XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8949

# Modelagem multiescala da resistividade elétrica em sistemas cimentícios com adições minerais

## Multiscale modeling of electrical conductivity in blended cement systems

**Walter Batista Bonfim**
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | walterbatistabonfim@gmail.com
**Tulio Honorio**
Université Paris-Saclay - CEA | Gif-sur-Yvette | França | tulio.honoriodefaria@cea.fr
**Oswaldo Cascudo**
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ocascudo@ufg.br

**Resumo**

Uma abordagem multiescala foi proposta para modelagem da resistividade elétrica de materiais cimentícios com adições minerais nas escalas de pasta, argamassa e concreto. Foram utilizados esquemas de homogeneização consistentes com uma descrição simplificada da microestrutura do material e tendo como dados de entrada as condutividades intrínsecas da solução dos poros e das fases sólidas. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais de resistividade elétrica de materiais produzidos com diferentes relações a/c e cimentos comerciais brasileiros. O modelo reproduziu adequadamente a evolução da resistividade elétrica ao longo da hidratação. Como esperado, observou-se forte influência da condutividade da solução dos poros sobre a resposta elétrica do modelo. O modelo proposto permite estimar a resistividade elétrica de diferentes combinações de materiais cimentícios, constituindo uma ferramenta para avaliação de matrizes cimentícias com diferentes composições.

Palavras-chave: Resistividade elétrica. Homogeneização micromecânica. Materiais cimentícios. Materiais cimentícios suplementares. Modelagem multiescala.

**Abstract**

*A multiscale approach was proposed to model the electrical resistivity of blended cementitious materials at the paste, mortar, and concrete scales. Homogenization schemes consistent with a simplified description of the material microstructure were employed, using the intrinsic electrical conductivities of the pore solution and solid phases as input parameters. The simulated results were compared with experimental electrical resistivity data obtained from materials produced with different water-to-cement ratios and commercial Brazilian cements. The model successfully reproduced the evolution of electrical resistivity during hydration. As expected, the electrical response was strongly influenced by the electrical conductivity of the pore solution. The proposed model enables the estimation of the electrical resistivity of different cementitious material combinations, providing a useful tool for evaluating cementitious systems with different compositions.*

*Keywords: Electrical resistivity. Micromechanical homogenization. Cementitious materials. Supplementary cementitious materials . Multiscale modeling.*

Como citar:
BONFIM, W. B.; HONORIO, T.; CASCUDO, O. Modelagem multiescala da resistividade elétrica em sistemas cimentícios com adições minerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21., 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

## INTRODUÇÃO

A crescente demanda por concretos com maior durabilidade, desempenho e menor impacto ambiental tem impulsionado o uso de cimentos compostos e adições minerais. Nesse contexto, a revisão da norma europeia EN 206:2026 amplia a adoção de abordagens orientadas ao desempenho (“performance-based specification”), permitindo maior flexibilidade na composição dos ligantes. Essa mudança amplia significativamente o número de combinações possíveis entre clínquer e materiais cimentícios suplementares (SCMs), tornando inviável uma avaliação exclusivamente experimental de todas as composições potenciais.

Nesse cenário, a modelagem termodinâmica, associada à micromecânica, surge como uma ferramenta promissora para avaliação de propriedades de materiais cimentícios, independentemente do tipo de cimento ou adição mineral utilizada. A modelagem termodinâmica permite estimar a hidratação, a composição da solução dos poros e a distribuição de fases hidratadas dos sistemas cimentícios [1], enquanto a micromecânica possibilita utilizar essas informações para estimativa de propriedades efetivas macroscópicas de materiais heterogêneos [2].

Dentro do contexto de desempenho e durabilidade, a resistividade elétrica destaca-se como um importante indicador de durabilidade, por estar diretamente relacionada ao transporte iônico, à permeabilidade do concreto e à conectividade da rede de poros [3]. Cimentos com adições minerais tendem a apresentar maiores resistividades elétricas devido à densificação da matriz cimentícia e à alteração da composição da solução do poro [4, 5]. Entretanto, esses efeitos dependerão do tipo, teor e reatividade da adição mineral empregada.

A resistividade elétrica depende diretamente da distribuição e interação entre as diferentes fases do material cimentício, tornando abordagens multiescala adequadas para sua análise. Honorio *et al*. [2] demonstraram que técnicas de homogeneização micromecânica são capazes de representar a evolução das propriedades elétricas de materiais cimentícios, destacando o papel dominante da solução do poro na resposta elétrica do sistema. Entretanto, praticamente inexistem estudos que integrem modelagem termodinâmica e micromecânica para a estimativa multiescala da resistividade elétrica, especialmente com validação experimental em diferentes escalas.

Dessa forma, este trabalho propõe uma abordagem multiescala para estimativa da resistividade elétrica de materiais cimentícios a partir da modelagem termodinâmica e de técnicas de homogeneização micromecânica. O modelo proposto possibilita prever a resistividade elétrica de diferentes combinações de materiais cimentícios, reduzindo a dependência de extensas campanhas experimentais.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8949

# METODOLOGIA

## A MICROESTRUTURA HIERÁRQUICA MULTIESCALA

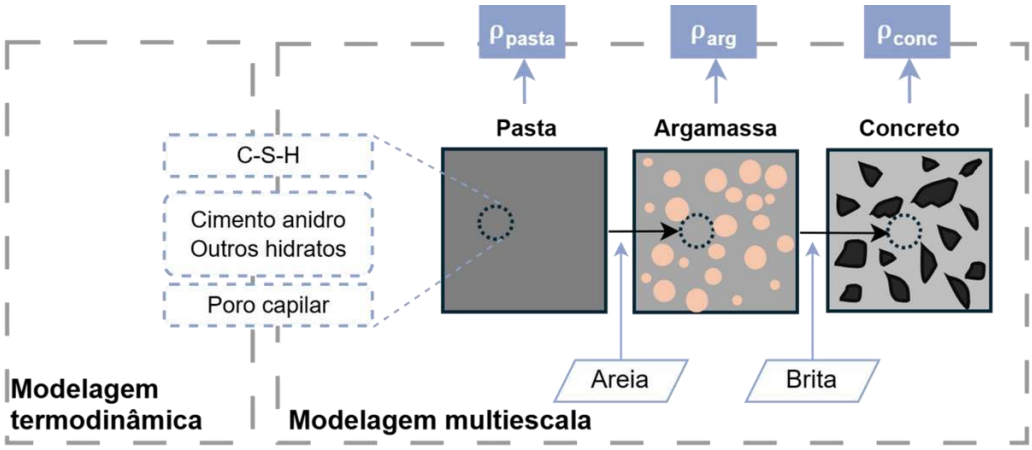
A representação da microestrutura da matriz cimentícia foi realizada partindo-se da pasta de cimento até o concreto. Para tanto, 3 escalas foram consideradas (Figura 1):

**Nível 1 – Pasta de cimento:** representada considerando três grupos de fases: porosidade capilar saturada ($f_{pc}$), C-S-H ($f_{C-S-H}$) e fases isolantes ($f_{iso}$), que englobam as fases anidras, adições minerais e demais hidratos (condutividade elétrica considerada nula). Para determinação das propriedades elétricas efetivas, $f_{pc}$ e $f_{C-S-H}$ foram tratadas como fases condutoras. A distribuição de fases e a composição da solução poral foram obtidas por modelagem termodinâmica.

**Nível 2 – Argamassa:** representada como uma estrutura matriz/inclusão, com os grãos de areia (inclusão) envoltos pela pasta de cimento (matriz). A areia será considerada um material não poroso e isolante.

