíbrio entre rigidez e capacidade de acomodação, com zonas localizadas de risco, mas tendência de fechamento posterior; expansões tardias (≈ 48 h), concentram tensões elevadas na interface parede/base, superando a resistência à tração estimada e configurando o cenário mais crítico de fissuração. Assim, a análise numérica comprova que o sincronismo entre maturidade do concreto e expansão gerada pelos óxidos reativos é essencial para mitigar a retração sem induzir fissuração por restrição.

A combinação dos resultados experimentais e numéricos permite afirmar que o resíduo de mármore tratado termicamente a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 h constitui um agente expensor alternativo viável, com capacidade de gerar expansão controlada em materiais cimentícios; compensar parcialmente a retração autógena e a retração envolvida em elementos estruturais; manter ou melhorar parâmetros mecânicos; refinar a microestrutura e reduzir porosidade; atuar com comportamento previsível quando modelado numericamente; e fornecer uma rota sustentável de reaproveitamento de resíduos industriais abundantes.

Conclui-se, portanto, que o uso de resíduos de mármore tratados termicamente como agentes expansores representa uma estratégia tecnicamente eficiente, ambientalmente relevante e economicamente promissora, com potencial de aplicação em concretos estruturais sujeitos a variações volumétricas críticas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, Mohammed A.A.M.; RAN, Xinyi; MUSLEH, Adel A.; LI, Peipeng. Synergistic effect of expansive agent and steel fiber on interfacial performance and axial compression behavior of UHPC-filled steel tube columns. *Construction and Building Materials*, v. 470, 140543, 4 apr. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140543>.

ABEDI, Mohammad; KANSTAD, Terje; JACOBSEN, Stefan; JI, Guomin. Shrinkage properties of steel fiber reinforced concrete- A review. *Applications in Engineering Science*, v. 23, 100244, 22 jun. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2025.100244>.

ACI 223-98, 2011. Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete. ACI Committee 223-98. American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

AGHAEE, Kamran; KHAYAT, Kamal H. Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete – An overview. *Construction and Building Materials*, v. 305, 124586, 25 oct. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124586>.

AGHAEE, Kamran; SPOSITO, Ricarda; KHAYAT, Kamal H. Synergistic effect of shrinkage mitigating materials on rheological properties of flowable and thixotropic cement paste. *Cement and Concrete Composites*, v. 133, 104686, oct. 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104686>.

AGHAEE, Kamran; KHAYAT, Kamal H. Benefits and drawbacks of using multiple shrinkage mitigating strategies on performance of fiber-reinforced mortar. *Cement and Concrete Composites*, v. 133, 104714, oct. 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104714>.

AGHAEE, Kamran; SPOSITO, Ricarda; THIENEL, Karl-Christian; KHAYAT, Kamal H. Effect of additional water or superplasticizer on key characteristics of cement paste made with superabsorbent polymer and other shrinkage mitigating materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 136, 104893, feb. 2023a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104893>.

AGHAEE, Kamran; HAN, Taihao; KUMAR, Aditya; KHAYAT, Kamal H. Mechanism underlying effect of expansive agent and shrinkage reducing admixture on mechanical properties and fiber-matrix bonding of fiber-reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 172, 107247, oct. 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107247>.

AGOSTINHO, Livia Barbosa. **Análise microestrutural de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo polímero superabsorvente e nanosilica**. 2021. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

AHMAD, Jawad; ZHOU, Zhiguang. Development of high strength self compacting concrete with waste glass and waste marble. *Construction and Building Materials*, v. 408, 133760, 8 dec. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133760>.

AÏTCIN, P. Autogenous shrinkage measurement. In AUTOSHRINK'98, **Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete**, June 13-14, 1998; Tazawa, E., Ed.; Japan Concrete Institute: Hiroshima, Japan, 1998; pp. 245–256.

AİTCIN, P.-C. Water and its role on concrete performance. In: Aİtcin, P.-C., Flatt, R.J. (Eds.), **Science and Technology of Concrete Admixtures**, pp. 75-86, 2016.

AİTCIN, P.-C. Concreto de alto desempenho. In: Aİtcin, P.-C., Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

ALIABDO, A. Aliabdo; ABD ELMOATY, Abd Elmoaty M., AUDA, Esraa M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v.50, p. 28–41, 15 jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>.

ALYAMAC, Kursat Esat; GHAFARI, Ehsan; INCE, Ragip. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 192-202, 15 feb. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>.

ALYOUSEF, Rayed; BENJEDDOU, Omrane; KHADIMALLAH, Mohamed Amine; MOHAMED, Abdeliazim Mustafa; SOUSSI, Chokri. Study of the Effects of Marble Powder Amount on the Self-Compacting Concretes Properties by Microstructure Analysis on Cement-Marble Powder Pastes. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 6018613, 27 sep. 2018. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/6018613>.

ALYOUSEF, Rayed; BENJEDDOU, Omrane; SOUSSI, Chokri; KHADIMALLAH, Mohamed Amine; MOHAMED, Abdeliazim Mustafa. Effects of Incorporation of Marble Powder Obtained by Recycling Waste Sludge and Limestone Powder on Rheology, Compressive Strength, and Durability of Self-Compacting Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, 4609353, 4 apr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/4609353>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C215**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Philadelphia – USA, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C157/C157M-17**: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Philadelphia – USA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C192/192M-19**: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Philadelphia – USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C1698**: Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar. Philadelphia – USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM E1876-15**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Philadelphia – USA, 2021.

ANDROUËT, Cédric; CHARRON, Jean-Philippe. Shrinkage Mitigation of an Ultra-High Performance Concrete Submitted to Various Mixing and Curing Conditions. *Materials*, v. 14, n. 14, 3982, 16 jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14143982>.

ANSHUANG, Su; LING, Qin; SHOUJIE, Zhang; JIAYANG, Zhang; ZHAOYU, Li. Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Admixture on the Volume Deformation of Ultrahigh Performance Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2017, 6384859, 20 jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/6384859>.

ARAGH, Amir; ROCHA RIBEIRO, Renan; RUSSO, Thomas; GRANJA, José; AZENHA, Miguel; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. New impulse-based test method for early-age elastic modulus measurement in cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, e03971, dec. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03971>.

ASHISH, Deepankar Kumar. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, v. 15, p. 236-242, jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.024>.

ASHISH, Deepankar Kumar. Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, v. 211, p. 716-729, 20 feb. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.245>.

ASLANI, Farhad; MA, Guowei; WAN, Dominic Law Yim; MUSELIN, Gojko. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 553-566, 1 may 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (**ABIROCHAS**), Setor brasileiro de rochas ornamentais e de revestimento em números - 2024, Informe 02/2025, Brasília, DF, 2025. Disponível em site: < <https://abirochas.com.br/biblioteca/informes-abirochas/>>. Acesso em: 15 dez 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18:2012**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:2009**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:2009**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2009**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2019:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011:** Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1:2021:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1:2009:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606:2018:** Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607:2018:** Cimento Portland – Determinação dos tempos de pegas. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16672:2021:** Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

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

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

ATCP. Sonelastic - Advanced Impulse Excitation Technique. 2018. Disponível em: <<https://www.sonelastic.com/pt/%0D>>. Acesso em: 03 março. 2022.

AZENHA, Miguel Ângelo Dias. **Comportamento do betão nas primeiras idades: fenomenologia e análise termo-mecânica.** 2004. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Portugal, 2004.

AZENHA, Miguel; FARIA, Rui. Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower-A case study, Eng. Struct. 30, p. 2392-2400, 2008.

AZENHA, Miguel Ângelo Dias. **Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages**. 2009. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) - University of Porto, Portugal, 2009.

AZENHA, Miguel; MAGALHÃES, Filipe; FARIA, Rui; CUNHA, Álvaro. Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: a novel method based on ambient vibration. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 7, p. 1096-1105, jul. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.014>.

AZENHA, Miguel; FARIA, Rui; MAGALHÃES, Filipe; RAMOS, Leonel; CUNHA, Álvaro. Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique. *Materials and Structures*, v. 45, p. 81-92, jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9750-9>.

AZENHA, Miguel; RAMOS, Luís F.; AGUILAR, Rafael; GRANJA, José L. Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: a case study for in situ application. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 7, p. 881-890, aug. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.004>.

AZENHA, Miguel; LAMEIRAS, Rodrigo; SOUSA, Christoph de; BARROS, Joaquim. Application of air cooled pipes for reduction of early age cracking risk in a massive RC wall. *Engineering Structures*, v. 62-63, p. 148-163, 15 mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.018>.

