

HEITOR MONTEFUSCO BERNARDO

**Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos para previsão da
protensão química em materiais cimentícios**

São Paulo
2024

HEITOR MONTEFUSCO BERNARDO

**Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos para previsão da
protensão química em materiais cimentícios**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia de
Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Rafael Giuliano
Pileggi

Co-orientador: Prof. Dr. Alfredo Gay
Neto

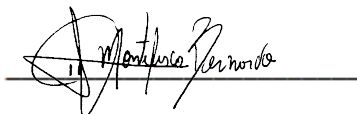
São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de Abril de 2024

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Bernardo, Heitor Montefusco

Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos para previsão da protensão química em materiais cimentícios / H. M. Bernardo -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

130 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Protensão química 2.Modelos numéricos 3.Retração química 4.Materiais cimentícios I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: Bernardo, Heitor Montefusco

Título: Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos para previsão da protensão química em materiais cimentícios.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em: **13/03/2024**

Banca Examinadora

Prof. Dr. **Rafael Giuliano Pileggi (Orientador)**

Instituição: Universidade de São Paulo - USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. **Renato Picelli Sanches**

Instituição: Universidade de São Paulo - USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. **Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos**

Instituição: Universidade Federal do Ceará - UFC

Julgamento: Aprovado

AGRADECIMENTOS

A Deus, Jesus e ao Espírito Santo, por me proporcionar esse momento de vida, eu não sou nada sem a sua Graça e Misericórdia.

À minha esposa Laura, minha companheira, durante essa etapa, foram diversos momentos de reflexões sobre a vida, trabalho e você sempre esteve disposta a me auxiliar.

Aos meus pais Marcelo e Rossana, pelo amor incondicional.

Meu irmão Marcello, minha cunhada Maria e os meus sobrinhos Melyssa e Lucca, sempre me motivando com a alegria em cada ligação de vídeo chamada.

Ao Prof. Rafael Giuliano Pileggi, por propor um tema inovador e confiar em mim durante todo esse tempo no laboratório.

Em especial ao Prof. Alfredo Gay Neto, que além de aceitar a coorientação desse trabalho, sempre esteve disposto a me explicar conceitos elementares relacionados a mecânica computacional, com uma didática fenomenal, que eu sinceramente, nunca havia presenciado antes. Agradeço também as nossas reuniões que tivemos por chamada de vídeo que foram leves e descontraídas, foi um prazer trabalhar com o Sr.

Aos colegas de laboratório, Estevão, Jordão, Matheus, Marcel, Gabriel, Victor, José Augusto, Daniele, Nathalia, Natacha, Delver, Matheus Felix entre tantos outros, que ajudaram sempre que possível.

Ao pesquisador Dr. Cesar Romano, que durante a minha passagem no laboratório foi uma das pessoas que acreditou no meu trabalho.

Ao Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de materiais (LME) da Escola Politécnica na Universidade de São Paulo, pela realização do trabalho prático. Aos técnicos Mário, Jéssica e Adilson.

Ao Laboratório de Mecânica Computacional (LMC) pela utilização da infraestrutura e ao técnico José por facilitar o acesso aos computadores.

À Wandrea e Milton, expresso minha profunda gratidão pela valiosa assistência na resolução de questões documentais e processos burocráticos.

À Danila Ferraz da empresa GCP, gostaria de expressar minha sincera gratidão pela generosa doação do silicato de sódio, que foi fundamental para a realização desta pesquisa.

Ao Valdecir Quarcioni do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo), meu profundo agradecimento pela colaboração na realização do ensaio para determinação do teor de Na_2O e SiO_2 do silicato de sódio.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa e pelo auxílio financeiro para realização desta pesquisa.

“Pois será como a árvore plantada junto a ribeiros de águas, a qual dá o seu fruto no seu tempo; as suas folhas não cairão, e tudo quanto fizer prosperará.”

(Salmos 1:3)

RESUMO

A protensão, uma técnica consolidada, tem sido um estímulo fundamental no desenvolvimento das estruturas de concreto, viabilizando a construção de elementos mais leves, com vãos maiores e maior capacidade de resistência à fissuração. Além da protensão mecânica tradicional, surgiram outras abordagens promissoras, como o uso de cordoalhas de fibra de carbono reforçada com polímero (CFRP), um material mais leve e resistente. Outra inovação é a protensão química, na qual as tensões internas de reforço são geradas sem a necessidade de ação mecânica de um elemento externo. No entanto, a protensão química ainda é uma área pouco explorada e com grande potencial de pesquisa. Para avançar nesse campo, a criação de modelos numéricos de elementos finitos tem sido uma solução prática e eficiente. Esses modelos permitem analisar uma ampla gama de variáveis e prever o comportamento de sistemas complexos de forma mais rápida e precisa do que os testes em escala real. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo de elementos finitos capaz de prever as tensões resultantes da protensão química em materiais cimentícios. Foram adotadas estratégias que incluíram a caracterização experimental das pastas cimentícias, a criação de três modelos numéricos para análise das tensões normais e de cisalhamento, a calibração da retração química e a aplicação da retração ao componente cimentício. O principal *input* adotado no modelo foi a quantificação do deslocamento vertical obtido no ensaio experimental de retração química para poder assumir a hipótese da dilatação volumétrica. Os resultados obtidos indicaram que o modelo desenvolvido apresentou um desempenho adequado, permitindo a calibração dos dados experimentais de retração química da pasta de cimento e da pasta de cimento com silicato de sódio. A aplicação da retração química em ambas as camadas evidenciou a necessidade de combinar as cinéticas de retração e expansão para melhorar as tensões de protensão. Além disso, a fim de aprimorar a compressão dos resultados, especialmente no estado endurecido, é essencial adotar um modelo que considere a transição do estado fluido para o sólido.

Palavras-chave: protensão química. modelos numéricos. retração química. materiais cimentícios.

ABSTRACT

Prestressing, a well-established technique, has been a fundamental stimulus in the development of concrete structures, making it possible to build lighter elements with longer spans and greater resistance to cracking. In addition to traditional mechanical prestressing, other promising approaches have emerged, such as the use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strands, a lighter and more resistant material. Another innovation is chemical prestressing, in which internal reinforcement stresses are generated without the need for mechanical action by an external element. However, chemical prestressing is still a little-explored area with great research potential. To advance in this field, the creation of finite element numerical models has been a practical and efficient solution. These models make it possible to analyze a wide range of variables and predict the behavior of complex systems more quickly and accurately than full-scale tests. In this context, the aim of this study was to develop a finite element model capable of predicting the stresses resulting from chemical prestressing in cementitious materials. Strategies were adopted that included the experimental characterization of cement pastes, the creation of three numerical models to analyze normal and shear stresses, the calibration of chemical shrinkage, and the application of shrinkage to the cementitious component. The main input adopted in the model was the quantification of the vertical displacement obtained in the experimental chemical shrinkage test to assume the hypothesis of volumetric expansion. The results obtained indicated that the model developed performed adequately, allowing for the calibration of experimental data on chemical shrinkage of cement paste and cement paste with sodium silicate. The application of chemical shrinkage to both layers highlighted the need to combine shrinkage and expansion kinetics to improve prestressing stresses. Furthermore, to improve the compression results, especially in the hardened state, it is essential to adopt a model that considers the transition from the fluid to the solid state.

Keywords: chemical prestressing. numerical models. chemical shrinkage. cementitious materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Mapa mental da Dissertação.....	23
Figura 2 Ilustração das forças atuantes quando se comprime um livro contra o outro.	25
Figura 3 Ilustração de uma roda de carroça.....	26
Figura 4 Em (a) concreto simples e em (b) concreto armado.	27
Figura 5 Diagrama da distribuição de tensões de origem axial, obtidas por meio das cordoalhas tensionadas. Em (a) tensões de tração sendo aplicadas externamente. Em (b) são posicionadas cordoalhas de aço que são previamente esticadas e ancoradas nos extremos, gerando tensões de compressão, sinal positivo T traciona e sinal negativo de NP representa compressão. E em (c) são ilustradas as tensões externas e as tensões de protensão geradas pelo tracionamento das cordoalhas.....	29
Figura 6 Distribuição das tensões em uma simplesmente apoiada. Com corte da seção transversal localizada no meio vão da viga.	31
Figura 7 Ilustração do mecanismo da protensão química.	32
Figura 8 Em (a) evolução das tensões de tração geradas pela expansão do material cimentício. Em (b) curvas de tensões-deflexões do ensaio de flexão quatro pontos.	33
Figura 9 Gerações de tensões hidrostáticas nos meniscos capilares dos materiais cimentícios.	35
Figura 10 Diagrama do comportamento de um poro capilar de uma pasta de cimento.	36
Figura 11 Mapeamento das retrações no estado fresco e endurecido de sistemas cimentícios.	36
Figura 12 Ilustração da variação volumétrica causada pela retração química	39
Figura 13 Impacto da utilização da simulação durante a fase de desenvolvimento de um produto	43
Figura 14 Discretização de um sólido pelo método de elementos finitos	44
Figura 15 Em (a) modelo esquemático do sistema de protensão. Em (b) simulação do sistema protendido, setas superiores indicando o carregamento transversal na viga. As setas vermelhas dentro da viga indicam as principais direções de tensão durante o carregamento da viga.....	45

Figura 16 Em (a) é apresentado a técnica denominada pelos autores de <i>Extrusion</i> . Em (b) a técnica de <i>Embedded</i> . Em (c) deformação axial em função do comprimento da viga.....	46
Figura 17 A protensão de uma das geometrias é avaliada pelo método da diminuição da temperatura (escala do gráfico em Pascal).	49
Figura 18 Picnômetro de gás hélio.....	51
Figura 19: Ilustração do funcionamento do granulômetro à laser.....	53
Figura 20 Distribuição do tamanho de partícula do cimento CPV utilizado no trabalho	55
Figura 21 Equipamento de retração química.....	58
Figura 22 Detalhes dos suportes criado para apoiar as amostras durante o ensaio.	58
Figura 23 Em (a) Comparação da retração química antes e depois da suavização dos dados. Resultado característico da retração química de um cimento CPV. Em (b) resultado da retração química suavizada e da taxa de retração química.....	60
Figura 24 Procedimento experimental do ensaio de retração química. Em (a) pasta de cimento é adicionada dentro da ampola em um volume determinado. Em (b) é adicionado 2 ml de água para manter a hidratação da pasta de cimento em seu nível máximo. Em (c) é adicionado até a superfície superior da ampola parafina líquida com corante. Em (d) a ampola é fechada com a pipeta dentro de uma rolha com um furo no meio.	62
Figura 25 Sistema de retração química montado com as amostras sendo ensaiadas.	62
Figura 26 Em (a) retração química das amostras com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio. Em (b) taxa de retração química com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	63
Figura 27 Calorímetro isotérmico utilizado para o acompanhamento da reação química das pastas cimentícias (a) e colocação da ampola no equipamento para iniciar o ensaio (b).	65
Figura 28 Esquema ilustrativo da liberação de calor em função do tempo. Em (a) é apresentada a curva do fluxo de calor dividida em estágios e em (b) o significado de cada patamar.	65
Figura 29 Em (a) Calor acumulado com o cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio. Em (b) Fluxo de calor com o cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	67

Figura 30 Em (a) Período de indução. Em (b) taxa de reação. Em (c) tempo de pega de acordo com a norma ASTM C1679/13 das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	68
Figura 31 Comparação entre o calor acumulado obtido pela calorimetria e retração química das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2, 2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	70
Figura 32 Correlação entre calor acumulado e retração química resultados obtidos do trabalho de LURA; WINNEFELD; KLEMM, (2010) utilizando cimento Portland comum do tipo CEM-I em diferentes relação água cimento 0,30 e 0,50. ESTRADA CACERES, (2016) utilizou cimento Portland do tipo V e substituições parciais (5,10 e 20%) de cimento por metacaulin.	71
Figura 33 Equipamento utilizado para os ensaios de reometria rotacional e oscilatória	71
Figura 34 Ilustração da programação utilizada para o ensaio de fluxo.	72
Figura 35 Ilustração da programação utilizada para o ensaio de reometria oscilatória	72
Figura 36 Tensão de escoamento e viscosidade aparente das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	74
Figura 37 Viscosidade vs taxa de cisalhamento das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,5,3,0 e 6,0% de silicato de sódio.	75
Figura 38 Alteração da rigidez microestrutural das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	76
Figura 39 G' vs calor acumulado das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.	77
Figura 40 Geometria criada a partir do software Abaqus.	80
Figura 41 Geometria em camadas da configuração (7:3)	82
Figura 42 Análise das tensões normais e tensões de cisalhamento dos diferentes níveis de refinamento de discretizações.	85
Figura 43 Modelo axissimétrico criado, a esquerda o modelo 2d e a direita o modelo 3d.	86
Figura 44 Variação da altura da amostra da pasta de cimento com 2,5% de silicato em função do tempo.	87
Figura 45 Variação da altura da amostra em função da temperatura para um mesmo coeficiente de expansão.	89

Figura 46 Simulação da variação da altura da pasta cimentícia com 2,5% de silicato de sódio.....	90
Figura 47 Configuração dos corpos de prova.....	91
Figura 48 Moldagem dos corpos de prova. Em (a) moldagem dos componentes prismáticos com o auxílio de uma colher e um mini vibrador. Em (b) os corpos de prova envelopados com papel filme para evitar o contato com atmosfera.....	92
Figura 49 Equipamento para medição do módulo de elasticidade dinâmico.....	93
Figura 50 Módulo de elasticidade dinâmico da pasta de cimento referência e com 2,5% de silicato de sódio.....	94
Figura 51 Resistência a compressão axial da pasta de cimento referência e com 2,5% de silicato de sódio.....	95
Figura 52 Porosidade total da pasta de cimento referência e com 2,5% de silicato de sódio.....	97
Figura 53 Ensaio de tração na flexão em quatro pontos. Em (a) o aparato montado com o corpo de prova cimentício. Em (b) detalhe para inserção de uma borracha para distribuir os esforços homogeneamente.....	97
Figura 54 Resistência a flexão 4 pontos dos componentes cimentícios Ref, 2,5% Silicato, 8,5;1,5 e 7:3.....	98
Figura 55 Carga vs deslocamento monolítico.	101
Figura 56 Resultados experimentais calculados a partir das equações analíticas e os resultados simulado obtido através do modelo criado no software Abaqus. Em (a) e (b) Tensões normais e (c) e (d) tensões de cisalhamento.	103
Figura 57 Ilustração das tensões normais e de cisalhamento do CP –10 Referência. Tensões normais calculadas no ponto médio do corpo de prova, enquanto as tensões de cisalhamento foram calculadas a um terço da distância entre os apoios inferiores.	104
Figura 58 Estimativa do módulo de elasticidade a partir do calor de hidratação. Gráfico superior pasta referência e no gráfico inferior, pasta com 2,5% de silicato de sódio.	105
Figura 59 Simulação da protensão para intervalo entre camadas de uma hora (condição 1). No gráfico superior são apresentadas as tensões normais oriundas da protensão química. A figura inferior apresenta a ilustração da configuração 7:3 obtida por meio do software de simulação Abaqus. A ilustração mostra as tensões normais	

no meio do vão, sendo que a escala de cores representa os valores das tensões em kPa.	107
Figura 60 Simulação da protensão para intervalo de duas horas na primeira camada e uma hora na segunda camada (condição 2). No gráfico superior são apresentadas as tensões normais oriundas da protensão química. A figura inferior apresenta a ilustração da configuração 7:3 obtida por meio do software de simulação Abaqus. A ilustração mostra as tensões normais no meio do vão, sendo que a escala de cores representa os valores das tensões em kPa.....	109
Figura 61 Simulação da protensão para intervalo de 48 horas na primeira camada e 47 horas na segunda camada (condição 3). No gráfico superior são apresentadas as tensões normais oriundas da protensão química. A figura inferior apresenta a ilustração da configuração 7:3 obtida por meio do software de simulação Abaqus. A ilustração mostra as tensões normais no meio do vão, sendo que a escala de cores representa os valores das tensões em MPa.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela I Densidade real, área superficial específica e diâmetros característicos das partículas de cimento CPV utilizado no trabalho e módulo de sílica ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) e teor de água no silicato de sódio.....	55
Tabela II Análise química do cimento CPV utilizado no trabalho.	55
Tabela III Determinação do teor de óxido de sódio (Na_2O), anidrido silícico (SiO_2) e água.	56
Tabela IV Composições cimentícias avaliadas.	57
Tabela V Valores de retração química em 12, 24 e 48 horas das amostras analisadas e a porcentagem em relação a referência.	64
Tabela VI Análise das simulações com diferentes malhas. Análise realizada considerando um deslocamento total de 0,05 mm.	84
Tabela VII Análise da variação da altura da pasta cimentícia em função da variação da temperatura.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/c	Relação água cimento
A/s	Relação água materiais sólidos
BET	Método <i>Braunaer, Emmet e Teller</i>
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas
MEF	Método de elementos finitos
MS	Módulo de sílica
NBR	Norma brasileira
PF	Perda ao fogo
RQ	Retração química
UHPC	Concreto de ultra alto desempenho
V_{ai}	Volume de água inicial
V_{al}	Volume de água livre
V_{ca}	Volume de cimento anidro
V_{ca}	Volume do cimento anidro
V_{ch}	Volume de cimento hidratado
V_{ph}	Volume de produtos hidratados

LISTA DE SIMBOLOS

Ca^+	Íons de cálcio
Ca(OH)_2	Hidróxido de cálcio
CO_2	Dióxido de carbônico
H_2CO_3	Ácido carbônico
CaCO_3	Carbonato de cálcio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
Fe_2O_3	Óxido de ferro
CaO	Óxido de cálcio
MgO	Óxido de magnésio
SO_3	Óxido sulfúrico
K_2O	Óxido de potássio
TiO_2	Dióxido de titânio
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
MnO	Óxido de manganês
SrO	Óxido de estrôncio
K^+	íons potássio
SO_4	Sulfato
Na_2O	Óxido de sódio
SiO_2	Dióxido de silício
NaOH	Hidróxido de sódio
mm	Milímetro
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
kPa	Kilopascal
T	Tração externa aplicada ao elemento de concreto
A_c	Área da seção transversal do concreto
N_p	Compressão no concreto por meio das tensões das cordoalhas
σ_c	Tensão normal do concreto
$\sigma_{c,p}$	Tensão no concreto causado pela aplicação da tração nas cordoalhas
$\sigma_{c,T}$	Tensão de tração advinda do esforço externo.
M	Momento fletor
σ_{cM}	Tensão de tração no concreto nas fibras inferiores

e_p	Excentricidade das cordoalhas com relação ao centro de gravidade
I_c	Momento de inércia da seção transversal do concreto
Y_1	Distância do centro de gravidade da seção transversal do elemento até a parte inferior da viga
Y_2	Distância do centro de gravidade da seção transversal do elemento até a parte superior
A_p	Área de protensão.
$\Delta Tsh(t)$	Comportamento da deformação ao longo do tempo
$\varepsilon sh(t)$	Deformação de retração da matriz em diferentes tempos de envelhecimento
α_m	Coefficiente de retração/expansão térmica
$\Delta\theta$	Varição da temperatura
ϕ	Valor de protensão
E_c	Módulo de elasticidade das cordoalhas de aço protendidas
P_1 .	Pressão da válvula de expansão
P_2 .	Valor de pressão da válvula de expansão após aberta
V_{mat}	Volume real do material
V_a	Volume da câmara da amostra
V_e	Volume da câmara de expansão
G'	Módulo de armazenamento elástico
G^*	Módulo de deformação complexo
τ	Tensão de cisalhamento
Y_0	deformação imposta
I	Momento de inércia
V	Força cortante
Q	Momento estático de área
t	Largura da seção transversal
ΔV	Varição de volume
V_0 .	Volume inicial
γ	Coefficiente de dilatação volumétrica
ν	Coefficiente Poisson
v	Velocidade de propagação de onda ultrassônica
ρ	Densidade de massa aparente

F

Força

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	OBJETIVO.....	22
3	PANORAMA GERAL DA DISSERTAÇÃO	23
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	25
4.1	PROTENSÃO.....	25
4.1.1	Protensão em elementos de concreto armado	26
4.2	PROTENSÃO QUÍMICA.....	31
4.2.1	Retração	34
4.3	SILICATO DE SÓDIO ASSOCIADO AOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	39
4.3.1	Tempo de pega.....	41
4.3.2	Resistência mecânica	41
4.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	42
4.4.1	Método dos elementos finitos (MEF) aplicado à sistemas com protensão ...	43
4.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	49
5	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	51
5.1	METODOLOGIA UTILIZADA PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO CIMENTO .	51
5.1.1	Picnometria de gás He.....	51
5.1.2	Distribuição granulométrica.....	52
5.1.3	Área superficial específica	53
5.1.4	Análise química via úmida por fluorescência de raios X.....	54
5.2	METODOLOGIA UTILIZADA PARA CARACTERIZAÇÃO DO SILICATO DE SÓDIO	54
5.3	RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS MATÉRIAS - PRIMAS UTILIZADAS	54
5.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	56
6	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RETRAÇÃO DAS SUSPENSÕES CIMENTÍCIAS.....	57
6.1	ENSAIO DE RETRAÇÃO QUÍMICA MÉTODO DE DILATOMETRIA AUTOMATIZADO.....	57
6.1.1	Equipamento.....	57
6.1.2	Determinação da retração química	59
6.1.3	Procedimento experimental, mistura e preparo das amostras.....	61
6.1.4	Resultados	63
6.2	CALORIMETRIA ISOTÉRMICA.....	65

6.2.1	Determinação do período de indução, taxa de reação e tempo de pega.....	65
6.2.2	Resultados	67
6.2.2.1	Correlação retração química vs calorimetria isotérmica	70
6.3	REOMETRIA ROTACIONAL E OSCILATÓRIA	71
6.3.1	Determinação da viscosidade aparente, tensão de escoamento e a componente elástica G'	73
6.3.2	Resultados	74
6.3.2.1	Correlação do ganho de consistência G' vs calor acumulado.....	76
6.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	78
7	DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO 2D PELO MEF PARA AVALIAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS, CISALHAMENTO E DA PROTENSÃO QUÍMICA	80
7.1	CRIAÇÃO DO MODELO 2D (MONOLÍTICO)	80
7.2	CRIAÇÃO DO MODELO 2D EM CAMADAS	81
7.3	CÁLCULOS ANALÍTICOS	83
7.4	ESTUDO DE SENSIBILIDADE DA MALHA	84
7.5	CALIBRAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO	86
7.5.1	Estudo da variação do coeficiente de expansão e da temperatura.....	87
7.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	90
8	MOLDAGEM/CURA DOS CORPOS DE PROVA E AVALIAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	91
8.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	92
8.1.1	Resultado.....	93
8.2	COMPRESSÃO AXIAL	94
8.2.1	Resultado.....	94
8.3	POROSIDADE TOTAL PELO MÉTODO ARQUIMEDES.....	95
8.3.1	Resultado.....	96
8.4	TRAÇÃO NA FLEXÃO EM QUATRO PONTOS	97
8.4.1	Resultado.....	98
8.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	99
9	COMPARAÇÕES MODELO NUMÉRICO VS EXPERIMENTAL	100
9.1.1	Análise componente monolítico Ref e 2,5% Silicato de sódio.....	100
9.1.2	Componente protendido quimicamente	104

9.1.2.1	Condição 1 – Retração química apenas na primeira camada em um intervalo de uma hora.....	106
9.1.2.2	Condição 2 – Retração química em ambas as camadas intervalo de duas horas na primeira camada e uma hora na segunda camada.....	108
9.1.2.3	Condição 3 – Retração química em ambas as camadas intervalo de 48 horas na primeira camada e 47 horas na segunda camada	110
9.2	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	112
10	CONCLUSÕES GERAIS.....	114
11	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	ANEXO A – ANÁLISE ANOVA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	122
	ANEXO B – ANÁLISE ANOVA POROSIDADE TOTAL.....	123
	ANEXO C – ANÁLISE ANOVA RESISTÊNCIA A FLEXÃO QUATRO PONTOS	124
	ANEXO D – COMPARAÇÕES CARGA VS DESLOCAMENTO.....	125
	ANEXO E – COMPARAÇÕES TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO	127

1 INTRODUÇÃO

A protensão é uma ideia que impulsionou o crescimento das estruturas de concreto no início do século XX, principalmente com o desenvolvimento de aços de alta resistência (Gilbert; Mickleborough; Ranzi, 2017). Com esse avanço, estruturas mais leves, superando maiores vãos, com seção transversal menor e com resistência maior à fissuração puderam ser construídas. Esse tipo de técnica tem desempenhado um papel fundamental no crescimento da infraestrutura urbana. Além disso, novas inovações baseadas na protensão estão ganhando destaque, como a utilização de cordoalhas de fibra de carbono reforçada com polímero (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – CFRP), que oferecem resistência superior a 1000 MPa (Wyrzykowski; Terrasi; Lura, 2020). Outra inovação é a protensão química, onde o próprio material, o concreto, é empregado para gerar tensões prévias sem a necessidade de ação mecânica de um elemento externo. De acordo com ZDANOWICZ, (2021), esse conceito é denominado protensão química.

A partir desse conceito, duas rotas podem ser aplicadas para gerar tensões internas de reforço, a primeira é expandindo-o material e a segunda é retraíndo-o. É fundamental destacar que essa condição de reforço só pode ser alcançada quando há contato entre os materiais e, durante a interação com os outros elementos, a expansão ou retração sejam diferentes. Sendo assim, o conceito mais difundido com mais publicações é a primeira, voltada principalmente aos cimentos e aditivos expansivos (Benuska; Bertero; Polivka, 1971; Lin; Klein, 1963; Liska; Wilson; Bensted, 2019; Wyrzykowski; Terrasi; Lura, 2018). Já a segunda, tema dessa Dissertação, é pouco difundida, apenas com alguns autores criando inferências sobre o conceito (Giordano, 2011), tornando-o um grande potencial para pesquisa.

Apesar de ser uma área a ser explorada, principalmente no tocante à validação de conceitos, gerando uma série de variáveis a serem analisadas, uma solução prática é a criação de modelos numéricos, permitindo analisar um número maior de variáveis prevendo o comportamento de sistemas complexos, avaliando diferentes cenários de maneira rápida quando comparado ao sistema real. Embora os modelos numéricos facilitem o entendimento dos conceitos abordados na pesquisa, reduzindo muitas

vezes o número de variáveis a serem testadas, ainda existem desafios a serem superados que não estão diretamente relacionados a esses modelos, como por exemplo: se o nível de retração é suficiente para protensão, qual o impacto geométrico nos níveis de tensões oriundos da protensão química, como a cinética da retração pode afetar as tensões de protensão entre tantos outros.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um modelo de elementos finitos capaz de prever as tensões de protensão química em materiais cimentícios. Para isso, algumas estratégias foram adotadas, a primeira listada no capítulo seis foi caracterizar experimentalmente as pastas cimentícias empregadas neste estudo, as quais consistiram na avaliação da retração química, na análise da cinética de reação e no estudo do comportamento reológico. Posteriormente, no capítulo sete foram criados modelos numéricos por meio do método dos elementos finitos. Nesta etapa, três modelos distintos foram desenvolvidos. O primeiro teve como objetivo analisar as tensões normais e de cisalhamento resultantes de carregamentos transversais. O segundo modelo foi elaborado para calibrar a retração química, ajustando os parâmetros do coeficiente de expansão térmica e temperatura para obter valores de retração compatíveis com os resultados experimentais, de forma a obter valores de retração compatíveis com os resultados experimentais obtidos, sendo esse o *input* principal. Por fim, um terceiro modelo foi elaborado para aplicar a retração ao componente cimentício, utilizando os valores experimentais calibrados no segundo modelo. No capítulo nove, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados experimentais e os resultados numéricos. Essa abordagem permitiu avaliar que o modelo puramente elástico adotado neste trabalho oferece uma visão comparativa qualitativa entre diferentes cenários. No entanto, uma análise mais aprofundada deve considerar a complexidade dos materiais cimentícios, como a variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo, o que demandaria a incorporação de hipóteses mais complexas para abranger a transição de fases do estado fluido para sólido de maneira concomitante.

2 OBJETIVO

Desenvolver um modelo de elementos finitos capaz de prever as tensões de protensão química em materiais cimentícios.

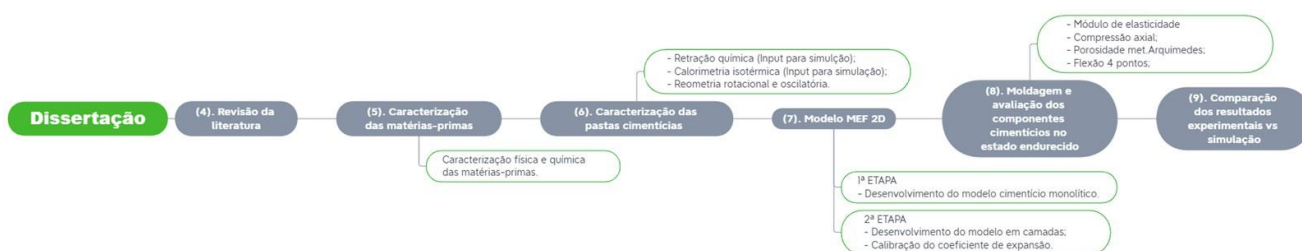
Para alcançar o objetivo proposto, são listados os seguintes objetivos específicos:

- i avaliar o método experimental para quantificação da retração química em materiais cimentícios
- ii calibrar os modelos de elementos finitos de posse dos resultados experimentais de retração química
- iii comparar as tensões advindas do carregamento externo com as tensões oriundas da protensão química

3 PANORAMA GERAL DA DISSERTAÇÃO

O objetivo deste tópico é contextualizar como cada parte do trabalho está conectada para atingir o objetivo dessa Dissertação. Na Figura 1, é apresentado um diagrama geral do trabalho, no qual cada tópico descrito na figura está relacionado com o título de cada capítulo.

Figura 1 Mapa mental da Dissertação.



Fonte: Autor.

Na revisão da literatura, foram abordados os contextos históricos da protensão e da protensão química, além de informações sobre os materiais utilizados na pesquisa e os modelos atuais de elementos finitos para protensão. No capítulo seguinte, apresenta-se a caracterização das matérias-primas, cujo objetivo é obter informações básicas dos materiais utilizados na Dissertação, de forma pragmática, abordando a metodologia empregada e os resultados obtidos.

No capítulo seis, é discutida a caracterização das pastas cimentícias, o objetivo nesta seção é compreender o comportamento de retração química das pastas, coletando os *inputs* para o modelo, sendo os principais: a variação volumétrica e calor de hidratação.

No capítulo sete, são descritas as construções dos modelos e as hipóteses adotadas para cada um deles, resultando no desenvolvimento de três modelos, o primeiro, denominado monolítico, prevê as tensões normais e de cisalhamento resultantes do carregamento transversal, com o intuito de simular o ensaio de flexão quatro pontos. Com os principais inputs obtidos no capítulo anterior, construiu-se o segundo modelo, ajustando os parâmetros do coeficiente de expansão térmica e temperatura, calibrando-o de acordo com os resultados experimentais de retração química. Por fim, um terceiro modelo foi elaborado para aplicar a retração ao componente cimentício,

utilizando os valores experimentais calibrados no segundo modelo, buscando o efeito da protensão química.

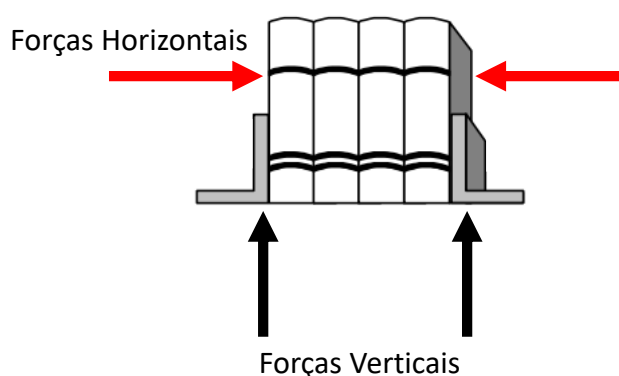
No capítulo oito, realizaram-se a moldagem dos corpos de prova e os ensaios no estado endurecido. No capítulo nove, são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais e os numéricos, além das simulações considerando diferentes cenários de protensão química.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Protensão

O conceito de protensão pode ser definido como sendo: a instalação de um estado prévio de tensões, seja em um material ou em uma estrutura (Veríssimo; Lenz, 1998). Esse conceito é genérico e pode ser aplicado em diversas ocasiões, como por exemplo, a movimentação de um conjunto de livros de uma prateleira para outra. Os livros por estarem soltos e não terem nenhuma conexão uns com os outros, necessitam de forças horizontais de maneira que, essas forças comprimam os livros uns contra os outros, gerando um atrito e ao mesmo tempo forças verticais nas extremidades para então ser capaz de superar o peso próprio do conjunto de livros durante o deslocamento, esse exemplo é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 Ilustração das forças atuantes quando se comprime um livro contra o outro.

