



**CENTRO UNIVERSITÁRIO  
DE VOLTA REDONDA**

**CIDIRLEI DE PAULA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLO PARA  
AVALIAÇÃO DA AUTO CICATRIZAÇÃO DE  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE PRODUTOS  
CRISTALIZANTES E ANÁLISE DAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DEVIDO AO  
ATAQUE DE SULFATOS**



Aluno: Cidirlei de Paula Silva

Orientadora: Prof<sup>a</sup> . Dra . Cirlene Fourquet Bandeira

Coorientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago



Volta Redonda  
2025





- “DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE ENSAIO DE AUTO CICATRIZAÇÃO PARA CONCRETOS COM ADIÇÕES CRISTALIZANTES E PATENTE DO EQUIPAMENTO.”

Autor: Pedro Henrique Tavares Geraldino, 2025

- “DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO COM ADITIVO CRISTALIZANTE PARA A REALIZAÇÃO DE TESTES EM EQUIPAMENTO PATENTEADO PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS.”

Autor: Dionatan Amaral Rodrigues, 2025






# Introdução



Concreto na construção civil



Ataque de agentes deletérios em ambientes agressivos



Solos contaminados, ambientes marinhos, industriais, esgoto, e outros



O uso de aditivos cristalizantes como uma alternativa eficaz e promissora





## Objetivo Geral

- ➔ Avaliação da autocicatrização e resistência mecânica do concreto exposto ao ataque de sulfato

## Objetivo Específico

- ➔ Analisar a eficiência da autocicatrização e fechamento de fissuras;
- ➔ Analisar a resistência mecânicas do concreto após o ataque de sulfatos.
- ➔ Comparar o desempenho das amostras sem e com a exposição de sulfato
- ➔ Analisar a eficiência e importância do equipamento patenteado pelo autor, para o desenvolvimento da pesquisa;






# Justificativa



Durabilidade, desempenho, sustentabilidade, recuperação das estruturas de concreto e descarte de resíduos sólidos



Necessidade da adoção de métodos e técnicas para evitar a degradação



Métodos eficazes contribuem para evitar gastos onerosos, com as reabilitações e reconstruções precoces