**Nível 3 – Concreto:** de forma análoga, representada por uma estrutura matriz/inclusão com os agregados graúdos (não porosos e isolantes) embutidos em uma matriz de argamassa.

**Figura 1: Representação da hierarquia multiescala da microestrutura da matriz cimentícia**




Fonte: os autores.

## MODELO DE HIDRATAÇÃO

Para sistemas baseados em cimento Portland sem adições minerais, podem ser empregados modelos de hidratação clássicos como os propostos por Powers [6] e Tennis e Jennings [7]. Entretanto, para cimentos compostos com adições minerais, tais abordagens tornam-se limitadas, sendo a modelagem termodinâmica amplamente empregada na descrição da hidratação de sistemas cimentícios modernos [8, 9, 10, 11, 12].

As simulações termodinâmicas foram realizadas na aplicação web CemGEMS [13], utilizando o módulo Hydration MPK, que combina um modelo cinético de hidratação com cálculos de equilíbrio químico baseados na minimização da energia livre de Gibbs

realizada pelo código GEMS3K [14, 15, 16]. Foi empregada a base termodinâmica PSI/Nagra [17] estendida com a base Cemdata18 [18], específica para materiais cimentícios. Como dados de entrada foram considerados a composição mineralógica do cimento, a relação água/cimento, a temperatura e a pressão. As simulações permitiram estimar a hidratação a partir das fases anidras, a distribuição das fases hidratadas e a composição química da solução do poro ao longo da hidratação.

## DEFINIÇÃO DE ESPAÇO COMPOSICIONAL

O espaço composicional foi definido com base nos limites estabelecidos pela ABNT NBR 16697 [19] para cimentos com adição de escória de alto-forno (CP III) e pozolanas (CP IV) (Tabela 1).

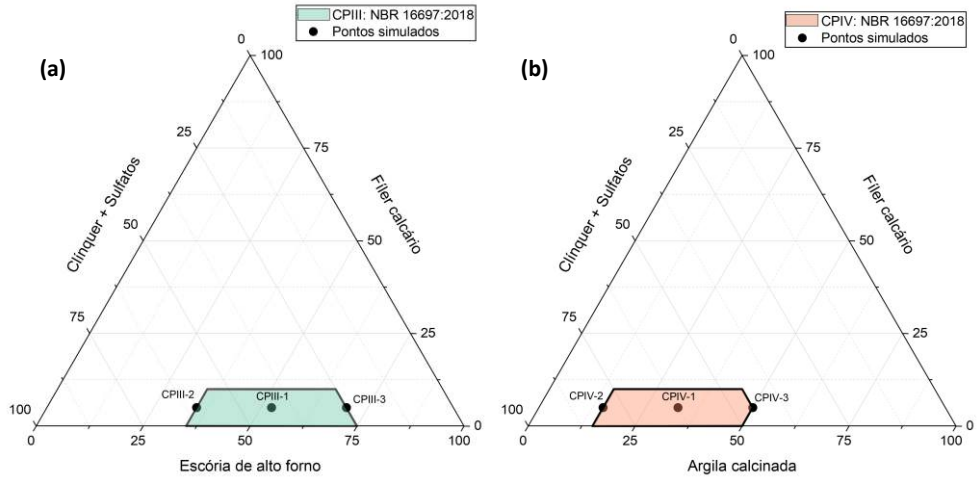
**Tabela 1: Limites de composição do cimento Portland (em massa)**

| Cimento Portland | Clínquer + Sulfatos | Escória de alto-forno | Material pozolânico | Material carbonático |
|---|---|---|---|---|
| CPIII | 25-65 | 35-75 | - | 0-10 |
| CPIV | 45-85 | - | 15-50 | 0-10 |

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018) [19].

Para o presente trabalho, adotou-se argila calcinada como fonte de material pozolânico, fíler calcário como fonte carbonática e gipsita como fonte de sulfatos, fixada em 4,5 % em massa em relação ao clínquer. A partir das restrições normativas, definiu-se um subconjunto ternário no diagrama de mistura (Figura 2).

**Figura 2: Diagrama de mistura baseados nos limites da ABNT NBR 16697:2018 para cimentos do tipo (a) CPIII e (b) CPIV**




Fonte: os autores.

A definição dos pontos de simulação foi realizada a partir de um ponto central e de composições com teores máximos e mínimos de escória de alto-forno ou argila calcinada, mantendo-se fixo o teor de fíler calcário em 5 %. Assim, avaliou-se o impacto dessas adições minerais, dentro dos limites normativos, sobre a resistividade elétrica nas diferentes escalas. Com base nesses critérios, definiram-se as composições de cimento apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2: Proporções em massa dos materiais constituintes para os cimentos simulados**

| Mistura | Clínquer + Sulfatos | Fíler calcário | Escória de alto-forno | Argila Calcinada |
|---|---|---|---|---|
| CPIII-1 | 42,5 | 5,0 | 52,5 | - |
| CPIII-2 | 60,0 | 5,0 | 35,0 | - |
| CPIII-3 | 25,0 | 5,0 | 70,0 | - |
| CPIV-1 | 62,5 | 5,0 | - | 32,5 |
| CPIV-2 | 80,0 | 5,0 | - | 15,0 |
| CPIV-3 | 45,0 | 5,0 | - | 50,0 |

Fonte: os autores.

Para cada composição definida no domínio de mistura, foram consideradas três relações água/cimento (a/c): 0,40, 0,50 e 0,60. Todas as simulações foram conduzidas a 20 °C e 1 bar.

## CONDUTIVIDADE DA SOLUÇÃO DO PORO

A condutividade elétrica da solução de poro foi estimada a partir de sua composição iônica obtida por modelagem termodinâmica, utilizando duas abordagens. Inicialmente, empregou-se a equação de Nernst–Einstein, na qual a condutividade elétrica ($\sigma_{SP}^{NE}$) é obtida pela soma das contribuições individuais dos íons, conforme Equação 1:

$$\sigma_{SP}^{NE} = \frac{e^2}{k_B T} \sum_i z_i^2 \, c_i D_i \tag{1}$$

em que $e$ é a carga elétrica elementar, $k_B$ a constante de Boltzmann, $T$ a temperatura absoluta, $z_i$ a valência do íon $i$, $c_i$ sua concentração molar e $D_i$ o coeficiente de difusão. Entretanto, a equação de Nernst–Einstein (NE) assume independência entre as espécies iônicas, característica de soluções muito diluídas, podendo superestimar a condutividade de soluções concentradas, como as soluções dos poros de materiais cimentícios [20].

Assim, adotou-se também a formulação proposta por Snyder *et al.* [21] (SN), que incorpora a influência da força iônica por meio de coeficientes empíricos específicos para cada espécie, permitindo representar efeitos de não idealidade (Equação 2):

$$\sigma_{SP} = \sum_i z_i \, c_i \frac{\sigma_i^\circ}{1 + G_i \sqrt{I}} \tag{2}$$

em que $\sigma_i^\circ$ é a condutividade equivalente à diluição infinita do íon $i$, $G_i$ o coeficiente empírico associado a esse íon e $I$ a força iônica da solução. Os coeficientes propostos por Snyder *et al.* [21] estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3: Parâmetros de correção empíricos**

| | $Na^+$ | $K^+$ | $Ca^{2+}$ | $SO2^{4-}$ | $OH^-$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_i^\circ \ (cm^2 S/mol)$ | 50,1 | 73,5 | 29,5 | 39,5 | 198,0 |
| $G_i \ (M^{-1/2})$ | 0,733 | 0,548 | 0,771 | 0,877 | 0,353 |

Fonte: [20].