AZENHA, Miguel; SILVA, Jacinto; GRANJA, José; GOMES-CORREIA, António. A Retrospective View of EMM-ARM: application to quality control in soil-improvement and complementary developments. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 339-346, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.043>.

AZENHA, Miguel; LEITÃO, Luís; GRANJA, José L.; SOUSA, Christoph de; FARIA, Rui; BARROS, Joaquim A.O. Experimental validation of a framework for hygro-mechanical simulation of self-induced stresses in concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 80, p. 41-54, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.008>.

AZENHA, Miguel; KANAVARIS, Fragkoulis; SCHLICKE, Dirk; JęDRZEJEWSKA, Agnieszka; BENBOUDJEMA, Farid; HONORIO, Tulio; SMILAUER, Vít; SERRA, Carlos; FORTH, John; RIDING, Kyle; KHADKA, Binod; SOUSA, Carlos; BRIFFAUT, Matthieu; LACARRIÈRE, Laurie; KOENDERS, Eduardus; KANSTAD, Terje; KLAUSEN, Anja; TORRENTI, Jean-Michel; FAIRBAIRN, Eduardo M. R. Recommendations of RILEM TC 287-CCS: thermo-chemo-mechanical modelling of massive concrete structures towards cracking risk assessment. *Materials and Structures*, v. 54, n. 4, 16 jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-021-01732-8>.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R.D.; KOENDERS, E.A.B.; FIGUEIREDO, E.P.; LOPES, J.L.M.P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building Materials*, v. 45, p. 1-10, aug. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.

BASARAN, Bogachan; KALKAN, Ilker; AKSOYLU, Ceyhun; ÖZKILIÇ, Yasin Onuralp; SABRI, Mohanad Muayad Sabri. Effects of Waste Powder, Fine and Coarse Marble Aggregates on Concrete Compressive Strength. *Sustainability*, v. 14, n. 21, 14388, 3 nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/su142114388>.

BAYRAKTAR, Oguzhan Yavuz; YARAR, Gokhan; BENLI, Ahmet; KAPLAN, Gokhan; GENÇEL, Osman; SUTCU, Mucahit; KOZIOWSKI, Marcin; KADELA, Marta. Basalt fiber reinforced foam concrete with marble waste and calcium aluminate cement. *Structural Concrete*, v. 24, n. 1, p. 1152-1178, 14 jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202200142>.

BELOUADAH, Messaouda; RAHMOUNI, Zine Elabidine; TEBBAL, Nadia; HICHAM, Mokrani El Hassen. Evaluation of Concretes Made with Marble Waste Using Destructive and Non-Destructive Testing. *Annales de Chimie - Science Des Matériaux*, v. 45, n. 5, p. 361-368, 31 oct. 2021. <http://dx.doi.org/10.18280/acsm.450501>.

BETTENCOURT, A.; GONÇALVES, A. **Autogenous shrinkage measurements on cement pastes: influence of w/c, cement fineness, C₃A content, and superplasticizer dosage.** Relatório 431/2010 – NB, LNEC, Lisboa, 2010.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 10, p. 1655-1662, 1999.

BISSONNETTE, B.; PEREZ, F.; BLAIS, S.; GAGNÉ, R. Évaluation des bétons a retrait compensé pour les travaux de réparation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (7), 716-726, 2008.

BISSONNETTE, B.; JOLIN, M.; GAGNÉ, R.; CERTAIN, P.-V.; PEREZ, F. Evaluation of the Robustness of Shrinkage-Compensating Concrete Repair Concretes Prepared with Expansive Components. *ACI C223 Special Publication*, 17 p, 2014.

BORGES, Juliana Gonçalves. **Metodologia dos tubos corrugados para determinação da retração autógena em materiais cimentícios de alto desempenho contendo polímero superabsorvente (SAP).** 2019. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

CAO, Fengze; MIAO, Miao; YAN, Peiyu. Hydration characteristics and expansive mechanism of MgO expansive agents. *Construction and Building Materials*, v. 183, 234-242, 20 sep. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.164>.

CARBALLOSA, P.; CALVO, J.L. García; REVUELTA, D.; SÁNCHEZ, J.J.; GUTIÉRREZ, J.P. Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 223-229, 15 sep. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.113>.

CEN, “EN 1992-1-1 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings,” 2004.

CHEN, Hao; ZHANG, Gaozhan; DING, Qingjun; YANG, Jun; ZHU, Jiahao; QI, Dapeng. Effect of expansive agent on lightweight micro-expansive ultra-high performance concrete: Properties, microstructure, and interfacial bonding in concrete-filled steel tube. *Construction and Building Materials*, v. 462, 139996, 7 feb. 2025a. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139996>.

CHEN, Junyu; ZHAO, Haitao; LI, Jinghao; ZHANG, Juan; XIANG, Yu. Test and multi-scale prediction model for early-age autogenous deformation of CEA shrinkage-compensating concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 108, 112861, 15 aug. 2025b. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112861>.

CHENG, Shukai; WU, Ziyang; WU, Qiaoyun; CHEN, Xuyong; TU, Yanping. Mitigation on the shrinkage properties of ultra-high strength concrete via using porous coral sand and shrinkage reducing agent. *Construction and Building Materials*, v. 57, 104861, 1 oct. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104861>.

CHEN, Shuo; ZHAO, Haitao; CHEN, Yu; HUANG, Donghui; CHEN, Yuzhi; CHEN, Xiaodong. Experimental study on interior relative humidity development in early-age concrete mixed with shrinkage-reducing and expansive admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 232, 117204, 30 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117204>.

CIFUENTES, H.; MONTERO-CHACÓN, F.; GALÁN, J.; CABEZAS, J.; LACONCHA, A. Martínez-De. A Finite Element-Based Methodology for the Thermo-mechanical Analysis of Early Age Behavior in Concrete Structures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 13, n. 41, 1 aug. 2019. <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-019-0353-0>.

COLLEPARDI, Mario; BORSOI, Antonio; COLLEPARDI, Silvia; OLAGOT, Jean Jacob Ogoumah; TROLI, Roberto. Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 6, p. 704-708, jul. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.020>.

COLLINS, Frank; SANJAYAN, J.G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, p. 1401-1406, sep. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00327-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00327-6).

COPPOLA, L.; COFFETTI, D.; CROTTI, E.; CANDAMANO, S.; CREA, F.; GAZZANIGA, G.; PASTORE, T. The combined use of admixtures for shrinkage reduction in one-part alkali activated slag-based mortars and pastes. *Construction and Building Materials*, v. 248, 118682, 10 jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118682>.

CORINALDESI, Valeria; MONOSI, Saveria; RUELLO, Maria Letizia. Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 289-293, may 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.037>.

CORINALDESI, Valeria. Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 758-764, nov. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.129>.

CORINALDESI, Valeria; NARDINOCCHI, Alessandro; DONNINI, Jacopo. The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 171-179, 30 aug. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.002>.

DHAHIR, Mohammed K.; MARX, Steffen. Development of expansive concrete for chemical prestressing applications. *Case Studies in Construction Materials*, v. 19, e02611, dec. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02611>.

DI BELLA, Carmelo. **Drying shrinkage of cementitious materials at early age**. 2016. Thesis (Doctor of Sciences)- ETH Zürich, 2016.

DIETRICH, Yustane Paula. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

DUERAMAE, Saofee; TANGCHIRAPAT, Weerachart; CHINDAPRASIRT, Prinya; JATURAPITAKKUL, Chai; SUKONTASUKKUL, Piti. Autogenous and drying shrinkages of mortars and pore structure of pastes made with activated binder of calcium carbide residue and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 230, 116962, 10 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116962>.

EBERHARDT, A.B.; FLATT, R.J. Working mechanisms of shrinkage reducing admixtures. In: Aïtcin, P.-C., Flatt, R.J. (Eds.), **Science and Technology of Concrete Admixtures**, pp. 305-320, 2016.

FALESCHINI, Flora; TRENTO, Daniel; MASOOMI, Maryam; PELLEGRINO, Carlo; ZANINI, Mariano Angelo. Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*, v. 398, 132496, 22 sep. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>.

FANG, Lei; FU, Dabao; YUAN, Qiang; XU, Song; ZHANG, Dong; CAI, Huangyi; ZENG, Xiaoqing; WANG, Yong; ZHOU, Jin. Combined effects of low-heat cement, expansive agent and shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and cracking of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 22, e04344, jul. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04344>.