# Revisão Bibliográfica

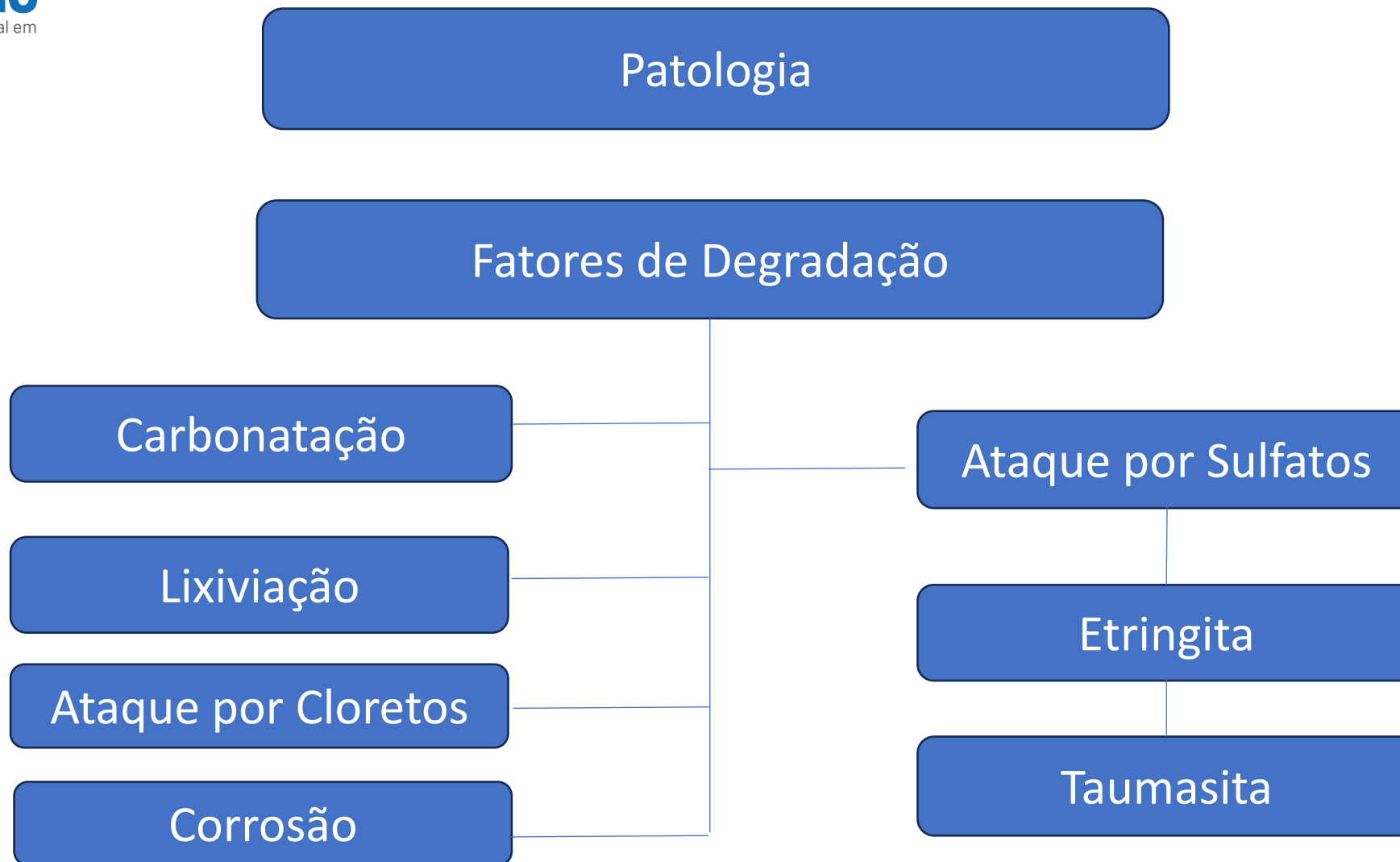
Materials Cerâmicos  
Materials Poliméricos  
Materials Compósitos

Concreto

- Cimento Portland  
- Agregado  
- Água  
- Aditivos

Concreto Simples  
Concreto Armado





## Carbonatação



- Reação entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e os compostos alcalinos do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, que forma o carbonato de cálcio e redução do pH do concreto



## Lixiviação



- Processo de degradação causado pela dissolução e transporte de compostos solúveis, como o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), para fora da matriz cimentícia.





## Ataque por Cloretos



- Ocorre frequentemente em ambientes marinhos, industriais ou com uso de agentes descongelantes .Diferente da carbonatação mesmo com o pH elevado são prejudiciais as armaduras



## Corrosão das armaduras



- É um dos mecanismos de degradação mais críticos em estruturas de concreto armado, pois compromete tanto a durabilidade quanto a segurança estrutural. Sua ação resulta na formação de óxidos que se expandem e geram fissurações e deslocamento do concreto.



## Ataque por sulfatos



- Ocorre quando os sulfatos em contato com materiais cimentícios, reagem com aluminatos do cimento, formando a etringita expansiva. O ataque de sulfatos pode ser classificado como interno ou externo.
- Ocasiona fissuração, deslocamento e perda de resistência do concreto, comprometendo assim sua durabilidade