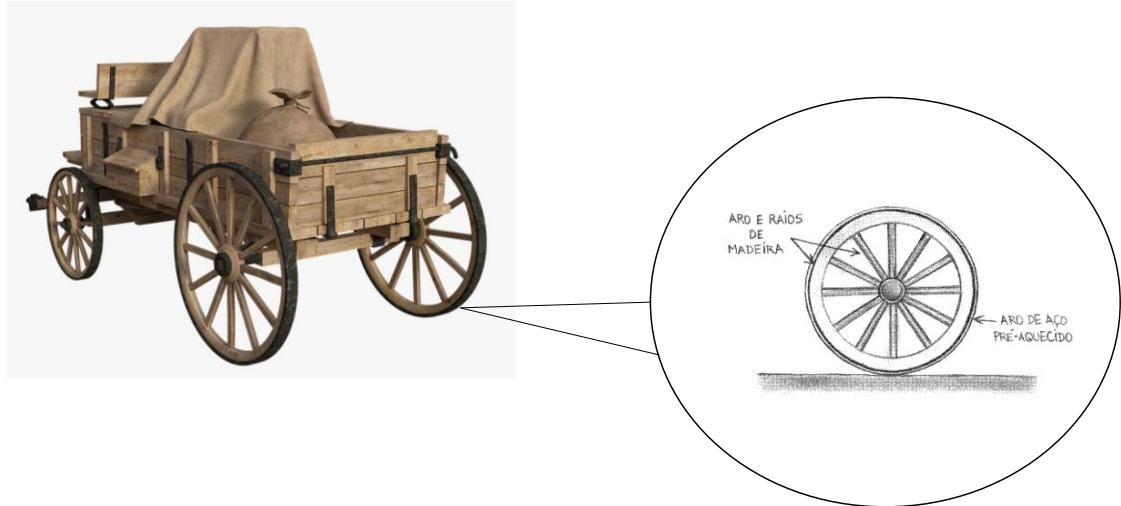


Fonte: adaptado de Veríssimo; Lenz (1998).

Um exemplo clássico, porém com aplicação limitada nos processos de produção atuais, são as rodas de carroça produzidas no século XVIII (Figura 3). Nesse caso, a protensão é alcançada por meio do seguinte procedimento: o aro externo feito de aço é submetido a um aquecimento controlado, resultando na expansão de seu diâmetro devido à dilatação térmica do material. Em seguida, o aro é colocado ao redor do aro de madeira pré-moldada. Durante o resfriamento do aço, ocorre a tendência de retorno do aro à sua configuração original. No entanto, o aro de madeira restringe

esse comportamento, impondo ao sistema como um todo tensões que conferem rigidez ao conjunto.

Figura 3 Ilustração de uma roda de carroça.



Fonte: adaptado de HANAL (2005).

Devido essa capacidade de melhorar o comportamento da estrutura por consequência da instalação de um estado prévio de tensões, iniciaram-se então no final do século XVIII algumas tentativas em pré-tensionar as estruturas de concreto (Bastos, 2021).

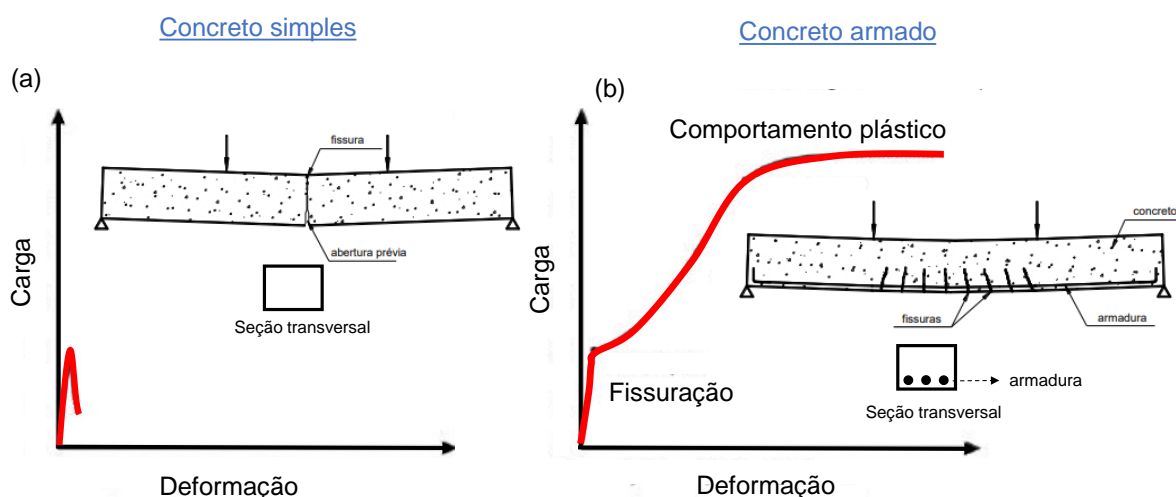
4.1.1 Protensão em elementos de concreto armado

Em volume consumido, o concreto é um dos materiais de construção civil mais utilizado ao redor do mundo devido à sua facilidade de produção com as matérias primas disponíveis da região e seu baixo custo (Rebmann, 2016; Steven.H Kosmatka; Wilson, 2011). Outras questões como por exemplo: durabilidade e alta resistência a compressão favorecem ainda mais a aplicação desse tipo de material. No entanto, a resistência à tração do concreto é consideravelmente inferior, representando aproximadamente 10% de sua resistência à compressão, conforme indicado em estudos de Guo, (2014) e Metha; Monteiro (2014). Essa limitação restringe sua aplicação em elementos sujeitos total ou parcialmente à tração, como tirantes, vigas, lajes, entre outros.

Por conta desse fator, em meados do século XVIII iniciou-se a introdução de aço em peças de concreto pelo francês Monier (Rodrigues, 2019; Veríssimo; Lenz, 1998). No entanto, as construções eram desenvolvidas de maneira empírica. Somente em 1877, o americano Hyatt, após realizar diversos estudos com aço e concreto, passou a dimensionar as estruturas considerando especialmente a região tracionada. O posicionamento adequado da armadura em elementos de concreto melhorou significativamente a estabilidade e as condições de serviço das estruturas de concreto. Segundo Bastos (2021) uma das primeiras tentativas de protensão ocorreu em 1888 na Alemanha, por Doebling, para a construção de lajes de concreto com fios de aço. No entanto, essas tentativas não alcançaram o desempenho adequado devido as perdas de protensão e à baixa resistência dos aços disponíveis na época, sendo esses os principais obstáculos. A técnica só obteve sucesso durante o século XX, especificamente durante a Segunda Guerra Mundial, através do francês Eugène Freyssinet. Freyssinet foi o primeiro a compreender a importância das perdas de força de protensão e propôs formas de compensá-las.

Na Figura 4, é apresentado um exemplo ilustrativo do comportamento de duas vigas biapoiadas submetidas à flexão. É evidente que a viga de concreto simples, sem armadura, demonstra um comportamento de ruptura frágil, com menor resistência aos esforços de tração. Em contraste, no caso do concreto armado, essa característica é distinta, uma vez que os esforços internos de tração são absorvidos pela armadura, resultando em um aumento da capacidade de carga modificando o comportamento sob tensão da viga, permitindo maiores deformações antes da ruptura.

Figura 4 Em (a) concreto simples e em (b) concreto armado.



Fonte: Autor.

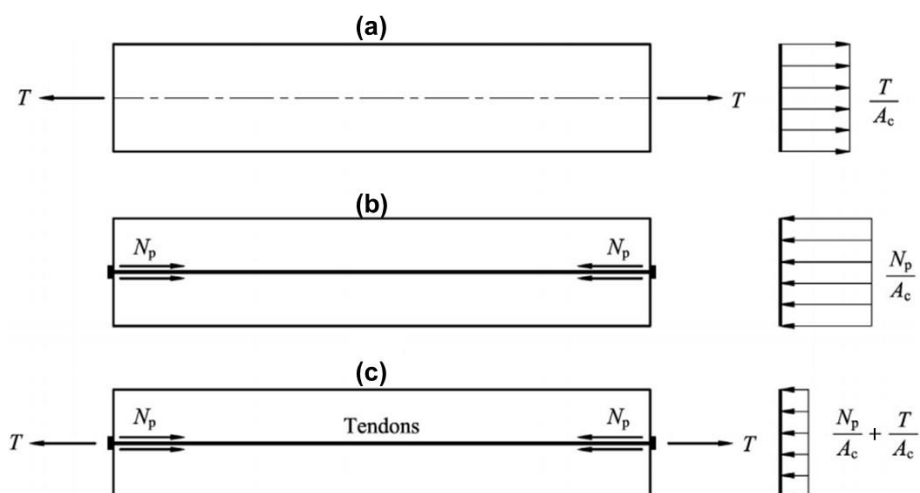
Apesar do aumento considerável das cargas, elementos de concreto armado submetidos a esforços de flexão e outros tipos de solicitações podem apresentar a formação de fissuras devido a diversos fatores, incluindo a capacidade limitada do material em resistir às tensões. Por exemplo, quando as tensões de tração excedem o limite de resistência do material, as fissuras começam a se desenvolver como mecanismo de alívio dessas tensões excessivas (Guo, 2014). A manifestação das fissuras pode acarretar problemas para estruturas de concreto armado, principalmente no tocante à durabilidade. A corrosão por carbonatação é o fenômeno mais comumente observado nas estruturas de concreto (Neville; Cremonini, 2015). Nesse processo, a água penetra nos poros do concreto por meio de fissuras, saturando-os. O cálcio (Ca) presente no concreto é dissolvido, formando hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). O dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera penetra nas fissuras e reage com a água, formando ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido carbônico, por sua vez, reage com o hidróxido de cálcio, resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse processo reduz o teor de cálcio disponível, diminui o pH do concreto e expõe o aço à corrosão.

Devido a esses fatores, construções como tanques de armazenamento de óleo, contenções para energia nuclear e ambientes com concentrações elevadas de sulfatos e cloretos demandam componentes com baixa suscetibilidade à fissuração. Contudo, em situações em que as fissuras são permitidas, é realizado um controle rigoroso das dimensões dessas fissuras. De acordo com Hu (2022), os valores de largura máxima admissíveis no projeto, especificamente relacionados à fissuração, situam-se entre 0,3 e 0,4 mm. Essa fissuração pode resultar em tensões de tração nas armaduras, variando entre 250 e 400 MPa. Além disso, o mesmo autor destaca que a utilização do concreto armado em construções de grandes vãos demandaria um substancial aumento nas dimensões da seção das armaduras, bem como um incremento na quantidade destas, resultando em um aumento significativo no peso próprio da estrutura e nos custos totais da construção.

De maneira a mitigar esses problemas e ampliar cada vez mais a utilização das estruturas de concreto, surgiu a ideia de protender a armadura. Se a protensão introduzida no concreto for maior que a tensão advinda de esforços externos, a tensão

de tração no elemento será nula. Dois exemplos são apresentados a seguir. O primeiro é ilustrado na Figura 5, supondo-se que um elemento de concreto armado está submetido a tensões axiais (Figura 5a). Onde T tração externa aplicada ao elemento de concreto e A_c é a área da seção transversal do concreto. Como visto anteriormente, se as tensões de tração ultrapassarem a capacidade de resistência à tração do elemento, ocorrerão fissuras. Uma abordagem para lidar com essa situação é substituir a armadura por cordoalhas de aço de alta resistência, as quais são protegidas por tubos de plástico para evitar corrosão. Essas cordoalhas são esticadas usando equipamentos externos e ancoradas nas extremidades após o procedimento. Durante o tensionamento e ancoragem das cordoalhas, altas tensões de compressão são aplicadas no concreto, como ilustrado no diagrama apresentado na Figura 5(b), onde N_p é a compressão no concreto por meio das tensões das cordoalhas. Ao observar as tensões normais do concreto quando protendido e sob ações axiais externas, pode-se definir através da equação (1). Onde σ_c é a tensão normal do concreto, $\sigma_{c,p}$ é a tensão no concreto causado pela aplicação da tração nas cordoalhas, $\sigma_{c,T}$ é a tensão de tração advinda do esforço externo.

Figura 5 Diagrama da distribuição de tensões de origem axial, obtidas por meio das cordoalhas tensionadas. Em (a) tensões de tração sendo aplicadas externamente. Em (b) são posicionadas cordoalhas de aço que são previamente esticadas e ancoradas nos extremos, gerando tensões de compressão, sinal positivo T traciona e sinal negativo de N_p representa compressão. E em (c) são ilustradas as tensões externas e as tensões de protensão geradas pelo tracionamento das cordoalhas.



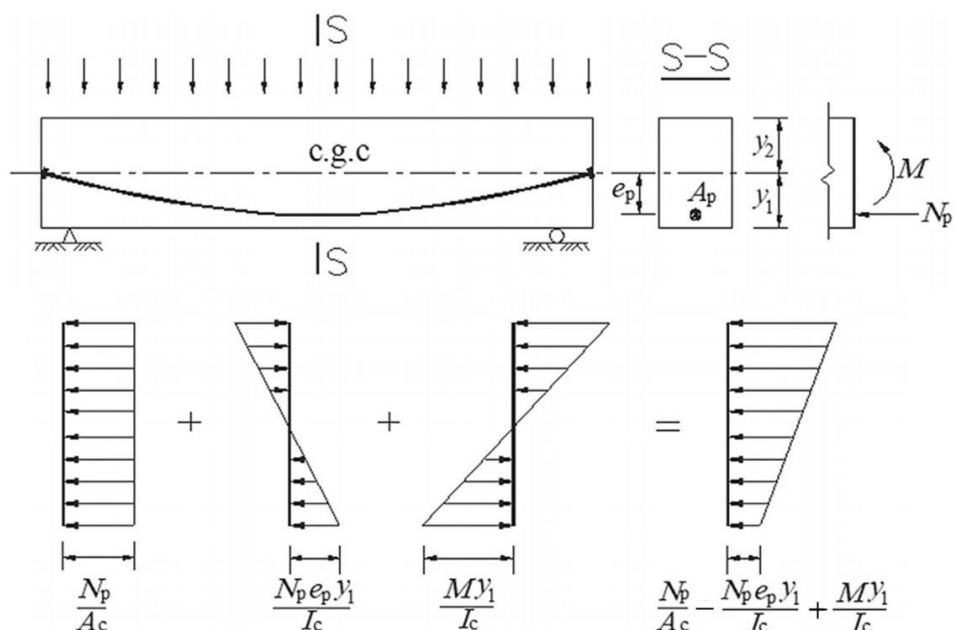
Fonte: adaptado de Hu (2022).

$$\sigma_c = \sigma_{c,p} + \sigma_{c,T} = \frac{N_p}{A_c} + \frac{T}{A_c} \quad (1)$$

O segundo exemplo (Figura 6) aborda uma viga sob carregamento, considere por exemplo, uma viga bi apoiada, sob um carregamento distribuído. Nas vigas são dispostas cordoalhas as quais são tracionadas e ancoradas na viga. Nesse caso, ao observar a seção transversal, identificada como S-S, é possível notar um momento fletor positivo (M) juntamente com uma tensão de compressão no concreto por meio das tensões geradas pelas cordoalhas. De acordo com Hu (2022) o comportamento das tensões normais na parte inferior da viga de concreto, localizada no ponto central, onde o momento fletor é máximo, é possível ser descrita por meio da equação (2) Onde σ_{cM} é a tensão de tração no concreto na fibras inferiores localizadas no meio vão causadas pelo carregamento distribuído, e_p é a excentricidade das cordoalhas com relação ao centro de gravidade, (identificado como c.g.c), I_c é o momento de inércia da seção transversal do concreto e Y_1 é a distância do centro de gravidade da seção transversal do elemento até a parte inferior da viga e Y_2 é a distância do centro de gravidade da seção transversal do elemento até a parte superior e A_p é a área de protensão.

Assim, pode-se concluir que as tensões de compressão geradas pelas cordoalhas alteram o comportamento das tensões na seção, podendo eliminar totalmente ou parcialmente as tensões de tração na viga. No entanto, é importante considerar efeitos secundários, como a perda de protensão, fluência e cargas acidentais, que também devem ser avaliados (Bastos, 2021; Guo, 2014).

Figura 6 Distribuição das tensões em uma simplesmente apoiada. Com corte da seção transversal localizada no meio vão da viga.



Fonte: adaptado de Hu (2022).

$$\sigma_c = \sigma_{c,p} + \sigma_{cM} = \frac{N_p}{A_c} - \frac{N_p e_p y_1}{I_c} + \frac{M y_1}{I_c} \quad (2)$$

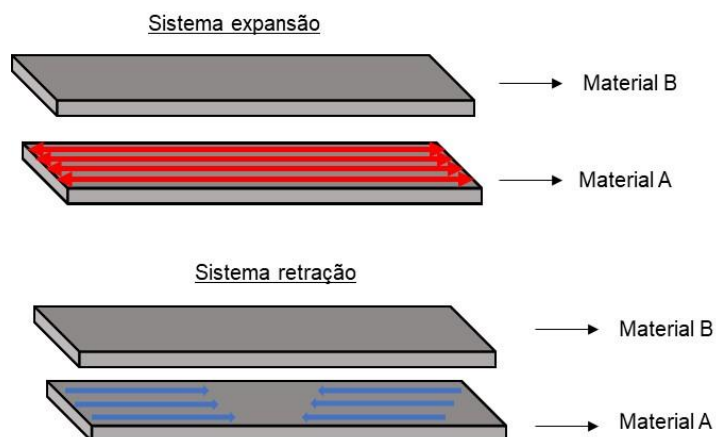
A ideia da protensão se difundiu e com o passar dos anos foram criados sistemas de protensão diferentes, os mais comuns são a protensão com aderência inicial e a protensão com aderência posterior (Rodrigues, 2019). O objetivo desse trabalho não será discutir essas duas metodologias, apenas citá-las, focando especialmente na protensão química e nos mecanismos de ação, foco principal desse trabalho.

4.2 Protensão química

A protensão química é pouco difundida quando comparada a protensão realizadas nas estruturas de concreto, que utilizam ferramentas mecânicas para instalar um estado prévio de tensões nas cordoalhas de aço. Diferente desta, a protensão química quando relacionada as tensões de expansão, pode se dividir na classe dos cimentos a base de sulfoaluminatos de cálcio hidratado (etringita) e na classe dos aditivos denominados redutores de retração e/ou aditivos expansivos (Wyrzykowski; Terrasi;

Lura, 2018), exercendo tensões de tração durante o endurecimento. Quando se utilizam materiais ou aditivos para promover retração, conduzindo a compressão em determinadas regiões, como é o caso apresentado por GIORDANO (2011), que aplicou finas camadas de silicato de sódio nas superfícies de fibrocimento. Um exemplo ilustrativo do mecanismo da protensão química é apresentado na Figura 7.

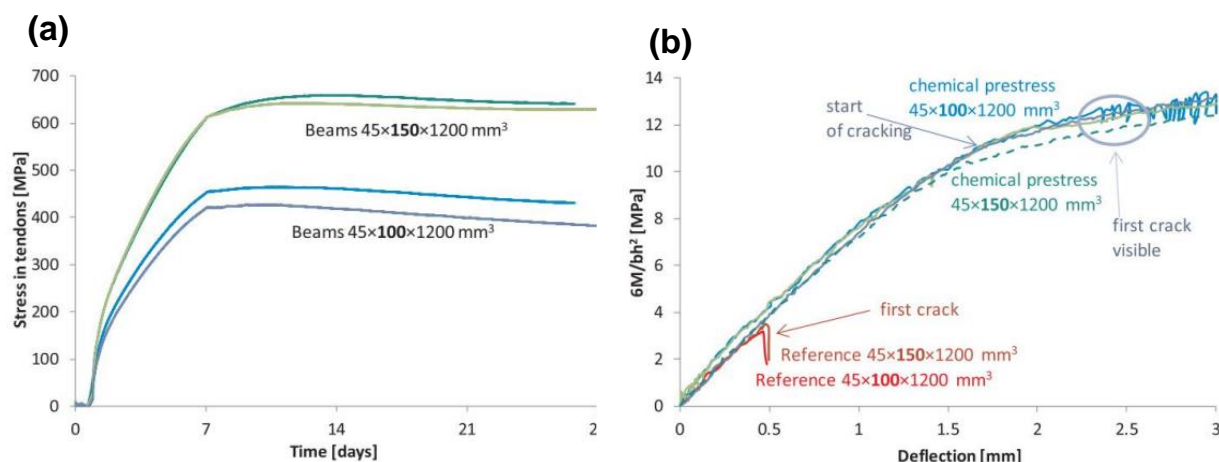
Figura 7 Ilustração do mecanismo da protensão química.



Fonte: Autor.

Apesar de poucos trabalhos encontrados na literatura, a protensão química foi uma ideia que surgiu na década de 60 (Benuska; Bertero; Polivka, 1971; Lin; Klein, 1963). Um trabalho realizado no Empa (Instituto Federal Suíço) (Wyrzykowski; Terrasi; Lura, 2020) explorou essa proposta, porém utilizando aditivos com altas capacidade de expansão. Durante a transição do estado fresco para o endurecido, o material cimentício, um UHPC (concreto de ultra alto desempenho), expande, gerando tensões de tração nos cabos e, conseqüentemente, tensões de compressão no concreto. No decorrer da pesquisa, foram moldadas vigas com diferentes seções transversais e diferentes concentrações do aditivo expansivo. A Figura 8 (a) ilustra o aumento das tensões nas cordoalhas ao longo do tempo devido ao uso do aditivo expansivo. A quantificação das tensões nas cordoalhas foi realizada utilizando um *strain gauge*, fixado na superfície das cordoalhas. De acordo com os autores também foi possível estimar a compressão exercida no concreto, conhecendo a força de protensão nos cabos e excluindo a área das cordoalhas, foi possível chegar em valores máximos de 4,5 MPa, valores próximos às protensões aplicadas convencionalmente.

Figura 8 Em (a) evolução das tensões de tração geradas pela expansão do material cimentício. Em (b) curvas de tensões-deflexões do ensaio de flexão quatro pontos.



Fonte:(Wyrzykowski; Terrasi; Lura, 2020).

Foram apresentados também os resultados do ensaio de flexão 4 pontos para medir a resistência à fissuração das vigas (Figura 8 (b)), fica muito claro que as viga protendidas quimicamente obtiveram resistência a fissuração e valores de deflexão cerca de três vezes mais que as vigas de referência.

Um outro trabalho que aborda o conceito de protensão química, é o Giordano (2011). Em sua Dissertação de Mestrado, utilizou o silicato de sódio entre as camadas de fibrocimento com o objetivo de controlar o aparecimento de fissuras aplicando o conceito da protensão química. A ideia foi aplicar entre as camadas de fibrocimento um material que pudesse provocar uma retração próxima à borda, e consequentemente comprimi-la, reduzindo o surgimento das fissuras.

Giordano (2011) aplicou diferentes quantidades de silicato de sódio entre as camadas de fibrocimento e avaliou o comportamento químico e mecânico. Os resultados químicos indicaram intensa interação entre o silicato e o ligante Portland e, praticamente dobrou o aumento da tensão para o surgimento da primeira fissura. No entanto, o autor conclui que a protensão química aplicada ao fibrocimento dependerá de fatores como a composição química do ligante, a quantidade e o tipo de silicato aplicado por unidade de área. Embora as interações do silicato de sódio com os materiais apresentados tenham obedecido a um determinado comportamento, essas condições não garantem os mesmos desempenhos quando aplicados por outro

método. Por essa razão, a utilização de outras ferramentas tecnológicas, como a simulação computacional, pode aperfeiçoar a aplicação.

Ambos os conceitos comentados referentes à protensão estão coerentes, as divergências entre os conceitos estão basicamente atreladas ao sentido de aplicação da tensão e dos seus efeitos posteriores. É importante deixar claro que será dada maior ênfase à protensão química relacionada as tensões de retração, devido ao objetivo proposto dessa Dissertação de Mestrado.

4.2.1 Retração

De uma forma geral, os materiais cimentícios possuem uma característica intrínseca que é conhecida como retração (Nunes Lúcio; Figueiredo, 2007; Tran, N. P. *et al.*, 2021). Na literatura, essa retração é descrita como uma variação volumétrica que ocorre ao longo do tempo, característica específica nos materiais cimentícios (Melo Neto, 2007; Zhao *et al.*, 2019).

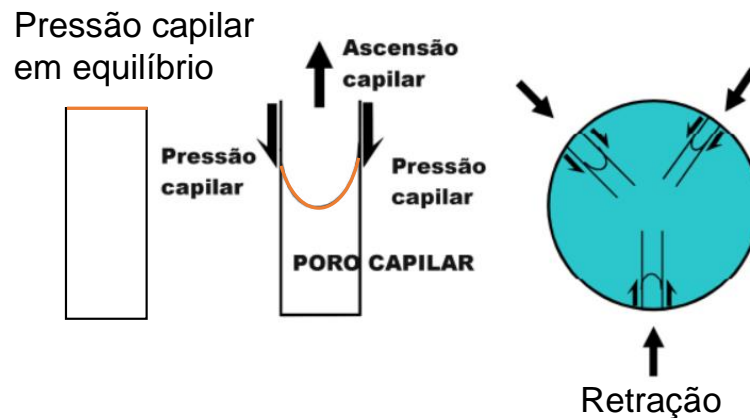
A comunidade científica frente a esse tema procurou entender os principais mecanismos que envolvem essas alterações volumétricas. Segundo Folliard (2003) foi possível definir os três principais mecanismos que atuam na microestrutura dos materiais cimentícios, sendo eles: tensão superficial, tensão capilar e pressão de desligamento.

A tensão superficial é o principal fenômeno da variação dimensional, podendo ser definida por uma força resultante do desequilíbrio das ligações intermoleculares na interface sólido-líquido ou líquido - líquido que atuam na superfície dos materiais, resultante de cargas não neutralizadas encontradas na interface. O conceito se aplica basicamente quando há uma remoção da água adsorvida, sucedendo uma tensão superficial que resulta na retração (Tran, N. P. *et al.*, 2021).

Tensão capilar é considerado um mecanismo importante que relaciona a perda de água em meio poroso. A perda de umidade na pasta de cimento provoca a formação de um raio de curvatura dos meniscos água-ar nos poros capilares devido ao rompimento do equilíbrio entre o vapor e a pressão saturada conforme ilustrado na

Figura 9. Segundo Nunes Lúcio; Figueiredo (2007), quanto menor o raio de curvatura do menisco formado, maior é a pressão capilar e conseqüentemente maior será a retração.

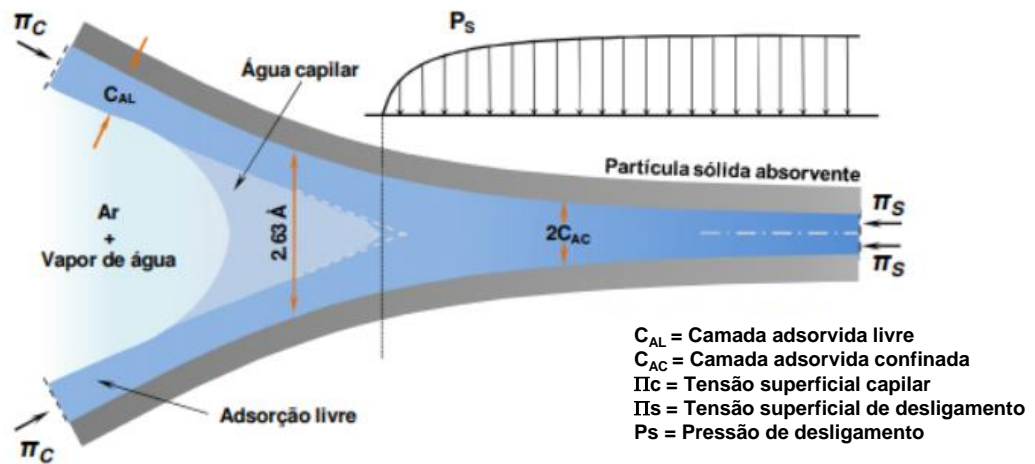
Figura 9 Gerações de tensões hidrostáticas nos meniscos capilares dos materiais cimentícios.



Fonte: adaptado de Nunes Lúcio; Figueiredo (2007).

Por fim, como discutido anteriormente, a pressão de desligamento pode levar à perda de água, resultando na formação de um menisco no poro capilar. Da mesma forma, é possível admitir que no mesmo poro existam superfícies sólidas tão próximas quanto no menisco. Esse conceito é detalhadamente ilustrado na Figura 9. Portanto, se a medida de água adsorvida aumenta, a pressão de desligamento aumenta, dá mesma forma ao contrário, se a redução da água adsorvida é reduzida, a pressão de desligamento diminui aumentando a retração. Melo Neto (2007) atribui esse comportamento as atrações de Van der Waals, segundo o autor, as partículas de C-S-H são atraídas por forças de atração e repulsão causando esse efeito.

Figura 10 Diagrama do comportamento de um poro capilar de uma pasta de cimento.

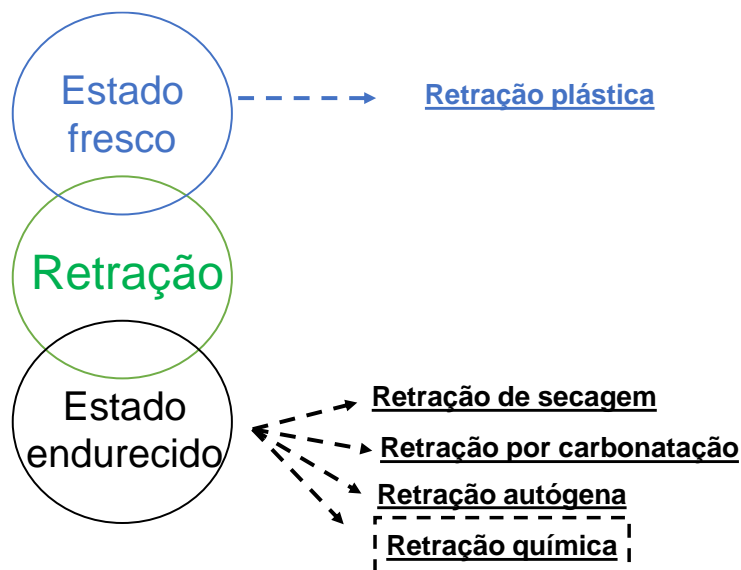


Fonte: adaptado de Melo Neto (2007).

Após a definição dos principais mecanismos que atuam na retração dos materiais cimentícios, classificou-se as retrações de acordo com as bibliografias consultadas.

É possível definir a retração nos materiais cimentícios em dois momentos, no estado fresco e no estado endurecido (Figura 11). No estado fresco, definiu-se retração plástica e no estado endurecido foram quatro, retração de secagem, retração por carbonatação e retração autógena juntamente com a retração química, as mesmas serão detalhas a seguir dando maior enfoque a retração química (Lura, 2003; Melo Neto, 2007; Nunes Lúcio; Figueiredo, 2007).

Figura 11 Mapeamento das retrações no estado fresco e endurecido de sistemas cimentícios.



Fonte: Autor.

- Retração plástica:

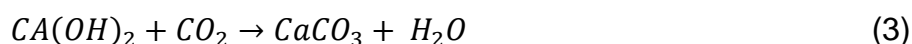
A retração plástica é um termo muito utilizado quando água de amassamento é evaporada rapidamente para o ambiente externo, buscando estabelecer o equilíbrio higroscópico com a umidade relativa (UR) do ambiente externo ou quando há sucção da água para o substrato e fôrmas (Nunes Lúcio; Figueiredo, 2007). No caso da perda para o ambiente, isso ocorre com muita frequência em peças cuja relação área volume tendem a ser muito grande, como por exemplo pavimentos e lajes de concretos. A remoção da água de amassamento gera uma série complexa de meniscos capilares que criam pressões capilares negativas provocando uma retração volumétrica na pasta de cimento (Snoeck *et al.*, 2020).

- Retração de secagem:

A retração de secagem ocorre no estado endurecido e se parece muito com a retração plástica em razão da perda de água para o ambiente externo. Alguns autores relatam que o grau de intensidade da retração por secagem pode depender de fatores como por exemplo: regime de cura, distribuição do tamanho dos poros, comportamento termodinâmico do teor de água nos poros, bem como a morfologia dos sólidos hidratados na microestrutura (Tran, N. P. *et al.*, 2021).

- Retração por carbonatação:

A retração por carbonatação ocorre principalmente devido as reações de hidratação dos materiais cimentícios, que geram compostos hidratados, sendo o principal deles, o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$. Quando esse hidróxido de cálcio em umidade entra em contato com CO_2 , é gerado carbonato de cálcio relativamente solúvel dentro dos poros gerando a retração, abaixo é apresentado a equação (3) que descreve o fenômeno.



De acordo com Kovler; Zhutovsky, (2006) a questão da retração por carbonatação ainda não está completamente esclarecida, uma vez que a formação do carbonato de cálcio pode resultar em aumento de volume. No entanto, acredita-se que a profundidade da carbonatação pode variar de milímetros a centímetros, dependendo dos materiais cimentícios e das condições ambientais. Portanto, a retração por

carbonatação deve ser cuidadosamente analisada e considerada principalmente em relação às superfícies.

- Retração autógena:

De acordo com Jensen; Hansen (2001) a retração autógena pode ser definida como sendo a variação volumétrica de materiais cimentícios em um sistema fechado, ou seja, sem mudança de temperatura e umidade. A causa ocorre devido à auto-secagem, parte da água que foi misturada inicialmente com o cimento anidro fica retida nos poros capilares, essa água é consumida em razão das reações de hidratação do cimento Portland formando meniscos capilares cuja tensão superficial induz a retração da pasta (Lura, 2003).

É interessante observar que algumas pesquisas indicam um efeito crítico da retração autógena em concretos de ultra alto desempenho (UHPC), onde uma maior quantidade de cimento e uma baixa relação água/cimento resultam em maior auto-dessecação no sistema. Em outros tipos de concreto, como os utilizados em impressão 3D (com baixa relação água/cimento <0,4), a umidade interna não é suficiente para hidratar completamente as partículas de cimento, o que favorece a ocorrência da retração autógena. Geralmente, as maiores mudanças volumétricas ocorrem nas primeiras 24 horas após a adição de água à mistura, período em que a matriz é mais propensa a fissuras devido à baixa capacidade do concreto de resistir às tensões de tração.