FARIA, R.; AZENHA, M.; FIGUEIRAS, J.A. Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cement and Concrete Composites*, v. 28, p. 572-585, 2006.

FARIA, R.; LEITÃO, L.; TEIXEIRA, L.; AZENHA, M.; CUSSON, D. A structural experimental technique to characterize the viscoelastic behavior of concrete under restrained deformations. *Strain*, v. 53, n. 1, p. 1-15, 28 nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1111/str.12216>.

FARIA, Thalles Moraes. **Estudo numérico em concreto reforçado com fibras de aço utilizando o Método dos Elementos Finitos e modelos constitutivos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

FENG, Shuo; LYU, Jingjing; XIAO, Huigang; ZHANG, Qingsong; LI, Yifei. Evaluation method of the synergistic service performance between ultrahigh-performance concrete and

normal strength concrete based on the parameter of environmental equivalent force ratio. *Cement and Concrete Composites*, v. 150, 105552, jul. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105552>.

FERREIRA, D.; MANIE, J. DIANA 10.5 user's manual. Delft, Netherlands: TNO DIANA BV; 2022.

FERREIRA, Cláudio; SCHLICHE, Dirk; SOUSA, Carlos; AZENHA, Miguel. Early-Age to Long-Term Numerical Simulation of Concrete Members Tested in Adjustable Restraining Frames. **International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures. SynerCrete 2023**, v. 43, p. 995-1007, 11 jun. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_89.

FRAGA, Yuri Sotero Bomfim. **Efeito da funcionalização da nanossílica com diferentes razões de massa de aditivo redutor de retração em compósitos cimentícios**. 2023. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

GAGNÉ, R. Expansive agents. In: Aïtcin, P.-C., Flatt, R.J. (Eds.), **Science and Technology of Concrete Admixtures**, pp. 441-456, 2016a.

GAGNÉ, R. Shrinkage-reducing admixtures. In: Aïtcin, P.-C., Flatt, R.J. (Eds.), **Science and Technology of Concrete Admixtures**, pp. 457-469, 2016b.

GAITÁN, Juan David Del Río. **Aplicação do Método de Elementos Finitos semi-embutidos na simulação de vigas de concreto armado**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

GALETAKIS, Michael; SOULTANA, Athanasia. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 769-781, 15 jan. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204>.

GAO, Peng; ZHANG, Tongsheng; LUO, Ruifeng; WEI, Jiangxiong; YU, Qijun. Improvement of autogenous shrinkage measurement for cement paste at very early age: corrugated tube method using non-contact sensors. *Construction and Building Materials*, v. 55, p. 57-62, 31 mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.086>.

GENCEL, Osman; OZEL, Cengiz; KOKSAL, Fuat; ERDOGMUS, Ertugrul; MARTÍNEZ-BARRERA, Gonzalo; BROSTOW, Witold. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, v. 21, n. 1, p. 62-70, jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.023>.

GENCEL, Osman; BENLI, Ahmet; BAYRAKTAR, Oguzhan Yavuz; KAPLAN, Gokhan; SUTCU, Mucahit; ELABADE, Wiam Abdelmagid Taher. Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, v. 291, 123374, 12 jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123374>.

GENCEL, Osman; NODEHI, Mehrab; BAYRAKTAR, Oguzhan Yavuz; KAPLAN, Gokhan; BENLI, Ahmet; KOKSAL, Fuat; BILIR, Turhan; SIDDIQUE, Rafat; OZBAKKALOGLU, Togay. The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*. v. 361, 129612, 26 dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129612>.

GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. Evaluation of morphology and size of cracks of the Interfacial Transition Zone (ITZ) in concrete containing fly ash (FA). *Journal of Hazardous Materials*, v. 357, p. 298-304, 5 sep. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.016>.

GOMES, José; CARVALHO, Rui; SOUSA, Carlos; GRANJA, José; FARIA, Rui; SCHLICKE, Dirk; AZENHA, Miguel. 3D numerical simulation of the cracking behaviour of a RC one-way slab under the combined effect of thermal, shrinkage and external loads. *Construction and Building Materials*, v. 212, 110493, 1 jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110493>.

GOMES, José; GRANJA, José; SOUSA, Carlos; FERREIRA, Cláudio; SCHLICKE, Dirk; FARIA, Rui; AZENHA, Miguel. Long-Term Experimental Campaign on RC Shrinkage Cracking: conceptualization, planning and experimental procedures. **International RILEM Conference on Early-Age and Long-Term Cracking in RC Structures. CRC 2021**, v. 31, p. 141-153, 19 may 2021. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-72921-9_12.

GRANJA, José Luís Duarte. **Continuous characterization of stiffness of cement - based materials: experimental analysis and micro-mechanics modelling**. 2016. Thesis (Philosophy Doctorate in Civil Engineering) - University of Minho, Portugal, 2016.

GRANJA, José; ROCHA RIBEIRO, Renan; RUSSO, Thomas; LAMEIRAS, Rodrigo; AZENHA, Miguel. Influence of Temperature in the Early-age Elastic Modulus Evolution of Cement Pastes and Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 21, n. 10, 2023. <https://doi.org/10.3151/jact.21.803>.

GUO, Aofei; SUN, Zhihui; SATYAVOLU, Jagannadh. Impact of modified kenaf fibers on shrinkage and cracking of cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 264, 120230, 20 dec. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120230>.

GUO, Xiao; LIAO, Longhui; XIE, Kaizhong; XU, Wen; LU, Liquan; HUANG, Kang. Early-age mechanical and shrinkage performance of CaO-MgO expansive agent self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 111, 113165, 1 oct. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113165>.

GUPTA, Mayank; GO, Igarashi; GRANJA, Jose; AZENHA, Miguel; ISHIDA, Tetsuya. Effect of Expansive Additives on the Early Age Elastic Modulus Development of Cement Paste by Ambient Response Method (ARM). **International RILEM Conference on Early-Age and Long-Term Cracking in RC Structures. CRC 2021**, v. 31, p. 319-327, 19 may 2021. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-72921-9_26.

GUPTA, Mayank; IGARASHI, Go; TAKAHASHI, Yuya; ISHIDA, Tetsuya. Multiscale chemo-mechanical modeling of concrete expansion with free lime-based expansive additives

under restraint conditions. *Cement and Concrete Composites*, v. 141, 105126, aug. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105126>.

HADDADOU, Naima; CHAID, Rabah; GHERNOUTI, Youcef. Experimental study on steel fibre reinforced self-compacting concrete incorporating high volume of marble powder. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 19, n. 1, p. 48-64, 26 jun. 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.929537>.

HAN, Jianguo; JIA, Di; YAN, Peiyu. Understanding the shrinkage compensating ability of type K expansive agent in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 116, p. 36-44, 30 jul. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.092>.

HANSEN, W.; ALMUDAIHEEM, J. A. Ultimate drying shrinkage of concrete -influence of major parameters. *ACI Materials Journal*, v. 84, n. 3, p. 217-223, 1987.

HANSEN, W. Constitutive model for predicting ultimate drying shrinkage of concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 70, n. 5, p. 329-332, 1987.

HARDY, G.H.; RIESZ, M. The General Theory of Dirichlet's Series. 2013: Dover Publications.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI. SENAI., 1992.

HE, Zhi-hai; HU, Hai-bo; CASANOVA; Ignasi; LIANG, Chao-feng; DU, Shi-gui. Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 254, 119312, 10 sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119312>.

HERMERSCHMIDT, W. Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons PhD Thesis, TU Braunschweig, 2016.

HIGUCHI, Takayuki; EGUCHI, Masataka; MORIOKA, Minoru; SAKAI, Etsuo. Hydration and properties of expansive additive treated high temperature carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 64, p. 11-16, oct. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.001>.

HOLLAND, Reid; DU, Jiang; OBEIDAH, Adi; MENG, Weina; NASSIF, Hani. Early-age crack-free ultra-high-performance concrete under restrained ring test for large-scale production as an overlay. *Construction and Building Materials*, v. 409, 133949, 15 dec 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133949>.

HU, Xiang; SHI, Zhenguo; SHI, Caijun; WU, Zemei; TONG, Baihui; OU, Zhihua; SCHUTTER, Geert de. Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 406-415, 15 sep. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.113>.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1457-1468, oct. 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00140-8](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00140-8).