## CONDUTIVIDADE DO C-S-H

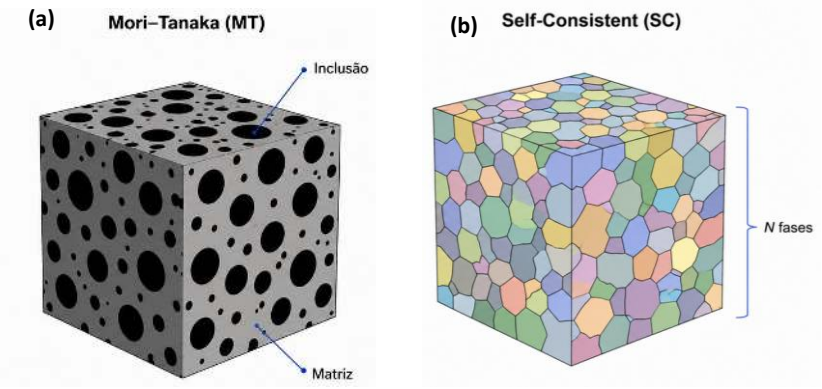
Em modelos termodinâmicos como o CSHQ implementado no CemGEMS, o teor de água associado ao C-S-H é obtido como parte da composição de equilíbrio da fase sólida, sem distinção explícita entre água estrutural, interlamelar e água de gel. Entretanto, resultados experimentais indicam que o teor total de água associado ao C-S-H é superior ao previsto pelo modelo termodinâmico [22, 23]. Assim, a água calculada pelo CemGEMS foi interpretada como representativa da água estrutural, interlamelar e parte da água do gel, sendo adicionada uma contribuição equivalente a 1 mol de $H_2O$ por mol de Si para representar, de forma aproximada, a fração de água de gel não explicitamente considerada.

A água adicional atribuída ao C-S-H foi subtraída da água capilar, garantindo a conservação de massa. O volume corrigido do C-S-H foi então utilizado para estimar sua densidade de empacotamento e classificar a fase em baixa (LD) ou alta densidade (HD). A condutividade elétrica do C-S-H foi definida em função de sua densidade de empacotamento. Para o C-S-H:LD, adotou-se condutividade elétrica de 0,070 S/m, enquanto para o C-S-H:HD foi utilizado o valor de $9{,}23 \times 10^{-5}$ S/m [24].

## MICROMECÂNICA DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A condutividade elétrica macroscópica foi estimada por técnicas de homogeneização micromecânica, considerando as propriedades e frações volumétricas das fases constituintes. Foram adotados os esquemas de Mori–Tanaka (MT) e Auto-Consistente (*Self-Consistent*, SC) (Figura 3).

**Figura 3: Ilustração esquemática para representação dos modelos micromecânicos (a) Mori-Tanaka (MT) e (b) Self-Consistent (SC)**




No esquema de Mori–Tanaka, a condutividade efetiva ($\sigma^{MT}$) é estimada assumindo N inclusões isotrópicas esféricas dispersas em uma matriz contínua e isotrópica, conforme Equação 3 [25]:

$$\frac{\sigma^{MT} - \sigma_0}{\sigma^{MT} + 2\sigma_0} = \sum_{r=1}^{N} f_r \, \frac{\sigma_r - \sigma_0}{\sigma_r + 2\sigma_0} \tag{3}$$

em que $\sigma_0$ é a condutividade da fase matriz, $\sigma_r$ a condutividade da inclusão $r$ e $f_r$ sua fração volumétrica.

No modelo SC, não há uma fase hospedeira definida. Todas as fases são tratadas de forma equivalente, sendo consideradas inclusões imersas em um meio homogêneo

efetivo inicialmente desconhecido. Assim, a condutividade elétrica efetiva do compósito ($\sigma^{SC}$), também sob condição de micro/macro-isotropia, é obtida implicitamente pela Equação 4 [25]:

$$\sum_{r=1}^{N} f_r \frac{\sigma_r - \sigma^{SC}}{\sigma_r + 2\sigma^{SC}} = 0 \quad (4)$$

em que $f_r$ e $\sigma_r$ correspondem, respectivamente, à fração volumétrica e à condutividade elétrica da fase $r$.

## DADOS EXPERIMENTAIS

Para validação do modelo, foram utilizados resultados experimentais de resistividade elétrica de pastas, argamassas e concretos produzidos com dois cimentos comerciais brasileiros dos tipos CP III 32-RS e CP IV 32-RS. O proporcionamento dos concretos e suas características estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4: Identificação dos traços, proporções dos materiais e propriedades do concreto**

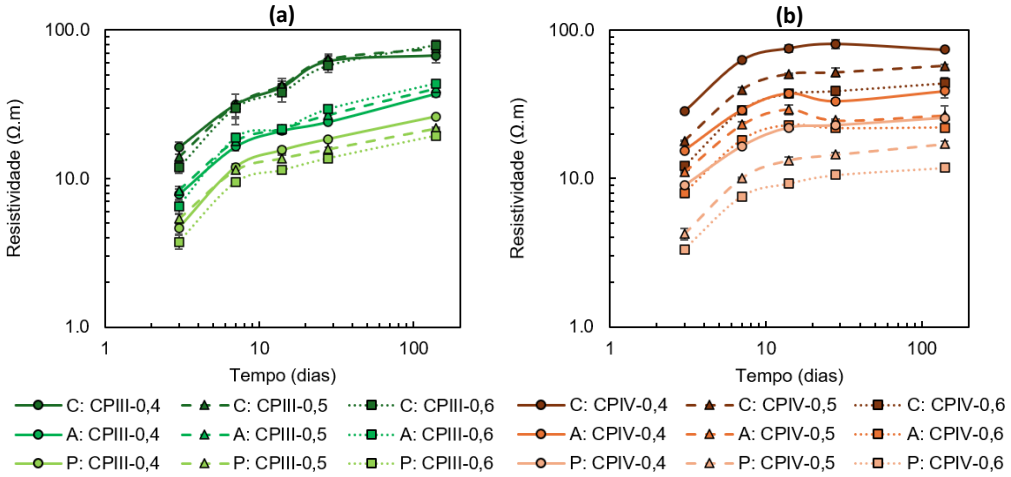
| ID | a/c | Dosagem unitária em massa (c:a:b) | Aditivo (%) | Abatimento (mm) | Resistência à compressão: 28 dias (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| CPIII-0,4 | 0,4 | 1:1,3:1,9 | 0,2 % | 160 | 48,8 |
| CPIII-0,5 | 0,5 | 1:1,8:2,3 | 0,1 % | 160 | 41,3 |
| CPIII-0,6 | 0,6 | 1:2,3:2,7 | 0,0 % | 160 | 32,9 |
| CPIV-0,4 | 0,4 | 1:1,3:1,9 | 0,8 % | 100 | 55,4 |
| CPIV-0,5 | 0,5 | 1:1,8:2,3 | 0,4 % | 115 | 39,1 |
| CPIV-0,6 | 0,6 | 1:2,3:2,7 | 0,4 % | 115 | 35,2 |

Fonte: os autores.

Além dos cimentos descritos, os materiais utilizados para a composição das pastas, argamassas e concretos foram areia natural quartzosa (módulo de finura de 2,05), rocha britada do tipo granítica (dimensão máxima característica de 19 mm) e aditivo superplastificante à base de policarboxilatos (PCE).