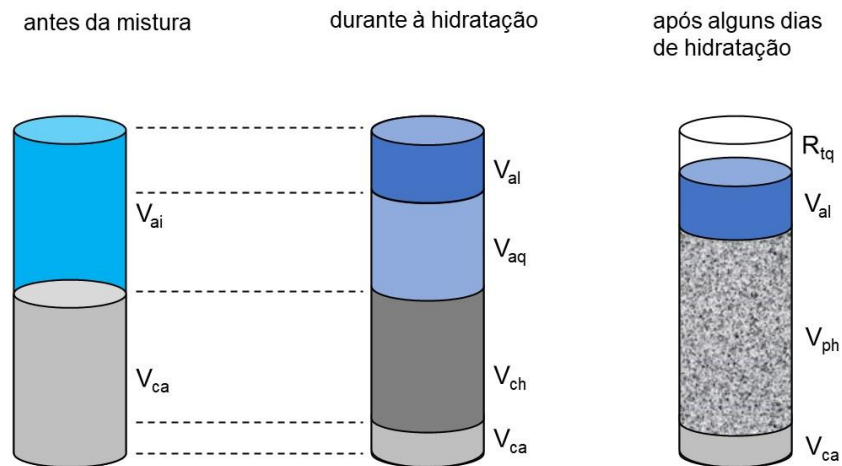
- Retração química:

O conceito de retração química em materiais cimentícios refere-se, essencialmente, a uma alteração volumétrica durante a formação dos produtos de hidratação do cimento Portland. Em outras palavras, o volume dos hidratados formados será menor que o volume inicial dos materiais anidros (antes da hidratação). Um exemplo desse fenômeno é ilustrado na Figura 12.

Onde, V_{ai} é o volume de água inicial e, V_{ca} é o volume de cimento anidro. Durante a hidratação, parte da água inicial se mistura com o cimento anidro e forma um volume de cimento hidratado (V_{ch}), parte do volume do cimento continua anidro (V_{ca}) em um processo de dissolução e precipitação, parte do volume da água fica quimicamente combinada e a outra parte do volume de água fica livre (V_{al}), após alguns dias de

hidratação, parte do volumes de água combinada e dos volumes de cimento hidratado se converteram para formação de um volume de produtos hidratados (V_{ph}) que são formados por produtos em sua maioria, menores volumetricamente, resultando na retração química (R_{tq}).

Figura 12 Ilustração da variação volumétrica causada pela retração química



Fonte: Autor.

Le Chatelier foi um dos primeiros pesquisadores a publicar esse tipo de fenômeno, em 1900, após medir a redução do volume de pastas cimentícias por meio de um sistemas de dilatometria simples, o autor concluiu que a retração química poderia chegar a 4,6% da massa do cimento anidro (Chatelier, 1900). Após esses resultados, diversos autores pesquisaram sobre o tema e chegaram à conclusão que, o grau de hidratação das pastas de cimento está diretamente relacionado com a retração química, logo, fatores que afetam a o grau de hidratação como por exemplo, área superficial específica do cimento, relação água/ligante, adições minerais e aditivos químicos podem influenciar diretamente nesse fenômeno (Folliard, 2003; Jensen; Hansen, 2001; Mac *et al.*, 2021; Melo Neto, 2002).

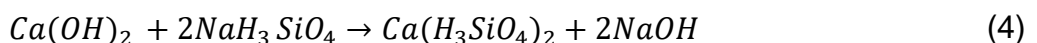
4.3 Silicato de sódio associado aos materiais cimentícios

O silicato de sódio é um composto químico que contém óxido de sódio (Na_2O) e dióxido de silício (SiO_2). É comumente chamado na construção civil de vidro líquido,

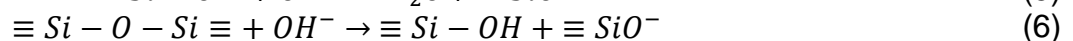
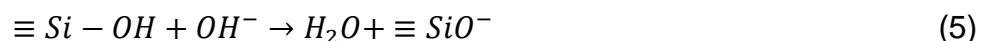
devido às suas propriedades químicas após a aplicação. Thompson *et al.* (1997) explica que quando aplicado com o objetivo de selar superfícies porosas de materiais cimentícios, cria-se uma reação entre o silicato de sódio e o hidróxido de cálcio formando compostos de silicato de cálcio hidratado tornando o sistema cimentício menos poroso.

Outras aplicações utilizando o silicato de sódio são observadas na literatura, John (1995) por exemplo, estudou em sua tese de Doutorado a ativação de cimento de escória por meio do silicato de sódio. Nesse caso, o silicato de sódio foi responsável por aumentar o pH da solução (ataque de íons OH⁻) permitindo a dissolução e precipitação dos compostos hidratados, que são majoritariamente silicato de cálcio hidratado. Sendo assim, o autor concluiu que foi possível desenvolver cimentos de escória ativados com silicato de sódio atingindo resistência a compressão de até 100 MPa e com calor de hidratação muito próximo à dos cimentos Portland.

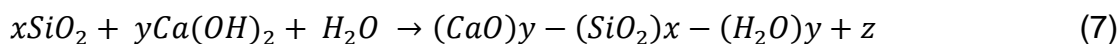
O comportamento das pastas cimentícias formuladas com cimento Portland e o silicato de sódio dependerá basicamente da relação SiO₂/Na₂O, citada na literatura como módulo de sílica (MS). De acordo com Brykov; Danilov; Larichkov (2006) quanto menor for o MS mais rápido as reações acontecem, o pH da solução aumenta (chegando a valores entre 12,7) devido a dissolução dos íons Ca²⁺ com os silicatos disponíveis, formando Hidróxido de sódio (NaOH) e Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) durante o processo de hidratação do cimento Portland equação (4).



Por outro lado, quanto maior for o módulo de sílica, o silicato se torna menos solúvel (Vail, 1952), o pH da suspensão pode variar em valores próximos de uma suspensão cimentícia sem silicato de sódio, entre 12 e 12,3. Dessa forma, os íons OH⁻ do cimento Portland dissolvem e interagem com os elementos disponíveis do silicato limitando o aumento rápido do pH equações (5) e (6), conforme indicado por Santana-Carrillo *et al.* (2021).



Porém, após um determinado tempo de reação, as espécies iônicas disponíveis do silicato de sódio se esgotam e os produtos de hidratação do cimento Portland continuam a dissolver liberando OH⁻. Sendo assim, o pH aumenta e os silicatos de cálcio se precipitarão de acordo com as equações (4) e (7).



4.3.1 Tempo de pega

Conforme visto anteriormente, a cinética de reação das pastas cimentícias com o silicato de sódio, dependerá do MS. Um estudo conduzido por Witzleben (2020) avaliou diferentes tipos de silicato, incluindo os de sódio, lítio e potássio. Especificamente, no caso do silicato de sódio, os autores investigaram dois MS, sendo 2,1 e 3,3, em uma concentração total em relação ao cimento Portland de 1%. Apesar da baixa adição em relação ao cimento Portland, observou-se que quanto maior o MS, menor foi o impacto na cinética de reação. No entanto, quando o MS foi menor, houve uma redução no período de indução e até mesmo um ganho de rigidez inicial.

Em outra parte do estudo, os autores aumentaram os teores para 2% e 10%. Nestes casos, independentemente dos MS avaliados, houve uma redução considerável no tempo de pega, resultando em uma aceleração das reações. Segundo os autores, o aumento da quantidade de silicato de sódio pode promover a reação do Ca^+ e levar à formação de outros compostos, como o NaOH.

4.3.2 Resistência mecânica

Da mesma maneira que o tempo de pega é influenciado pelo MS, a resistência mecânica de pastas de cimento com silicato de sódio também. Em um estudo bem amplo os autores Santana-Carrillo *et al.* (2021) avaliaram cerca de 16 pastas com diferentes MS. Segundo o estudo, quanto maior foi o MS, valores entre 3,2, maiores foram a resistência a compressão aos 180 dias. De maneira contrária, foi observado que quanto menor foi o MS, com relação 1, menores foram as resistências.

Esse comportamento pode ser explicado com relação à solubilidade do silicato, quanto maior o MS, menos solúvel a suspensão de silicato será, o que permitiria que as reações do cimento Portland não alterassem de maneira tão intensa. Em idades

de cura posteriores, o alto teor de sílica favorece na formação de outros hidratos, como por exemplo C-S-H que aumentam a resistência final. O oposto também pode ser explicado dessa maneira, os baixos valores de MS possuem uma alta solubilidade, interagindo intensamente com as fases do cimento Portland, essa rápida interação, reduz o tempo de pega e cria uma microestrutura precocemente, que não favorece o desenvolvimento da resistência.

4.4 **Simulação computacional**

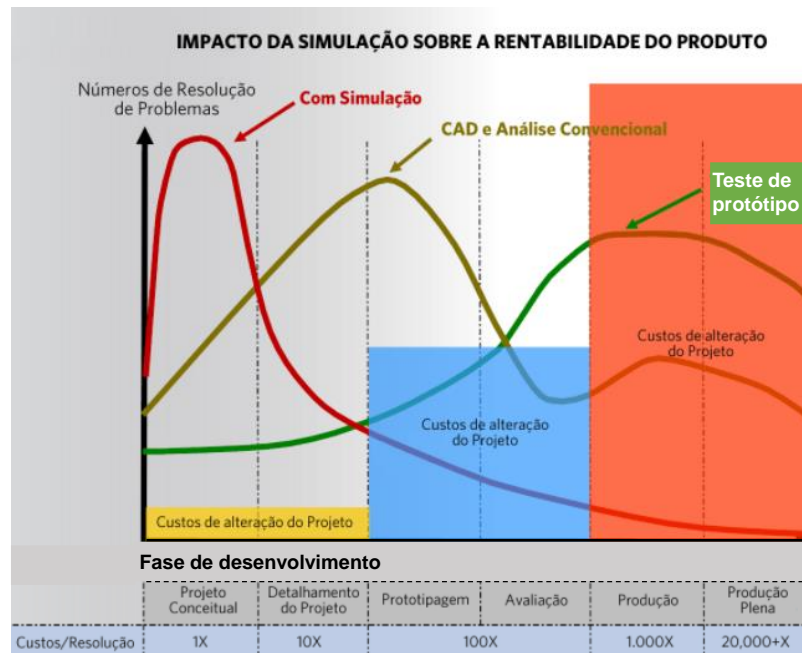
De maneira geral, o processo de simulação pode ser definido como método para representar a realidade em diversas áreas do conhecimento Banks (1998). Com os avanços tecnológicos, o computador se tornou uma ferramenta importante para esse processo, principalmente para à análise de sistemas complexos que se tornam inviáveis para serem resolvidos analiticamente.

Com a inserção do computador para realização das simulações, o processo se tornou mais robusto, permitindo analisar um número maior de variáveis prevendo o comportamento de sistemas complexos, avaliando diferentes cenários de maneira rápida quando comparado ao sistema real.

Segundo de Paula Ferreira; Armellini; De Santa-Eulalia (2020) a utilização da simulação computacional se faz necessário quando, os custos para o desenvolvimento do experimento prático tendem a ter um custo elevado, além de evitar alterações no produto durante a fase de produção, que normalmente tornam o processo 1.000 à 10.000 vezes mais caras quando realizadas nas fases iniciais de projeto (Figura 13).

Com a simulação computacional é possível reduzir o tempo de lançamento do produto, redução na produção de protótipos e testes experimentais, otimização do produto, detecção de falhas, dentre outras.

Figura 13 Impacto da utilização da simulação durante a fase de desenvolvimento de um produto



Fonte: Aberdeen Group.

As diversas vantagens propiciadas pela simulação computacional serão possíveis se o usuário compreender intrinsecamente os processos de desenvolvimento do produto, interpretando os resultados analiticamente. Com isso, a fim de aprimorar as análises para o desenvolvimento do componente cimentício, será realizada uma simulação computacional, utilizando o método dos elementos finitos (MEF) para representar o efeito da protensão química.

4.4.1 Método dos elementos finitos (MEF) aplicado à sistemas com protensão

O MEF é um método numérico desenvolvido inicialmente no século XX, na década de 40 para solução de problemas relacionados à mecânica dos sólidos, no entanto, com a chegada de novas tecnologias computacionais na década de 60, permitiu que o método aumentasse seu poder de análise e se expandisse até os dias atuais para diversas áreas da Engenharia, Medicina, Odontologia dentre outras áreas do conhecimento (Ellobody; Feng; Young, 2014).

Uma das características fundamentais do MEF é a utilização do conceito de discretização, pois permite entender o comportamento do conjunto, a partir de cada elemento separado. Na Figura 14 é ilustrado esse conceito da seguinte forma: Um corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes, essas partes são chamadas de elementos (triângulos cinzas), os elementos são conectados entre si por meio dos nós (círculos vermelhos).

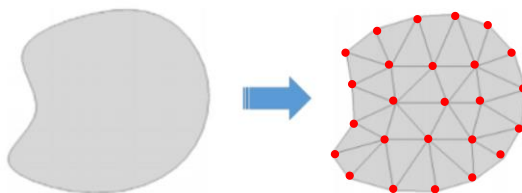


Figura 14 Discretização de um sólido pelo método de elementos finitos

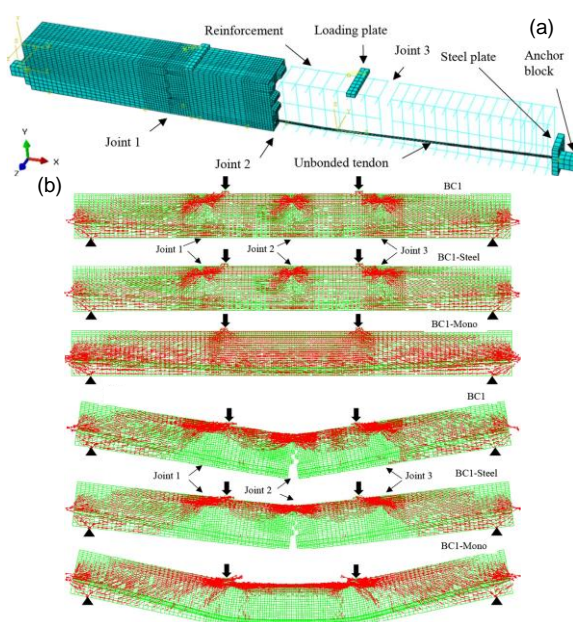
Fonte: Autor.

A interface amigável de diversos programas de elementos finitos permite que o método seja utilizado de maneira intensa no desenvolvimento e na análise de produtos. No entanto, deve-se atentar para as boas práticas sugeridas por diversos autores, muitos deles precursores no desenvolvimento do método (Zienkiewicz. O.C; Taylor. R.L; Zhu. J.Z, 2013).

De maneira geral, para prever o comportamento de sistemas de protensão, existem dois tipos de sistema convencionais de protensão, o pós-tensionamento ou pré-tensionamento das cordoalhas (Fontana, 2011; Hannant; Venkata Siva; Rama Sreekanth, 2018). Essa abordagem considera as diferenças de comportamento mecânico entre o concreto e o aço, além das fissuras que ocorrem em estados de tensões mais elevados antes da resistência final do material. Também são levadas em conta as interações entre o concreto e as cordoalhas de aço nas regiões de ancoragem e transferência de forças de protensão, assim como as perdas de protensão devido à fluência ou relaxação do aço (Abdelaziz; El-Ghazaly; Gomaa, 2021; Vu; Castel; François, 2010). Em literatura foi possível encontrar autores sugerindo determinadas metodologias para cada caso. Para o caso de pós-tensionamento das cordoalhas, a armadura de protensão é tensionada e ancorada nas extremidades da peça após o concreto atingir resistência especificada (Fontana, 2011; Moreira; Sousa; Parente, 2018; Wu; Lu, 2003).

Tran, D. T. *et al.* (2021) propõem um método numérico baseado no MEF para avaliação de viga de concreto protendido para o sistema de pós tensionamento utilizando o software Abaqus. A viga de concreto e o aço protendido foram modeladas em conjunto, a viga de concreto e o sistema de ancoragem foram modelados utilizando suportes fixos e rolantes, com elementos hexaédricos sólidos. Já o aço foi utilizado elementos de treliça. O modelo esquemático do conjunto é apresentado na Figura 15(a).

Figura 15 Em (a) modelo esquemático do sistema de protensão. Em (b) simulação do sistema protendido, setas superiores indicando o carregamento transversal na viga. As setas vermelhas dentro da viga indicam as principais direções de tensão durante o carregamento da viga.



Fonte: (Tran, D. T. *et al.*, 2021).

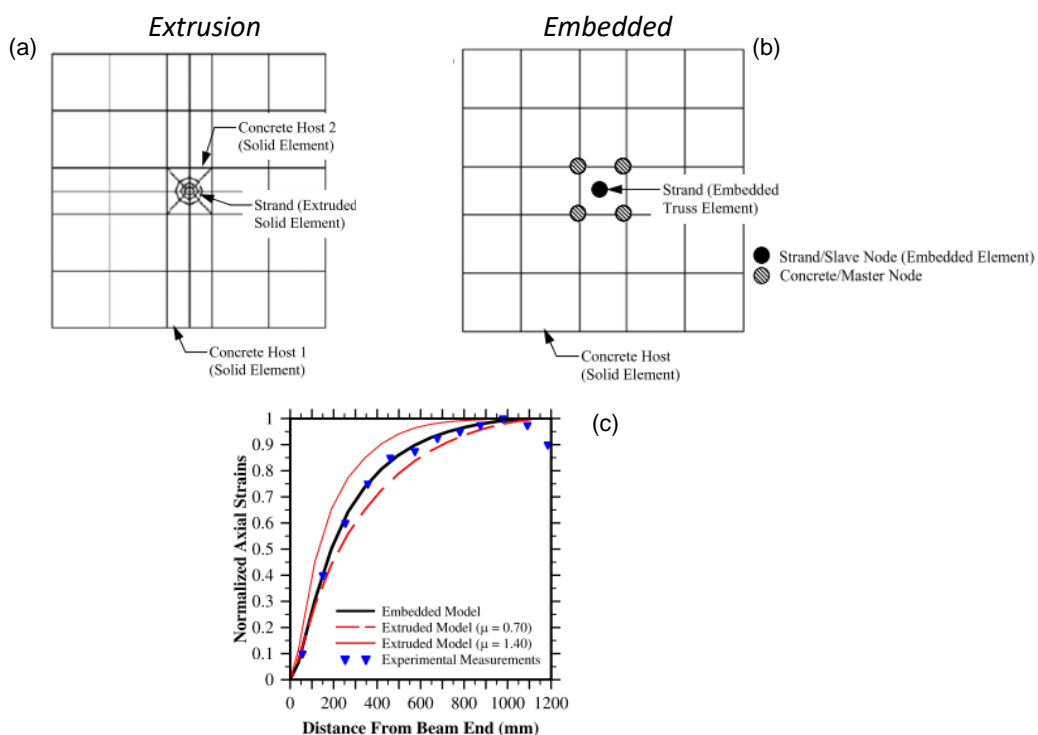
O sistema de protensão foi realizado nas cordoalhas de aço estabelecendo um estado prévio de tensões, utilizando a ferramenta do próprio software, denominada *Predefined Fields*. Na Figura 15(b) é apresentado o modelo construído em simulação, as três figuras na posição superior apresentam o comportamento da viga de concreto protendido antes da fissuração, indicando intensas tensões de compressão. Já as três figuras na região inferior, apresenta o comportamento de fissuração e rompimento da estrutura.

Para o sistema de pré-tensão, o aço é tensionado antes de o concreto iniciar o ganho de resistência (Ayoub; Filippou, 2010). Para esse tipo de técnica, também foi possível encontrar trabalhos que descrevessem esse tipo de abordagem pelo MEF.

Um trabalho publicado pelos autores, Arab; Badie; Manzari (2011) apresentam duas metodologias para avaliar o sistema de pré-tensão, um é chamado de *Extrusion* e o outro de *Embedment*. A técnica de *Extrusion* (Figura 16a), utiliza uma modelagem baseada na interface entre o concreto e as cordoalhas, utilizando formulações de contato. Segundo os autores, essa técnica prevê a otimização da interação do compósito em sistema que envolvam atrito e possíveis deslocamentos entre os sistemas.

Já a técnica de *Embedment* (Figura 16b), segundo os autores, permite que um ou mais elementos sejam adicionados dentro do elemento principal, nesse exemplo o concreto. A vantagem principal é que a técnica de fato não exige formulações de contato, reduzindo significativamente os custos computacionais. A interação entre o concreto e a cordoalha de aço pode ser estabelecida realizando uma espécie de acoplamento nos nós dos elementos.

Figura 16 Em (a) é apresentado a técnica denominada pelos autores de *Extrusion*. Em (b) a técnica de *Embedded*. Em (c) deformação axial em função do comprimento da viga.



Fonte:(Arab; Badie; Manzari, 2011).

Os autores comparam o teste experimental com as técnicas apresentadas (Figura 16c) e concluem que a técnica de *Embedment* apesar de mais simples, foi a que mais

se aproximou dos resultados experimentais. Porém, a técnica de *Extrusion* também apresentou resultados confiáveis com pequenas diferenças em relação aos resultados experimentais, podendo variar de acordo com o fator de atrito utilizado. Um outro comentário realizado pelos autores foi a importância de ajustar com precisão o modelo utilizado pois, a análise de elemento finito é significativamente afetada e governada pela não linearidade do material, além dos coeficientes de atrito, que devem corresponder corretamente ao comportamento de interação entre os componentes.

As abordagens convencionais previamente apresentadas, embora complexas, representam as metodologias predominantes para a previsão da protensão. No entanto, é possível recorrer a recursos computacionais adicionais a fim de simular essa mesma propriedade, utilizando conceitos térmicos de dilatação e contração. A dilatação e a contração são fenômenos termomecânicos pelos quais os materiais sofrem alterações dimensionais em resposta a variações de temperatura. Essas mudanças dimensionais estão sujeitas a influências provenientes das características do material, tais como isotropia, ortotropia e anisotropia. Enquanto materiais isotrópicos exibem expansão ou contração uniforme em todas as direções, materiais ortotrópicos exibem comportamentos distintos em direções específicas. Já materiais anisotrópicos manifestam variações dimensionais distintas em diferentes direções. Dessa forma, a dilatação e a contração constituem fenômenos complexos que requerem uma análise criteriosa das propriedades do material para a previsão precisa das mudanças dimensionais resultantes das variações de temperatura. (Kimura *et al.*, 2021).

Esse tipo de abordagem é utilizada para prever o comportamento de compósitos para aplicações aeroespaciais em altas temperaturas, denominado *braided composite*. Em um trabalho publicado por Zhang; Sun; Gu, (2018) indicam que o mecanismo de envelhecimento termo-oxidativo é uma questão crítica que podem degradar as propriedades desse compósito. Para isso foi realizado um teste experimental para medir a retração da matriz do compósito, que é polimérica e uma análise pelo MEF.

Para avaliar a retração numericamente, os autores consideraram um coeficiente de retração/expansão térmica a partir de dados experimentais e representam o comportamento da deformação na equação (8).

$$\Delta Tsh(t) = \frac{\varepsilon sh(t)}{\alpha m} \quad (8)$$

Sendo $\varepsilon sh(t)$ deformação de retração da matriz em diferentes tempos de envelhecimento, e αm coeficiente de retração/expansão térmica. Apesar de não haver informações mais detalhadas do método numérico utilizado, os resultados apresentados correspondem corretamente com o comportamento experimental.

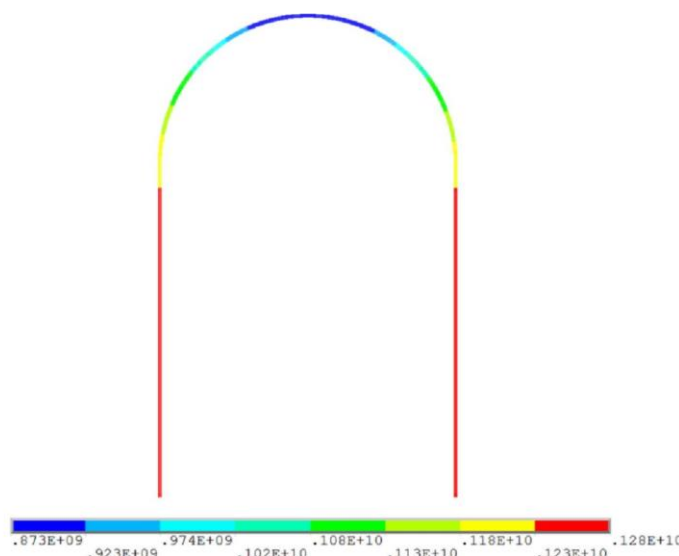
Um outro exemplo similar foi encontrado no trabalho publicado por TONG; ZHOU; CAO, (2018). Os autores apresentam um estudo numérico para utilização de concreto protendido para usinas nucleares. A protensão no aço foi dada pelo método de diminuição da temperatura que é ajustada pelo coeficiente de expansão térmica. O cálculo da protensão é fornecido pela variação da temperatura conforme descreve a equação (9).

$$\Delta \theta = \frac{\phi}{E_c \alpha m} \quad (9)$$

Onde ϕ é o valor de protensão em MPa, E_c é o módulo de elasticidade das cordoalhas de aço protendidas em MPa e αm é o coeficiente de expansão térmica aplicado nas cordoalhas em Kelvin.

É possível observar a protensão na Figura 17 de uma das geometrias avaliadas pelos autores. Nesse caso, o aumento da protensão foi dado pela diminuição da temperatura que atingiu valores de tensão que variaram ao longo da cordoalha de aço entre 873 a 1280 MPa. Além das informações mencionadas, os autores exploraram questões relacionadas à perda de protensão decorrente de fatores como atrito, relaxação e fluência do concreto. Com o propósito de fornecer uma abordagem prática, foram propostas equações para estimar tais comportamentos.

Figura 17 A protensão de uma das geometrias é avaliada pelo método da diminuição da temperatura (escala do gráfico em Pascal).



Fonte:(Tong; Zhou; Cao, 2018).

De maneira resumida: Os trabalhos apresentados fornecem metodologias diferentes para avaliação da protensão. Os trabalhos de Tran, D. T. *et al.*, (2021) e de Arab; Badie; Manzari (2011) abordam métodos mais clássicos estabelecendo formulações de contato e atrito entre o concreto e as cordoalhas de aço. Já os autores Zhang; Sun; Gu, (2018) e Tong; Zhou; Cao (2018) utilizam uma abordagem térmica, associando coeficiente de expansão com a protensão.

4.5 Conclusões do capítulo

Este capítulo discutiu tópicos relevantes para a compreensão dos próximos capítulos da dissertação. A protensão, um conceito amplamente utilizado no setor de construção civil, ganhou destaque quando aplicado ao concreto, oferecendo uma alternativa viável para o reforço de estruturas reduzindo o surgimento de fissuras e aumentando seu desempenho sob determinadas condições de carregamento.

No entanto, no contexto da protensão química, embora tenha sido introduzido no século XX, na década de 60, há poucos estudos na literatura que se aprofundam no tema, e a maioria se concentra nas tensões resultantes da utilização de aditivos

expansivos combinados com materiais cimentícios, com poucas inferências sobre as tensões geradas pela retração química.

No que diz respeito à retração química em sistemas cimentícios, entende-se que é uma característica intrínseca desse tipo de sistema, na medida em que a hidratação desses sistemas avança, o volume da matriz cimentícia retrai, ou seja, o volume dos hidratados formados será menor do que o volume inicial dos materiais anidros (antes da hidratação). A intensidade da retração dependerá basicamente da reação química do sistema que está diretamente associado ao tipo de cimento utilizado, aditivos e até adições minerais. A utilização de silicato de sódio em sistemas cimentícios é fortemente influenciada pelo módulo de sílica do silicato de sódio e pelo teor de silicato adicionado na suspensão cimentícia.

Os modelos numéricos para previsão da protensão estão predominantemente associados à protensão convencional aplicada ao concreto armado. No entanto, em uma abordagem não convencional adotada nesta dissertação, foi possível encontrar autores que, para obter o efeito de protensão, aplicaram um campo de temperatura negativa normalmente associado a um coeficiente de expansão dentro do domínio de interesse alvo. de acordo com os princípios de dilatação e contração térmica, obteve-se as deformações de origem térmica no elemento alcançando o objetivo da protensão.

5 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Nesta etapa são apresentadas as metodologias utilizadas para a caracterização do cimento e do silicato de sódio, além dos resultados.

5.1 Metodologia utilizada para caracterização física e química do cimento

5.1.1 Picnometria de gás He

A densidade real foi determinada por picnometria de adsorção de gás hélio (He) em um equipamento Hélio em um equipamento AccuPyc II 1340 Micromeritics (Figura 18), a partir de uma média de 5 aferições de amostras de cada material. Utilizou – se gás hélio, pois além de ser inerte, o tamanho reduzido dos átomos facilita a penetração nos poros acessíveis da amostra.

Figura 18 Picnômetro de gás hélio.



Fonte: Micromeritics.

Esse método permite determinar o volume real ocupado pelo sólido, mesmo que poroso, por meio da medição de pressões em duas câmaras de volumes conhecido (por calibração prévia): (i) câmara ou célula chamada de referência (expansão) e (ii) câmara ou célula que contém a amostra do material, ligadas por uma válvula de expansão.

Na câmara do equipamento será adicionado uma amostra, seca em estufa a 100°C por 24 horas, com massa previamente pesada, sem ligação com a câmara de referência. Após iniciar o ensaio, gás He é injetado na câmara de referência até igualar

a pressão atmosférica, isola-se esta câmara fechando a válvula de expansão e depois o gás é transferido para a câmara que contém a amostra do material e registra a pressão P_1 . A válvula de expansão é aberta e a pressão P_1 cai para um valor de pressão P_2 .

Utilizando esses valores, o volume real do material (V_{mat}) é determinado utilizando a lei universal dos gases equação (10), admitindo um comportamento ideal do gás He e que o sistema seja mantido a temperatura constante.

A densidade real é então calculada automaticamente pelo picnômetro através da relação massa/volume. A massa é fornecida como dado de entrada no ensaio e o volume calculado pela equação (11).

$$P_1 \times (V_a - V_{mat}) = P_2 \times (V_a - V_{mat} + V_e) \quad (10)$$

$$V_{mat} = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (11)$$

onde, V_a é o volume da câmara da amostra e V_e é o volume da câmara de expansão.

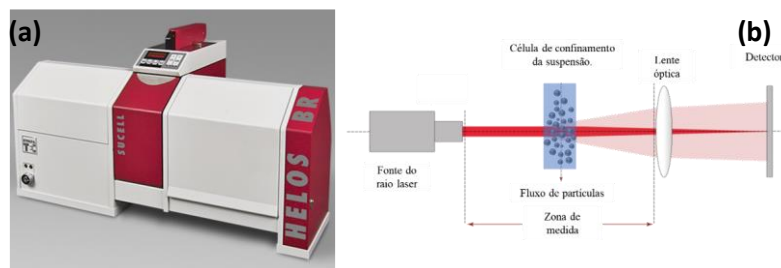
5.1.2 Distribuição granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica foi determinada em um granulômetro a laser Helos – SympaTec (Figura 19 a) e dispersor por via úmida com ultrassom Sucell, com capacidade de leitura no intervalo de 0,05 μm a 350 μm . O método por via úmida tem como base a dispersão do laser na suspensão, no qual ocorrem três fenômenos físicos: reflexão (retorno da luz a origem ao incidir sobre uma superfície), refração (desvio da luz ao atravessar a superfície que separa dois meios com velocidades de propagação diferentes) e difração (desvio da luz ao passar próximo a borda de um corpo).

O funcionamento do equipamento citado, ilustrado na Figura 19 (b), baseia-se na teoria da difração da luz. Um laser de luz é incidido em uma suspensão de partículas dispersas, a luz difratada é focada em uma lente óptica com detectores que convertem a energia incidente em sinais elétricos. A distribuição do tamanho de partículas é obtida combinando o padrão de difração medido com um padrão calculado com base

na teoria de difusão da luz de Mie. Os valores calculados são indicados como diâmetro de uma esfera de volume equivalente.

Figura 19: Ilustração do funcionamento do granulômetro à laser.



Fonte: Ilustração em (a) e (b) SympaTec.

Foram preparadas 3 amostras por material avaliado, para cada uma das amostras será 3 medidas. Cada amostra deverá pesar aproximadamente 0,15 gramas, quantidade ideal para manter a opacidade da lente próximo a 10%. Foi utilizado água deionizada como solvente. Previamente, as amostras serão dispersas em 50 mL de água em um copo metálico com um misturador de bancada RW20 (IKA), com rotação mantida em 1.000 rpm durante 1 min. A suspensão foi transferida para o reservatório de análise, aplicado ultrassom por 2 min e logo iniciada a avaliação.

5.1.3 Área superficial específica

A determinação da área superficial específica foi realizada pelo método BET (desenvolvido por *Braunaer, Emmet e Teller*) com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60 °C e pressão de 10-2 kPa por 24 h no equipamento Belprep vac-II para a retirada da umidade e de outros gases adsorvidos. No caso do cimento, o pré-tratamento será realizado sob temperatura de 40°C e em 16 horas, para evitar o risco de desidratação da gipsita. A área superficial específica foi determinada a partir de isoterma de adsorção de gás N₂ gasoso a 77 K, segundo o método BET multiponto (faixa de p/p₀ entre 0,05 e 0,25), onde “p₀” é a pressão de condensação do nitrogênio

5.1.4 Análise química via úmida por fluorescência de raios X

Para análise química utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX), marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. Os teores de óxidos apresentados nos resultados foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração CIM-1 (Cimentos), relativa à análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h.