HUA, Tengfei; TANG, Jinhui; ZHU, Jiang; TANG, Hao; LIU, Jiaping. Evolution of the early compressive strength of cement-slag pastes with CaO-based expansive agent. *Materials and Structures*, v. 55, n. 63, 16 feb. 2022a. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01809-4>.

HUA, Tengfei; LI, Zheng; HU, Xiang; TANG, Jinhui; ZHANG, Jian; LIU, Guangyan. Effects of CEA on the microstructure evolution and chloride ion migration of marine concrete. *Construction and Building Materials*, v. 358, 129464, 5 dec. 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129464>.

HUA, Tengfei; HU, Xiang; TANG, Jinhui; WANG, Yujiang; LI, Hua; LIU, Jiaping. Influence of CaO-based expansive agent on chloride penetration resistance of marine concrete. *Construction and Building Materials*, v. 326, 126872, 4 apr. 2022c. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126872>.

HUANG, Hao; YE, Guang. Examining the “time-zero” of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 97, p. 107-114, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.010>.

IDIART, Andrés Enrique. **Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level**. 2009. Thesis (Doctoral in Geotechnical Engineering)–Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

JAIN, Abhishek; GUPTA, Rajesh; CHAUDHARY, Sandeep. Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 221, p. 539-552, 10 oct. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.104>.

JCI- Committee Report of Japan Concrete Institute, “**Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete**”, 1998, In: E. Tazawa (ed), *Autoshrink’ 98, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan June, pp. 3-67.

JĘDRZEJEWSKA, Agnieszka; BENBOUDJEMA, Farid; LACARRIÈRE, Laurie; AZENHA, Miguel; SCHLICHE, Dirk; PONT, Stefano dal; DELAPLACE, Arnaud; GRANJA, José; HÁJKOVÁ, Karolina; HEINRICH, Peter Joachim; SCIUMÈ, Giuseppe; STRIEDER, Emanuel; STIERSCHNEIDER, Elisabeth; ŠMILAUER, Vít; TROYAN, Vyacheslav. COST TU1404 benchmark on macroscopic modelling of concrete and concrete structures at early age: proof-of-concept stage. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 173-189, 20 jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.088>.

JENSEN, O. Mejlhede; HANSEN, P. Freiesleben. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste. *Materials and Structures*, v. 28, n. 7, p. 406-409, aug. 1995. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02473076>.

Ji, Xiankun; WANG, Binglei; LIU, Meng; ZHANG, Wensheng; MING, Yang; MA, Hongyan. Expansion and creep of concrete with expansive agents at variable temperature. *Journal of Building Engineering*, v. 87, 108982, 15 jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108982>.

JIA, Zijian; YANG, Yuanyuan; YANG, Lingyan; ZHANG, Yamei; SUN, Zhengming. Hydration products, internal relative humidity and drying shrinkage of alkali activated slag mortar with expansion agents. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 198-207, 15 jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.162>.

JIA, Zijian; ZHANG, Zedi; JIA, Lutao; CAO, Ruilin; YU, Cheng; YU, Jinyao; Gao, Yueyi; Zhang, Yamei. Effect of different expansive agents on the early age structural build-up process of cement paste. *Construction and Building Materials*, v. 144, 105282, nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105282>.

JIANG, Feifei; MAO, Zhongyang; YU, Lanqing. Hydration and Expansion Characteristics of MgO Expansive Agent in Mass Concrete. *Materials*, v. 15, n. 22, 8028, 14 nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15228028>.

KANAVARIS, Fragkoulis; FERREIRA, Cláudio; SOUSA, Carlos; AZENHA, Miguel. Thermo-chemo-hygro-mechanical simulation of the restrained shrinkage ring test for cement-based materials under distinct drying conditions. *Construction and Building Materials*, v. 294, 123600, 2 aug. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123600>.

KANG, Jiacheng; SHEN, Dejian; LI, Chengcai; LI, Ming; WANG, Xudong; HU, Haijiang. Effect of water-to-cement ratio on internal relative humidity and autogenous shrinkage of early-age concrete internally cured by superabsorbent polymers. *Structural Concrete*, v. 23, n. 5, p. 3234-3248, 3 feb. 2022. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202100488>.

KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KHODABAKHSHIAN, Ali; BRITO, Jorge de; GHALEHNOVI, Mansour; SHAMSABADI, Elyas Asadi. Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 237-251, 30 apr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192>.

KLAUSEN, Anja Estensen; KANSTAD, Terje. The effect of shrinkage reducing admixtures on drying shrinkage, autogenous deformation, and early age stress development of concrete. *Structural Concrete*, v. 22, n. 1, p. 596-606, 7 sep. 2020. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201900583>.

KLEMCZAK, Barbara; KNOPPIK-WRÓBEL, Agnieszka. Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: early-age behaviour, analytic approaches and numerical models. *Engineering Structures*, v. 84, p. 233-251, 1 feb. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.031>.

KUORIBO, Ewald; MAHMOUD, Hatem. Utilisation of waste marble dust in concrete production: A scientometric review and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, v. 374, 133872, 10 nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133872>.

KURUP, Divya S.; MOHAN, Manu K.; TITTELBOOM, Kim Van; SCHUTTER, Geert De. Early-age Shrinkage assessment of cementitious materials: A critical review. *Cement and*

Concrete Composites, v. 145, 105343, 18 Oct.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105343>.

LI, Biao; WU, Chen; LI, Yang; WANG, Shunan; JIA, Lili; XIA, Dongtao. Expansive behavior of high-strength self-stressing and self-compacting concrete: experimental study and analytical model. **Construction and Building Materials**, v. 353, 129080, 24 oct. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129080>.

LI, Changming; JIA, Dongyang; YANG, Xudong; ZHAO, Shunbo; LI, Changyong; LIU, Guanfeng; WANG, Yaozong; DING, Xin xin; QIN, Soglin; SONG, Wenyu. Effects of dosage and reactivity of modified dolomite dust waste on mechanical properties and shrink-resist of mortar. **Developments in the Built Environment**, v. 17, 100308, mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100308>.

LI, Congbo; WANG, Qing; CHEN, Junqiao; JIA, Senchun; JIANG, Linfeng; HE, Jianqiang. Effect of polyether-type SRA on the drying shrinkage, pore structure and properties of blended mortar incorporating limestone powder. **Construction and Building Materials**, v. 264, 120173, 20 dec. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120173>.

LI, L.G.; HUANG, Z.H.; TAN, Y.P.; KWAN, A.K.H.; LIU, F. Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 423-432, 30 mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.154>.

LI, L.G.; HUANG, Z.H.; TAN, Y.P.; KWAN, A.K.H.; CHEN, H.Y. Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 55-65, 10 feb. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.332>.

LI, Ming; SU, Ang; LI, Hua; WANG, Yujiang; TIAN, Qian. Effect of expansive agent on temperature and deformation of concrete under simulated actual construction condition. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, e04178, jul. 2025b. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04178>.

LI, Shunkai; ZENG, Qinwei; XIANG, Weiheng; ZHAO, Huan; SUN, Fengpin; LI, Jie; CHENG, Shukai; ZHANG, Mingmin. Role of ammonium acetate in hydration and expansion behaviour of mortar with magnesium oxide expansive agent. **Journal of Building Engineering**, v. 105, 112527, 1 jul. 2025a. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112527>.

LI, Zhengqi. Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultra-high performance concrete. **Materials Today Communications**, v. 6, p. 74-80, mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.01.001>.

LIANG, Siming; LIU, Yuhang; SONG, Guofeng; YAN, Han; SONG, Baocang; LIU, Jiankun. Effect of sulfoaluminate expansive additive on mechanical properties, internal relative humidity, and shrinkage of early-age mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, e02226, dec. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02226>.

LIU, Cijun; ZHANG, Xiao; CHENG, Shukai; LI, Shunkai; BAO, Ming; QIAO, Lige. Mechanical properties, hydration behavior and shrinkage deformation of ultra-high performance concrete (UHPC) incorporating MgO expansive agent. *Journal of Building Engineering*, v. 96, 110529, 1 Nov 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110529>.

LIU, Lei; CHEN, Hao; HE, Zhen; WANG, Peng; CUI, Jinyang; CAI, Xinhua; SUN, Yuqi. Effect and mechanism of compound expansive agent on rheological, mechanical, and shrinkage properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, v. 444, 137730, 20 sep. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137730>.