As argamassas foram produzidas a partir do peneiramento do concreto fresco em peneira de 6,3 mm. As pastas foram produzidas com cimento, água e aditivo, mantendo-se as proporções da Tabela 4. Os corpos de prova de concreto foram moldados em formato cilíndrico (10 × 20 cm), enquanto os de argamassa e pasta foram prismáticos (4 × 4 × 16 cm). Após a moldagem, as amostras foram mantidas em câmara úmida (25 ± 2 °C e UR > 95 %) até as idades de ensaio. As medidas de resistividade elétrica foram realizadas utilizando o equipamento Resipod (Proceq), pelo método volumétrico [26], aos 3, 7, 14, 28 e 140 dias (Figura 4).

**Figura 4: Caracterização da resistividade elétrica volumétrica das pastas, argamassas e concretos produzidos com os cimentos (a) CPIII e (b) CPIV**



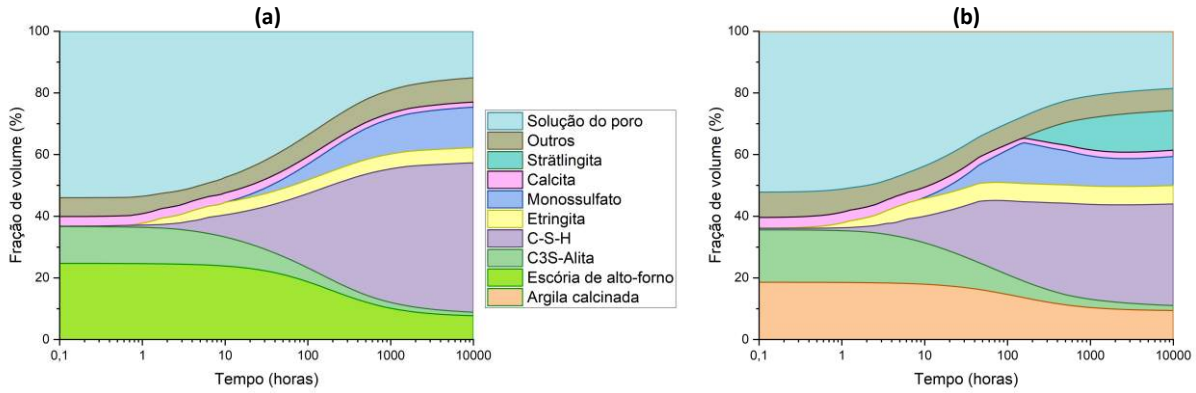

Nota: C: Concreto; A: Argamassa; P: Pasta. Fonte: os autores.

## RESULTADOS

### DISTRIBUIÇÃO DE FASES E DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO

A Figura 5 apresenta o diagrama de fases das matrizes CP III-1-0,4 e CP IV-1-0,4. As demais misturas e relações a/c apresentaram distribuições semelhantes para cada tipo de cimento.

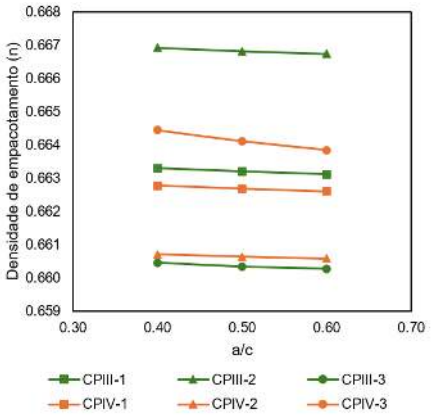
**Figura 5: Diagrama de fases ao longo do tempo de hidratação das matrizes (a) CP III-1-0,4 e (b) CP IV-1-0,4**




Fonte: os autores.

A Figura 6 apresenta os resultados de densidade de empacotamento obtidos a partir das simulações termodinâmicas utilizando o modelo CSHQ, ajustado com a adição de 1 mol $H_2O$/mol Si.

**Figura 6: Densidade de empacotamento do C-S-H na condição de equilíbrio**



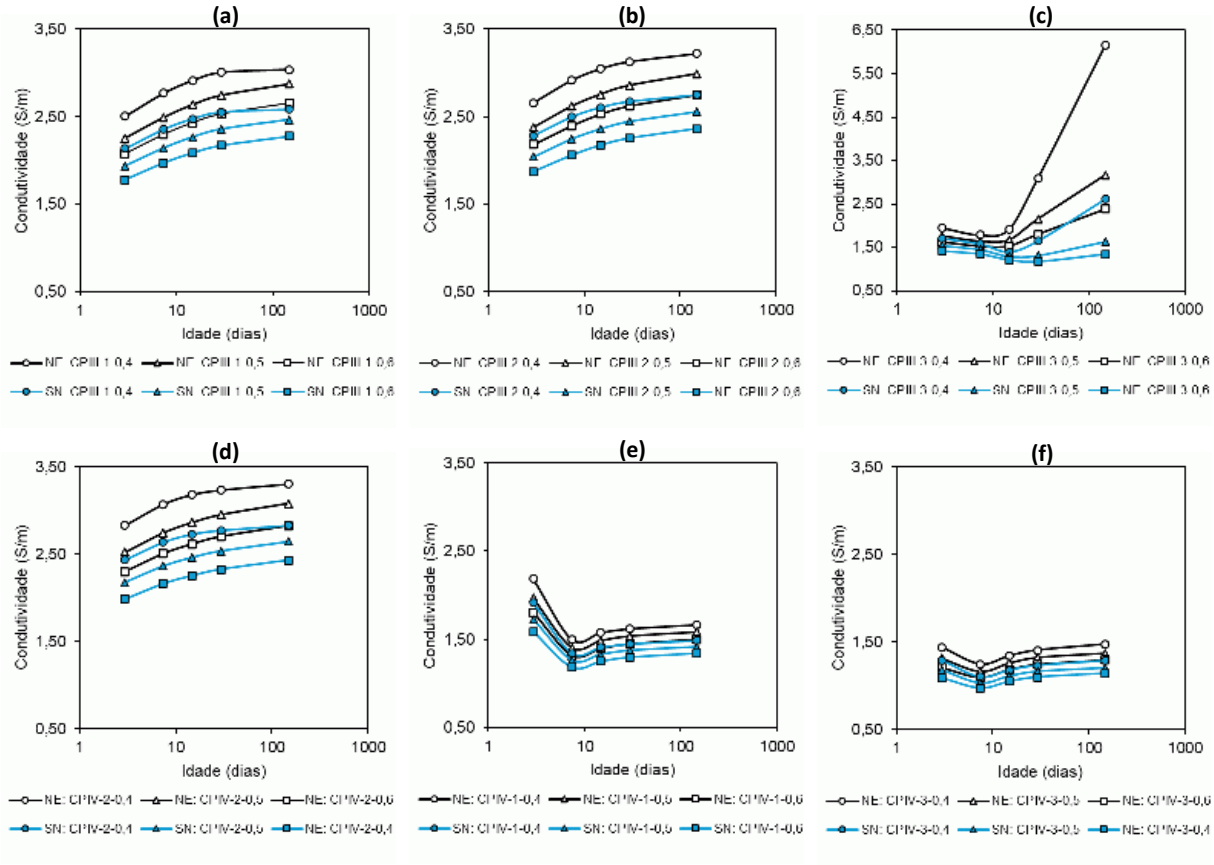

Fonte: os autores.

Os resultados indicaram valores próximos entre si, variando apenas na terceira casa decimal (0,660 a 0,667), e situando-se próximos ao limite de 0,64 adotado para C-S-H de baixa densidade (LD) [27]. Nesse contexto, considerou-se que a microestrutura prevista apresenta comportamento mais compatível com C-S-H do tipo LD, adotando-se os valores de resistividade elétrica reportados na literatura para esse regime estrutural.

## CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DO PORO

A determinação da condutividade elétrica da solução do poro ao longo da hidratação foi realizada pelas equações de Nernst–Einstein (NE) e Snyder *et al.* (SN) (Figura 7). Os resultados mostram que NE fornece condutividades sistematicamente superiores às obtidas por SN.

**Figura 7: Determinação da condutividade elétrica da solução do poro pelas equações Nernst–Einstein (NE) e *Snyder et al.* (SN) para os pontos simulados (a) CPIII-1, (b) CPIII-2, (c) CPIII-3, (d) CPIV-1¸(e) CPIV-2 e (f) CPIV-3**



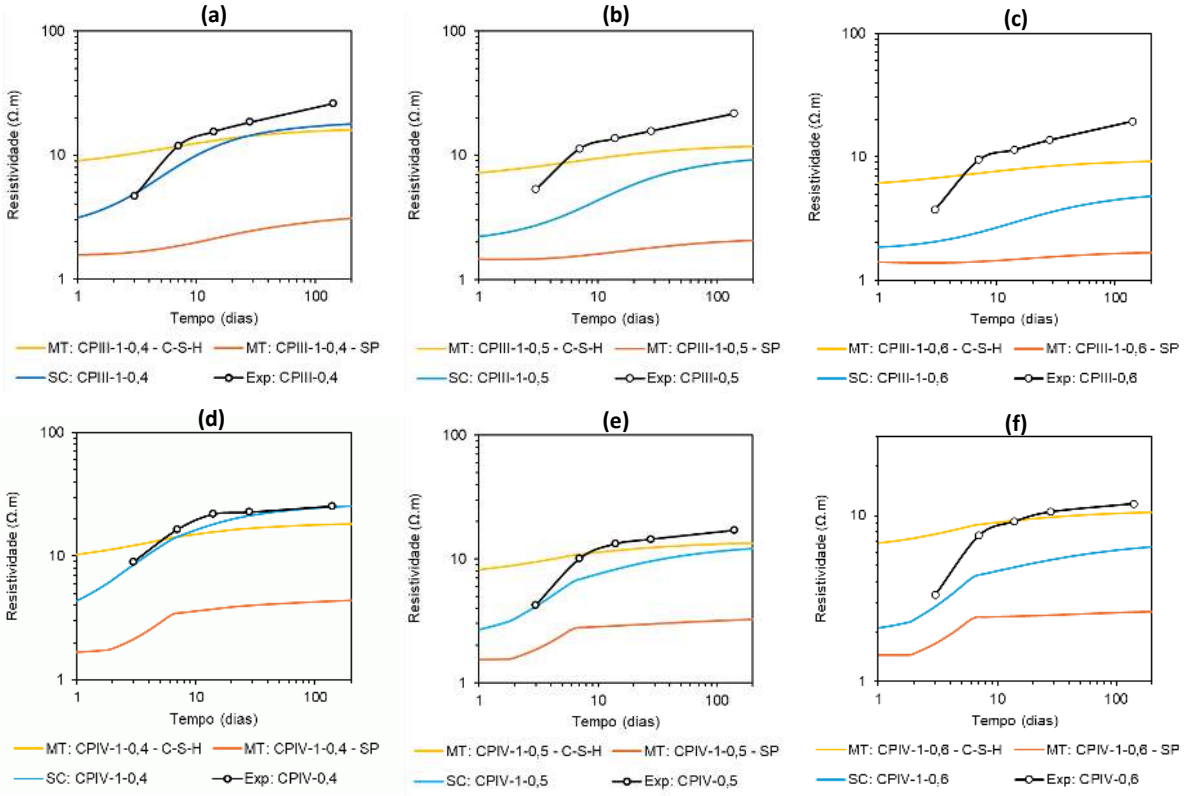

Fonte: os autores.

Esse comportamento era esperado, uma vez que NE desconsidera interações entre íons e efeitos de correlação eletrostática, sendo mais adequada para soluções diluídas [20]. O modelo de SN incorpora uma correção dependente da força iônica válida para concentraçoes de íon moderadas (e.g. < 0,5 M), reduzindo a mobilidade das espécies dissolvidas em soluções concentradas. Assim, os resultados obtidos por SN foram considerados mais representativos da condutividade da solução do poro e adotados nas etapas subsequentes de homogeneização. Além disso, as homogeneizações foram realizadas a partir da resistividade elétrica, por ser uma propriedade mais relacionada à prática da engenharia

## HOMOGENEIZAÇÃO - RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA ESCALA DA PASTA

Na escala da pasta, foram avaliados os esquemas de Mori–Tanaka (MT), considerando tanto o C-S-H (MT/C-S-H) quanto a solução do poro (MT/SP) como matriz, além do esquema Autoconsistente (SC). Os resultados indicaram diferenças importantes entre as abordagens (Figura 8).

**Figura 8: Esquemas de homogeneização da resistividade elétrica da pasta de cimento pelo método de Mori–Tanaka (MT) e Auto-Consistente (SC) para os pontos simulados (a) CPIII-1-0,4, (b) CPIII-1-0,5, (c) CPIII-1-0,6, (d) CPIV-1-0,4¸(e) CPIV-1-0,5 e (f) CPIV-1-0,6.**



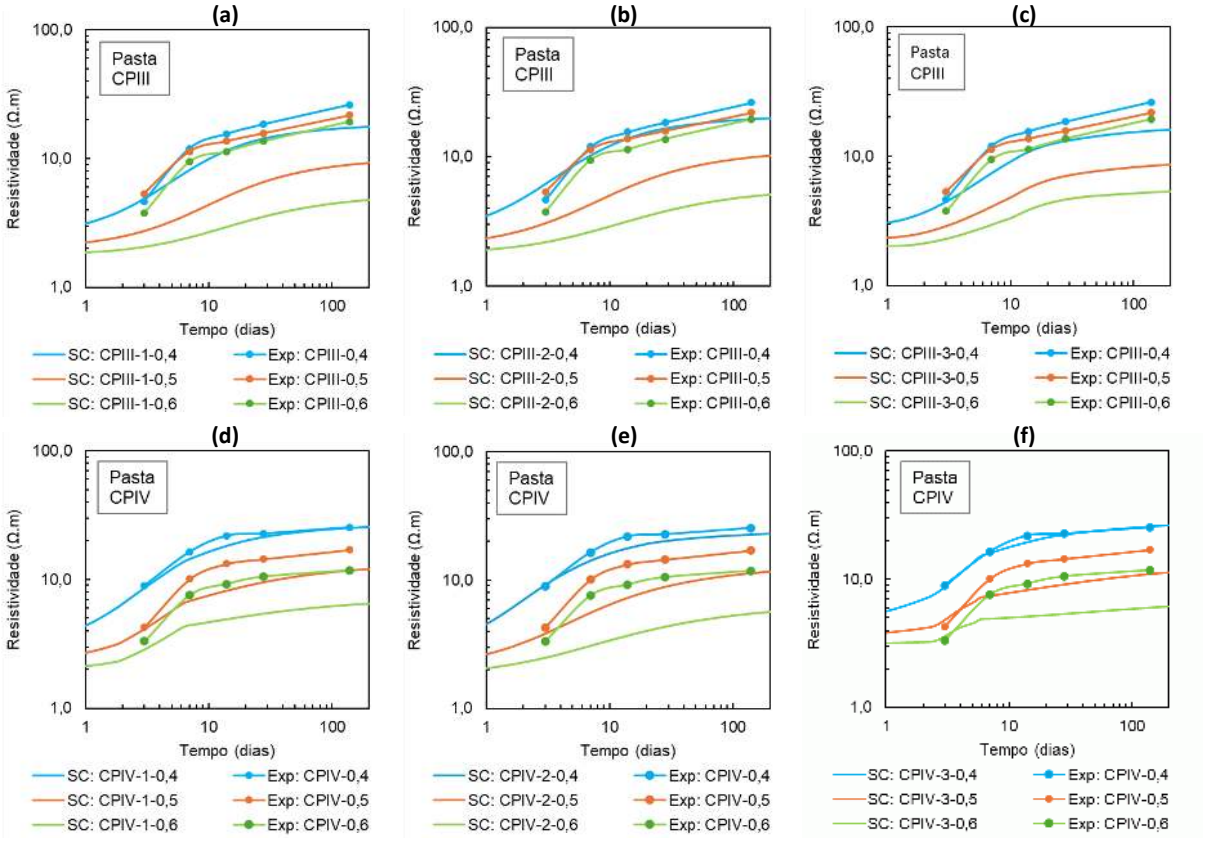

Fonte: os autores.