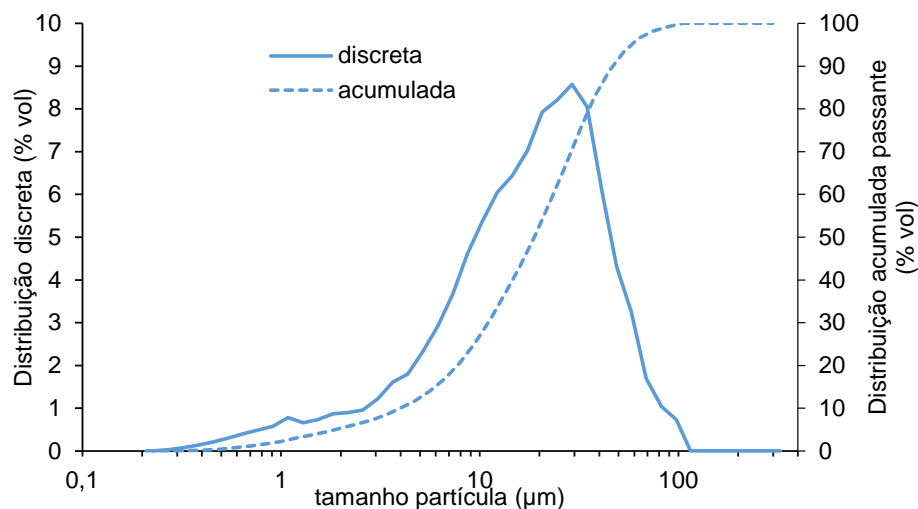
5.2 Metodologia utilizada para caracterização do silicato de sódio

A determinação de óxido de sódio (Na_2O) e anidrido silícico (SiO_2) foi determinado no IPT (instituto de pesquisas tecnológicas) no laboratório de Materiais para Produtos de Construção/Habitação e Edificações. O laboratório seguiu as diretrizes da norma Tappi 632:2011 *Analysis of sodium silicate*.

5.3 Resultados das caracterizações das matérias - primas utilizadas

A Figura 20 ilustra a distribuição granulométrica do cimento CPV. Na Tabela I são apresentados a quantificação dos valores característicos a partir da distribuição acumulada (d_{10} , d_{50} e d_{90}).

Figura 20 Distribuição do tamanho de partícula do cimento CPV utilizado no trabalho



Fonte: Autor.

Na Tabela I também são apresentados os resultados de densidade e área superficial específica do cimento e do módulo de sílica e teor de água no silicato.

Tabela I Densidade real, área superficial específica e diâmetros característicos das partículas de cimento CPV utilizado no trabalho e módulo de sílica ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) e teor de água no silicato de sódio.

Propriedades	CPV
Densidade real (g/cm^3)	3,06
Área superficial específica (m^2/g)	1,44
d_{10} (μm)	4,0
d_{50} (μm)	18,9
d_{90} (μm)	47,0

Na Tabela II são apresentados os resultados obtidos pela análise química. De acordo com a norma NBR 16697/18 o cimento CPV está de acordo com os parâmetros química estabelecidos na norma.

Tabela II Análise química do cimento CPV utilizado no trabalho.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	SrO (%)	PF (%)	Total (%)
19,90	4,74	2,58	59,4	1,79	3,70	0,49	0,90	0,22	0,21	0,09	0,26	6,54	100,8

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 1,08$

Na Tabela III são apresentados os resultados do teor de óxido de sódio (Na_2O) e anidrido silícico (SiO_2) e do teor de água. Ensaio realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).

Tabela III Determinação do teor de óxido de sódio (Na₂O), anidrido silícico (SiO₂) e água.

Determinações	Resultados (%)			
	Sub-amostra 1	Sub-amostra 2	Sub-amostra 3	Média
Óxido de sódio (Na ₂ O)	8,57	8,57	8,59	8,58
Anidrido silícico (SiO ₂)	28,6	28,8	28,9	28,8
Água (H ₂ O)*	62,8	62,6	62,6	62,7

*Resultado estimado por meio da equação: Água (H₂O) % = 100 – [teor de óxido de sódio (Na₂O) + teor de anidrido silícico (SiO₂)].

O módulo de sílica que é a relação SiO₂/Na₂O é de 3,36. A quantidade de água foi de 62,7%, somando a porcentagem do óxido de sódio e do anidrido silícico é possível obter a quantidade de sólidos na solução, que é de 37,3%.

5.4 Conclusões do capítulo

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que o cimento CPV apresenta uma distribuição granulométrica (d₁₀, d₅₀ e d₉₀), área superficial específica e densidade adequadas. Verificou-se também os elementos químicos do cimento, apresentando conformidade de acordo com os parâmetros estabelecidos na norma NBR 16697/18.

O silicato de sódio utilizado possui um módulo de sílica de 3,36 (relação entre o teor de sílica e sódio). A quantidade de água presente na solução de silicato foi de 62,7% e a quantificação dos sólidos na solução foi obtida pela soma das porcentagens de óxido de sódio e anidrido silícico, resultando em 37,3%.

6 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RETRAÇÃO DAS SUSPENSÕES CIMENTÍCIAS

Foram avaliadas quatro suspensões cimentícias com diferentes quantidades de silicato de sódio, Na Tabela IV são apresentadas as quantidades dos materiais utilizadas.

Tabela IV Composições cimentícias avaliadas.

Amostra	Cimento (g)	Silicato de sódio (g)	Água (g)	a/s*
Referência	100	-	50	
1,2% Silicato	100	3,33	48,92	0,50
2,5% Silicato	100	6,67	47,83	
5,0% Silicato	100	13,35	45,65	

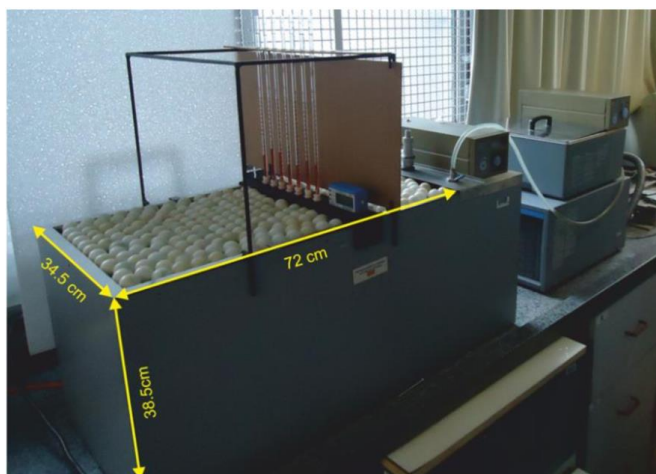
*relação água/materiais sólidos

6.1 Ensaio de retração química método de dilatometria automatizado

6.1.1 Equipamento

A avaliação da retração química foi determinada pelo mesmo método de dilatometria automática que foi desenvolvido na Dissertação de Mestrado de ESTRADA CACERES, (2016). Basicamente o equipamento é um banho térmico com variação de temperatura de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. O equipamento possui um sistema elétrico para controle de temperatura e um sistema hidráulico que permitiu a circulação de água de maneira ininterrupta, na Figura 21 é apresentado o equipamento.

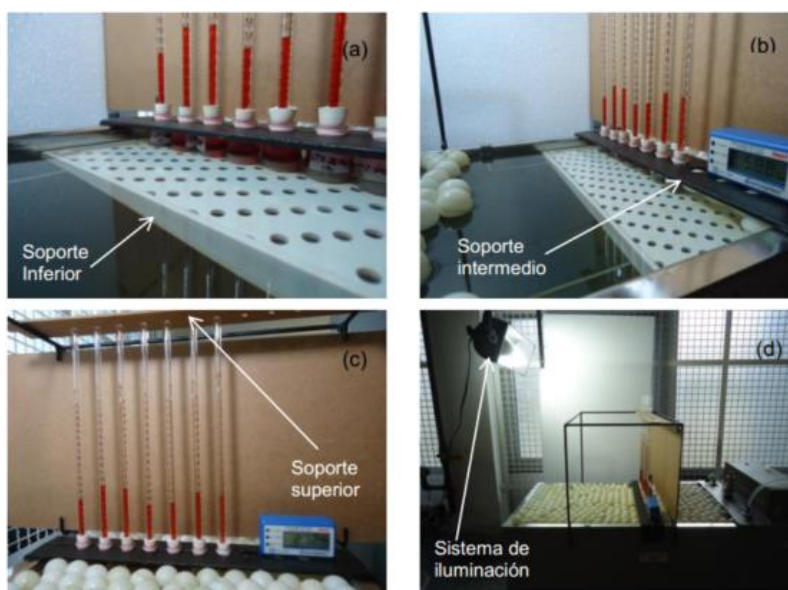
Figura 21 Equipamento de retração química.



Fonte: (Estrada Caceres, 2016).

Para o posicionamento das amostras, foi necessário criar três diferentes suportes, inferior, intermediário e superior, na Figura 22 são ilustrados os suportes criados. Para leitura da variação dimensional, foi posicionada uma câmera da marca Logitech c920 HD Pro com resolução média de 15 Megapixels. Foi utilizado também um software para fotografar as imagens em instantes determinados, esse software é conhecido como *time lapse*. Nesses experimentos foi utilizado o software Chronolapse versão 1.0.8, as imagens foram fotografadas em intervalos de quinze minutos.

Figura 22 Detalhes dos suportes criado para apoiar as amostras durante o ensaio.



Fonte: (Estrada Caceres, 2016).

6.1.2 Determinação da retração química

A determinação da massa de cimento foi baseada na equação (12), onde $M_{cimento}$ é a massa de cimento dentro da ampola (g). $M_{frasco + Pasta}$ é a massa da ampola com a pasta de cimento (g). $M_{frasco\ vazio}$ é a massa do frasco vazio (g) e $\frac{a}{c}$ é relação água cimento utilizada.

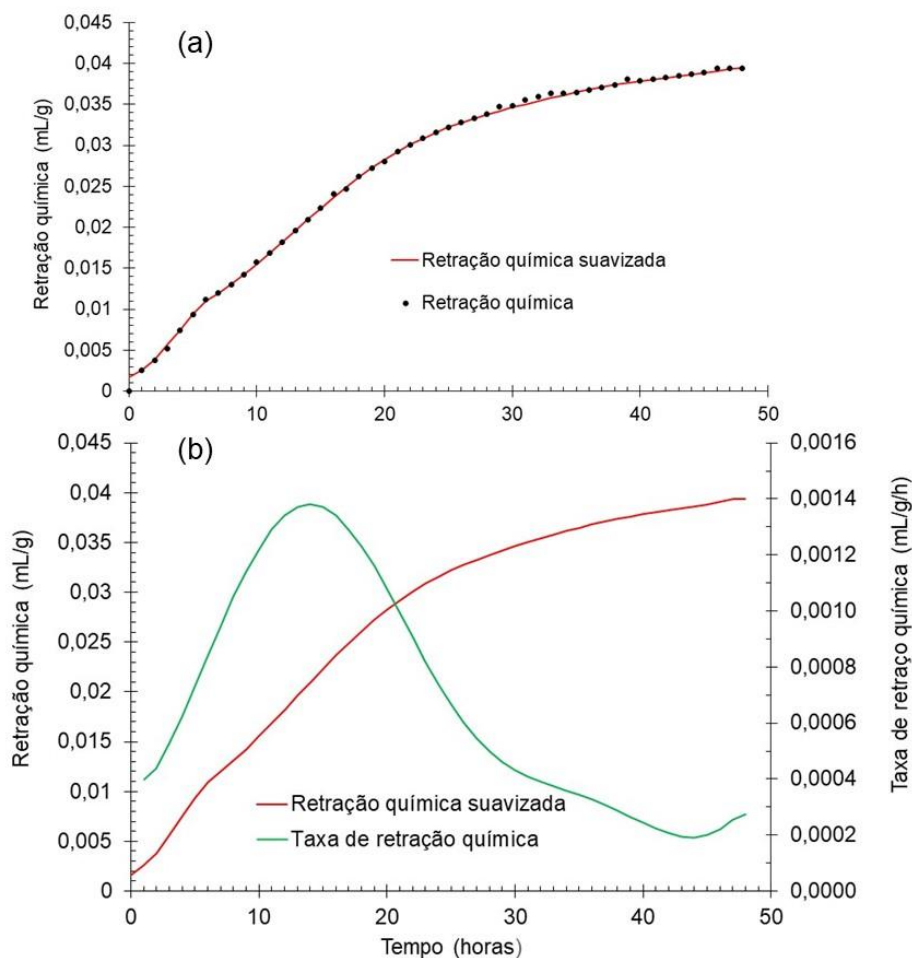
$$M_{cimento} = \frac{M_{frasco + Pasta} - M_{frasco\ vazio}}{1 + \frac{a}{c}} \quad (12)$$

Após a determinação da massa de cimento, a retração química é possível ser determinada a partir da equação (13), onde $RQ(t)$ é a retração química em função do tempo (mL/g). $h(t)$ é a variação volumétrica medida em função do tempo (mL). $h(60\ minutos)$ é a medição da primeira leitura. Essa última condição, fica à critério do pesquisador definir.

$$RQ(t) = \frac{h(t) - h(60\ minutos)}{M_{cimento}} \quad (13)$$

Na Figura 23 (a) é apresentado um resultado de retração química pelo método de dilatometria automatizado. Neste caso, a amostra analisada foi um cimento CPV com uma relação água/cimento de 0,50.

Figura 23 Em (a) Comparação da retração química antes e depois da suavização dos dados. Resultado característico da retração química de um cimento CPV. Em (b) resultado da retração química suavizada e da taxa de retração química.



Fonte: Autor.

Conforme relatado por (Estrada Caceres, 2016), ao analisar as amostras, a partir de 20 horas de ensaio, ocorrem pequenas oscilações, a fim de reduzi-las, utilizou-se a função *Analysis* → *smoothing* → *FFT Filter* do software Origin 2022b versão 9.95. Observando a Figura 23 (a) é possível notar a diferença entre o antes e o depois da suavização.

Após a obtenção da curva suavizada, pode-se obter também a taxa de retração química, ao qual é definida pela derivação da curva suavizada. Para obtenção dessa curva utilizou-se o mesmo software Origin com as seguintes funções *Analysis* → *Mathematics* → *Differentiate*. Na Figura 23 (b) são ilustradas as duas curvas.

6.1.3 Procedimento experimental, mistura e preparo das amostras

Procedimento experimental:

Os ensaios foram realizados em uma temperatura à $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas. As imagens foram fotografadas em intervalos de quinze minutos. Foram realizadas um total de 5 repetições por amostra.

Mistura:

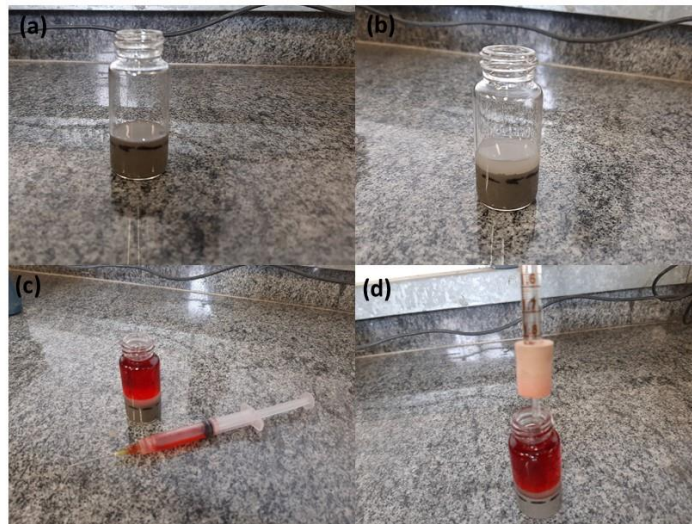
As amostras foram misturadas em um misturador de bancada da marca IKA modelo RW 20DZM. A hélice utilizada foi do tipo caules. Cerca de 100g de pó foi adicionado em um beck de plástico, todo o líquido (água + silicato de sódio ou apenas água) foi adicionado dentro do beck de plástico, aguardou 1 minuto para molhagem de todo o pó e em seguida foi ligado o misturador em 750 rpm por 3 minutos. Após esse tempo, desligou o misturador e com o auxílio de uma espátula o fundo do Becker foi raspado, esse procedimento durou cerca de 30 segundos. Para homogeneizar a suspensão, ligou novamente o misturador por mais 1 minuto em 750 rpm. O procedimento total de mistura durou cerca de 5 minutos e 30 segundos e foi mantido desta maneira para todos os experimentos.

Preparo das amostras:

Logo após a mistura, adicionou-se cerca de 5 mL de pasta de cimento dentro da ampola, para facilitar o manejo da pasta e evitar de sujar as paredes interna da ampola, utilizou-se um funil com um bastonete de vidro para empurrar a pasta cimentícia. Após esse procedimento, adicionou-se cerca de 2 mL de água na superfície da pasta de cimento para garantir a hidratação. Com o objetivo de evitar a evaporação e facilitar a leitura das imagens, misturou previamente uma parafina líquida e um corante líquido de cor vermelha. Com o auxílio de uma seringa com bico fino, adicionou-se a parafina líquida com o corante devagar sem gerar bolhas até a borda superior da ampola. Na próxima etapa uma pipeta com graduação volumétrica dentro de uma rolha com um furo no meio foi inserida dentro da ampola, é importante salientar que nessa etapa, deve-se ter cuidado para não gerar bolhas e prejudicar a medição das amostras. Finalizando completamente o procedimento, a amostra é

posicionada dentro do equipamento e ajustadas de acordo com os suportes. O procedimento descrito é ilustrado na Figura 24 e Figura 25.

Figura 24 Procedimento experimental do ensaio de retração química. Em (a) pasta de cimento é adicionada dentro da ampola em um volume determinado. Em (b) é adicionado 2 ml de água para manter a hidratação da pasta de cimento em seu nível máximo. Em (c) é adicionado até a superfície superior da ampola parafina líquida com corante. Em (d) a ampola é fechada com a pipeta dentro de uma rolha com um furo no meio.



Fonte: Autor.

Figura 25 Sistema de retração química montado com as amostras sendo ensaiadas.

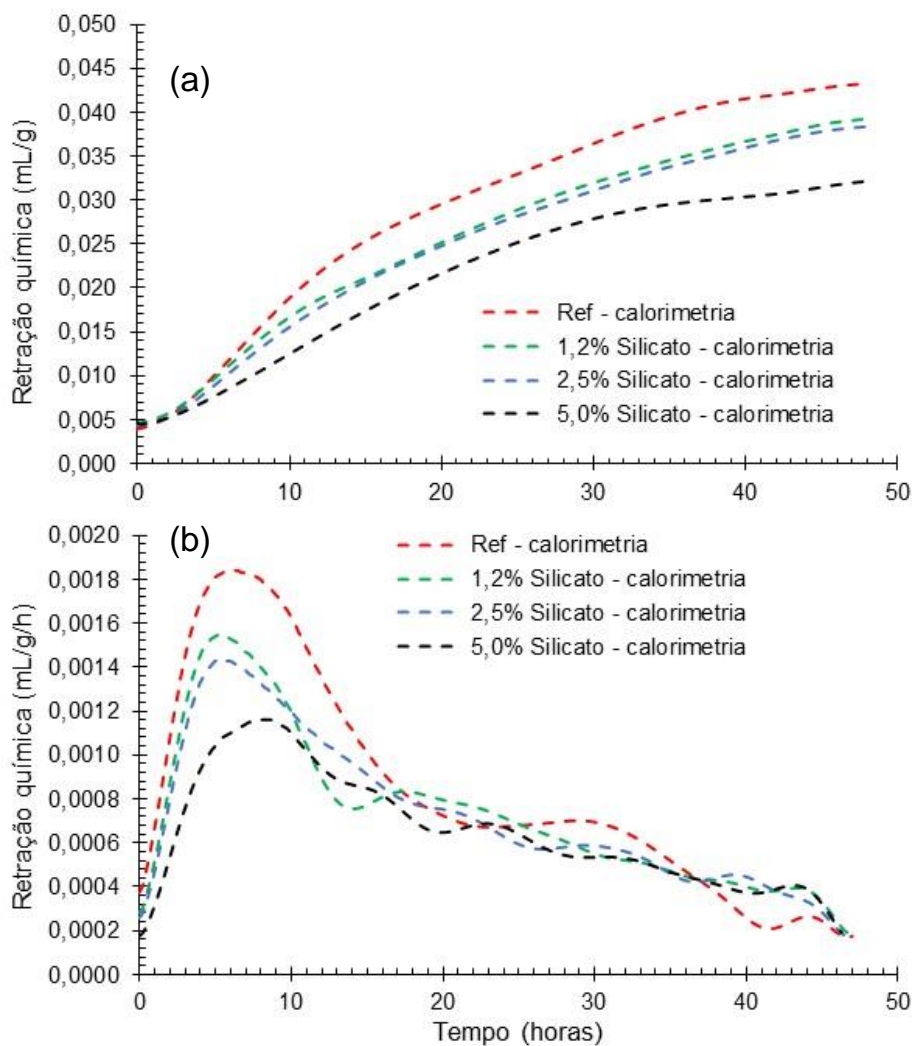


Fonte: Autor.

6.1.4 Resultados

Na Figura 26 são apresentados os resultados do ensaio de retração química. É possível observar que as curvas possuem o mesmo comportamento, a medida em que se aumenta a quantidade de silicato de sódio, a retração química diminui.

Figura 26 Em (a) retração química das amostras com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio. Em (b) taxa de retração química com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

Na Figura 26 (b) é possível observar de maneira mais nítida a redução da retração, principalmente no primeiro pico (em torno de 6 horas). Esse primeiro pico, está associado a formação dos hidratados, o principal deles o C-S-H (Lothenbach; Scrivener; Hooton, 2011), quanto maior a quantidade formada, maior será a retração

química, no caso dos silicatos avaliados, esse efeito foi ao contrário, comportamento que também foi observado por outros autores que utilizam métodos correlatos (Santana-Carrillo *et al.*, 2021).

Em idades mais avançadas também é possível notar pequenas oscilações, o que também foi reportado por Estrada Caceres, (2016) possivelmente por pequenas variações de temperatura que ocorrem na sala, sugerindo então que os ensaios sejam realizados em um banho térmico de precisão.

Na Tabela V são apresentados os resultados de retração química obtidos por meio da curva de retração química. Nessa tabela, é possível observar os valores para 12, 24 e 48 horas. A maior diferença em relação a pasta de cimento pura (referência) foi a pasta com 5,0% de silicato de sódio em 12 horas, cerca de 33% de retração a menos.

Tabela V Valores de retração química em 12, 24 e 48 horas das amostras analisadas e a porcentagem em relação a referência.

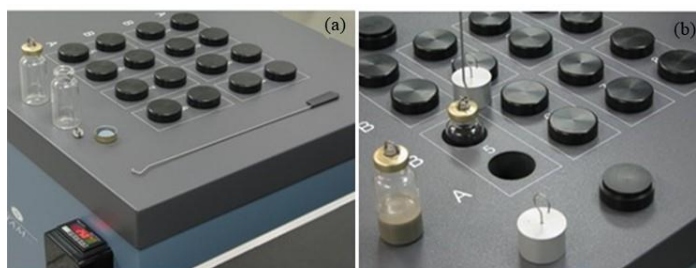
Amostra	Retração química (mL/g)		
	12 horas	24 horas	48 horas
Referência	0,0218	0,0322	0,0433
1,2% Silicato	0,0187 (-13,9%)	0,0282 (-12,5%)	0,0393 (-9,2%)
2,5% Silicato	0,0178 (-18,3%)	0,0276 (-14,5%)	0,0384 (-11,3%)
5,0% Silicato	0,0145 (-33,3%)	0,0246 (-23,8%)	0,0322 (-25,6%)

Apesar de não haver nenhum estudo na literatura que avalie diretamente a retração química de cimento Portland com silicato de sódio, como foi realizado neste trabalho, outras técnicas utilizadas em diversos trabalho para o monitoramento da cinética de reação, como por exemplo, a calorimetria isotérmica, puderam auxiliar diretamente no entendimento da retração química, haja visto que são resultados que possuem relação direta conforme relatados por outros autores (Estrada Caceres, 2016; Lura; Winnefeld; Klemm, 2010). Mais adiante serão apresentados e discutidos os resultados de calorimetria isotérmica e a correlação com a retração química.

6.2 Calorimetria isotérmica

Neste trabalho o acompanhamento da cinética de reação química das pastas de cimento foi realizado em um calorímetro isotérmico, TAM Air (TA Instruments), apresentado na Figura 27 Calorímetro isotérmico utilizado para o acompanhamento da reação química das pastas cimentícias (a) e colocação da ampola no equipamento para iniciar o ensaio (b) (a), com precisão de $\pm 20 \mu\text{W}$. As pastas cimentícias após a mistura foram inseridas nas ampolas com o auxílio de um funil. Adicionando-se as ampolas no calorímetro, com o auxílio de uma haste metálica (Figura 27b) e iniciar os ensaios. Todo esse processo durou cerca de 2 minutos. O acompanhamento da reação química foi realizado em 25°C até 48 horas.

Figura 27 Calorímetro isotérmico utilizado para o acompanhamento da reação química das pastas cimentícias (a) e colocação da ampola no equipamento para iniciar o ensaio (b).

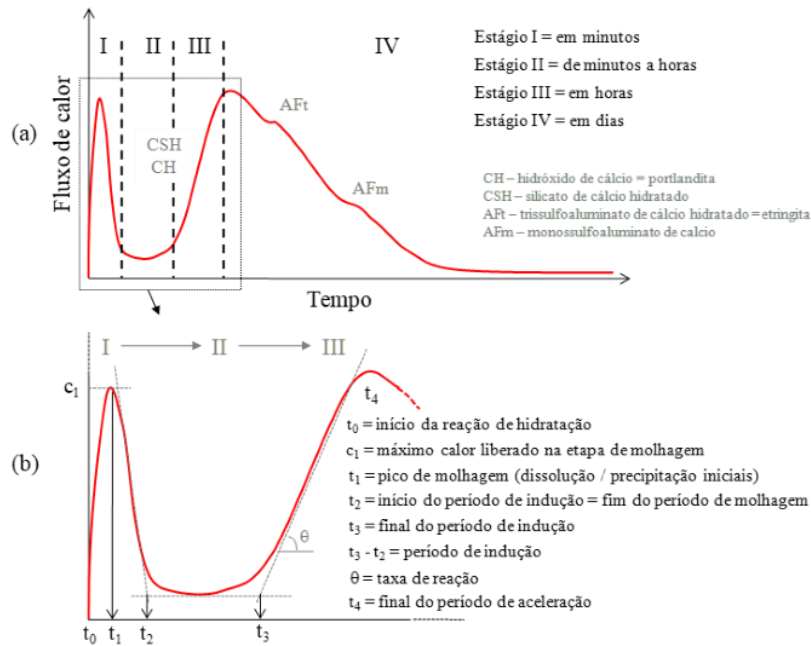


Fonte: Mario S Takeashi.

6.2.1 Determinação do período de indução, taxa de reação e tempo de pega

Para a determinação do período de indução, taxa de reação e tempo de pega foi utilizado como base os estágio das reações químicas estabelecidas por (Romano *et al.*, 2011) (Figura 28).

Figura 28 Esquema ilustrativo da liberação de calor em função do tempo. Em (a) é apresentada a curva do fluxo de calor dividida em estágios e em (b) o significado de cada patamar.



Fonte: (Romano *et al.*, 2011).

De maneira resumida no estágio 1 há a floculação das partículas que aprisionam água de amassamento, a qual não participa da fluidez da pasta. Sendo assim, há rápida liberação de calor devido à neutralização das cargas eletrostáticas superficiais das partículas, à dissolução dos sulfatos alcalinos e sulfatos de cálcio, e início de dissolução das fases C_3S (alita) e C_3A (aluminato de cálcio) liberando íons K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} para a solução.

No estágio 2 inicia-se a polimerização dos monômeros de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), precipitando uma camada ao redor das partículas de cimento a qual aparentemente retarda as reações de hidratação devido à formação de uma barreira ao redor das partículas.

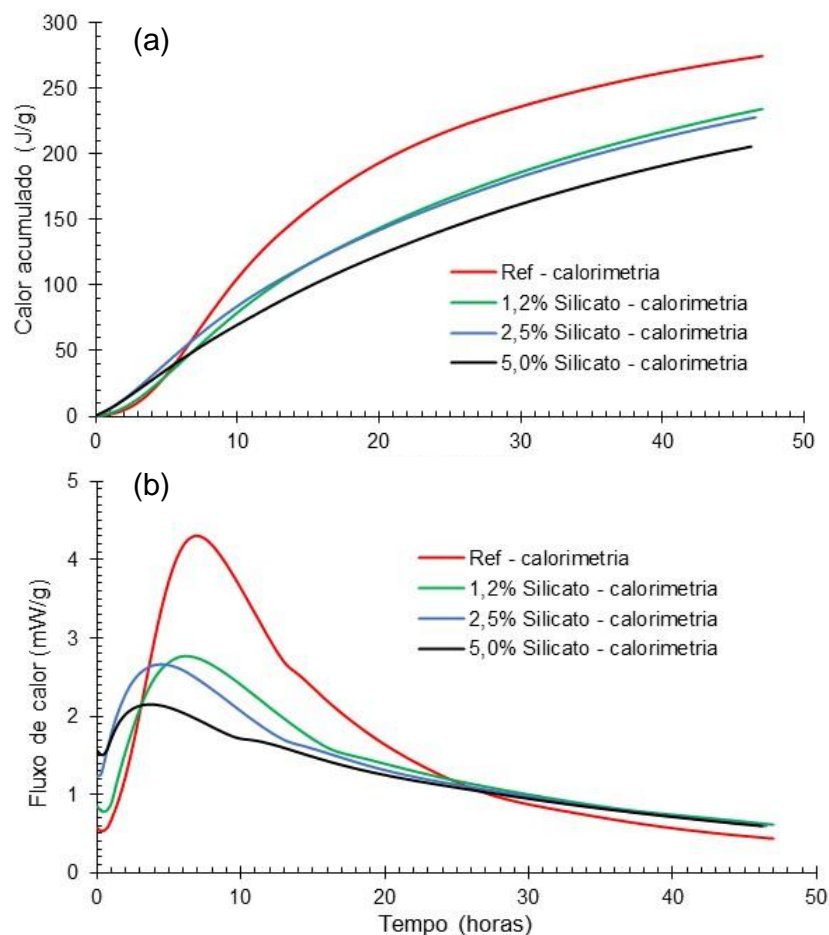
O estágio 3 irá iniciar após supersaturação em cálcio da solução, onde ocorre a precipitação de portlandita e de C-S-H (em forma de agulhas ao redor das partículas) com elevada liberação de calor até atingir um ponto máximo. É o período de aceleração da reação. Com a evolução da reação, as partículas se ligam formando uma rede tridimensional dando consistência à pasta, período no qual se inicia e termina a pega do cimento. Neste caso, o tempo pega das pastas cimentícias foi determinada a partir da norma ASTM C1679/13, sendo o tempo correspondente à 50% do valor no período de aceleração.

Por fim o estágio 4 irá se iniciar após o ponto máximo de liberação de calor, em consequência a taxa de reação do C_3S irá diminuir e este período pode ser definido como período de desaceleração.

6.2.2 Resultados

Na Figura 29 são apresentados os resultados de calor acumulado e do fluxo de calor das amostras com cimento puro e cimento com silicato de sódio.

Figura 29 Em (a) Calor acumulado com o cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio. Em (b) Fluxo de calor com o cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.

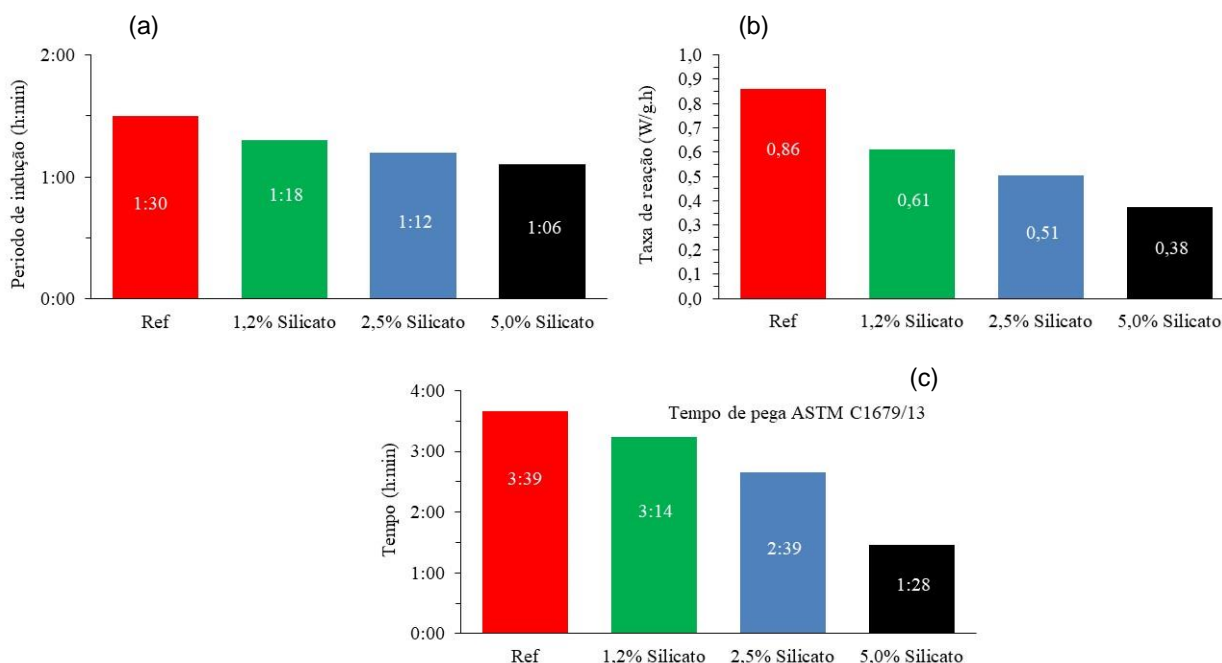


Fonte: Autor.