LIU, Luming; FANG, Zhi; HUANG, Zhengyu; WU, Yuyou. Solving shrinkage problem of ultra-high-performance concrete by a combined use of expansive agent, super absorbent polymer, and shrinkage-reducing agent. *Composites Part B: Engineering*, v. 230, 109503, 1 feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109503>.

LIU, Kaizhi; SHUI, Zhonghe; SUN, Tao; LING, Gang; LI, Xiaosheng; CHENG, Shukai. Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 211, p. 120-129, 30 jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.143>.

LOPES, Gonçalo Correia; MENDES, Nuno; VICENTE, Romeu; FERREIRA, Tiago Miguel; AZENHA, Miguel. Numerical simulations of derived URM-RC buildings: assessment of strengthening interventions with RC. *Journal of Building Engineering*, v. 40, 102304, aug. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102304>.

LU, Anqun; XU, Wen; WANG, Qianqian; WANG, Rui; YE, ZHIYAN. Effect of Different Expansive Agents on the Deformation Properties of Core Concrete in a Steel Tube with a Harsh Temperature History. *Materials*, v. 16, n. 5, 1780, 21 feb. 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16051780>.

LURA, Pietro; KOVLER, Konstantin. M&S highlight: Jensen and Hansen (1995), A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste. *Materials and Structures*, v. 55, n. 39, 26 jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-021-01853-0>.

LV, Tong; ZHANG, Jinrui; LI, Chenjiang; XU, Lei; HOU, Dongshuai; HONG, Shuxian; DONG, Biqin. Durability and sustainable assessment of fly ash-blended cement paste modified by MgO expansive additive. *Journal of Cleaner Production*, v. 468, 143135, 25 aug. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143135>.

MA, Baoguo; WANG, Jie; TAN, Hongbo; LI, Xiangguo; CAI, Lixiong; ZHOU, Yang; CHU, Zhugen. Utilization of waste marble powder in cement-based materials by incorporating nano silica. *Construction and Building Materials*, v. 211, p. 139-149, 30 jun. 2019a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.248>.

MA, Y.; YANG, X.; HU, J.; ZHANG, Z.; WANG, H. Accurate determination of the “time-zero” of autogenous shrinkage in alkali-activated fly ash/slag system. *Composites Part B*, v. 177, 107367, 18 aug. 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107367>.

MAHMOUD, Alaa A.; EL-SAYED, Alaa A.; ABORAYA, Ayman M.; FATHY, Islam. N.; ABOUELNOUR, Mohamaed. A.; TAYED, Bassam A.; NABIL, Islam M. Investigating the effects of granite, marble, granodiorite, and ceramic waste powders on the physical, mechanical, and radiation shielding performance of sustainable concrete. *Annals of Nuclear Energy*, v. 216, 111274, 15 jun. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111274>.

MAHMOOD, Abir; KAISH, A. B. M. Amrul; GULAM, Nor Farhana Binti Ab; RAMAN, Sudharshan N.; JAMIL, Maslina; HAMID, Roszilah. Effects of MgO-Based Expansive Agent on the Characteristics of Expansive Concrete. **The 2nd International Electronic Conference on Applied Sciences**, 15 oct. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/asec2021-11165>.

MAIA, Lino; AZENHA, Miguel; FARIA, Rui; FIGUEIRAS, Joaquim. Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 8, p. 799-807, aug. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.008>.

MALTESE, C.; PISTOLESI, C.; LOLLI, A.; BRAVO, A.; CERULLI, T.; SALVIONI, D. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 12, p. 2244-2251, dec. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.021>.

MANZANO, Manual Alejandro Rojas. **Estudo experimental de materiais cimentícios de alta resistência modificados com polímeros superabsorventes (PSAs) como agentes de cura interna**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MARCHON, D.; MANTELLATO, S.; EBERHARDT, A. B.; FLATT, R.J. Adsorption of chemical admixtures. In: Aïtcin, P.-C., Flatt, R.J. (Eds.), **Science and Technology of Concrete Admixtures**, pp. 219-256, 2016.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria; **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003, 311 páginas.

MARIANO, Ari Melo; ROCHA SANTOS, Maíra. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora Structural Equations View project Service Quality View project. In: XXVI Congreso Internacional de la Academia Europea de Dirección y Economía de la Empresa (AEDEM), September, Reggio Calabria. **Anais**. Reggio Calabria: AEDEM, 2017.

MARTINS, Gabriel Lima Oliveira. **Microestrutura de pastas de cimento Portland contendo nanossílica funcionalizada com diferentes proporções de aminosilano**. 2022. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

MARUYAMA, Ippei; LURA, Pietro. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 123, 105770 sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.015>.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. *Cement and*

Concrete Composites, v. 32, n. 8, p. 617-622, sep. 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.06.003>.

MASHALY, Ahmed O.; EL-KALIOUBY, Baher A.; SHALABY, Basel N.; EL-GOHARY, Amr M.; RASHWAN, Mohammed A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*, v.112, n.1, p. 731-741, 20 jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.

MAZAHERIPOUR, Hadi; FARIA, Rui; YE, Guang; SCHLANGEN, Erik; GRANJA, José; AZENHA, Miguel. Microstructure-Based Prediction of the Elastic Behaviour of Hydrating Cement Pastes. *Applied Sciences*, v. 8, n. 3, p. 442, 15 mar. 2018.
<http://dx.doi.org/10.3390/app8030442>.

MECHTCHERINE, Viktor.; REINHARDT, Hans-Wolf. **Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction**: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP, Springer, Netherlands, 2012, p. 225-SAP.

MEDINA, G.; BOSQUE, I.F. Sáez del; FRÍAS, M.; ROJAS, M.I. Sánchez de; MEDINA, C. Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system: influence of the activation process. *Applied Clay Science*, v. 135, p. 362-371, jan. 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.018>.

MEHDIPOUR, Iman; KHAYAT, Kamal H. Enhancing the performance of calcium sulfoaluminate blended cements with shrinkage reducing admixture or lightweight sand. *Cement and Concrete Composites*, v. 87, p. 29-43, mar. 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.001>.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 3a ed., 2014, 674p.

MEHTA, Dhiraj; MONDAL, Poonam; GEORGE, Suja. Utilization of marble waste powder as a novel adsorbent for removal of fluoride ions from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, n. 1, p. 932-942, mar. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.12.040>.

MELO, Sávio Torres. **Estudo analítico e numérico via método dos elementos finitos dos Deslocamentos horizontais de pilares de pontes em concreto armado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MELO NETO, Antonio A.; CINCOTTO, Maria Alba; REPETTE, Wellington. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 4, p. 565-574, apr. 2008.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.002>.

MITTRI, S.H.M.; VIEIRA, G.L.; GUIGNONE, G.C.; DEGEN, M.K.; TELES, C.R.; ZULCÃO, R. Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 444-455, 10 nov. 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.129>.

MO, Liwu; DENG, Min; TANG, Mingshu; AL-TABBAA, Abir. MgO expansive cement and concrete in China: past, present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 57, p. 1-12, mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.007>.

MO, Liwu; FANG, Jianwei; HUANG, Bei; WANG, Aiguo; DENG, Min. Combined effects of biochar and MgO expansive additive on the autogenous shrinkage, internal relative humidity and compressive strength of cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 229, 116877, 30 dec. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116877>.

MONTANI, C. **XXXII World Marble and Stones Report 2021**. Carrara, 2021.

NALON, Gustavo Henrique; RIBEIRO, José Carlos Lopes; ARAÚJO, Eduardo Nery Duarte de; SILVA, Roberto Marcio da; PEDROTI, Leonardo Gonçalves. Effects of shrinkage-reducing admixtures and expansive agents on the self-sensing behavior of nanomodified cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, v. 78, 1 nov. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2023.107648>.

NEGREDO, Alexandre Silveira. **Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre, 5ª ed., Bookman, 2016, 912p.

NOUSHINI, Amin; VESSALAS, Kirk; ARABIAN, Garo; SAMALI, Bijan. Drying Shrinkage Behaviour of Fibre Reinforced Concrete Incorporating Polyvinyl Alcohol Fibres and Fly Ash. *Advances in Civil Engineering*, v. 2014, n.1, p. 1-10, may 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/836173>.

NUNES, Nelson. Lúcio; FIGUEIREDO, Antonio Domingues. **Retração do concreto de cimento Portland**. BT/PCC/452. São Paulo: EPUSP, 2007.