Observa-se que o esquema SC apresentou melhor capacidade de reproduzir o comportamento da evolução temporal da resistividade elétrica observada experimentalmente, especialmente o aumento progressivo ao longo da hidratação. Em contraste, o esquema MT apresentou comportamento menos sensível, resultando em curvas relativamente mais estáveis ao longo do tempo. Esse comportamento está associado ao fato de o modelo MT assumir uma morfologia fixa do tipo matriz-inclusão, enquanto o esquema SC considera implicitamente a transição microestrutural de um sistema inicialmente dominado pela fase líquida para uma matriz sólida [2].

Assim, utilizando o esquema SC, fez-se a homogeneização da resistividade elétrica da pasta de cimento (Figura 9). De forma geral, observa-se que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a tendência de aumento da resistividade elétrica ao longo da hidratação para os sistemas CP III e CP IV.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8949

**Figura 9: Homogeneização da resistividade elétrica da pasta de cimento pelo método Auto-Consistente (SC) para os pontos simulados (a) CPIII-1, (b) CPIII-2, (c) CPIII-3, (d) CPIV-1¸(e) CPIV-2 e (f) CPIV-3**




Fonte: os autores.

Os melhores ajustes foram observados para as misturas com menor relação a/c, particularmente para a/c = 0,4. Para relações a/c mais elevadas, o modelo tende a subestimar os valores experimentais de resistividade elétrica, principalmente em idades mais avançadas. Esse comportamento sugere que, embora a abordagem adotada represente adequadamente a evolução global da microestrutura, ainda existem limitações relacionadas à descrição da solução dos poros e da evolução das propriedades elétricas das fases hidratadas ao longo da hidratação.

## HOMOGENEIZAÇÃO - RESISTIVIDADE ELÉTRICA NA ESCALA DA ARGAMASSA E CONCRETO

Para as escalas de argamassa e concreto, utilizou-se apenas o esquema de homogeneização MT considerando duas fases. Nesse modelo, as inclusões (areia ou brita) são tratadas de forma simplificadas, sendo representadas apenas por sua fração volumétrica na matriz, não sendo consideradas informações relativas ao tamanho, distribuição granulométrica ou forma das partículas. A Figura 10 e Figura 11 apresentam a comparação entre os resultados experimentais e simulados nas escalas de argamassa e concreto, respectivamente.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8949

**Figura 10: Homogeneização da resistividade elétrica na escala da argamassa e do concreto pelo método de Mori-Tanaka para os pontos simulados (a) CPIII-1, (b) CPIII-2, (c) CPIII-3, (d) CPIV-1¸(e) CPIV-2 e (f) CPIV-3**

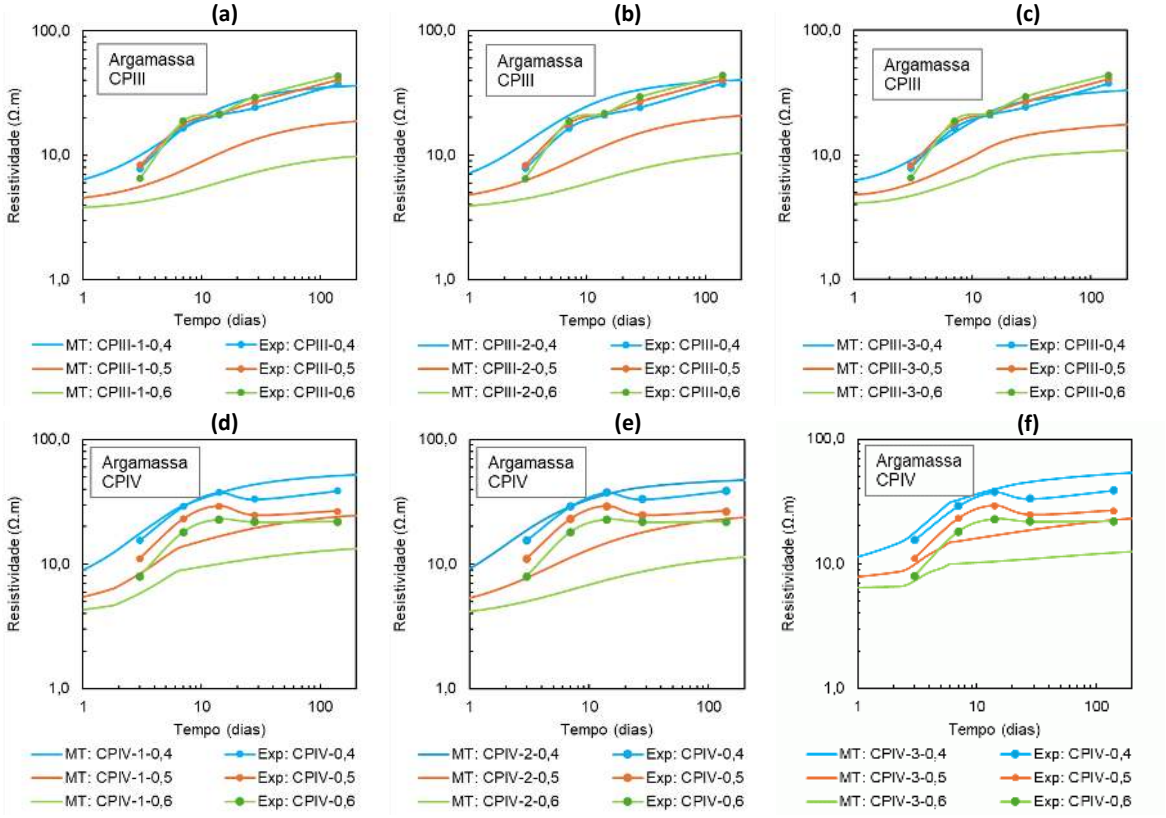
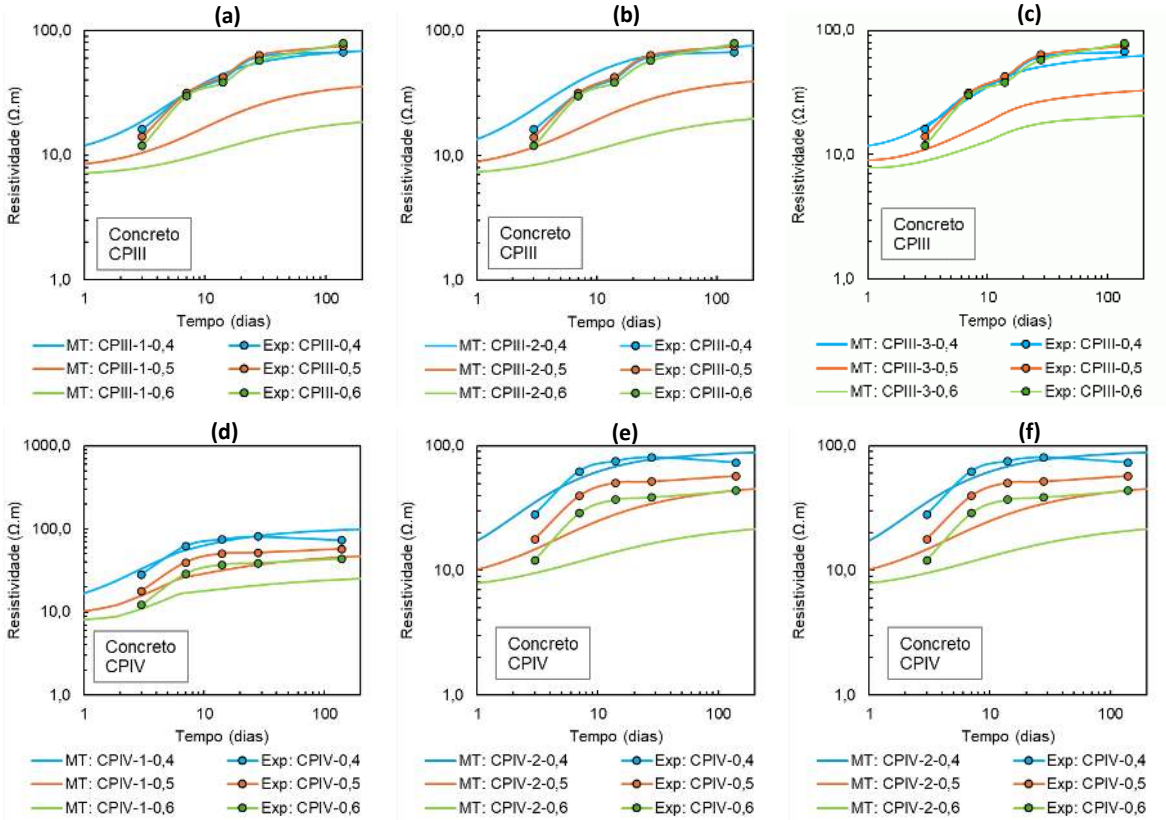