Na Figura 29 (b) é possível observar claramente o impacto do teor de silicato de sódio na cinética de hidratação das pastas cimentícias. Com relação ao tempo de indução

(estágio II), a medida em que foi aumentando a quantidade de silicato, o período foi sendo reduzido cada vez mais, conforme o gráfico da Figura 30. A medida em que se foi aumentando a quantidade de silicato de sódio, conseqüentemente foi se aumentando o pH da solução que foi responsável por antecipar as reações responsáveis pela formação de compostos com sódio, como por exemplo: o NaOH (BRYKOV et al., 2002). No entanto, no estágio III, a taxa de reação representada pela inclinação durante o período de aceleração, tem relação direta com a formação de C-S-H e portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Scrivener; Nonat, 2011), foi reduzida a medida em que se aumentou a quantidade de silicato de sódio, os valores calculados são apresentados na Figura 30. Nesse caso em específico, esse comportamento pode estar associado com a redução da solubilidade dos íons de Ca^+ , que foram reduzidos devido ao aumento do pH da suspensão (Phair; Van Deventer; Smith, 2000). Também foi possível determinar o tempo de pega de acordo com a norma ASTM C1679/13 (Figura 30) que seguiu a mesma tendência do período de indução e da taxa de reação.

Figura 30 Em (a) Período de indução. Em (b) taxa de reação. Em (c) tempo de pega de acordo com a norma ASTM C1679/13 das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.



Fonte: Autor

A adição de 5% de silicato foi a que mais impactou o tempo de pega, quando comparado com a referência, cerca de 2 horas de diferença. Além disso, o silicato de

sódio também afetou as propriedades reológicas, as quais serão discutidas mais adiante.

Outros autores observaram o impacto da rápida formação da microestrutura, segundo Santana-Carrillo *et al.* (2021) a rápida formação microestrutural das pastas prejudicou o desenvolvimento adequado da resistência mecânica, de acordo com os resultados publicados, quanto menor foi o MS (sistema mais alcalino), menor foi o tempo de pega e conseqüentemente menor foram as resistências a compressão que foram explicadas pelos autores com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura. As pastas que tiveram um tempo de pega menor interferiram diretamente na formação de uma microestrutura defeituosa e com muitos vazios. Situação contrária para os MS mais altos, que pouco interferiram na cinética de reação do cimento Portland (devido à baixa solubilidade do SiO₂) permitindo que as reações de hidratação do cimento Portland pudessem evoluir sem perturbações. Além disso, em idades mais avançadas, o alto teor de SiO₂ favoreceu na resistência a compressão, formando uma espécie de gel de sílica que reagiu com outras espécies de cálcio do cimento Portland, formando mais produtos de hidratação.

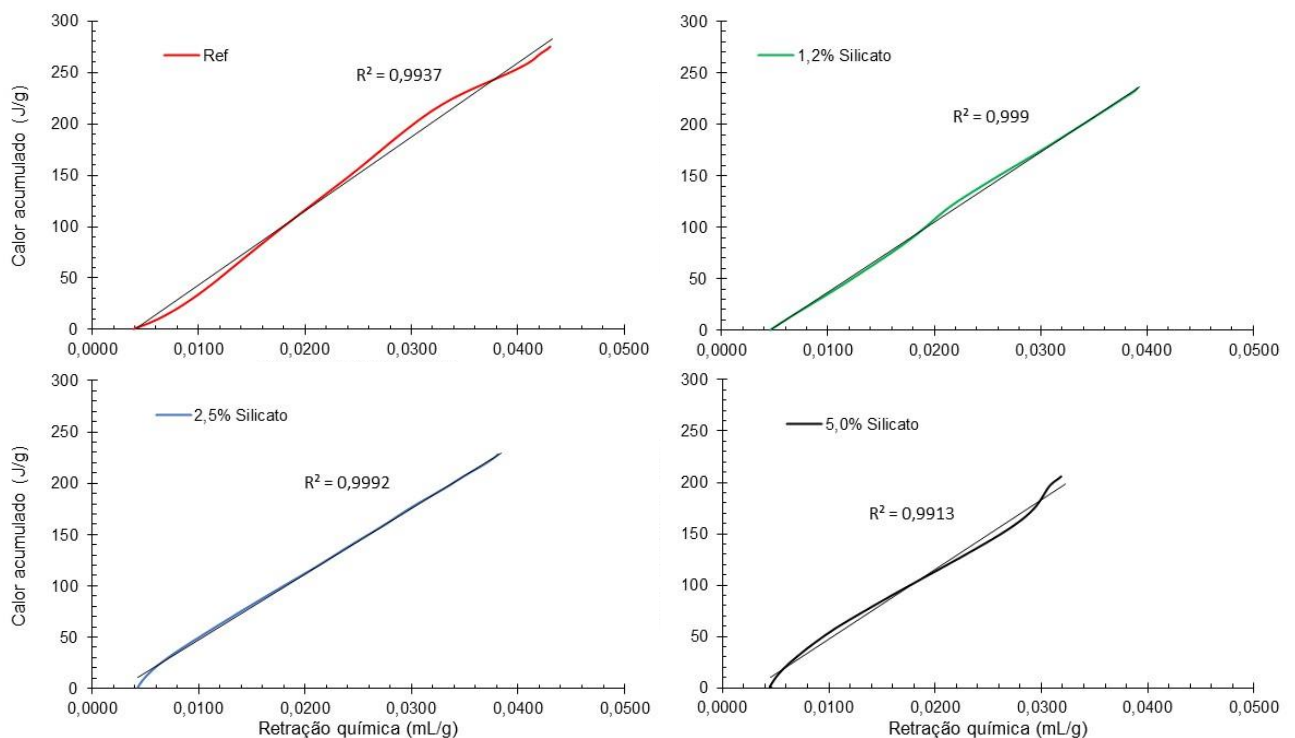
No estágio IV, conhecido como período de desaceleração, é possível observar a formação da etringita que ocorre entre as amostras em um intervalo de 12 e 16 horas. A amostra de referência apresentou uma desaceleração mais intensa das reações em comparação com as amostras contendo silicato, que por sinal, se mantiveram todas exatamente iguais a partir de 25 horas.

Ao observar o calor acumulado após as 48 horas, fica muito claro que o silicato de sódio afetou a cinética de reação do cimento Portland puro (referência), principalmente nos estágios II e III. Ao comparar o efeito do silicato de sódio na cinética de hidratação, o teor com 5% foi o que mais afetou, já 1,2% e 2,5% foram praticamente iguais entre si.

6.2.2.1 Correlação retração química vs calorimetria isotérmica

Na Figura 31 são apresentadas as correlações entre os resultados de calor acumulado, obtidos por calorimetria, e retração química. É possível notar que em todas as amostras se observa um comportamento linear com R^2 superior a 0,95 que indica uma excelente correlação entre os resultados.

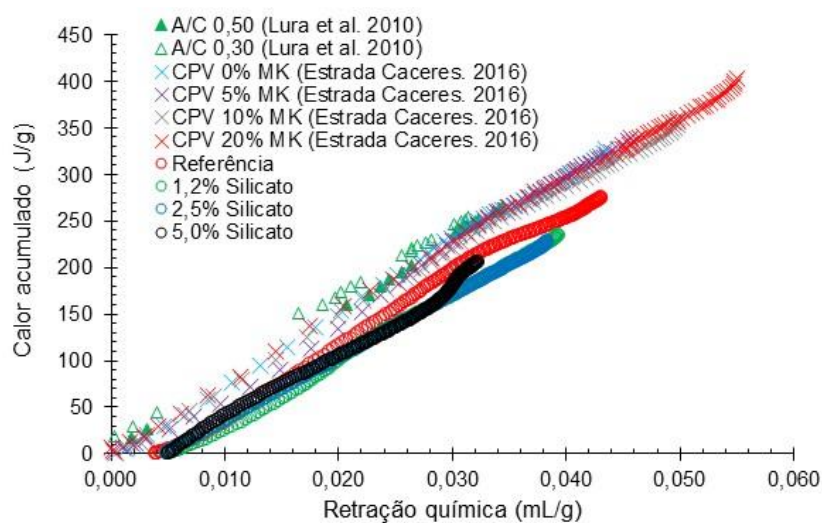
Figura 31 Comparação entre o calor acumulado obtido pela calorimetria e retração química das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2, 2,5 e 5,0% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

Na literatura também são encontrados trabalhos que correlacionam o calor acumulado obtido por calorimetria isotérmica e a retração química, um trabalho é de LURA; WINNEFELD; KLEMM, (2010) e o outro é de ESTRADA CACERES, (2016). Em ambos os trabalhos a relação permaneceu linear, conforme ilustrado na Figura 32. A boa correlação entre os resultados permite que as técnicas para quantificação dos dados de retração sejam complementares entre si e auxiliem na interpretação dos resultados.

Figura 32 Correlação entre calor acumulado e retração química resultados obtidos do trabalho de LURA; WINNEFELD; KLEMM, (2010) utilizando cimento Portland comum do tipo CEM-I em diferentes relação água cimento 0,30 e 0,50. ESTRADA CACERES, (2016) utilizou cimento Portland do tipo V e substituições parciais (5,10 e 20%) de cimento por metacaulin.



Fonte: Autor.

6.3 Reometria rotacional e oscilatória

Os ensaios de reometria rotacional e oscilatória foram realizados em um reômetro Mars 60, Haake (Figura 33), usando uma geometria do tipo placa paralela, com controle de temperatura em 25°C.

Figura 33 Equipamento utilizado para os ensaios de reometria rotacional e oscilatória

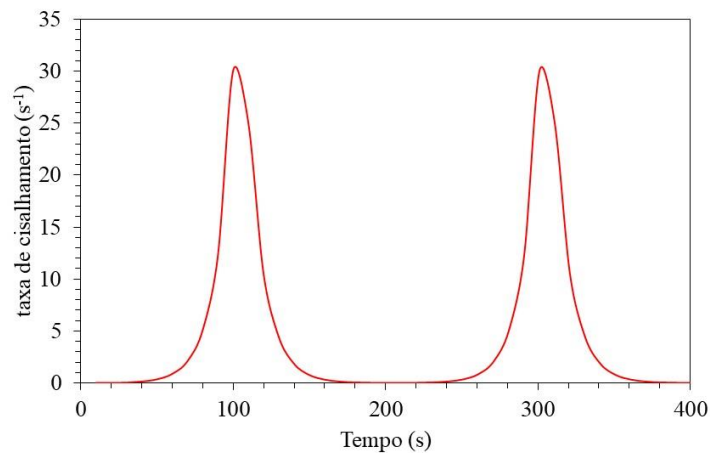


Fonte: www.thermofisher.com.

As pastas cimentícias foram misturadas de acordo com o procedimento em 6.1.3. A seguir são descritos os procedimentos a programação realizada para o ensaio de fluxo e oscilatório:

- Ensaio de fluxo contínuo: cerca de 2 mL da pasta cimentícia será adicionada entre duas placas paralelas e comprimida mantendo-se um *gap* de 1000 μm entre elas. Foram iniciados os ensaios aproximadamente 5 minutos após o início da mistura do pó com a água. Foram realizados dois ciclos de cisalhamento aumentando-se a taxa de cisalhamento de 0,001 até 30 s^{-1} e retornando-se para o repouso (Figura 34), totalizando cerca de 3 minutos por ciclo.

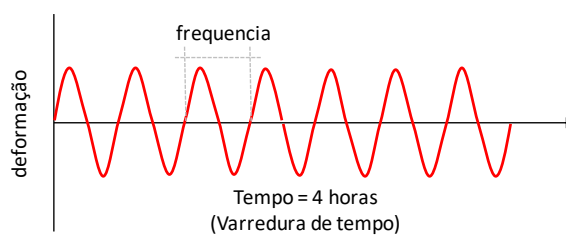
Figura 34 Ilustração da programação utilizada para o ensaio de fluxo.



Fonte: Autor.

- Ensaio oscilatório (varredura de tempo): o ensaio (Figura 35) foi realizado acompanhado por 4 horas, mantendo-se a frequência angular em 1Hz e a deformação em 0,0001.

Figura 35 Ilustração da programação utilizada para o ensaio de reometria oscilatória



Fonte: Autor.

6.3.1 Determinação da viscosidade aparente, tensão de escoamento e a componente elástica G'

A partir dos ensaios realizados foi possível estimar os parâmetros reológicos mais relevantes para o trabalho, viscosidade aparente e tensão de escoamento. Enquanto a primeira foi determinada no ponto de máxima taxa de cisalhamento imposta no teste, a tensão mínima necessária para o início do fluxo (tensão de escoamento) foi quantificada na mínima taxa de cisalhamento, ambos os parâmetros foram definidos adotando as medidas no segundo ciclo de cisalhamento.

Para determinar o módulo de armazenamento elástico (G') foi calculado primeiro o módulo de deformação complexo (G^*) a partir da equação (14) que é razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a deformação imposta (γ_0).

$$|G^*| = \frac{\tau}{\gamma_0} \quad (14)$$

Nesse caso, o valor pode ser dividido em duas componentes: a componente elástica equação (15) e a componente viscosa equação (16).

$$G' = |G^*| \cos \delta \quad (15)$$

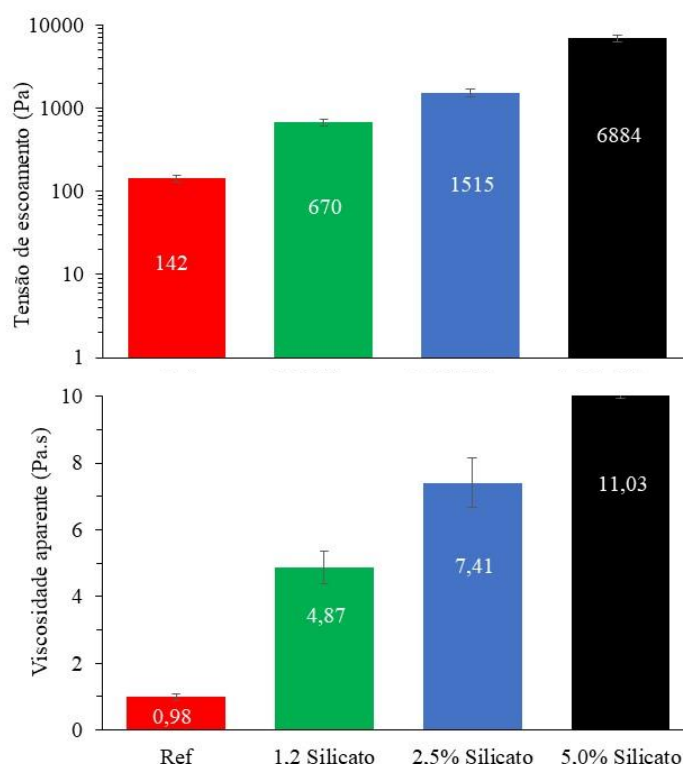
$$G'' = |G^*| \sin \delta \quad (16)$$

Apenas para ilustrar, se $\delta=0$, a componente elástica tende ao máximo, e a componente viscosa é nula, a suspensão tem um comportamento típico de um sólido. Ao contrário pode ocorrer, se $\delta=90^\circ$, a componente elástica é nula, a componente viscosa é máxima a suspensão tem um comportamento típico de um fluido newtoniano.

6.3.2 Resultados

Na Figura 36 são apresentados os resultados de tensão de escoamento e viscosidade aparente das pastas cimentícias com e sem silicato de sódio.

Figura 36 Tensão de escoamento e viscosidade aparente das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.



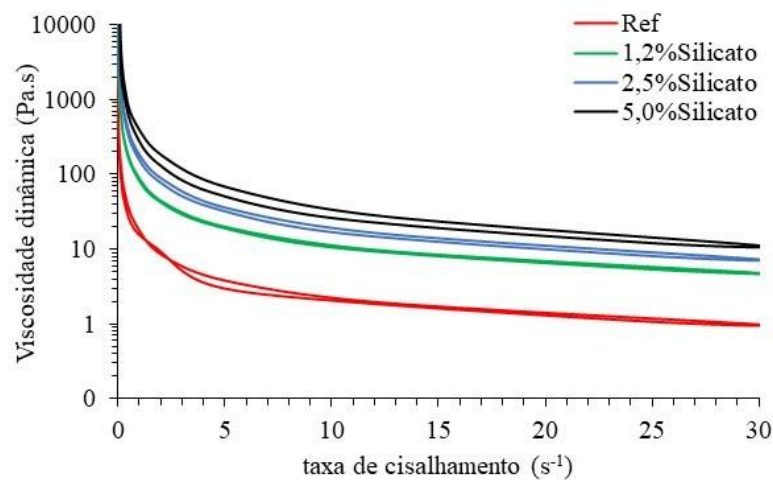
Fonte: Autor.

Ao observar os resultados de tensão de escoamento e viscosidade aparente, fica claro que a adição do silicato de sódio aumentou a coesão no sistema cimentício. Em ambos os casos o maior aumento em relação a pasta de referência, foi na pasta contendo 5,0% de silicato, a tensão de escoamento cresceu cerca de 42 vezes e na viscosidade aparente foi cerca de 11 vezes. Essa mudança no comportamento reológico pode ser explicada com base nos conceitos físicos e químicos, com mais influência física, principalmente porque a medida da tensão de escoamento e da viscosidade plástica ocorreu com no máximo dez minutos após o contato do cimento com a água e o silicato. Possivelmente por ter mantido o teor de água constante, a alteração no teor de sólidos pode ter impactado na aproximação das partículas,

mesmo que em pequena quantidade, o aumento do pH das suspensões também podem ter aproximado ainda mais as partículas, conforme observado por outros autores (Brykov *et al.*, 2002; Fonseca, 2021; Santana-Carrillo *et al.*, 2021).

O comportamento reológico das pastas cimentícias avaliadas apresentam um comportamento de pseudoplasticidade, uma vez que a viscosidade dinâmica é reduzida com o aumento da taxa de cisalhamento conforme ilustra a Figura 37.

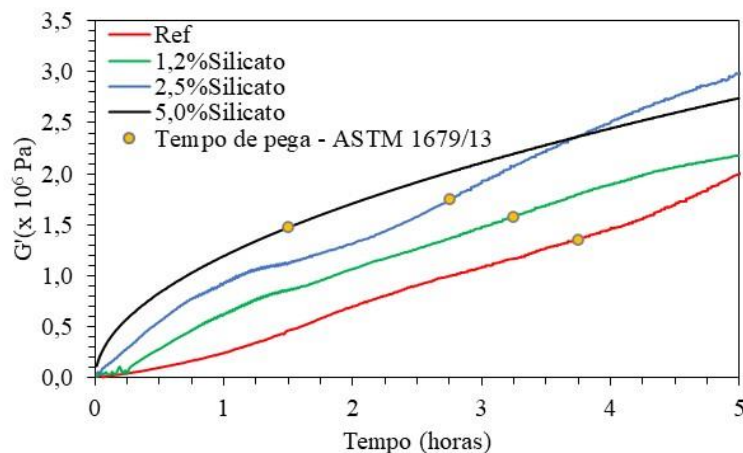
Figura 37 Viscosidade vs taxa de cisalhamento das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,5,3,0 e 6,0% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

Com base nos resultados de varredura de tempo, ensaio que visa avaliar a consolidação dos materiais sem romper a estrutura de partículas formada continuamente com o tempo, foi possível observar o desenvolvimento da rigidez microestrutural das pastas cimentícias avaliadas, os resultados são apresentados na Figura 38.

Figura 38 Alteração da rigidez microestrutural das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

Ao observar o gráfico de G' fica evidente que o aumento no teor de silicato de sódio aumentou a rigidez estrutural para um mesmo tempo de análise. Analisando em conjunto com o tempo de pega, também é possível observar que independente do teor de silicato de sódio, as pastas já tinham adquirido rigidez microestrutural antes mesmo do tempo pega, o que corrobora com a ideia de aglomeração/floculação das pastas, que se origina essencialmente através do contato entre as partículas.

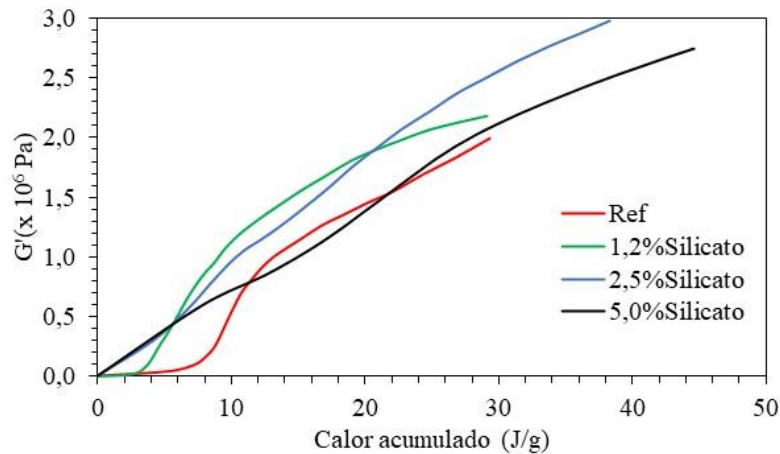
No entanto, utilizando-se somente ensaios de reometria oscilatória não é possível compreender, por exemplo, se as pastas apresentam condições de trabalhabilidade, ao mesmo tempo em que a utilização dos ensaios para o acompanhamento da reação química não permite inferir nenhuma discussão sobre o ganho de consistência da pasta em função da microestrutura formada. Por essa razão, a análise combinada de ambas as técnicas torna uma alternativa quando se objetiva a compreensão dos fenômenos predominantes na transição do comportamento fluido-sólido.

6.3.2.1 Correlação do ganho de consistência G' vs calor acumulado

Conforme discutido anteriormente, para compreender os fenômenos predominantes na transição do comportamento fluido-sólido em sistemas reativos, a análise

combinada pode ser uma alternativa, na Figura 39 são apresentadas as curvas das pastas avaliadas.

Figura 39 G' vs calor acumulado das pastas cimentícias com cimento puro (ref) e cimento com 1,2,2,5 e 5,0% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

A pasta de referência, sem silicato, tem um comportamento bem adequado e característico de uma pasta cimentícia, durante a baixa liberação de calor não é observado um aumento da rigidez microestrutural, a medida em que a pasta vai hidratando, as reações vão acontecendo e a liberação de calor aumenta, nessa etapa, próximo de 8 J/g de calor, ocorre um aumento microestrutural considerável, nesse momento, as reações de hidratação se tornam predominantes devido a intensa formação de Portlandita e C-S-H (estágio III da hidratação) (Scrivener; Juilland; Monteiro, 2015). Após esse intenso crescimento microestrutural, pouca alteração é observada depois, muito provavelmente porque já estava consolidada. Para a pasta de cimento com 1,2% de silicato, esse comportamento se altera, principalmente no início, aproximadamente em 4 J/g, praticamente a metade da referência, já possível observar um ganho na rigidez microestrutural, que também está diretamente associada à antecipação das reações de hidratação, conforme visto na Figura 30.

As pasta 2,5 e 5,0% de silicato de sódio, tem um comportamento muito parecido inicialmente, até aproximadamente 5 J/g, as pastas tem um comportamento linear, adquirindo rigidez a medida em que o calor acumulado cresce, aparentemente com a componente física e química iguais porém, após esse instante, 2,5% de silicato de sódio aumenta a rigidez com mais intensidade do que 5,0% indicando que a

contribuição da componente física no processo de endurecimento foi mais significativa, basta observar a inclinação da curva.

6.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foi possível compreender o impacto do teor de silicato de sódio nas pastas cimentícias na reação de hidratação, na retração química e nas propriedades reológicas. Na reação de hidratação, ficou claro que a medida em que se aumentou o teor de silicato de sódio, o período de indução diminuiu, reduzindo conseqüentemente o tempo de pega das pastas. Esse efeito pode ser atribuído aos íons alcalinos do silicato de sódio acelerando a reação dos íons cálcio. Além disso, a taxa de reação que tem relação com a quantidade de hidratados formados também foi reduzida, possivelmente impactado pelo aumento do pH, que impossibilitou a formação do C-S-H entre outros hidratados.

Os resultados de retração química seguiram a mesma tendência dos resultados de reação química, ficando evidente que a retração química está ligada com a taxa de reação, ou seja, quanto menor a taxa de reação, menor a retração química. 5,0% de silicato de sódio foi o teor que menos retraiu, 2,5 e 1,2% ficaram com valores absolutos muito próximos, apesar de seguirem a tendência de redução.

Através dos resultados da reometria rotacional, foi observado um aumento tanto na tensão de escoamento quanto na viscosidade aparente à medida que o teor de silicato de sódio aumentou. Além disso, todas as pastas apresentaram um comportamento pseudoplástico. Os resultados de reometria oscilatória permitiram que fosse visualizado o ganho de rigidez das pastas cimentícias ao longo do tempo, sendo o ganho microestrutural maior nas pastas com silicato de sódio. A combinação da reometria oscilatória aos resultados de reação química, puderam esclarecer sob qual influencia as pastas cimentícias estariam na transição do comportamento fluido-sólido, tendo visto que a componente física resulta na aglomeração, contato intenso entre as partículas e a componente química, responsável pela coagulação, resultante da evolução das reações de hidratação do sistema. A pasta referência e 1,2% de silicato

de sódio, durante os instantes iniciais estão mais sob influência química do que física, quando comparado a 2,5 e 5,0%, que inicialmente já estão com uma rigidez, possivelmente motivado pelo aumento do pH da suspensão, conforme observado por BRYKOV et al., (2002).

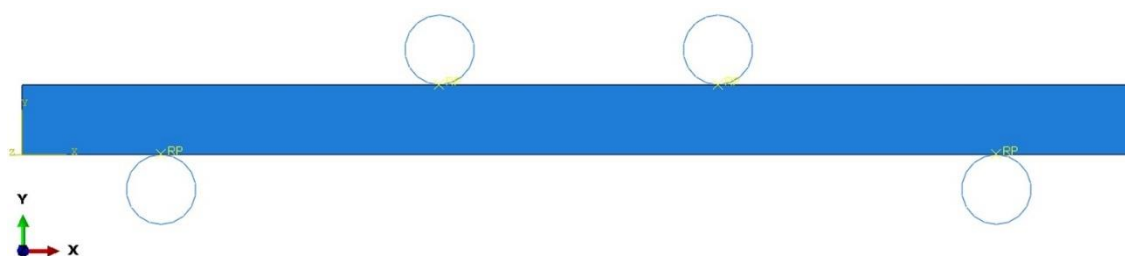
7 DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO 2D PELO MEF PARA AVALIAÇÃO DAS TENSÕES NORMAIS, CISALHAMENTO E DA PROTENSÃO QUÍMICA

O modelo desenvolvido simulou as condições experimentais do ensaio de tração na flexão em 4 pontos realizadas nos componentes proposto no item 8. Para isso, foi utilizado um software comercial ABAQUS Standard 2018 (Abaqus/CAE User's Manual, 2018). O modelo realizado foi em 2D aplicando formulações contidas no próprio software.

7.1 Criação do modelo 2D (Monolítico)

A geometria do modelo foi definida por meio da criação dos apoios e do corpo de prova. Os apoios são representados por geometrias 2D com seção transversal circular, tendo um raio de 5 mm. Já o corpo de prova possui uma forma retangular, com comprimento L e altura H, onde os valores nominais adotados são $L = 160$ mm e $H = 10$ mm. As distâncias entre os cutelos inferiores foram de 120 mm e as distâncias dos cutelos superiores foram de 40 mm. Na Figura 40 é ilustrada a geometria final desenvolvida.

Figura 40 Geometria criada a partir do software Abaqus.



Fonte: Autor.

Os modelos sólidos são considerados homogêneos. Adotou-se para os materiais utilizados o modelo de material elástico linear (Lei de Hooke generalizada) e coeficiente de Poisson.

No modelo de elementos finitos, é essencial considerar a interação entre os apoios e o corpo de prova para estabelecer o contato entre eles. Para isso, foram definidos dois tipos de comportamento. O primeiro é o comportamento tangencial, com uma formulação sem atrito (*frictionless*), o que implica que não há resistência ao deslizamento entre as superfícies de contato. O segundo é o comportamento normal, com uma formulação do tipo contato rígido (*hard contact*), que impõe restrições ao movimento relativo das superfícies de contato perpendicularmente à direção tangencial.

As condições de contorno estabelecidas para os cutelos inferiores foram de travamento de engaste, o que restringe o movimento em todas as direções. Já para os cutelos superiores, foram aplicadas condições de travamento horizontal e de rotação, permitindo o deslocamento vertical livremente.

A malha utilizada no estudo consiste em 100 mil nós e aproximadamente 33 mil elementos do tipo tetraédrico. Foi realizado um estudo de convergência de malha, abordado no capítulo 7.4. O tipo de análise adotado foi o estado plano de tensão, que envolve uma simplificação do modelo de elasticidade tridimensional, na qual as tensões na direção fora do plano do modelo são desprezadas. Essa simplificação é empregada para reduzir a complexidade computacional e obter resultados aproximados de forma eficiente. O modelo adotado é uma análise estática com uma suposição de linearidade geométrica.

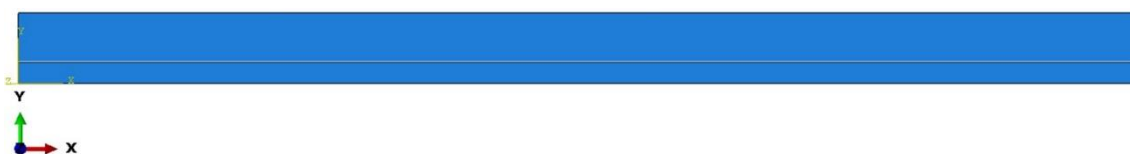
7.2 Criação do modelo 2D em camadas

O procedimento para montagem do modelo 2D do componente em camadas é muito semelhante ao modelo monolítico, no entanto existem algumas diferenças importantes que serão destacadas.

O corpo de prova do modelo possui uma forma retangular com comprimento L e altura H , com valores nominais de $L = 160$ mm e $H = 10$ mm. O componente em camadas foi dividido em duas configurações geométricas: 7:3 e 8,5:1,5. Essas configurações

representam a proporção de altura entre os materiais, onde 7 mm correspondem a um material e 3 mm correspondem ao outro material, na Figura 41 é ilustrada a geometria. O mesmo padrão foi adotado para a configuração 8,5:1,5. Os materiais foram considerados como sólidos homogêneos. Foi utilizado o modelo de material elástico linear, baseado na Lei de Hooke generalizada, juntamente com os coeficientes de Poisson e de expansão térmica.

Figura 41 Geometria em camadas da configuração (7:3)



No contato entre as camadas, foi aplicado um *Constraints* do tipo *Tie*, que pressupõe que as superfícies permaneçam em contato, impedindo qualquer movimento relativo entre as camadas.

As condições de contorno estabelecidas para a aplicação da retração no componente consideram a sua aplicação em todo o volume do material, garantindo retração distintas entre as camadas, ou seja, com diferentes coeficiente de dilatação.

O valor inicial é zero, mas para induzir a retração, é aplicada uma temperatura com um valor não nulo e negativo, criando um gradiente térmico. Isso resulta em tensões de protensão na região selecionada. Em relação ao coeficiente de expansão utilizado e à calibração desse valor em relação aos resultados experimentais, todos os procedimentos serão abordados e detalhados no item 7.5.

A malha utilizada para o modelo atual consistiu em 100 mil nós, com cerca de 33 mil elementos, mantendo a configuração do modelo anterior. No entanto, foi adotado um tipo de elemento diferente, chamado *Coupled Temperature Displacement*, que permite a detecção e análise das tensões térmicas aplicadas. Esse tipo de elemento é capaz de considerar o acoplamento entre a temperatura e o deslocamento do material, possibilitando uma análise das tensões geradas devido às variações térmicas.

7.3 Cálculos analíticos

É possível determinar as tensões normais em uma viga de eixo retilíneo com seção transversal com um plano de simetria e com momento fletor aplicado induzindo curvatura e mantendo esta simetria. Pode-se utilizar a equação (17), mais conhecida como fórmula das tensões normais na flexão. A hipótese de que as seções transversais inicialmente planas permaneçam planas após a deformação por flexão é assumida. Também é considerado como hipótese o comportamento dos materiais analisados dentro do regime elástico linear.

$$\sigma = \frac{MY}{I} \quad (17)$$

Onde M é o momento interno, valor extraído do diagrama de momento fletor, Y é a distância perpendicular do eixo da viga até o ponto onde se deseja calcular a tensão, I é o momento de inércia da seção transversal (Hibbeler, 2009).

A determinação das tensões normais em sistemas com camadas foi realizada da mesma maneira que a equação (17), porém ao utilizar a mesma equação, foi considerado o método da seção transformada, que considera um elemento feito de dois materiais, normalmente com módulos de elasticidade diferentes, sejam homogêneos por meio de um fator de conversão (razão entre os diferentes módulos de elasticidade), o fator de conversão é utilizado para calcular uma nova seção transversal que é feita de um único material, HIBBELER, (2009) de maneira minuciosa detalha o equacionamento.

As tensões de cisalhamento na seção transversal foram determinadas a partir da equação (18) Onde V é a força cortante, determinada pelo diagrama de esforços cortantes, Q momento estático de área, I é o momento de inércia da seção transversal inteira e t é a largura da seção transversal.

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (18)$$

A tensão de cisalhamento dos materiais em camadas também poderá ser definida a partir da equação (18), no entanto é necessário calcular Q e I da seção transformada do elemento conforme realizado na fórmula da flexão. Além disso, HIBBELER, (2009)

atenta que nesse caso, a largura t na formula permanece a largura verdadeira da seção transversal no ponto qual o ponto da tensão de cisalhamento deverá ser calculada.