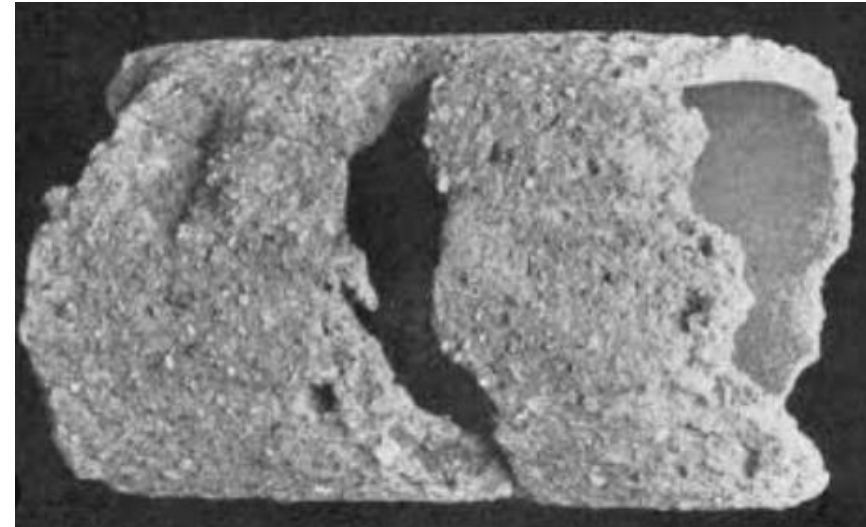
## Etringita



Fonte: Google imagens (2025)

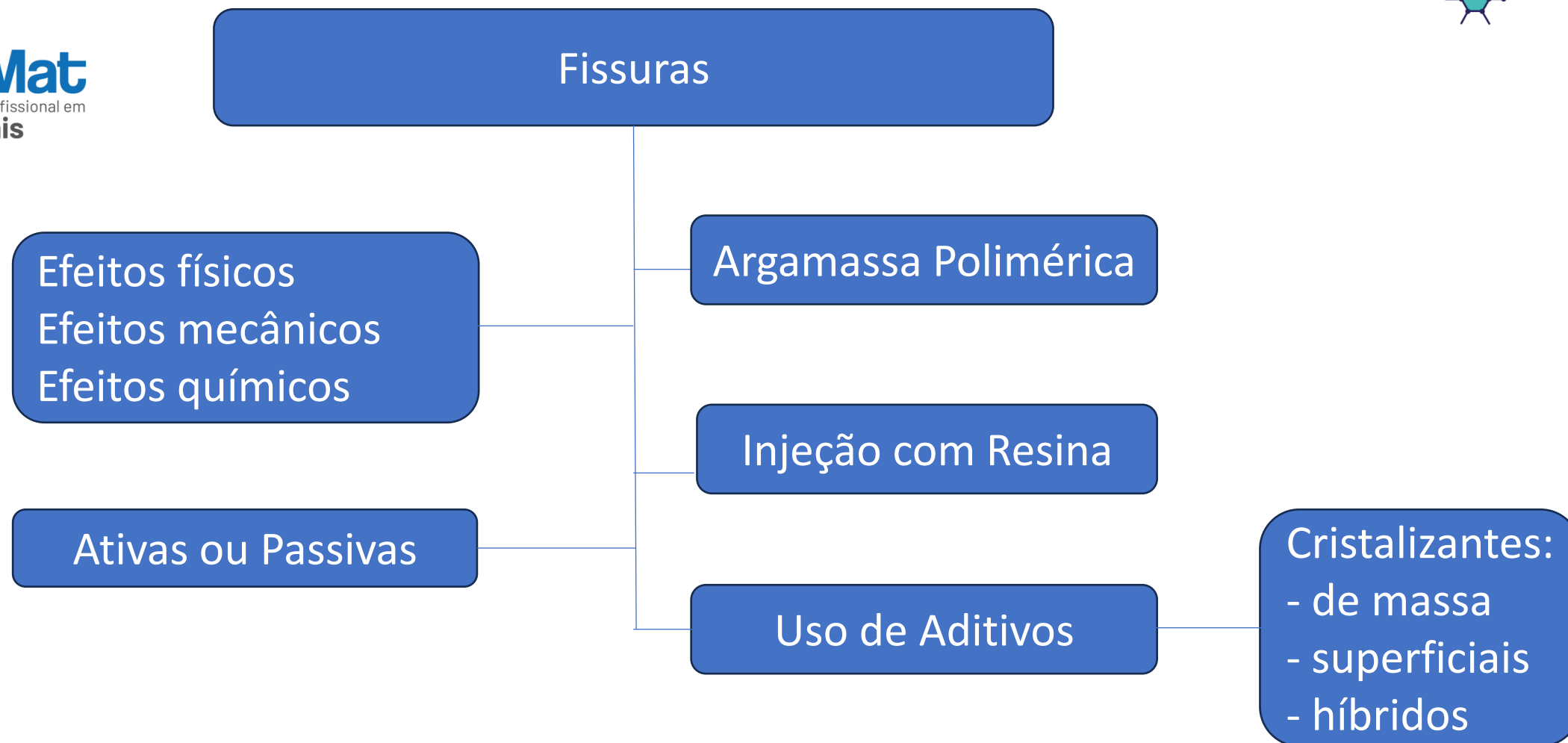
- Composto cristalino a partir da reação entre aluminatos do cimento, íons cálcio e sulfato, sendo normalmente gerada durante a hidratação inicial do cimento.
- A formação da etringita pode ser classificada como primária ou secundária.
- É um processo crítico principalmente em estruturas expostas à água, como barragens, fundações e túneis.