OLIVEIRA, Andrielli Moraes de; OLIVEIRA, Ana Paula; VIEIRA, Janine Domingos; NEVES JUNIOR, Alex; CASCUDO; Oswaldo. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. *Journal of Building Engineering*, v. 64, 105616, 1 apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105616>.

OLIVEIRA, Miguel José; RIBEIRO, António Bettencourt; BRANCO, Fernando G. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 52, p. 267-275, 15 feb. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.033>.

OLIVEIRA, Miguel José; RIBEIRO, António Bettencourt; BRANCO, Fernando Garrido. Curing effect in the shrinkage of a lower strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 1206-1215, 15 sep. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.035>.

OLIVEIRA, Miguel José; RIBEIRO, António Bettencourt; BRANCO, Fernando G. Strategies to mitigate shrinkage in an intermediate strength self-compacting concrete. *Structural Concrete*, v. 22, n. 1, p. 581-595, 25 feb. 2020. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201900456>.

ORDÓÑEZ, Sirley Tatiana López. **Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração**. 2013. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

OTANI, L. B. et al. **Elastic Moduli characterization of composites using the Impulse Excitation Technique**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276288705_Elastic_Moduli_characterization_of_composites_using_the_Impulse_Excitation_Technique>.

OU, Guangfeng; KISHI, Toshiharu; MO, Liwu; LIN, Zhihai. New insights into restrained stress and deformation mechanisms of concretes blended with calcium sulfoaluminate and MgO expansive additives using multi-scale techniques. *Construction and Building Materials*, v. 371, 130737, 31 mar. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130737>.

PEREIRA, Cláudio Henrique de Almeida Feitosa. **Contribuição ao estudo da fissuração, da retração e do mecanismo de descolamento do revestimento à base de argamassa**. 2007. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

PEREIRA, Mara Monaliza Linhares. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos autoadensáveis com resíduo de marmoraria**. 2021. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

PEREIRA, Mara Monaliza Linhares; CAPUZZO, Valdirene Maria Silva; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 345, 22 aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128261>.

PEREIRA, Mara Monaliza Linhares; SOUZA, Ana Luiza Rocha de; CAPUZZO, Valdirene Maria Silva; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. Effect of the water/binder ratio on the hydration process of Portland cement pastes with silica fume and metakaolin. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 1, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952022000100005>.

PESAVENTO, Francesco; KNOPPIK, Agnieszka; IMILAUER, Vít; BRIFFAUT, Matthieu; ROSSI, Pierre. Numerical Modelling. *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures*, p. 181-255, 24 may 2018. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1_7.

PILAR, Ronaldo; SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida; FERRON, Raissa Douglas; REPETTE, Wellington Longuini. Rheological behavior of low shrinkage very high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 286, 122838, 7 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122838>.

PRAYUDA, Hakas; DUMARU, Rasla; TANAPORNRAWEEKIT, Ganchai; TANGTERMSIRIKUL, Somnuk; SAENGSOY, Warangkana; MATSUMOTO, Koji.

Estimation of restrained expansion strain of reinforced expansive concrete considering mixture and curing conditions. *Construction and Building Materials*, v. 322, 126386, 7 mar. 2022a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126386>.

PRAYUDA, Hakas; TANAPORNRAWEEKIT, Ganchai; TANGTERMSIRIKUL, Somnuk; MATSUMOTO, Koji; JONGVISUTTISUN, Passarin; SNGUANYAT, Chalermwut. Field investigation and finite element analysis on expansion and shrinkage strains of expansive concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 360, 129598, 19 dec. 2022b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129598>.

POWERS, T.C.; BROWNYARD, T.L. **Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste**, Bulletin 22 (1948). Research Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago.

POWERS, T. C. Causes and control of volume changes. J. Portland Cement Assoc. Research and Development Laboratories 1, N.1, p: 29-39, Jan. 1959.

POZO-ANTONIO, J.S. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 77, p. 472-478, 15 feb. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>.

QOMI, Mohammad Javad Abdolhosseini; BROCHARD, Laurent; HONORIO, Tulio; MARUYAMA, Ippei; VANDAMME, Matthieu. Advances in atomistic modeling and understanding of drying shrinkage in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 148, 106536, oct. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106536>.

RANA, Aditya; KALLA, Pawan; VERMA, H.K.; MOHNOT, J.K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 312-331, 1 nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126>.

RASHAD, Alaa M.; ESSA, Ghada M. F.; MOKHTAR, Mahmoud M.; MOHAMED, Reham Abu-Elwafa. Valorization of calcined Egyptian marble waste as a reactive CaO additive for fortifying alkali-activated slag cement. *Journal of Engineering and Applied Science*, v. 72, n. 167, 23 sep. 2025. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00754-1>.

REINHARDT, H. W.; BLAAUWENDRAAD, Johan; JONGEDIJK, J. Temperature development in concrete structures taking account of state dependent properties. in Int. Conf. Concrete at Early Ages. 1982. Paris, France.

REIS, Paulo Francisco de Oliveira. **Efeito do polímero super absorvente e de nano partículas de sílica na viscoelasticidade e retração de materiais cimentícios como uma resposta poroviscoelástica**. 2019. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

REPETTE, W. L.: Cimentos especiais de base mineral. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, pg 825-862. IBRACON, 2010.

RIBEIRO, António Bettencourt; FARIA, Guida; VERMELHADO, Vitor. Estudo de betão de retração controlada. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (julho 2023) 00-00.

ROCHA RIBEIRO, Renan. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades**. 2019. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

ROCHA RIBEIRO, Renan; SOUSA, Matheus Ian Castro; RÊGO, João Henrique da Silva; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. Innovative low-cost system for early age E-modulus monitoring of cement pastes: validation and application to nanosilica-added and limestone-calcined clay cements. *Materials and Structures*, v. 55, n. 13, 05 jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-021-01849-w>.

ROCHA RIBEIRO, Renan; GRANJA, José; LAMEIRAS, Rodrigo; AZENHA, Miguel. A Cost-Effective Micro-controller Based System for EMM-ARM Tests in Cement Paste. **International Rilem Conference on Synergising Expertise Towards Sustainability and Robustness of Cement-Based Materials and Concrete Structures**, SynerCrete 2023, v.43, p. 399-412, 2023. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_36.

ROCHA RIBEIRO, R.; RUSSO, Thomas; ARAGHI, A.; GRANJA, J. L.; AZENHA, M.; LAMEIRAS, R. Design and validation of a minimalist, open-source system for measuring elastic modulus evolution in cementitious materials. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 26 jan 2025a. <https://doi.org/10.1080/10589759.2025.2457015>.

ROCHA RIBEIRO, R.; HILLIOU, L.; GRANJA, J. L.; LAMEIRAS, R.; AZENHA, M. Influence of stress and specimen geometry on three-point bending DMA in hardened cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 490, 142109, 5 sep. 2025b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142109>.

RODRIGUES, Giana Sousa Sena. **Contribuição ao estudo da retração e da fluência e seus mecanismos de atuação a baixas idades em concretos estruturais**. 2010. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

RODRIGUES, Larissa Hlena Carnielli Howat. **Análise da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente na composição do cimento Portland**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

RUBIO-CINTAS, Maria Dolores; PARRON-RUBIO, Maria Eugenia; PEREZ-GARCIA; Francisca; RIBEIRO, António Bettencourt; OLIVEIRA; Miguel José. Influence of Steel Slag Type on Concrete Shrinkage. *Sustainability*, v. 13, n.1, 214, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13010214>.

RUSSO, Thomas; RIBEIRO, Renan Rocha; ARAGHI, Amir; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo; GRANJA, José; AZENHA, Miguel. Continuous Monitoring of Elastic Modulus of Mortars Using a Single-Board Computer and Cost-Effective Components. *Buildings*, v. 13, n. 5, 1117, 22 apr. 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13051117>.

S APRIANTI, Evi. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 4178-4194, 20 jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>.

SADEK, Dina M.; EL-ATTAR, Mohamed M.; ALI, Haitham A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, v. 121, p. 19-32, 10 may 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>.