7.4 Estudo de sensibilidade da malha

O estudo de sensibilidade da malha consiste em avaliar e comparar as tensões normais e as tensões de cisalhamento que ocorrem na seção transversal do componente. As condições de contorno do problema foram as mesmas descritas no capítulo 7.1. Foram adotadas para esse problema um material com módulo de elasticidade de 6GPa e um coeficiente de Poisson de 0,25. As propriedades geométricas da seção transversal foram 10 mm de altura x 40 mm de largura. O deslocamento total submetido na amostra foi de 0,05 mm. A escolha da malha final foi baseada na análise da variação das tensões em relação as malhas avaliadas e no custo computacional (convergência de malha).

Para esse estudo, foram avaliadas cinco malhas discretizadas diferentes, na Tabela VI são apresentados os resultados das simulações.

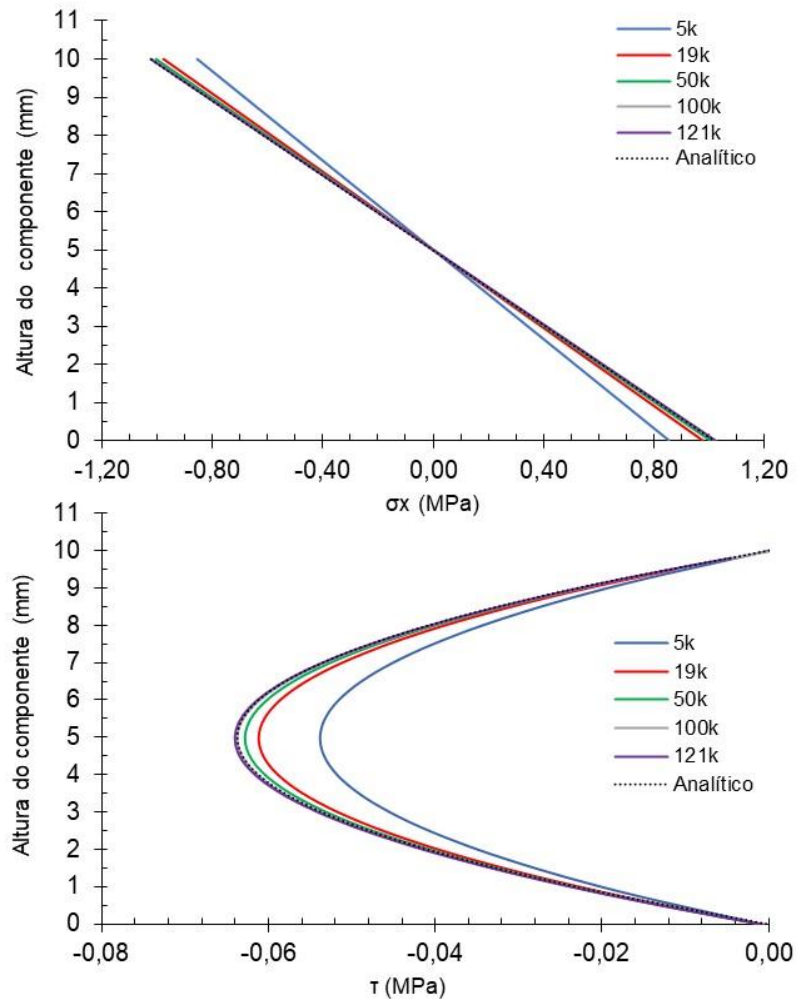
Tabela VI Análise das simulações com diferentes malhas. Análise realizada considerando um deslocamento total de 0,05 mm.

Número de nós da malha	σ_{xx} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	Diferença σ_{xx} (%)	Diferença τ_{xy} (%)	Tempo computacional (min:seg)
5k	0,85	0,054	13,27	11,48	00:45
19k	0,98	0,061	2,00	3,17	01:03
50k	1,00	0,063	1,96	1,56	02:25
100k	1,02	0,064	0	0	04:23
121k	1,02	0,064	-	-	05:09

Fica nítido que à medida em que se aumenta o número de nós, a diferença entre os valores absolutos das simulações tende a reduzir, efeito esperado devido a convergência de malha, já para o tempo computacional, esse comportamento é inverso, a medida em que se aumenta o número de elementos, o tempo necessário para realizar as simulações tende a aumentar.

Ao observar os resultados da malha com 100k nós, é possível perceber que a diferença nas tensões normais e nas tensões de cisalhamento é zero, ou seja, não há mudança apreciável nos resultados a partir de 100k nós. Em relação ao custo computacional, notou-se que o da malha de 121k nós foi maior frente a diferença no resultado, ou seja, o aumento na malha não trará melhorias significativas nos resultados, introduzindo ainda um custo computacional maior quando comparado a malha anterior (100k). Apenas para tornar análise mais ilustrativa, os resultados são apresentados na Figura 42.

Figura 42 Análise das tensões normais e tensões de cisalhamento dos diferentes níveis de refinamento de discretizações.



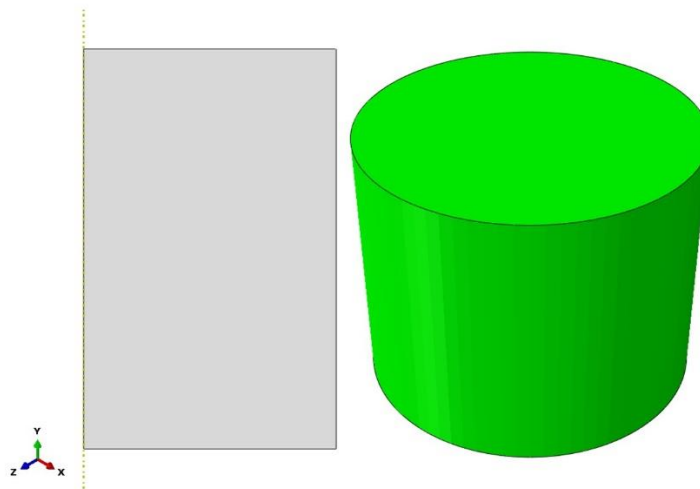
Fonte: Autor.

7.5 Calibração do coeficiente de expansão

O objetivo desse modelo é calibrar o coeficiente de expansão para uma dada variação fixa e fictícia de temperatura, de modo a promover a retração geométrica no modelo de elementos finitos. Os resultados obtidos da variação da altura, devem ser os mesmos valores obtidos experimentalmente da retração química detalhado e discutido anteriormente no capítulo 6.1 e 6.1.4.

Para realizar a análise por elementos finitos, foi desenvolvido um novo modelo com a mesma geometria do corpo de prova utilizado no experimento. A hipótese geométrica é a de uma cinemática axissimétrica, que considera a simetria ao longo do eixo de rotação. O corpo de prova possui uma seção transversal circular com raio de 10,41 mm e altura H de 16,48 mm, na Figura 43 é ilustrado a geometria 2d (seção de revolução) e 3d. O eixo de revolução considerado é a direção y global.

Figura 43 Modelo axissimétrico criado, a esquerda o modelo 2d e a direita o modelo 3d.



Fonte: Autor

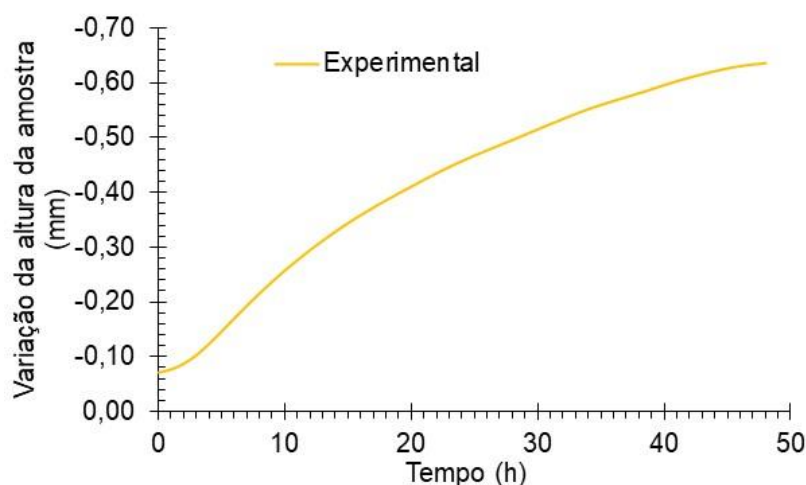
Os materiais foram tratados como sólidos homogêneos, e foram utilizados modelos de material com coeficientes de Poisson e expansão térmica adequados. As condições de contorno estabelecidas no modelo foram as seguintes: na parte inferior da geometria, foi aplicado um travamento vertical, permitindo apenas deslocamento horizontal; na parte direita da geometria, foi aplicado um travamento horizontal, permitindo apenas deslocamento vertical. Além disso, foi aplicada uma temperatura negativa em toda a geometria para que fossem analisados os deslocamentos

verticais. A malha utilizada no modelo consistiu em 13 mil nós, e o tipo de elemento adotado foi o *Coupled Temperature Displacement*, para esse caso, a não necessidade de apresentar a convergência de malha pode ser justificada pela presença de uma solução analítica de resolução simples, que proporciona uma referência confiável para a verificação dos resultados obtidos.

7.5.1 Estudo da variação do coeficiente de expansão e da temperatura

O objetivo deste estudo foi determinar a variação vertical, ou seja, a alteração na altura do corpo de prova, da pasta cimentícia contendo 2,5% de silicato de sódio durante o ensaio experimental de retração química. A variação volumétrica obtida no ensaio experimental permitiu calcular a variação da altura da amostra, simplesmente dividindo a variação volumétrica pela área da amostra, na Figura 44 é ilustrado os resultados obtidos ao longo de 48 horas. As pequenas variações observadas no início da medição são atribuídas às pequenas imprecisões inerentes ao método de quantificação empregado, por esta razão não foi possível quantificar a variação de altura partindo do zero.

Figura 44 Variação da altura da amostra da pasta de cimento com 2,5% de silicato em função do tempo.



Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 44 que a variação ao longo das 48 horas é de aproximadamente 0,64 mm. No entanto, é relevante destacar que, para esse caso, o objetivo adotado

na modelagem de elementos finitos foi de uma hora, resultando em um valor de 0,076 mm. Essa escolha foi feita para assegurar o mesmo intervalo de tempo entre a formação das camadas durante a moldagem dos corpos de prova, conforme será detalhado no capítulo 8.

O estudo apresentado foi dividido em duas etapas, na primeira etapa foi analisado um coeficiente de expansão no valor de $1,10 \text{ E-}3$ em diferentes variações de temperaturas e na segunda etapa feito ao contrário, variou-se o coeficiente de expansão e manteve constante a temperatura, na Tabela VII são detalhados todas as simulações e os resultados obtidos. Para análise em uma hora, é importante citar que foi considerado um coeficiente de Poisson de 0,50, que assume a condição da pasta cimentícia com um comportamento incompressível.

Tabela VII Análise da variação da altura da pasta cimentícia em função da variação da temperatura.

	Coeficiente de expansão ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Δ Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Variação da altura (mm)
1ªetapa	1,100E-4	-1	0,0049
		-2	0,0098
		-4	0,0195
		-6	0,0292
2ªetapa	1,11E-3	-1	0,054
	1,15E-3		0,056
	1,22E-3		0,059
	1,44E-3		0,070
	1,56E-3		0,076

Fonte: Autor.

Após analisar os resultados da primeira etapa, observou-se uma variação na altura da amostra, sendo o valor mais próximo encontrado na temperatura de -6, com uma retração de 0,0292 mm. No entanto, esse valor ainda não foi suficiente. Para a segunda etapa, fixou-se a variação de temperatura em -1 e variou-se o coeficiente de expansão. Com um coeficiente de expansão de $1,56\text{E-}3$, foi possível atingir o valor experimental de 0,076 mm.

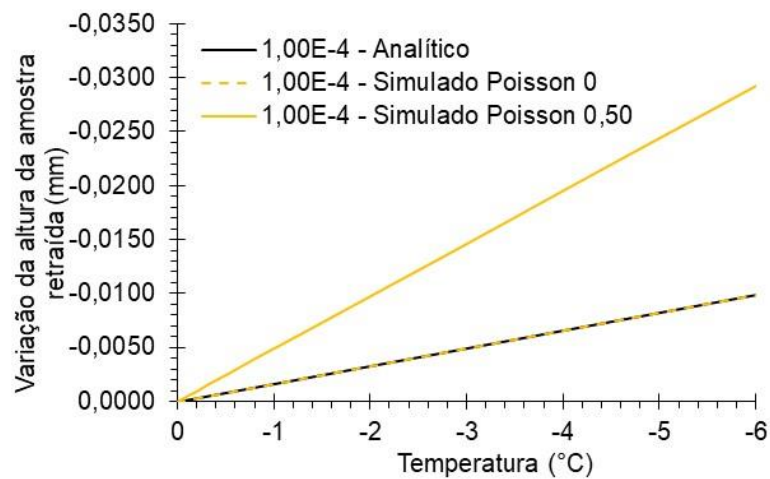
Vale ressaltar que nesse modelo, a pasta cimentícia é considerada um sólido. Ao assumir um coeficiente de Poisson de 0,5, o sólido é incompressível, ou seja, não sofre alterações significativas de volume sob a ação de cargas. Essa suposição é apropriada devido ao fato de que, dentro de um intervalo de aproximadamente uma hora, o material cimentício mantém-se em seu estado fresco. No entanto, ao

estabelecer o coeficiente de Poisson como zero, observa-se que o modelo analítico se adequa com equação (19) conforme ilustrado na Figura 45.

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta \theta \quad (19)$$

A equação (19) é descrita onde ΔV é a variação volumétrica, V_0 é o volume inicial, γ é coeficiente de dilatação volumétrica, normalmente considera-se o valor como sendo três vezes maior que o coeficiente da dilatação linear e o $\Delta \theta$ que é variação de temperatura.

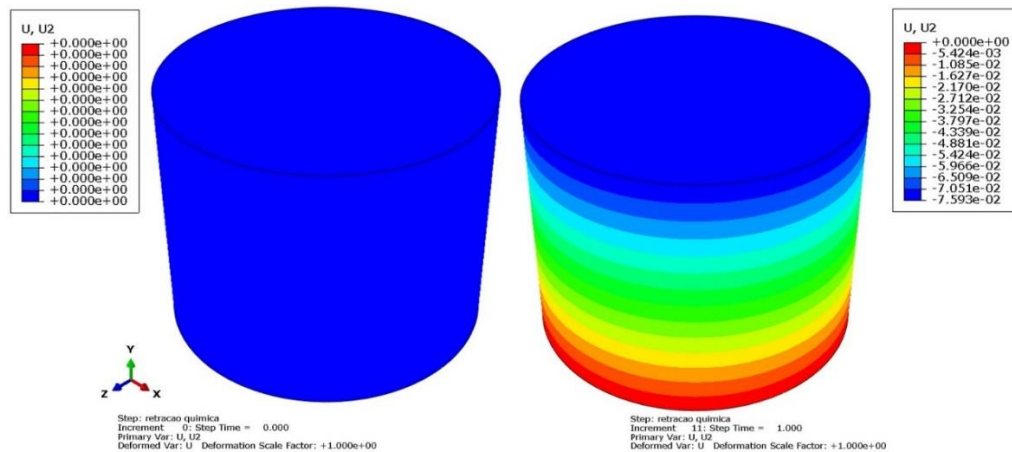
Figura 45 Variação da altura da amostra em função da temperatura para um mesmo coeficiente de expansão.



Fonte: Autor.

Na Figura 46 são apresentadas as ilustrações da simulação, à esquerda é ilustrado a simulação no instante de tempo 0 horas, sem deslocamento, conforme indica a legenda, e à direita é ilustrado a simulação no instante de tempo em uma hora, com deslocamento vertical de 0,076 mm.

Figura 46 Simulação da variação da altura da pasta cimentícia com 2,5% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

7.6 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram desenvolvidos modelos computacionais baseados em elementos finitos com o objetivo de realizar previsões de deslocamentos e análises de tensões normais e de cisalhamento em um corpo de prova submetido a um ensaio de flexão de quatro pontos. Além disso, foi conduzida a calibração dos resultados referentes à retração química, empregando uma modelagem do experimento de retração química. No contexto do modelo do ensaio de flexão de quatro pontos, foi conduzido um estudo preliminar para avaliar a sensibilidade da malha, resultando em uma configuração contendo 100 mil nós. Já no caso do modelo de calibração da retração química (um modelo axissimétrico), foi realizado um estudo para ajustar o coeficiente de expansão e a temperatura. Os resultados obtidos indicaram que, considerando um tempo de reação de uma hora, o valor mais adequado para representar a retração química foi um coeficiente de expansão de $1,56E-3$, em uma temperatura negativa de $1^{\circ}C$. Importante ressaltar que esses valores estão sujeitos a variações de acordo com o tempo de hidratação analisado.

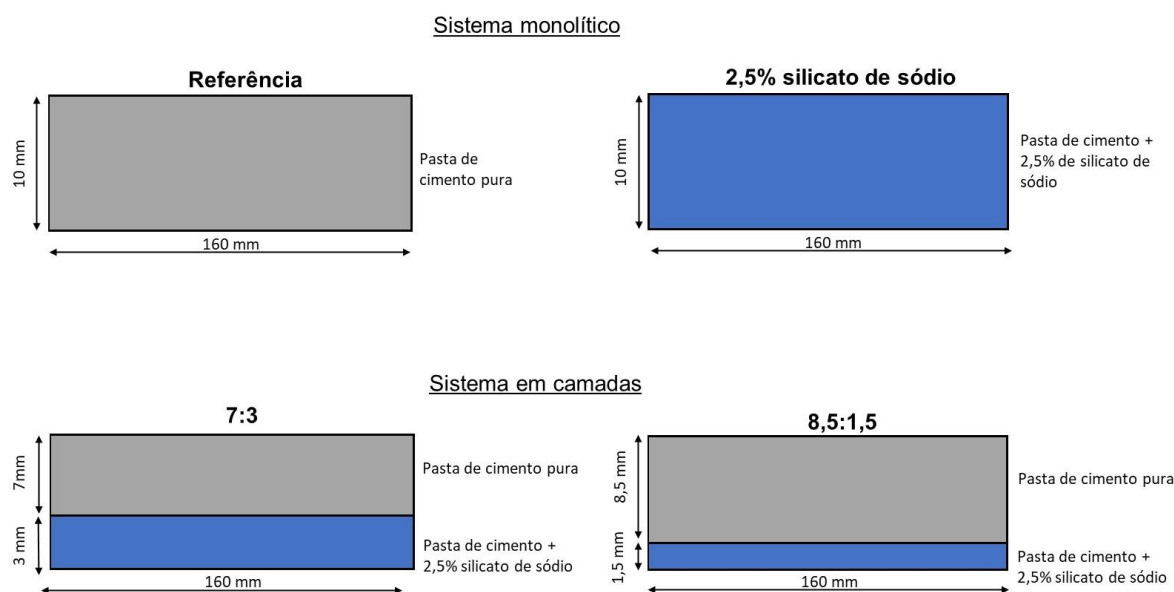
8 MOLDAGEM/CURA DOS CORPOS DE PROVA E AVALIAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Nessa etapa do trabalho as moldagens se dividiram em duas partes: a primeira parte foi a moldagem dos corpos de prova cilíndricos para alimentar os dados de entrada do modelo. Já a segunda parte, foram moldados os corpos de prova do tipo prismático (10 mm altura x 40 mm largura x 160 mm comprimento) para avaliação da protensão química. Todos os ensaios foram realizados com 28 dias de cura.

Na primeira etapa foram moldadas apenas duas composições: Referência (pasta de cimento pura) e 2,5% Silicato (pasta de cimento + 2,5% de silicato de sódio). Para cada composição foram moldados 10 corpos de provas cilíndricos. As dimensões do molde foram de 60 mm de altura e 50 mm de diâmetro.

Na segunda etapa foram moldados quatro sistemas diferentes, referência (corpo de prova monolítico), 2,5% silicato de sódio (corpo de prova monolítico), 7:3 (7 mm – pasta de cimento pura, 3 mm – pasta de cimento com 2,5% silicato de sódio) 8,5:1,5 (8,5 mm pasta de cimento pura, 1,5 mm – pasta de cimento com 2,5% silicato de sódio). O intervalo entre a moldagem da camada inferior e a superior foi de 1 hora, na Figura 47 são apresentadas as geometrias.

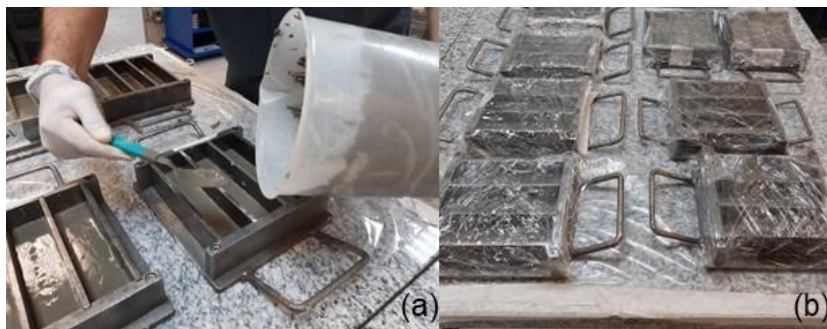
Figura 47 Configuração dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Foram moldados um total de 12 corpos de prova por sistema avaliado. Logo após a moldagem, tanto os moldes cilíndricos como os prismáticos foram envelopados com papel filme para evitar a perda de água para o ambiente e conseqüentemente evitar a retração por secagem, na Figura 48(a)e(b) são apresentadas de maneira ilustrativa os procedimentos.

Figura 48 Moldagem dos corpos de prova. Em (a) moldagem dos componentes prismáticos com o auxílio de uma colher e um mini vibrador. Em (b) os corpos de prova envelopados com papel filme para evitar o contato com atmosfera.



Fonte: Autor.

8.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo elástico foi realizado em um equipamento da Proceq Pundit Lab+(Figura 49), com transdutores cilíndricos de 2 cm de diâmetro, frequência de 200 kHz e resolução de 0,1 μ s.

Para realizações das medidas, foi aplicado uma fina camada de gel nos transdutores, posicionou-os sob a face do corpo de prova e foi transmitido um pulso elétrico de baixa frequência numa faixa entre 54 kHz e 1 MHz. Foi medido então o tempo decorrido pela onda no corpo de prova. Por meio da equação (20) obtemos o valor do módulo elástico.

Onde E é módulo de elasticidade dinâmico em GPa, ρ é a densidade de massa aparente em g/cm^3 , v é a velocidade de propagação de onda ultrassônica em $mm/\mu s$, e ν é o coeficiente de Poisson. Conforme detalhado na Dissertação de Mestrado de

GARCIA (2017), deve-se levar em consideração que valor do módulo de elasticidade dinâmico correspondente a uma deformação instantânea muito pequena, geralmente considera-se módulo de elasticidade tangente inicial. Importante citar que o coeficiente de Poisson utilizado foi o mesmo valor considerado nas simulações 0,25.

Figura 49 Equipamento para medição do módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Autor.

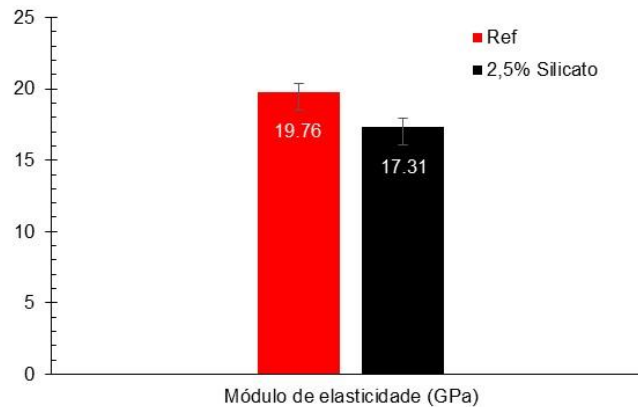
$$E = \rho v^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (20)$$

8.1.1 Resultado

Na Figura 50 é apresentado o resultado do módulo de elasticidade dinâmico das pastas cimentícias avaliadas, de acordo com os resultados observados em literatura, os resultados experimentais não expressaram a rigidez adequada das pastas, provavelmente devido ao tipo de corpo de prova utilizado para realizar os ensaios. De maneira geral, os valores de módulo de elasticidade tangente inicial para uma pasta de cimento com relação água/cimento de 0,50 tende a ser em torno de 5 a 10 GPa, valores que variam devido ao tipo de cimento e o método de mistura (Maia *et al.*, 2012; Oliveira, 2020; Stefan *et al.*, 2010).

Os valores de módulo de elasticidade adotados nas simulações tanto para a pasta de cimento pura, como a pasta de cimento com 2,5% de silicato foi de 6 GPa. A escolha se baseia nos dados obtidos em literatura e na aderência adequada dos resultados experimentais apresentados posteriormente no capítulo 9.

Figura 50 Módulo de elasticidade dinâmico da pasta de cimento referência e com 2,5% de silicato de sódio



Fonte: Autor.

8.2 Compressão axial

Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica da marca Emic modelo DL10000 com célula de carga de 10 toneladas. A velocidade de ensaio foi de 490N/s.

A resistência a compressão foi calculada de acordo com a equação (21), onde F é a força máxima obtida na máquina de ensaio e A , é a área do corpo de prova ensaiado

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (21)$$

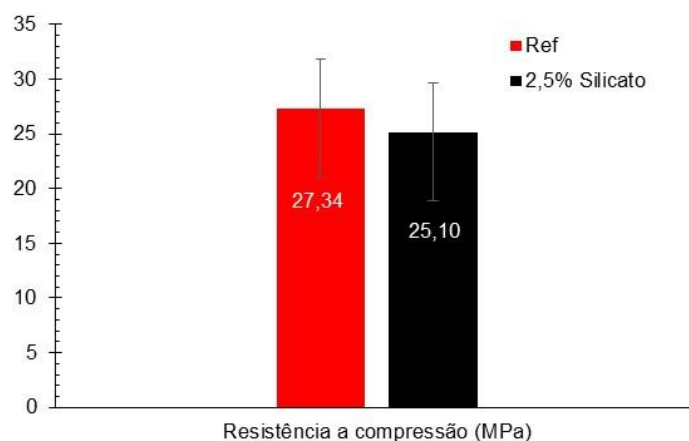
Devido à relação altura/diâmetro menor que 1,94 dos corpos de prova ensaiados, a força máxima foi majorada conforme sugerido pela norma NBR 5739.

8.2.1 Resultado

Na Figura 51 apresenta os resultados de resistência à compressão axial das pastas cimentícias Ref e 2,5% Silicato, sendo que a pasta de cimento sem silicato de sódio obteve resistência ligeiramente superior à pasta de cimento com silicato de sódio. No entanto, não houve diferença estatisticamente significativa, de acordo com a análise

estatística realizada pelo método de Anova de fator único com nível de significância de 5%. A resistência mecânica aos 28 dias da pasta de cimento com silicato não foi diretamente influenciada pelo módulo de sílica e pelo teor de silicato de sódio utilizados, que permitiram que as reações de hidratação evoluíssem sem perturbações significativas, enquanto outros trabalhos com silicato de sódio com módulo de sílica (MS) na faixa de 1 e 2 em teores de 1 a 8% tiveram redução de 20 a 25% da resistência mecânica aos 28 dias, possivelmente relacionada a rápida e defeituosa formação microestrutural da pasta conforme avaliado por SANTANA-CARRILLO et al., (2021). É importante citar que o ganho de resistência mecânica em sistemas de silicato tende realmente a ser com módulo de sílica em torno de 3 contudo, esse fenômeno é mais evidente em idades mais avançadas, geralmente entre 90 e 180 dias, quando o teor de SiO₂ age como um gel de sílica, reagindo com os produtos de hidratação do cimento Portland.

Figura 51 Resistência a compressão axial da pasta de cimento referência e com 2,5% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

8.3 Porosidade total pelo método Arquimedes

Após o ensaio de resistência a compressão, uma parte do corpo de prova foi para medição da porosidade a partir do método de Arquimedes. Todas as dez amostras foram pesadas inicialmente, estando em condições secas portanto, foram levadas a uma estufa a 40°C durante 24 horas. Foi quantificado a massa seca (m_s), e logo após

os corpos-de-prova foram imersos em água e submetidos a vácuo por cerca de 2 horas para forçar sua intrusão nos poros. Em seguida, as amostras foram pesadas imersas (m_i) e úmidas (m_u). Com esses dados foi possível determinar o volume aparente de poros de acordo com a equação (22). Onde VAP é o volume aparente de poros.

$$VAP (\%) = \frac{m_u - m_i}{m_u - m_s} \times 100\% \quad (22)$$

Com as informações de volume aparente de poros, calcula-se a DAP densidade aparente conforme ilustra a equação (23). Onde a absorção de água é $((m_u - m_s) / m_u)$ e ρ solvente foi adotado da água (1 g/cm^3).

$$DAP (\text{g/cm}^3) = \frac{VAP(\%)}{\text{Absorção de água}(\%)} \times \rho \text{ solvente} \quad (23)$$

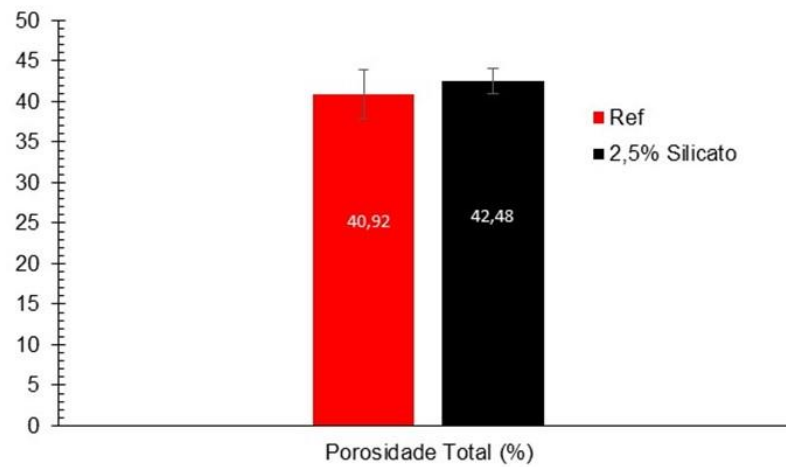
Por fim, se calcula a porosidade total de acordo com a equação (24) Onde PT é a porosidade total, ρ_{REL} é a DAP/Densidade real do cimento ou resultante dos pós que compõem a composição cimentícia.

$$PT (\%) = (1 - \rho_{REL}) \times 100\% \quad (24)$$

8.3.1 Resultado

Na Figura 52 é apresentado o resultado de porosidade total, a comparação entre os resultados estatísticos indica que não foi possível detectar diferença nas médias analisadas, resultado esperado em teoria, tendo visto que não houve alteração da relação da quantidade de água total além dos resultados de resistência a compressão axial. Nesse caso em específico, é razoável assumir que em idades mais avançadas, possivelmente a porosidade do sistemas com silicato de sódio deva diminuir em um processo lento devido à formação dos hidratados formando uma rede mais densa conforme reportado na pasta de cimento com relação 0,5 de FONSECA, (2021).

Figura 52 Porosidade total da pasta de cimento referência e com 2,5% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

8.4 Tração na flexão em quatro pontos

O ensaio de tração na flexão em quatro pontos (Figura 53 (a)) foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 5569, com célula de carga de 1 kN. As distâncias entre os cutelos superiores foram de 40 mm e dos cutelos inferiores foram de 120 mm. O deslocamento foi de 0,001 mm/s.

Figura 53 Ensaio de tração na flexão em quatro pontos. Em (a) o aparato montado com o corpo de prova cimentício. Em (b) detalhe para inserção de uma borracha para distribuir os esforços homogeneamente.



Fonte: Autor.

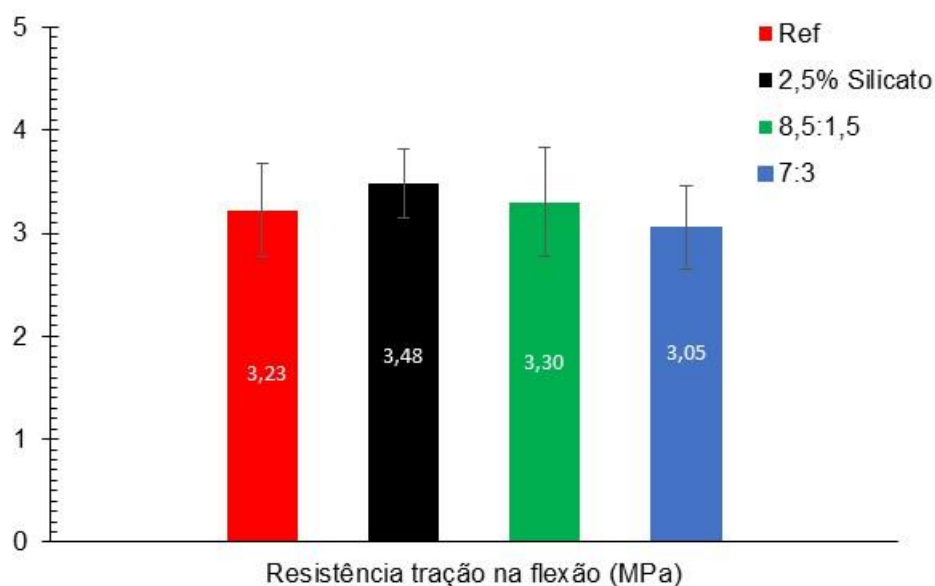
Para melhorar a distribuição das tensões, foram adicionadas duas borrachas com 0,5 mm de espessura conforme ilustra o detalhe da Figura 53 (b).

A resistência à tração na flexão em quatro pontos foi determinada através da Equação (17).

8.4.1 Resultado

Os resultados de resistência a tração na flexão em 4 pontos dos componentes cimentícios monolíticos (Ref e 2,5% Silicato) e os moldados em camadas (8,5;1,5 e 7:3) são apresentados na Figura 54.