**Figura 11: Homogeneização da resistividade elétrica na escala da argamassa e do concreto pelo método de Mori-Tanaka para os pontos simulados (a) CPIII-1, (b) CPIII-2, (c) CPIII-3, (d) CPIV-1¸(e) CPIV-2 e (f) CPIV-3**



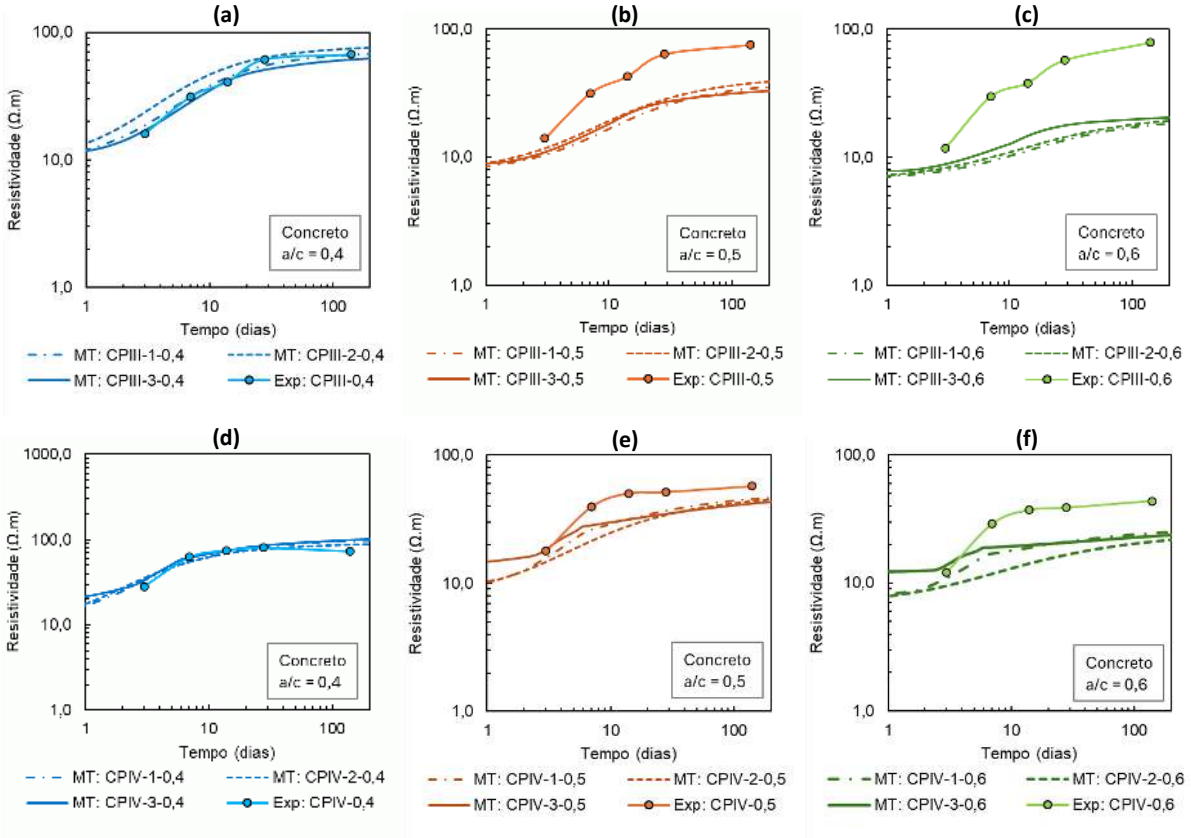

Fonte: os autores.

Observa-se que as tendências identificadas na escala da pasta foram mantidas nas escalas superiores, indicando coerência na estratégia multiescala adotada. De maneira geral, o modelo reproduziu adequadamente o aumento da resistividade elétrica ao longo da hidratação e o efeito da relação a/c. Misturas com menor relação a/c apresentaram maiores valores de resistividade elétrica, associados à menor conectividade da rede porosa.

Assim como na pasta, os melhores ajustes ocorreram para a/c = 0,4, enquanto diferenças mais pronunciadas foram observadas para relações a/c mais elevadas e idades avançadas. Na escala do concreto, observou-se ainda menor sensibilidade à variação da relação a/c, comportamento associado à maior fração volumétrica de agregados e à menor participação relativa da pasta na resposta elétrica do compósito.

A Figura 12 apresenta os resultados simulados, na escala do concreto, para diferentes sistemas cimentícios com mesma relação a/c. Observa-se elevada sobreposição entre as composições simuladas, indicando influência limitada das variações de composição sobre a resistividade elétrica simulada.

**Figura 12: Comparação da resistividade elétrica de concretos produzidos com cimentos CP III e CP IV para relações a/c de 0,4, 0,5 e 0,6: (a–c) CP III e (d–f) CP IV.**




Fonte: os autores.

Esse comportamento sugere que, no modelo proposto, a resposta elétrica do sistema é predominantemente governada pela relação a/c e pela evolução da microestrutura porosa, enquanto as variações nas proporções de escória e argila calcinada exercem influência secundária. Esse resultado difere das observações de Vollpracht *et al.* [28], que demonstraram forte influência da composição de ligantes sobre a composição

iônica e a condutividade da solução dos poros. Assim, os desvios observados indicam que ainda existem limitações relacionadas à descrição da quantidade de alcalinos no cimento e à evolução das propriedades elétricas das fases hidratadas.