SANTANA, Paulo Fernando Matos de. **Análise Numérica de Ancoragens do Tipo Conector com Cabeça Embutidos em Membros de Concreto Armado Sob Tração**. 2020. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SANTOS, Thyala Anarelli Cunha e. **Estudo da adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alto desempenho**. 2016. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTOS, Karyne Ferreira dos. **Self-healing of high strength concrete by super absorbent polymers for autogenous shrinkage control**. 2021. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SANTOS, Karyne Ferreira dos; RIBEIRO, Antônio Carlos Bettencourt Simões; SILVA, Eugênia Fonseca da; MANZANO, Manuel Alejandro Rojas; MOTTA, Leila Aparecida de Castro; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Effect of the Combination of Superabsorbent Polymers for Autogenous Shrinkage Control with Steel Fibers of High-Performance Concrete under Uniaxial Tension Using DIC. *Materials*, [s.l.], v. 13, n. 20, p. 4638, 17 oct. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13204638>.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R. LOTHENBACH. B. (ED) **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1a ed. CRC Press, 2016.

SEGAL, L.; CREELY, J. J.; MARTIN, A. E. Jr.; CONRAD, C. M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. *Textile Research Journal*, v. 29, n. 10, p. 786-794, oct. 1959. <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>.

SERRA, Débora R.; FERREIRA, Gabriella R.; REIS BARROSO, Raissa Gabriela M.; JENSEN, Alan T.; VALADARES, Leonardo F.; MACHADO, Fabricio. Novel hydrogel from functionalized glycerol and microfibrillated cellulose: towards an environmentally-friendly design. *Cellulose*, v. 28, p. 7033–7052, jul. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03960-1>.

SHEN, Peiliang; LU, Linnu; HE, Yongjia; WANG, Fazhou; LU, Jianxin; ZHENG, Haibing; HU, Shuguang. Investigation on expansion effect of the expansive agents in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 105, 103425, jan. 2020a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103425>.

SHEN, Peiliang; LU, Jian-Xin; ZHENG, Haibing; LU, Linnu; WANG, Fazhou; HE, Yongjia; HU, Shuguang. Expansive ultra-high performance concrete for concrete-filled steel tube applications. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, 103813, nov. 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103813>.

SIDDIQUE, Salman; JANG, Jeong Gook; GUPTA, Trilok. Developing marble slurry as supplementary cementitious material through calcination: Strength and microstructure study. *Construction and Building Materials*, v. 293, 123474, 26 jul. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123474>.

SILVA, Eugênia Fonseca da. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, Lucilia Maria Silveira Bernardinho da. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SILVA JUNIOR, Paulo Francinete. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica**. 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SILVA, Tatiane Brito Perim da. **Comparação entre os resíduos finos recém-gerados e os depositados em aterros da indústria de rochas ornamentais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2019.

SILVA, Fernando Hipólito Barros Trindades da. **Modelagem tridimensional de fratura em materiais quase frágeis com aplicações em fraturamento hidráulico usando elementos finitos**. 2021. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SILVA, Arthur Aviz Palma e. **Microconcretos de alta resistência contendo polímero superabsorvente e metacaulim**. 2022. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

SIMPLICIO, Eliane da Silva.; BRITO NETA, Maria de Souza.; BRITO, Gabriel Ferreira da Silva; ANDREANI, Larissa; CARVALHO, Felipe Brandão Paiva; RODRIGUES, Dasciana de Sousa; MACHADO, Fabricio; VALADARES, Leonado Fonseca. Enzymatic hydrolysis of sugarcane and oil palm residues after hydrothermal pretreatment: the attainment of cellulose nanofibers. *Cellulose*, v. 31, p. 8027–8039, sep. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06115-0>.

SINGH, Manpreet; CHOUDHARY, Kailash; SRIVASTAVA, Anshuman; SANGWAN, Kuldip Singh; BHUNIA, Dipendu. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 13, p. 87-95, sep. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2017.07.009>.

SINGH, Manpreet; SRIVASTAVA, Anshuman; BHUNIA, Dipendu. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Construction and Building Materials*, v. 134, p. 471-488, 1 mar. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>.

SINGH, Manpreet; SRIVASTAVA, Anshuman; BHUNIA, Dipendu. Analytical and Experimental Investigations on Using Waste Marble Powder in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 4, apr. 2019a. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002631](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002631).

SINGH, Manpreet; SRIVASTAVA, Anshuman; BHUNIA, Dipendu. Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 553-569, 20 feb. 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005>.

SMOLANA, Aneta; KLEMCZAK, Barbara; AZENHA, Miguel; SCHLICKE, Dirk. Early age cracking risk in a massive concrete foundation slab: comparison of analytical and numerical prediction models with on-site measurements. *Construction and Building Materials*, v. 301, 124135, 27 sep. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124135>.

SMOLANA, Aneta; KLEMCZAK, Barbara; AZENHA, Miguel; SCHLICKE, Dirk. Thermo-Mechanical Analysis of Mass Concrete Foundation Slabs at Early Age—Essential Aspects and Experiences from the FE Modelling. *Materials*, v. 15, n. 5, 28 feb. 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15051815>.

SOARES, Rubielly Bastos. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SOUZA, Roger Antonio Garcia. **Avaliação numérica do uso de modelos reduzidos para estudo da flambagem lateral por flexo-torção de vigas de aço em situação de Incêndio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SOUZA, Ana Luiza Rocha de. **Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SOUZA, Marcelo Tramontin; ONGHERO, Lucas; CORREA, Bruna Nunes; SELHORST, Maria Angélica; DIAS, Ariely Miranda; Repette, Wellington Longuini; PEREIRA, Fabiano Raupp; OLIVEIRA, Antonio Pedro Novaes de. Novel low-cost shrinkage-compensating admixture for ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, v. 230, 117024, 10 jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117024>.

SUAREZ, Marta Liliana González. **Polímeros super absorventes (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S., “**Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete**”. In: E. Tazawa (ed), Autoshrink’ 98, proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, pp. 269-280, Hiroshima, Japan June, 1999.

TANG, Shengwen; HUANG, Desheng; HE, Zhen. A review of autogenous shrinkage models of concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 44, p. 103412, 2 Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103412>.

TAO, Ling; DENG, Fang; XU, Kaiqin; DONG, Xingzhi; XU, Duheng, LIAO, Yishun; TANG, Shengwen. Effect of calcium sulfoaluminate cement on the hydration process and water resistance of phosphogypsum slag cement. *Journal of Materials Research and Technology*, v.33, p. 5375-5383, 18 oct. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.166>.

TENNICH, Mohsen; KALLEL, Abderrazek; OUEZDOU, Mongi Ben. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 65-70, 30 aug. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.052>.

TENÓRIO FILHO, José Roberto; ARAÚJO, Maria Adelaide Pereira Gomes de; SNOECK, Didier; BELIE, Nele de. Discussing Different Approaches for the Time-Zero as Start for Autogenous Shrinkage in Cement Pastes Containing Superabsorbent Polymers. *Materials*, v. 12, n. 18, 2962, 12 sep. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12182962>.

THIPCHAI, Parichat; JANTANASAKULWONG, Kittisak; SAWANGRAT, Choncharoen; SUHR, Jonghwan; KHOTCHAPONG, Kittiphat; WATTANACHAI, Pitiwat; RACHTANAPUN, Pornchai. Microstructural Characterization of Cellulose Nanocrystals and Microcellulose from Bamboo (*Bambusa longispatha*) for Reinforcing Ordinary Portland Cement Matrix. *Polymers*, v.16, n. 24, 3558, 20 dec. 2024. <https://doi.org/10.3390/polym16243558>.

TRAN, Nghia P.; GUNASEKARA, Chamila; LAW, David W.; HOUSHYAR, Shadi; SETUNGE, Sujeeva; CWIRZEN, Andrzej. A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, v. 38, 102210, jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102210>.

TREESUWAN, Sarapon; MALEESEE, Komsan. Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Additive on Mortar Properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2017, n.1, p. 1-11, 12 oct. 2017. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/8917957>.

TUNC, Esra Tugrul. Recycling of marble waste: a review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environmental Management*, v. 231, p. 86-97, 1 feb. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.034>.

ULIANA, Juliana Gavani. **Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: Aplicação como pozolana em matrizes cimentícias**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

ULIANA, J.G.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NUNES, E. Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 8, n. 2, p. 100-123, apr. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952015000200004>.

UYGUNOĞLU, Tayfun; TOPCU, Ilker Bekir; GENÇEL, Osman; BROSTOW, Witold. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 180-187, may 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.020>.

VALIPOUR, Mahdi; KHAYAT, Kamal H. Coupled effect of shrinkage-mitigating admixtures and saturated lightweight sand on shrinkage of UHPC for overlay applications. *Construction and Building Materials*, v. 184, p. 320-329, 30 sep. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.191>.