Figura 54 Resistência a flexão 4 pontos dos componentes cimentícios Ref, 2,5% Silicato, 8,5;1,5 e 7:3.



Fonte: Autor.

De acordo com os resultados estatístico (ANOVA) todas as médias avaliadas são estatisticamente as mesmas considerando um nível de significância de 5%. Percebe-se que a composição Ref (pasta de cimento pura) e a composição com 2,5% de silicato (pasta de cimento + 2,5% silicato) tiveram a mesma porosidade total corroborando com os resultados de resistência à tração na flexão e resistência à

compressão. Segundo METHA; MONTEIRO, (2014) a relação entre a porosidade e a resistência são inversamente proporcionais, sendo assim, não havendo diferença na porosidade total, teoricamente não se deve haver diferença na resistência mecânica e no módulo de elasticidade também. Em relação aos sistemas em camadas (8,5:1,5 e 7:3), os resultados seguiram a mesma tendência sem nenhum impacto estatístico significativo.

8.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo os resultados experimentais obtidos para os sistemas cimentícios monolítico indicaram que a adição de silicato de sódio à pasta de cimento não apresentou impacto significativo estatisticamente na resistência mecânica a compressão aos 28 dias e na porosidade total. O teste estatístico aplicado considerou um nível de significância de 5%.

Com relação ao módulo de elasticidade, é crucial salientar que os resultados experimentais obtidos não apresentaram a rigidez apropriada das pastas cimentícias, possivelmente em razão do tipo de corpo de prova empregado. Contudo, a literatura revela valores do módulo de elasticidade tangente inicial, situados entre 5 e 10 GPa.

Em relação aos sistemas em camadas (8,5:1,5 e 7:3), os resultados seguiram a mesma tendência dos resultados mecânicos das fases analisadas separadamente, sem nenhum impacto estatístico significativo.

9 COMPARAÇÕES MODELO NUMÉRICO VS EXPERIMENTAL

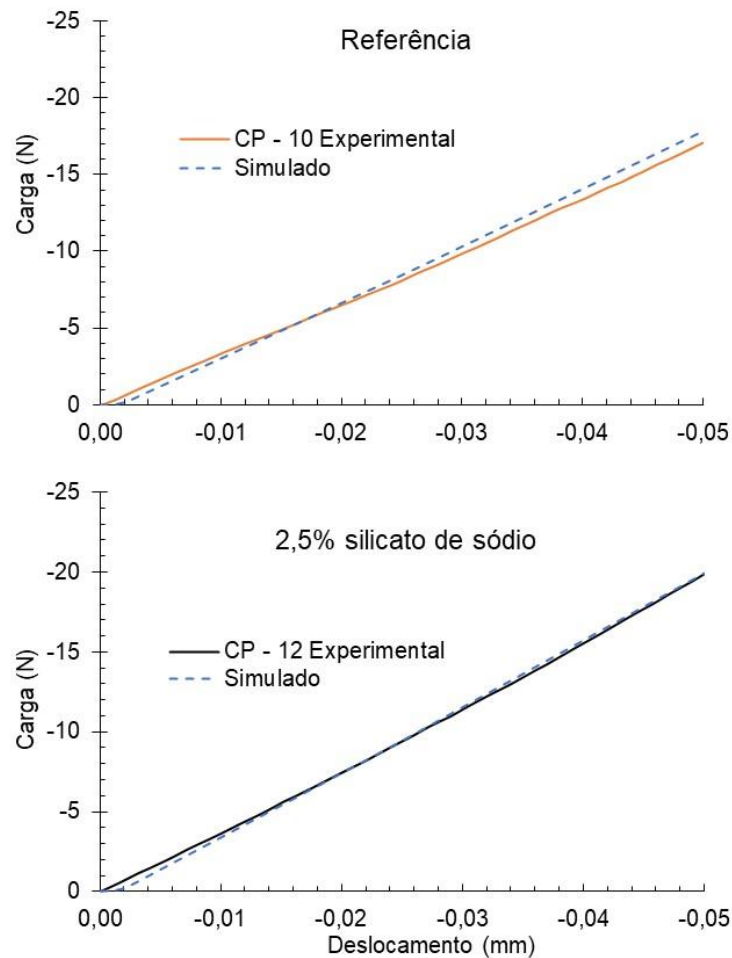
Nesta etapa, são apresentados os resultados das comparações numéricas e experimentais. Para avaliar as tensões normais e de cisalhamento nos modelos numéricos, foram definidas as propriedades dos materiais, como o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade, da seguinte maneira: O coeficiente de Poisson para a pasta de cimento de referência e o silicato de sódio foi mantido em 0,25. O módulo de elasticidade para ambas as pastas foi mantido em 6 GPa. É importante destacar que essa escolha foi baseada no intervalo de resultados reportados na literatura e nos resultados de carga versus deslocamento, que serão apresentados no capítulo 9.1.1.

Já para os modelos numéricos de previsão da protensão química, foram adotadas as propriedades do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de expansão. Os valores adotados serão detalhados e apresentados no capítulo 9.1.2.

9.1.1 Análise componente monolítico Ref e 2,5% Silicato de sódio

Na Figura 55 é apresentado o resultado da carga em função do deslocamento. O gráfico superior representa a amostra referência e o gráfico inferior representa 2,5% de silicato de sódio.

Figura 55 Carga vs deslocamento monolítico.



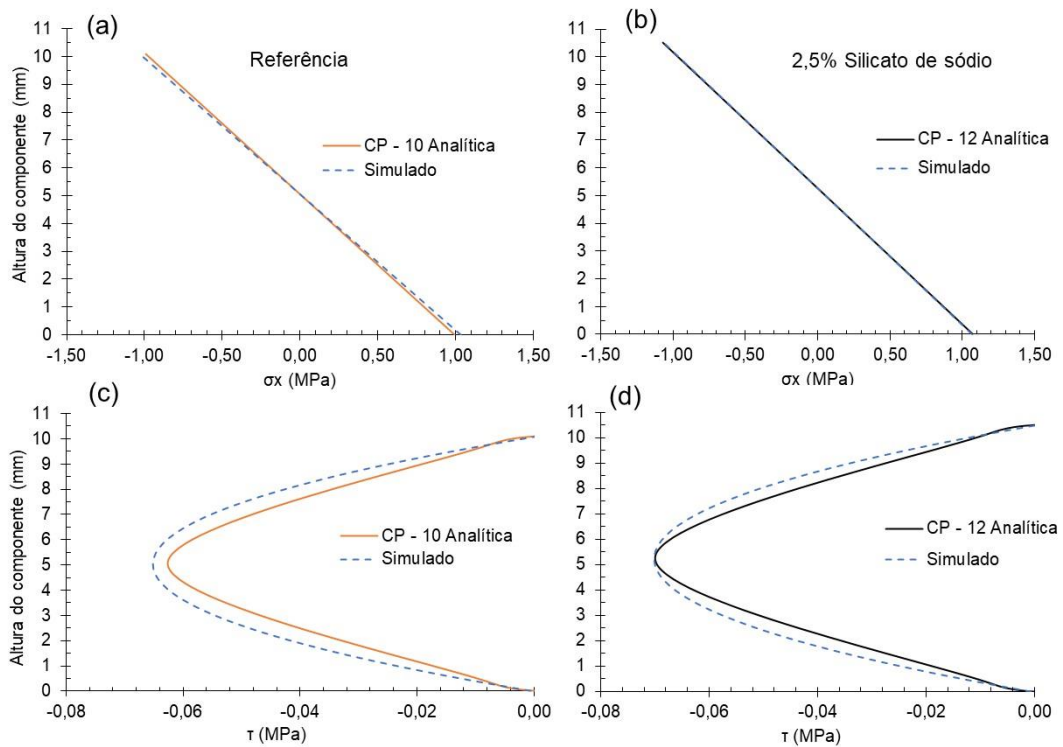
Fonte: Autor.

Observando a Figura 55, fica evidente que os resultados numéricos e experimentais obtidos foram considerados adequados. É relevante salientar que, durante a análise, foram conduzidas simulações utilizando diferentes módulos de elasticidade, conforme sugerido pela literatura e detalhado no capítulo 5.1.1. Após a comparação dos resultados com os dados experimentais, verificou-se que o módulo de elasticidade de 6 GPa apresentou a melhor concordância com os resultados experimentais. Portanto, essa escolha foi adotada para os modelos numéricos. Essa informação reforça a importância de considerar os parâmetros recomendados pela literatura e validar sua aplicação por meio dos resultados experimentais, visando obter uma maior precisão nas simulações numéricas. Além disso, é importante destacar que o deslocamento aplicado garante a condição de linearidade geométrica, uma vez que o deslocamento provoca uma deflexão no componente extremamente pequena, cerca de 2000 vezes menor que o comprimento da amostra entre os apoios.

A divergência nas cargas é atribuível, principalmente, às pequenas disparidades dimensionais apresentadas pelos corpos de prova. Enquanto o corpo de prova de referência CP-10 apresentava uma altura de 10,1 mm, o CP-12 com 2,5% de silicato apresentava uma altura de 10,5 mm. A fim de verificar essas variações geométricas, foram simulados outros corpos de prova com dimensões idênticas aos corpos de prova experimentais. As demais comparações encontram-se disponíveis no anexo dessa dissertação.

A Figura 56 apresenta os resultados das tensões normais e de cisalhamento para o sistema de referência e com 2,5% de silicato. Observa-se que as tensões normais na amostra de referência variam de 1,04 MPa, enquanto na amostra com 2,5% de silicato a variação é de 1,10 MPa. Quanto às tensões de cisalhamento, a amostra de referência apresenta valores em torno de 0,06 MPa e a amostra com 2,5% de silicato apresenta valores em torno de 0,07 MPa. Os resultados experimentais das tensões normais e de cisalhamento foram determinados por meio de equações analíticas com base nas informações obtidas durante o ensaio experimental. É importante ressaltar que as tensões normais foram calculadas no ponto médio do corpo de prova, enquanto as tensões de cisalhamento foram calculadas a um terço da distância entre os apoios inferiores. Essas posições de cálculo foram escolhidas para fornecer informações representativas sobre as características de tensão ao longo do corpo de prova.

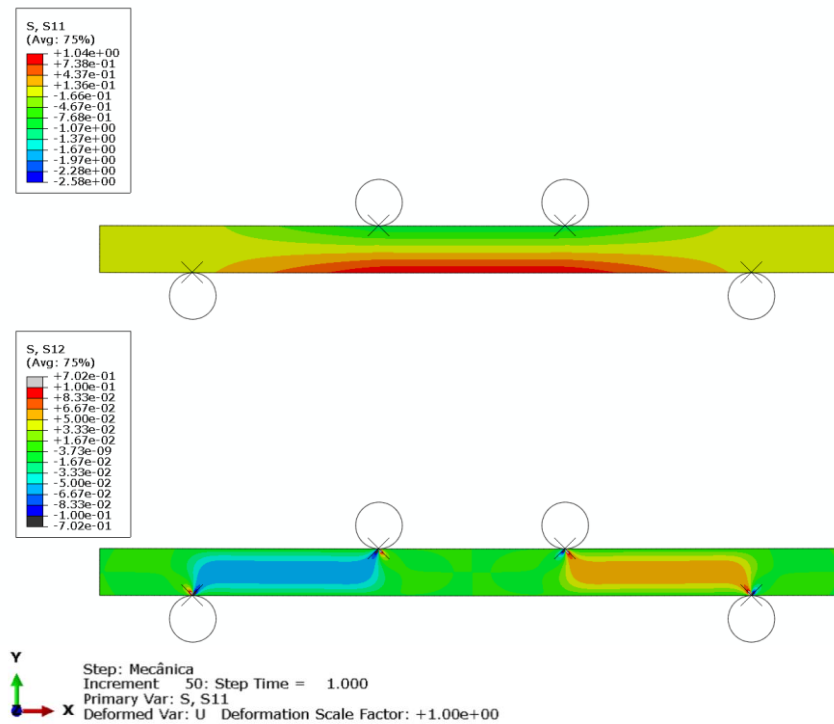
Figura 56 Resultados experimentais calculados a partir das equações analíticas e os resultados simulado obtido através do modelo criado no software Abaqus. Em (a) e (b) Tensões normais e (c) e (d) tensões de cisalhamento.



Fonte: Autor.

Na Figura 57, são ilustradas as distribuições das tensões obtidas através do modelo numérico. A parte superior da ilustração representa as tensões normais, enquanto a parte inferior representa as tensões de cisalhamento. Essa representação gráfica permite visualizar a variação das tensões ao longo do corpo de prova, proporcionando uma melhor compreensão do comportamento do componente cimentício.

Figura 57 Ilustração das tensões normais e de cisalhamento do CP –10 Referência. Tensões normais calculadas no ponto médio do corpo de prova, enquanto as tensões de cisalhamento foram calculadas a um terço da distância entre os apoios inferiores.



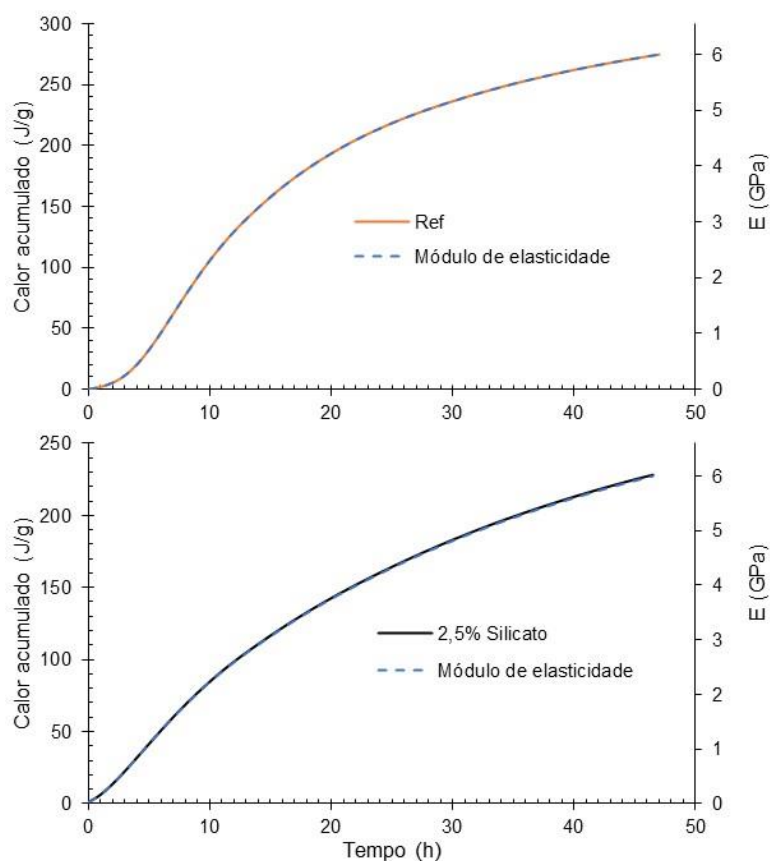
Fonte: Autor.

9.1.2 Componente protendido quimicamente

A determinação das tensões decorrentes da protensão química requer que os valores do módulo de elasticidade estejam de acordo com o momento em que ocorre a retração. De acordo com o método utilizado na moldagem dos corpos de prova (descrito no Capítulo 8), o intervalo de tempo entre as camadas foi de uma hora, mantido constante para ambos os sistemas cimentícios (8,5:1,5 e 7:3). Com base nessas informações, foi necessário estimar o módulo de elasticidade das pastas cimentícias de referência e com 2,5% de silicato de sódio. Essa estimativa é apresentada na Figura 58, que ilustra a variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo, juntamente com a curva de calor de hidratação. O cálculo do módulo de elasticidade em função do tempo foi realizado por meio da normalização da curva de calor acumulado. Para isso, assumiu-se que o valor máximo de calor acumulado nas

48 horas corresponde ao valor do módulo de elasticidade de 6 GPa, e em seguida foi extrapolado ao longo do tempo.

Figura 58 Estimativa do módulo de elasticidade a partir do calor de hidratação. Gráfico superior pasta referência e no gráfico inferior, pasta com 2,5% de silicato de sódio.



Fonte: Autor.

Essa abordagem, ilustrada na Figura 58, considera a hipótese de que, ao misturar cimento e água e formar uma pasta cimentícia, o processo de hidratação evolui ao longo do tempo, resultando na formação de produtos de hidratação que preenchem os poros da pasta cimentícia, conforme discutido no capítulo 3.2.2. Essa evolução da hidratação contribui para a formação de uma microestrutura menos porosa e, conseqüentemente, para o aumento da rigidez do sistema, ou seja, do módulo de elasticidade (Bentz, 2008; Maia *et al.*, 2011; Sant *et al.*, 2009). Além disso, há outras técnicas para medir a rigidez microestrutural em materiais cimentícios, que não foram utilizadas nesse trabalho, com por exemplo, o ensaio reológico SAOS (Small Amplitude Oscillatory Strain/Stress) e LAOS (Large Amplitude Oscillatory Strain/Stress), que possibilitam acompanhar a evolução da pasta em diferentes idades, desde os instantes iniciais, onde as tensões e deformações são pequenas,

até as idades mais avançadas, onde as tensões e deformações são proporcionalmente maiores devido à consolidação do sistema cimentício. Dessa forma, foram realizadas simulações em três cenários distintos de protensão química. No primeiro cenário, considerou-se uma condição em que apenas a primeira camada sofre retração química, enquanto a camada superior permanece com suas propriedades inalteradas. O tempo de análise adotado para esse cenário é de uma hora.

No segundo cenário, buscou-se uma representação mais próxima das condições reais, em que ocorre retração química em ambas as camadas. Nesse caso, assumiu-se um intervalo de duas horas para a retração na primeira camada e uma hora para a retração na segunda camada.

No terceiro cenário, foi considerada a retração em ambas as camadas, semelhante à segunda condição. No entanto, há uma diferença no tempo de análise: a primeira camada foi submetida a um período de 48 horas, enquanto a segunda camada foi analisada por 47 horas.

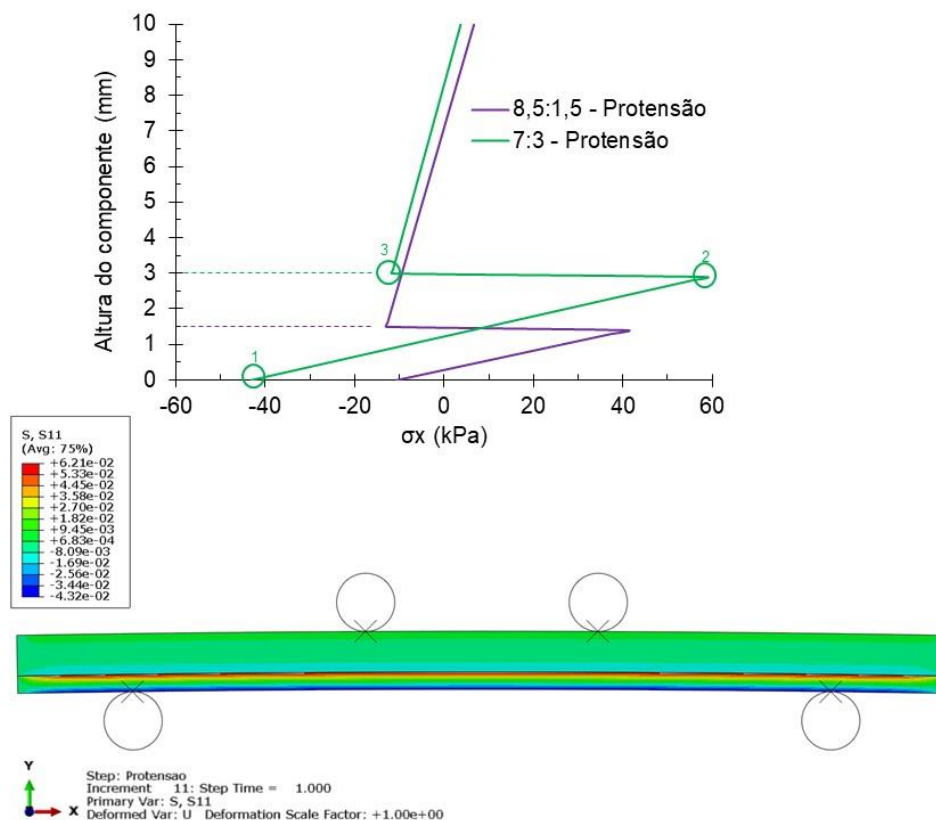
9.1.2.1 Condição 1 – Retração química apenas na primeira camada em um intervalo de uma hora

As propriedades dos materiais utilizados foram mantidas constantes para ambos os sistemas analisados (7:3 e 8,5:1,5). Na primeira camada, adotou-se uma pasta de cimento contendo 2,5% de silicato, que apresentou um módulo de elasticidade em torno de 160 MPa após uma hora de hidratação, juntamente com um coeficiente de Poisson de 0,50. A retração química foi aplicada proporcionalmente a uma hora, considerando um coeficiente de expansão de $1,56E-3$ e uma temperatura negativa de 1 °C. Na camada superior, adotou-se uma pasta de cimento sem silicato de sódio (referência). Nesse cenário, não se considerou a ocorrência de retração química. No entanto, foram adotados um módulo de elasticidade mínimo de 10 MPa e um coeficiente de Poisson de 0,50. Os resultados da simulação apresentados na Figura

59, mostram que o comportamento do componente sob à protensão química pode ser dividido em três regiões, como indicado pelos círculos verdes no gráfico.

Na primeira região, localizada no ponto mais baixo da altura do componente, é esperado que a aplicação da retração comprima as fibras inferiores. Nesse sentido, as diferenças nas tensões entre os sistemas podem ser atribuídas principalmente à diferença volumétrica. Na região em questão, as tensões variam em torno de 10 kPa para o sistema com menor altura (1,5 mm) e 40 kPa para o sistema com maior altura (3 mm).

Figura 59 Simulação da protensão para intervalo entre camadas de uma hora (condição 1). No gráfico superior são apresentadas as tensões normais oriundas da protensão química. A figura inferior apresenta a ilustração da configuração 7:3 obtida por meio do software de simulação Abaqus. A ilustração mostra as tensões normais no meio do vão, sendo que a escala de cores representa os valores das tensões em kPa.



Fonte: Autor.

Na segunda região, que corresponde a uma área próxima de contato entre as camadas, ocorre uma situação em que a parte inferior do componente está sujeita à retração, enquanto a camada superior permanece sem sofrer retração. Esse cenário dificulta a retração do material e gera tensões de tração. A configuração 8,5:1,5

apresenta valores em torno de 40 kPa nessa região, enquanto a configuração 7:3 apresenta valores em torno de 60 KPa.

Já na terceira região, que representa a área de contato direto entre as camadas, as tensões são predominantemente de compressão e praticamente iguais para ambos os sistemas. A configuração 8,5:1,5 apresenta tensões de compressão em torno de 13 kPa, enquanto a configuração 7:3 apresenta tensões de compressão em torno de 12 kPa.

Com base nos resultados apresentados, pode-se observar que, nesse caso específico, a geometria (7:3) com maior volume de material retraído foi aquela que gerou maior protensão. As tensões geradas, embora relativamente baixas em comparação com as tensões provenientes de carregamentos externos, foram influenciadas diretamente pela camada superior, que permaneceu sem sofrer retração. Isso criou restrições à retração da camada inferior, resultando nos níveis de protensão observados. No entanto, é importante ressaltar que a condição assumida de retração em apenas uma das camadas não representa adequadamente as condições reais.

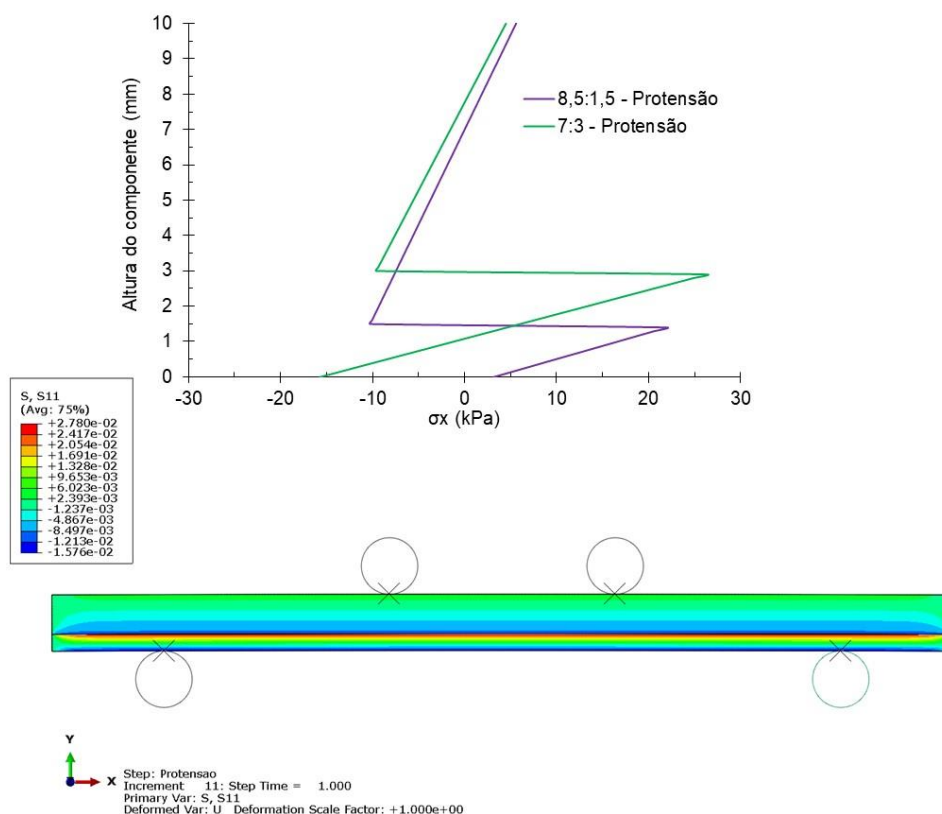
9.1.2.2 Condição 2 – Retração química em ambas as camadas intervalo de duas horas na primeira camada e uma hora na segunda camada

As propriedades dos materiais utilizados foram mantidas constantes para ambos os sistemas analisados (7:3 e 8,5:1,5). Na primeira camada, adotou-se uma pasta de cimento contendo 2,5% de silicato, que apresentou um módulo de elasticidade em torno de 360 MPa após duas horas de hidratação, juntamente com um coeficiente de Poisson de 0,50. A retração química foi aplicada de acordo com um intervalo de tempo de duas horas, considerando um coeficiente de expansão de $1,77E-3$ e uma temperatura negativa de $1^{\circ}C$. Na camada superior, adotou-se uma pasta de cimento sem silicato de sódio (referência), que apresentou um módulo de elasticidade em torno de 50 MPa após uma hora de hidratação, juntamente com um coeficiente de Poisson

de 0,50. A retração química foi aplicada proporcional a uma hora, considerando um coeficiente de expansão de $1,50E-3$ e uma temperatura negativa de 1.

Ao observar os resultados da Figura 60, é possível notar diferenças no comportamento das tensões entre as duas geometrias analisadas. Na primeira região, a geometria 8,5:1,5 apresenta tensões de tração em torno de 3 kPa, enquanto a geometria 7:3 apresenta tensões de compressão em torno de 15 kPa. Na segunda região, os valores das tensões são próximos, com aproximadamente 22 kPa para a geometria 8,5:1,5 e 26 kPa para a geometria 7:3. Na terceira região, os valores das tensões são de aproximadamente 12 kPa para a geometria 7:3 e 13 kPa para a geometria 8,5:1,5.

Figura 60 Simulação da protensão para intervalo de duas horas na primeira camada e uma hora na segunda camada (condição 2). No gráfico superior são apresentadas as tensões normais oriundas da protensão química. A figura inferior apresenta a ilustração da configuração 7:3 obtida por meio do software de simulação Abaqus. A ilustração mostra as tensões normais no meio do vão, sendo que a escala de cores representa os valores das tensões em kPa.



Fonte: Autor.

É interessante fazer uma comparação com a primeira condição simulada, na qual apenas a primeira camada sofre retração. Observa-se, por exemplo, que na geometria 7:3, tanto na primeira região quanto na segunda região, os níveis de tensão são cerca

de duas vezes menores. Isso ocorre provavelmente porque a camada superior também está sofrendo retração, o que não cria dificuldades na camada em retrair e as tensões são menores, ou seja, a retração ocorre com maior liberdade de movimento. Observa-se também que a protensão química foi maior na geometria 7:3, semelhante à primeira condição, na qual a retração também foi maior.

Com base nessa observação, pode-se conjecturar que para aumentar os níveis de tensões, seria necessário utilizar materiais com diferentes cinéticas de retração e de expansão. Essa abordagem possivelmente permitiria uma melhor protensão química do sistema como um todo.

Além disso, é importante ressaltar as limitações do modelo numérico utilizado, o que pode afetar a precisão dos resultados obtidos. Assim, para obter uma compreensão mais abrangente e precisa do comportamento da protensão química, é necessário realizar estudos mais aprofundados que levem em consideração outras variáveis e façam uso de modelos mais complexos, incluindo a incorporação de modelos de transição do estado fluido para o sólido. Essas abordagens mais avançadas contribuirão para aprimorar as análises fornecendo informações importantes sobre o fenômeno da protensão química.

9.1.2.3 Condição 3 – Retração química em ambas as camadas intervalo de 48 horas na primeira camada e 47 horas na segunda camada

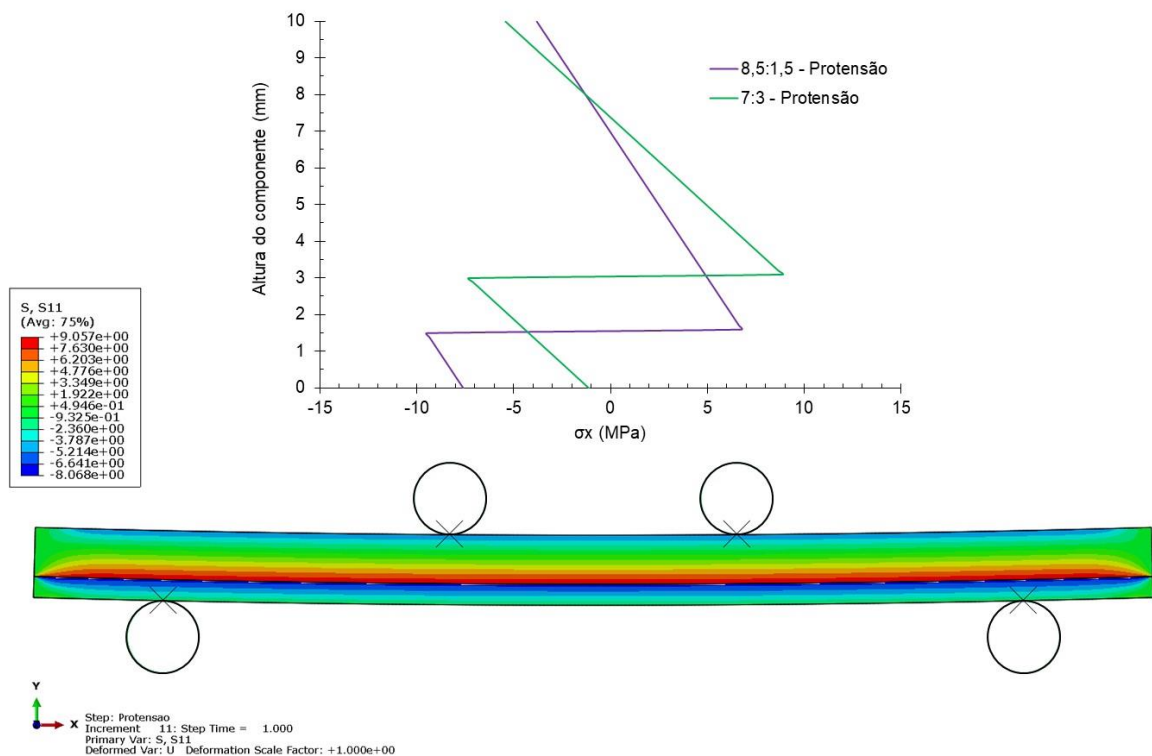
As propriedades dos materiais utilizados foram mantidas constantes para ambos os sistemas analisados (7:3 e 8,5:1,5). Na primeira camada, adotou-se uma pasta de cimento contendo 2,5% de silicato, que apresentou um módulo de elasticidade em torno de 6 GPa após 48 horas de hidratação, juntamente com um coeficiente de Poisson de 0,25. A retração química foi aplicada de acordo com um intervalo de tempo de 48 horas, considerando um coeficiente de expansão de $1,13 \times 10^{-3}$ e uma temperatura negativa de 21°C. Na camada superior, adotou-se uma pasta de cimento sem silicato de sódio (referência), que apresentou um módulo de elasticidade em torno de 6 GPa após 47 horas de hidratação, juntamente com um coeficiente de Poisson de 0,25. A

retração química foi aplicada proporcional a 47 horas, considerando um coeficiente de expansão de $1,260E-3$ e uma temperatura negativa de 21°C .

Ao analisar os resultados da Figura 61, foram observadas diferenças no comportamento das tensões entre as duas geometrias analisadas. Na primeira região, a geometria 8,5:1,5 apresentou tensões de compressão em torno de 8 MPa, enquanto na geometria 7:3 as tensões também foram de compressão, porém atingiram cerca de 1 MPa. Na segunda região, os valores das tensões foram próximos, com aproximadamente 9 MPa para a geometria 8,5:1,5 e 7 MPa para a geometria 7:3. Na terceira região, as tensões foram em torno de 8 MPa para a geometria 7:3 e 6 MPa para a geometria 8,5:1,5.