## CONCLUSÕES

A abordagem multiescala proposta representou adequadamente a evolução da resistividade elétrica nas escalas de pasta, argamassa e concreto, reproduzindo as principais tendências associadas à hidratação e à relação a/c. Apesar de ser um modelo com algumas simplificações, os resultados demonstram o potencial da homogeneização micromecânica para análise da resposta elétrica de matrizes cimentícias diversas, embora ainda existam limitações relacionadas à descrição da solução do poro e das fases hidratadas. Seguem conclusões específicas:

- O modelo reproduziu o aumento da resistividade elétrica ao longo da hidratação nas três escalas avaliadas.
- A integração entre modelagem termodinâmica e homogeneização micromecânica mostrou-se capaz de representar a influência da microestrutura e da solução dos poros sobre a resposta elétrica dos materiais cimentícios.
- A resposta elétrica simulada mostrou sensibilidade exagerada à relação a/c, indicando o papel dominante do volume da solução do poro sobre a resistividade elétrica efetiva.
- As diferenças entre composições cimentícias exerceram influência limitada sobre os resultados simulados, indicando que para os pontos simulados o efeito da relação a/c foi predominante.
- Embora o modelo simplificado tenha apresentado boa capacidade preditiva, permanecem incertezas associadas à condutividade elétrica das fases hidratadas e à representação da composição química da solução dos poros, aspectos que podem contribuir para aprimorar sua precisão.

Como perspectiva futura, recomenda-se incorporar descrições mais detalhadas da composição química dos cimentos e das propriedades elétricas individuais das fases hidratadas, visando ampliar a aplicabilidade e a capacidade preditiva do modelo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento desta pesquisa, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa PQ do Prof. Oswaldo Cascudo.

**Declaração**

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou a ferramenta ChatGPT (GPT-5.5, OpenAI) para a revisão ortográfica e de coerência do texto, bem como para geração da imagem que compõe a Figura 3 do presente trabalho. Após a utilização da ferramenta, o autor revisou e editou o conteúdo conforme necessário e assume total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

## REFERÊNCIAS


[1] KULIK, D. A.; WINNEFELD, F.; KULIK, A.; MIRON, G. D.; LOTHENBACH, B. CemGEMS – an easy-to-use web application for thermodynamic modeling of cementitious materials. **Rilem Technical Letters**, v.6, p.36-52, jun. 2021.

[2] HONORIO, T.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Electrical properties of cement-based materials: multiscale modeling and quantification of the variability. **Construction and Building Materials**, v.245, p.118461, jun. 2020.

[3] ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. Physical properties of cement paste. In: Physical properties of cement paste, 2., 2010, Delft. **Proceedings [...].** Delft, 2010.

[4] CASCUDO, O.; PIRES, P.; CARASEK, H.; CASTRO, A.; LOPES, A. Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation. **Cement and Concrete Composites**, v.115, p.103858, jan. 2021.

[5] AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: a review. **Advances In Materials Science and Engineering**, v.2017, p.1-30, 2017.

[6] POWERS, T. C. Physical properties of cement paste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHEMISTRY OF CEMENT, 4., 1960, Washington. **Proceedings [...]** Washington: National Bureau of Standards, 1960. p.577-613.

[7] TENNIS, P. D.; JENNINGS, H. M. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.30, n.6, p.855-863, jun. 2000.

[8] LOTHENBACH, B.; SAOUT, G. L.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v.38, n.6, p.848-860, jun. 2008.

[9] LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v.41, n.12, p.1244-1256, dez. 2011.

[10] DURDZIńSKI, P. T.; HAHA, M. B.; ZAJAC, M.; SCRIVENER, K. L. Phase assemblage of composite cements. **Cement and Concrete Research**, v.99, p.172-182, set. 2017.

[11] BOLTE, G.; ZAJAC, M.; SKOCEK, J.; HAHA, M. B. Development of composite cements characterized by low environmental footprint. **Journal of Cleaner Production**, v.226, p.503-514, jul. 2019.

[12] LOTHENBACH, B.; ZAJAC, M. Application of thermodynamic modelling to hydrated cements. **Cement and Concrete Research**, v.123, p.105779, set. 2019.

[13] CEMGEMS. **Web application for thermodynamic modelling of cementitious materials**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://cemgems.app/. Acesso em: 17 jul. 2026.

[14] WAGNER, T.; KULIK, D. A.; HINGERL, F. F.; DMYTRIEVA, S. V. GEM-SELEKTOR GEOCHEMICAL MODELING PACKAGE: tsolmod library and data interface for multicomponent phase models**. The Canadian Mineralogist**, v.50, n.5, p.1173-1195, out. 2012.

[15] KULIK, D. A.; WAGNER, T.; DMYTRIEVA, S. V.; KOSAKOWSKI, G.; HINGERL, F. F.; CHUDNENKO, K. V.; BERNER, U. R. GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and gems3k numerical kernel for coupled simulation codes. **Computational Geosciences**, p.1-24, ago. 2012.

[16] MIRON, G. D.; KULIK, D. A.; DMYTRIEVA, S. V.; WAGNER, T. GEMSFITS: code package for optimization of geochemical model parameters and inverse modeling. **Applied Geochemistry**, v.55, p.28-45, abr. 2015.

[17] HOENEN, T., HUMMEL, W., BERNER, U., CURTI, E. **The PSI/Nagra Chemical Thermodynamic Data Base 12/07**, PSI report 14-04. 1.ed. Switzerland: Villigen PSI, 2014.

[18] LOTHENBACH, B., KULIK, D., MATSCHEI, T., BALONIS, M., BAQUERIZO, L., DILNESA, B.Z., MIRON, D. G., MYERS, R. Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials, **Cement and Concrete Research**, V.115, P.472-506, jan. 2019.

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

[20] HONORIO, T.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. May self-diffusion of ions computed from molecular dynamics explain the electrical conductivity of pore solutions in cement-based materials? **Materials and Structures**, v.53, n.3, p.1-13, jun. 2020.

[21] SNYDER, K. A.; FENG, X.; KEEN, B. D.; MASON, T. O. Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH−, K+ and Na+ concentrations. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.6, p.793-798, jun. 2003.

[22] MULLER, A. C. A.; SCRIVENER, K. L.; GAJEWICZ, A. M.; MCDONALD, P. J. Densification of C–S–H Measured by 1H NMR Relaxometry. **The Journal of Physical Chemistry C**, v.117, n.1, p.403-412, dez. 2012.

[23] LOTHENBACH, B.; NONAT, A. Calcium silicate hydrates: solid and liquid phase composition**. Cement and Concrete Research**, v.78, p.57-70, dez. 2015.

[24] HONORIO, T.; BONFIM, W. B.; CASCUDO, O. Impedance and electrical conductivity of C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v.201, p.108123, mar. 2026.

[25] TORQUATO, S. **Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties**. 1.ed. Nova Iorque: Springer New York, 2002.

[26] PROCEQ SA**. Resipod Family: instruções de operação – teste de durabilidade do concreto.** Schwerzenbach, Suíça: Proceq SA, 2017. Manual de operação.

[27] CONSTANTINIDES, G.; ULM, F. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: results from nanoindentation and micromechanical modeling. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.1, p.67-80, jan. 2004.

[28] VOLLPRACHT, A.; LOTHENBACH, B.; SNELLINGS, R.; HAUFE, J. The pore solution of blended cements: a review. **Materials and Structures**, v.49, n.8, p.3341-3367, out. 2015.