VAN BREUGEL, K. Numerical modelling of volume changes at early ages-Potential, pitfalls and challenges. *Materials and Structures*, v. 34, n. 5, p. 293-301, jun. 2001. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02482209>.

VARDHAN, Kirti; SIDDIQUE, Rafat; GOYAL, Shweta. Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 45-55, 10 apr. 2019a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.079>.

VARDHAN, Kirti; SIDDIQUE, Rafat; GOYAL, Shweta. Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 228, 116730, 20 dec. 2019b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116730>.

VAZZOLER, Janaína dos Santos; VIEIRA, Geilma Lima; TELES, Claudia Rodrigues; DEGEN, Maxwell Klein; TEIXEIRA, Roberta Arlêu. Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. *Construction and Building Materials*, v. 177, p. 314-321, 20 jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.098>.

VIEIRA, Sheila Pereira. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

WANG, X.F.; FANG, C.; KUANG, W.Q.; LI, D.W.; HAN, N.X.; XING, F. Experimental investigation on the compressive strength and shrinkage of concrete with pre-wetted lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 867-879, 30 nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.224>.

WANG, Lei; LI, Guoxin; LI, Xiang; GUO, Fanxing; TANG, Shengwen; LU, Xiao; HANIF, Asad. Influence of reactivity and dosage of MgO expansive agent on shrinkage and crack resistance of face slab concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 126, 104333, feb. 2022a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104333>.

WANG, Yujiang; TIAN, Qian; LI, Hua; WANG, Humidity Sensitivity of Hydration of Expansive Agent and Its Expansive Efficiency in Ultra-High Performance Concrete. *Crystals*, v. 12, n. 2, 195, 28 jan. 2022b. <https://doi.org/10.3390/cryst12020195>.

WEISS, J. Experimental determination of the 'Time Zero', t_0 ('Maturity-Zero', M_0). **Early Age Cracking in Cementitious Systems - Report of Rilem Technical Committee 181-Eas - Early Age Shrinkage Induced Stresses and Cracking in Cementitious Systems**, p. 195-206, 2002. <http://dx.doi.org/10.1617/2912143632.019>.

WEISS, Jason; LURA, Pietro; RAJABIPOUR, Farshad; SANT, Gaurav. Performance of Shrinkage-Reducing Admixtures at Different Humidities and at Early Ages. *Aci Materials Journal*, v. 105, n. 5, p. 478-486, 1 sep. 2008. <http://dx.doi.org/10.14359/19977>.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), WBCSD Cement Sustainability Initiative. Getting the Numbers Right Project, Emissions Report 2014, 2014. Disponível em site: <<http://www.wbcscement.org/GNR-2014/index.html>>. Acesso em: 07 dec 2021.

WU, Linmei; FARZADNIA, Nima; SHI, Caijun; ZHANG, Zuhua; WANG, Hao. Autogenous shrinkage of high performance concrete: a review. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 62-75, 15 sep. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064>.

WYRZYKOWSKI, Mateusz; TRTIK, Pavel; MÜNCH, Beat; WEISS, Jason; VONTOBEL, Peter; LURA, Pietro. Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography. *Cement and Concrete Research*, v. 73, p. 238-245, jul. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.013>.

WYRZYKOWSKI, Mateusz; HU, Zhangli; GHOURCHIAN, Sadegh; SCRIVENER, Karen; LURA, Pietro. Corrugated tube protocol for autogenous shrinkage measurements: review and statistical assessment. *Materials and Structures*, v. 50, n. 57, 2017. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0933-2>.

WYRZYKOWSKI, Mateusz; TERRASI, Giovanni; LURA, Pietro. Expansive high-performance concrete for chemical-prestress applications. *Cement and Concrete Research*, v. 107, p. 275-283, may 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.018>.

YANG, Guo; WANG, Hao; WAN-WENDNER, Roman; HU, Zhangli; LIU, Jiaping. Cracking behavior of ultra-high strength mortar with CaO-based expansive agent and superabsorbent polymer. *Construction and Building Materials*, v. 357, 129281, 28 nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129281>.

YANG, Guo; ZHAO, Haitao; HU, Zhangli; ZHANG, Weiwei; XIANG, Yu; JIN, Ming; WAN-WENDNER, Roman; LIU, Jiaping. Prediction of restrained stress for UHPC: Considering relationship between long-term and in-situ creep. *Construction and Building Materials*, v. 484, 141722, 18 jul. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141722>.

YOO, Doo-Yeol; KIM, Jihwan; ZI, Goangseup; YOON, Young-Soo. Effect of shrinkage-reducing admixture on biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced

concrete. *Construction and Building Materials*, v. 89, p. 67-75, 1 aug. 2015a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.040>.

YOO, Doo-Yeol; BANTHIA, Nemkumar; YOON, Young-Soo. Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 64, p. 27-36, nov. 2015b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.005>.

YOO, Doo-Yeol; MIN, Kyung-Hwan; LEE, Joo-Ha; YOON, Young-Soo. Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 357-365, 30 dec. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.097>.

YUAN, Tian-Feng; KIM, Seong-Kyum; KOH, Kyung-Teak; YOON, Young-Soo. Synergistic Benefits of Using Expansive and Shrinkage Reducing Admixture on High-Performance Concrete. *Materials*, v. 11, n. 12, 2514, 11 dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11122514>.

XU, Li; PAN, Jinlong; YANG, Xiao. Mechanical performance of self-stressing CFST columns under uniaxial compression. *Journal of Building Engineering*, v. 44, 103366, dec. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103366>.

ZAICHENKO, Mykola; NAZAROVA, Antonina; MARSHDI, Qosai. Effect of expansive agent and shrinkage reducing admixture in shrinkage-compensating concrete under hot-dry curing environment. *Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, v. 14, n. 2, p. 170–178, 2014.

ZHAN, Pei-Min; HE, Zhi-Hai. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: a review. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 676-690, 20 mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209>.

ZHANG, Sherong; CAO, Kelei; WANG, Chao; WANG, Xiaohua; WANG, Jiaxin; SUN, Benbo. Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, v. 241, 117980, 30 apr. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>.

ZHANG, Jia-Xuan; LYU, Hai-Min; SHEN, Shui-Long; HOU, Dong-Wei. Investigation of Crack Control of Underground Concrete Structure with Expansive Additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 1, jan. 2021. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003528](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003528).

ZHANG, Wenyan; LIN, Huaxia; XUE, Mengfen; WANG, Shuai; RAN, Junsheng; SU, Faqiang; ZHU, Jianping. Influence of shrinkage reducing admixtures on the performance of cementitious composites: a review. *Construction and Building Materials*, v. 325, 126579, 28 mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126579>.

ZHANG, Yulu; PAN, Yifan; REN, Tiezhen; LIANG, Hongtao; ZHANG, Jianfeng; ZHANG, Dakang. The Application of Calcium-Based Expansive Agents in High-Strength Concrete: A Review. *Buildings*, v.14, n. 8, 2369, 1 aug. 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14082369>.

ZHANG, Zhanqiang; SHAO, Hanrui; CAO, Wenxiang; YIN, Suhong; LIU, Songhui. Understanding synergistic effects between MgO expansive agents and hydrophilic nano-silica in UHPC. *Journal of Building Engineering*, v. 95, 110049, 15 oct. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110049>.

ZHAO, Haitao; LI, Jinghao; SUN, Gaoyang; JIANHUA, Jiang; XUAN, Weihong; CHEN, Yuzhi; TIAN, Qian; LIU, Jiaping. Effects of pre-soaked zeolite and CaO-based expansive agent on mechanical properties and autogenous deformation of early-age concrete. *Construction and Building Materials*, v. 261, 120370, 20 nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120370>.

ZHAO, Haitao; XIANG, Yu; CHEN, Xiaodong; HUANG, Jie; XU, Wen; LI, Hua; WANG, Yujiang; WANG, Penggang. Mechanical properties and volumetric deformation of early-age concrete containing CaO-MgO blended expansive agent and temperature rising inhibitor. *Construction and Building Materials*, v. 299, 123977, 13 sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123977>.

ZHAO, Haitao; XIANG, Yu; LIU, Jiaping; ZHANG, Zhiqiang; JIA, Ruiming; YAO, Ting; LI, Hua; XU, Wen; TIAN, Qian. Effects of reinforcement on autogenous deformation of early-age concrete containing CaO-based expansion agent. *Construction and Building Materials*, v. 320, 126197, 21 feb. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126197>.