Diferentemente dos cenários anteriores, essa condição não considera o material em estado fluido, o que tem um impacto significativo nos níveis elevados de tensão. Isso ocorre porque a simulação pressupõe uma contração do material que já está consolidado, o que não condiz com a realidade.

Figura 61 Simulação da protensão para intervalo de 48 horas na primeira camada e 47 horas na segunda camada (condição 3). No gráfico superior são apresentadas as tensões normais oriundas da protensão química. A figura inferior apresenta a ilustração da configuração 7:3 obtida por meio do software de simulação Abaqus. A ilustração mostra as tensões normais no meio do vão, sendo que a escala de cores representa os valores das tensões em MPa.



Fonte: Autor.

Observou-se também que, em idades mais avançadas, a retração química da pasta cimentícia de referência foi maior do que na pasta com 2,5% de silicato, o que resultou em uma distribuição de tensões diferente. Esse comportamento levou à compressão na parte superior do componente, o que contraria os princípios fundamentais da protensão.

9.2 Conclusões do capítulo

Na primeira etapa do estudo, foram avaliadas as tensões normais e de cisalhamento em sistemas monolíticos. Verificou-se que a utilização de um módulo de elasticidade de 6 GPa, tanto para a pasta cimentícia de referência quanto para a pasta contendo 2,5% de silicato de sódio, resultou em uma boa concordância entre as simulações numéricas e os resultados experimentais. É relevante salientar que a condição de linearidade geométrica foi mantida, uma vez que a aplicação do deslocamento resultou em uma deflexão extremamente pequena no componente. A análise comparativa das tensões normais e de cisalhamento entre o sistema de referência e o sistema com 2,5% foram semelhantes.

Com relação as tensões de protensão química, na condição 1, observou-se que a geometria (7:3), com maior volume de material retraído, gerou maior protensão. No entanto, é importante ressaltar que a condição assumida de retração em apenas uma das camadas não representa adequadamente as condições reais.

Na condição 2, verificou-se que a retração em ambas as camadas resultou em níveis menores de tensão em comparação com a condição em que apenas a primeira camada sofreu retração. Embora represente a condição mais próxima à realidade, os níveis de protensão obtidos não atingiram os níveis de desempenho mecânico desejável, tendo visto que as tensões de protensão obtidas foram menores do que as tensões advindas do carregamento externo. Uma das possíveis razões para esse resultado pode estar vinculada ao comportamento das camadas, as quais, apesar de retraírem com intensidade distintas, o que já justificaria a protensão, ambas estão

retraindo. Possivelmente, a combinação controlada de retração e expansão em diferentes camadas pode ser uma estratégia para melhorar os níveis de protensão química.

Na condição 3, foi evidenciado que as simulações não consideraram o comportamento do material em estado fluido, o que pode afetar significativamente os resultados. Além disso, a retração química da pasta cimentícia de referência foi maior do que na pasta com 2,5% de silicato, resultando em uma distribuição de tensões que contraria os princípios fundamentais da protensão.

10 CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo principal desta dissertação consistiu em desenvolver um modelo utilizando o método de elementos finitos para prever as tensões de protensão resultantes de retração química. O modelo axissimétrico 2D desenvolvido demonstrou um desempenho adequado, permitindo a calibração dos dados experimentais de retração química das pastas de cimento, levando em consideração os parâmetros de entrada relacionados à temperatura e coeficiente de expansão.

Dentre as três condições analisadas no capítulo 9.1.2, a segunda, que considerava a retração química em ambas as camadas, apresentou maior semelhança com as condições reais. Isso resultou em níveis menores de tensão em comparação com as tensões normais provenientes do carregamento externo, que foram aproximadamente 1 MPa. A redução das tensões pode ser atribuída ao mecanismo de retração nas camadas, já que ambos os materiais retraíram teoricamente de maneira semelhante, apesar de intensidades diferentes. Essa observação sugere que a combinação controlada de retração e expansão em diferentes camadas possa ser uma estratégia para melhorar os níveis de protensão química.

Embora o modelo adotado não tenha simulado com precisão as tensões de protensão devido à variação das propriedades dos materiais ao longo do tempo, que exigiria a incorporação de modelos de transição do estado fluido para o sólido considerando tanto os efeitos elásticos quanto viscosos concomitantemente, o modelo puramente elástico adotado oferece uma visão comparativa entre os diferentes cenários do ponto de vista qualitativo. No entanto, ele não deve ser considerado como uma resposta definitiva sobre as tensões de protensão.

11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que este trabalho se concentrou no desenvolvimento de um modelo por meio do método de elementos finitos capaz de prever as tensões de protensão química, sugere-se que trabalhos futuros foquem em:

- i – avaliar experimentalmente os corpos de prova em diferentes intervalos de tempo entre camadas;
- ii – avaliar o comportamento da protensão ao longo tempo, com uma simulação que considere a variação do módulo de elasticidade, com cada material retraído ou expandindo de maneira individual gerando com isso diferentes tensões de protensão;
- iii – desenvolver pastas cimentícias que apresentem alta capacidade de retração e/ou expansão química, assegurando a compatibilidade entre as camadas e prevenindo a formação precoce de fissuras que possam comprometer o efeito da protensão.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS/CAE USER'S MANUAL. [S. l.], 2018. Disponível em: https://help.3ds.com/2020/English/DSSIMULIA_Established/SIMULIA_Established_FrontmatterMap/sim-r-DSDocAbaqus.htm?contextscope=all&id=9a5d7bf209394446819332b397a93f40. Acesso em: 14 jun. 2023.
- ABDELAZIZ, M. M.; EL-GHAZALY, H. A.; GOMAA, M. S. Numerical simulation of unbonded prestressed concrete beams using improved applied element method. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 245, p. 112962, 2021.
- ARAB, A. A.; BADIE, S. S.; MANZARI, M. T. A methodological approach for finite element modeling of pretensioned concrete members at the release of pretensioning. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 1918–1929, 2011.
- AYOUB, A.; FILIPPOU, F. C. Finite-Element Model for Pretensioned Prestressed Concrete Girders. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 4, p. 401–409, 2010.
- BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1998.
- BASTOS, P. S. **Fundamentos do Concreto Protendido**. Universidade Estadual Paulista (UNESP): [s. n.], 2021.
- BENTZ, D. P. A review of early-age properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 38, n. 2, Special Issue — The 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, Canada, July 8-13 2007, p. 196–204, 2008.
- BENUSKA, K. L.; BERTERO, V. V.; POLIVKA, M. SELF-STRESSED CONCRETE FOR PRECAST BUILDING UNITS. **PCI Journal**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 72–84, 1971.
- BRYKOV, A. S. *et al.* Effect of Hydrated Sodium Silicates on Cement Paste Hardening. **Russian Journal of Applied Chemistry**, [s. l.], v. 75, n. 10, p. 1577–1579, 2002.
- BRYKOV, A. S.; DANILOV, B. V.; LARICHKOV, A. V. Specific features of portland cement hydration in the presence of sodium hydrosilicates. **Russian Journal of Applied Chemistry**, [s. l.], v. 79, n. 4, p. 521–524, 2006.
- CHATELIER, H. L. Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments. *In*: BULL. SOC. ENCOUR. IND. NATL. V, 1900. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 1900. p. 54–57.
- DE PAULA FERREIRA, W.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 149, p. 106868, 2020.

ELLOBODY, E.; FENG, R.; YOUNG, B. Chapter 3 - Finite Element Modeling. *In*: ELLOBODY, E.; FENG, R.; YOUNG, B. (org.). **Finite Element Analysis and Design of Metal Structures**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014. p. 31–55. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124165618000032>. Acesso em: 25 nov. 2021.

ESTRADA CACERES, D. P. **Influencia del metacaolin en las propiedades en estado fresco del cemento Portland: hidratación y retracción química**. 2016. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18012017-142504/>. Acesso em: 8 fev. 2023.

FOLLIARD, K. Evaluation of Alternative Materials to Control Drying-Shrinkage Cracking in Concrete Bridge Decks. [s. l.], p. 170, 2003.

FONSECA, J. M. M. da. **Estudo da adição de silicato de sódio alcalino em componentes cimentícios**. 2021. masterThesis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/26141>. Acesso em: 21 fev. 2023.

FONTANA, P. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL. [s. l.], p. 82, 2011.

GARCIA, C. V. M. **Avaliação do impacto do uso de fíler calcário como substituição ao cimento no comportamento reológico e retração de microconcretos**. 2017. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-23062017-162907/>. Acesso em: 18 fev. 2021.

GILBERT, R. I.; MICKLEBOROUGH, N. C.; RANZI, G. **Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

GIORDANO, B. L. **Controle da fissuração em compósitos com fibras orgânicas aplicando conceito de materiais com gradação funcional**. 2011. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20092012-182239/>. Acesso em: 22 dez. 2020.

GUO, Z. Part 1 Mechanical Behavior of Concrete. *In*: GUO, Z. (org.). **Principles of Reinforced Concrete**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014a. p. 7–8. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008591020016>. Acesso em: 8 fev. 2023.

GUO, Z. (org.). **Principles of Reinforced Concrete**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128008591120018>. Acesso em: 8 fev. 2023.

HANAL, J. B. de. **Fundamentos do Concreto Protendido - E-Book de apoio par ao Curso de Engenharia Civil**. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos: [s. n.], 2005.

HANNANT, D. J.; VENKATA SIVA, S. B.; RAMA SREEKANTH, P. S. 5.15 Cement-Based Composites☆. *In*: BEAUMONT, P. W. R.; ZWEBEN, C. H. (org.). **Comprehensive Composite Materials II**. Oxford: Elsevier, 2018. p. 379–420. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818039035>. Acesso em: 25 nov. 2021.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7ª edição. [S. l.]: Pearson Universidades, 2009.

HU, D. (org.). **Analysis and Design of Prestressed Concrete**. [S. l.]: Elsevier, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244258120019>. Acesso em: 8 fev. 2023.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 31, n. 12, p. 1859–1865, 2001.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20102014-114027/>. Acesso em: 22 dez. 2020.

KIMURA, D. *et al.* Mechanism for anisotropic thermal expansion of polyamide fibers. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [s. l.], v. 344, p. 130262, 2021.

KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. Overview and Future Trends of Shrinkage Research. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 827, 2006.

LIN, T. Y.; KLEIN, A. Chemical Prestressig of Concrete Elements Using Expanding Cements. **Journal Proceedings**, [s. l.], v. 60, n. 9, p. 1187–1218, 1963.

LISKA, M.; WILSON, A.; BENSTED, J. 13 - Special Cements. *In*: HEWLETT, P. C.; LISKA, M. (org.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifth Edition)**. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2019. p. 585–640. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081007730000137>. Acesso em: 6 mar. 2023.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 12, Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling, Quebec City, 2009 & CONMOD10, Lausanne, 2010, p. 1244–1256, 2011.

LURA, P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete. [s. l.], 2003. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A1a1efc2d-a638-4787-b543-5bd643a39a4b>. Acesso em: 8 abr. 2021.

LURA, P.; WINNEFELD, F.; KLEMM, S. Simultaneous measurements of heat of hydration and chemical shrinkage on hardening cement pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 101, n. 3, p. 925–932, 2010.

MAC, M. J. *et al.* Analysis of autogenous shrinkage-induced microcracks in concrete from 3D images. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 144, p. 106416, 2021.

MAIA, L. *et al.* E-modulus evolution and its relation to solids formation of pastes from commercial cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 7, p. 928–936, 2012.

MAIA, L. *et al.* Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 799–807, 2011.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05022003-114904/>. Acesso em: 13 abr. 2021.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2007. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-28032008-174009/>. Acesso em: 13 abr. 2021.

METHA, K. P.; MONTEIRO, M. J. P. **CONCRETO: MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS**. [S. l.: s. n.], 2014.

MOREIRA, L. S.; SOUSA, J. B. M.; PARENTE, E. Nonlinear finite element simulation of unbonded prestressed concrete beams. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 170, p. 167–177, 2018.

NEVILLE, A. M.; CREMONINI, R. A. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição. [S. l.]: Bookman, 2015.

NUNES LÚCIO, N.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland - Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**. [S. l.: s. n.], 2007.

OLIVEIRA, F. C. de. **Propriedades mecânicas de pastas de cimento: microestrutura, variabilidade e análises probabilísticas**. 2020. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-08032021-092118/>. Acesso em: 2 maio 2023.

PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J.; SMITH, J. D. Mechanism of Polysialation in the Incorporation of Zirconia into Fly Ash-Based Geopolymers. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 39, n. 8, p. 2925–2934, 2000.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-20012017-090400/>. Acesso em: 14 fev. 2017.

RODRIGUES, M. A. **Simulação numérica do comportamento de vigas de concreto protendido pós-tracionado**. 2019. text - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-09032020-105539/>. Acesso em: 8 fev. 2023.

ROMANO, R. C. O. *et al.* Fresh and hardened characterization of air-entrained cement pastes. *In: XIII ICCO INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT*, 2011, Espanha, Madrid. **Anais [...]**. Espanha, Madrid: [s. n.], 2011.

SANT, G. *et al.* Detecting the Fluid-to-Solid Transition in Cement Pastes. **Concrete International**, [s. l.], p. 53–58, 2009.

SANTANA-CARRILLO, J. L. *et al.* Modified blended limestone-Portland cement binders: Evaluation of 4 different sodium silicates. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 118, p. 103935, 2021.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 78, Keynote papers from 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015), p. 38–56, 2015.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 7, Special Issue: 13th International Congress on the Chemistry of Cement, p. 651–665, 2011.

SNOECK, D. *et al.* In-situ crosslinking of superabsorbent polymers as external curing layer compared to internal curing to mitigate plastic shrinkage. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 262, p. 120819, 2020.

STEFAN, L. *et al.* Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages. **Computational Materials Science**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 775–784, 2010.

STEVEN.H KOSMATKA; WILSON, Michelle. L. **Steven H. Kosmatka, Michelle L. Wilson-Design and Control of Concrete Mixtures-PCA (2011).pdf**. [S. l.: s. n.], 2011. (15). Disponível em: Acesso em: 3 abr. 2017.

THOMPSON, J. L. *et al.* Characterization of silicate sealers on concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 27, n. 10, Materials Research Society Symposium on Structure-Property Relationships in Hardened Cement Paste and Composites, p. 1561–1567, 1997.

TONG, L.; ZHOU, X.; CAO, X. Ultimate pressure bearing capacity analysis for the prestressed concrete containment. **Annals of Nuclear Energy**, [s. l.], v. 121, p. 582–593, 2018.

TRAN, N. P. *et al.* A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 38, p. 102210, 2021.

TRAN, D. T. *et al.* Numerical investigation of flexural behaviours of precast segmental concrete beams internally post-tensioned with unbonded FRP tendons under monotonic loading. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 249, p. 113341, 2021.

VAIL, J. G. **Soluble Silicates, Their Properties and Uses - Volume 1: Chemistry**. [S. l.]: Reinhold Publishing Corporation, 1952.

VERÍSSIMO, G. de S.; LENZ, K. M. C. J. **Concreto Protendido - Fundamentos Básicos**. 4^a-Novembro de 1998ed. Universidade Federal de Viçosa: [s. n.], 1998.

VU, N. A.; CASTEL, A.; FRANÇOIS, R. Response of post-tensioned concrete beams with unbonded tendons including serviceability and ultimate state. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 556–569, 2010.

WITZLEBEN, S. T. Acceleration of Portland cement with lithium, sodium and potassium silicates and hydroxides. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 243, p. 122608, 2020.

WU, X.-H.; LU, X. Tendon Model for Nonlinear Analysis of Externally Prestressed Concrete Structures. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 129, n. 1, p. 96–104, 2003.

WYRZYKOWSKI, M.; TERRASI, G.; LURA, P. Chemical prestressing of high-performance concrete reinforced with CFRP tendons. **Composite Structures**, [s. l.], v. 239, p. 112031, 2020.

WYRZYKOWSKI, M.; TERRASI, G.; LURA, P. Expansive high-performance concrete for chemical-prestress applications. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 107, p. 275–283, 2018.

ZDANOWICZ, K. **Chemical Prestressing of Thin Concrete Elements with Carbon Textile Reinforcement**. 2021. Doctoral Thesis - Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/11097>. Acesso em: 30 maio 2023.

ZHANG, M.; SUN, B.; GU, B. Experimental and numerical analyses of matrix shrinkage and compressive behavior of 3-D braided composite under thermo-oxidative ageing conditions. **Composite Structures**, [s. l.], v. 204, p. 320–332, 2018.

ZHAO, H. *et al.* A multiscale prediction model and simulation for autogenous shrinkage deformation of early-age cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 215, p. 482–493, 2019.

ZIENKIEWICZ, O.C; TAYLOR, R.L; ZHU, J.Z. **The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals**. [S. l.]: Elsevier, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20090249099>. Acesso em: 30 nov. 2020.

ANEXO A – ANÁLISE ANOVA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Tabela A 1 Análise de variância fator único da resistência a compressão axial, realizado com um nível de significância de 5%.

Referência	Média	Desvio padrão				
	2,5% Silicato	27,3367	4,7652			
	25,1028	6,5529				
	GL	SQ	MQ	F	P	Resultado
Modelo	1	24,9526	24,9526	0,7602	0,3947	Insignificativo
Erro	18	590,8291	32,8238			
Total	19	615,7817				

Legenda: GL – grau de liberdade SQ – soma dos quadrados; MQ – média dos quadrados; F e P – parâmetros de Fisher para o teste de significância

ANEXO B – ANÁLISE ANOVA POROSIDADE TOTAL

Tabela A 2 Análise de variância fator único da resistência porosidade total, realizado com um nível de significância de 5%.

Referência	Média	Desvio padrão				
	2,5% Silicato	40,9165	3,0092			
	42,4789	1,5408				
	GL	SQ	MQ	F	P	Resultado
Modelo	1	12,2051	12,2051	2,1357	2,1357	Insignificativo
Erro	18	102,8652	5,7147			
Total	19	115,0703				

Legenda: GL – grau de liberdade SQ – soma dos quadrados; MQ – média dos quadrados; F e P – parâmetros de Fisher para o teste de significância

ANEXO C – ANÁLISE ANOVA RESISTÊNCIA A FLEXÃO QUATRO PONTOS

Tabela A 3 Análise de variância fator único da resistência a flexão quatro pontos, realizado com um nível de significância de 5%.

	Média	Desvio padrão				
Referência 2,5% Silicato 8,5:1,5 7:3	3,2255	0,4835				
	3,5741	0,5225				
	3,3026	0,5627				
	3,0537	0,4298				
	GL	SQ	MQ	F	P	Resultado
Modelo	3	1,4004	0,4668	1,8442	0,1578	Insignificativo
Erro	34	8,6056	0,2531			
Total	37	10,0059				

Legenda: GL – grau de liberdade SQ – soma dos quadrados; MQ – média dos quadrados; F e P – parâmetros de Fisher para o teste de significância

ANEXO D – COMPARAÇÕES CARGA VS DESLOCAMENTO

Figura A 1 Carga vs deslocamento dos corpos de prova referência.

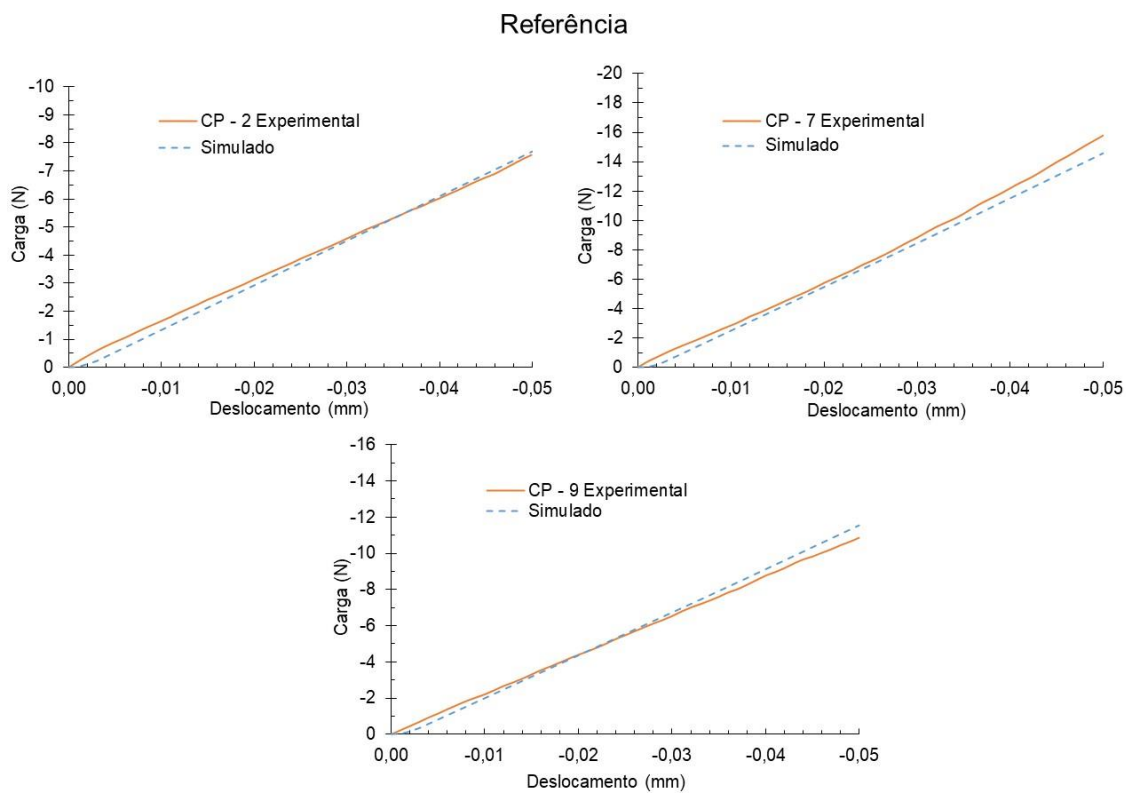
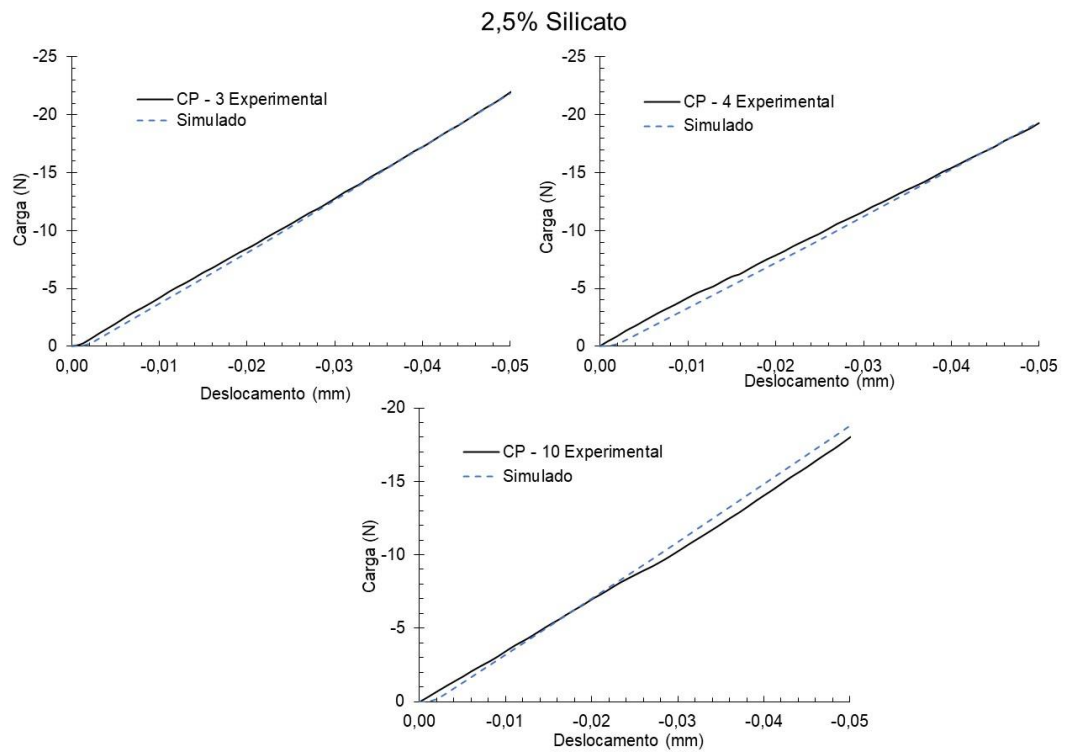


Figura A 2 Carga vs deslocamento dos corpos de prova com 2,5% silicato de sódio.



ANEXO E – COMPARAÇÕES TENSÕES NORMAIS E DE CISALHAMENTO

Figura A 3 Tensões normais nos corpos de prova referência.

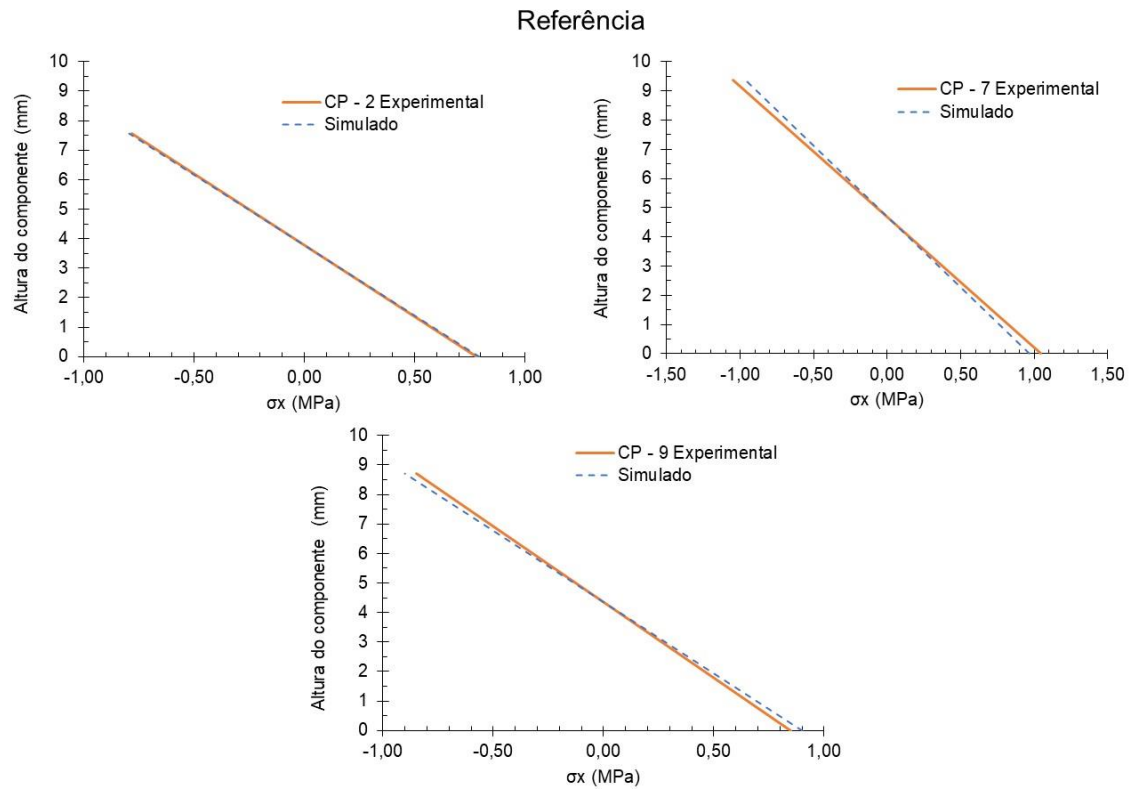


Figura A 4 Tensões normais nos corpos de prova com 2,5% de silicato de sódio.

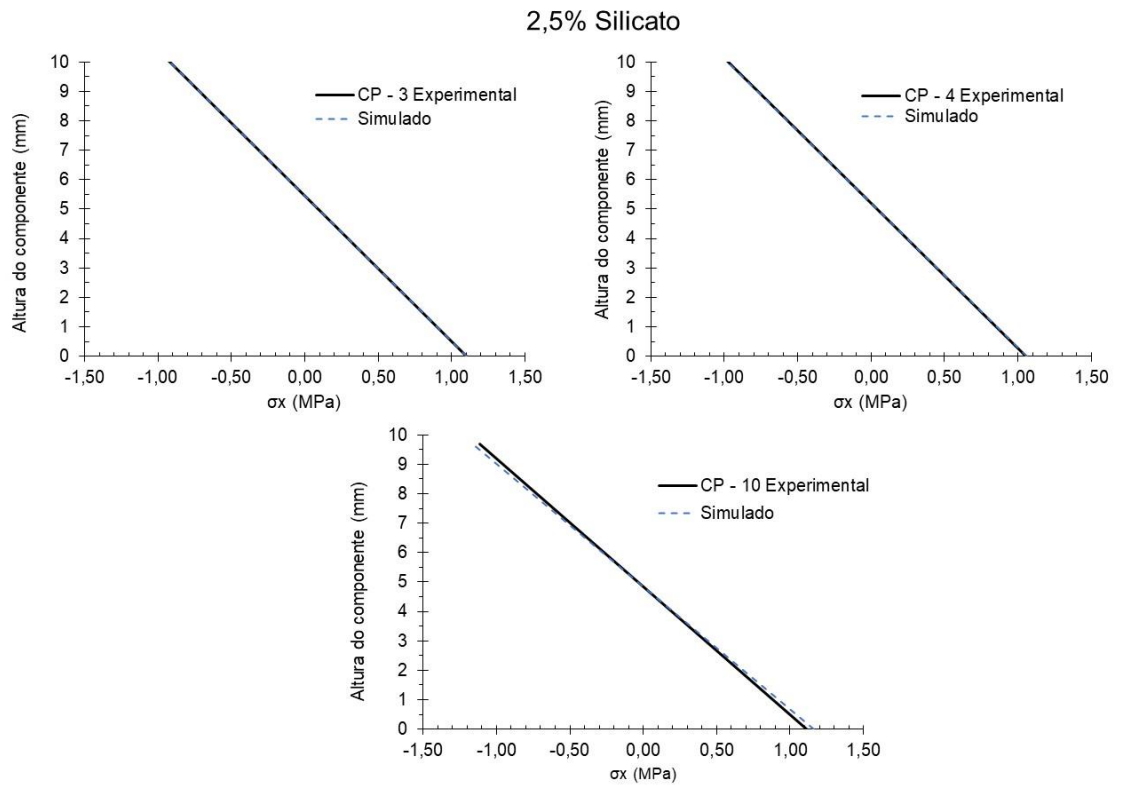


Figura A 5 Tensões de cisalhamento nos corpos de prova referência.

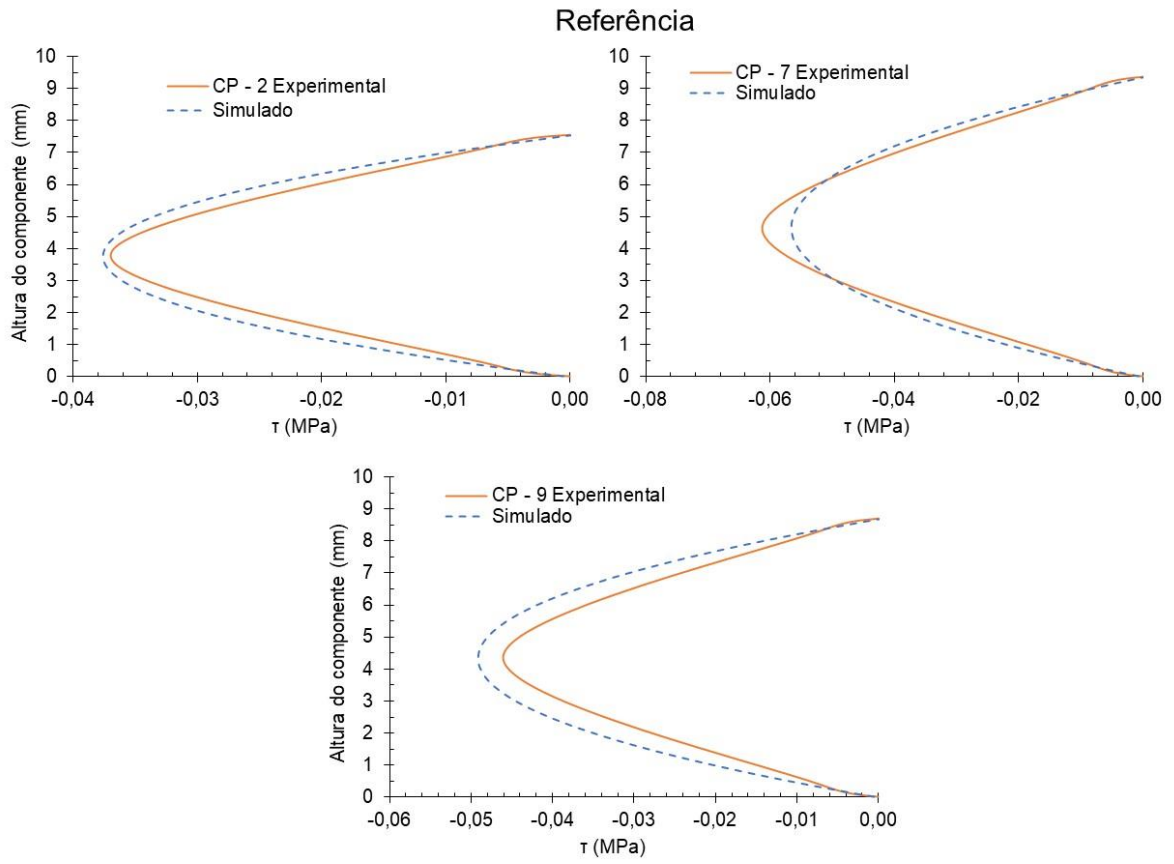


Figura A 6 Tensões de cisalhamento nos corpos de prova com 2,5% de silicato de sódio.