## Processo de Taumasita



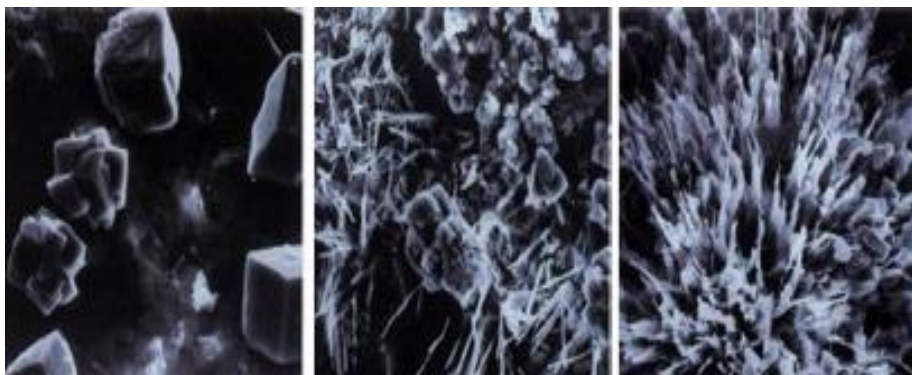
Fonte: Google imagens (2025)

- Formado pela reação entre aluminatos do cimento, carbonatos e os sulfatos.
- Ocorre em ambientes frios e úmidos, geralmente inferiores a 15 °C.
- Resulta em perda de coesão, amolecimento da estrutura e redução significativa da resistência mecânica.
- Pode surgir em estruturas subterrâneas, túneis e obras expostas a águas contaminadas com sulfatos em regiões frias ou mal ventiladas.





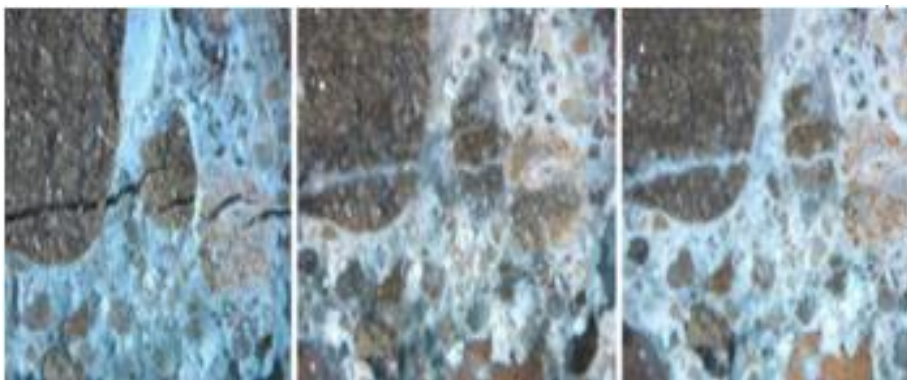
## Auto Cicatrização



Reação dos ingredientes ativos dos aditivos com os sub produtos da hidratação do cimento

Eficiente em ambientes com pressão hidrostática de até 0,7 MPa

Tecnologia eficaz que reduz custos com manutenções ao longo da vida útil





## Processos de Auto Cicatrização

### Técnicas Iniciais

Processos Naturais e Autógenos

Formação de carbonatação- até 0,1mm

Pouca eficácia em fissuras acima de 0,2mm

Uso restrito, necessitando da adoção de novas técnicas

### Técnicas Atuais

Uso de Bactérias Calcificantes

Microcápsulas com polímero ou resinas

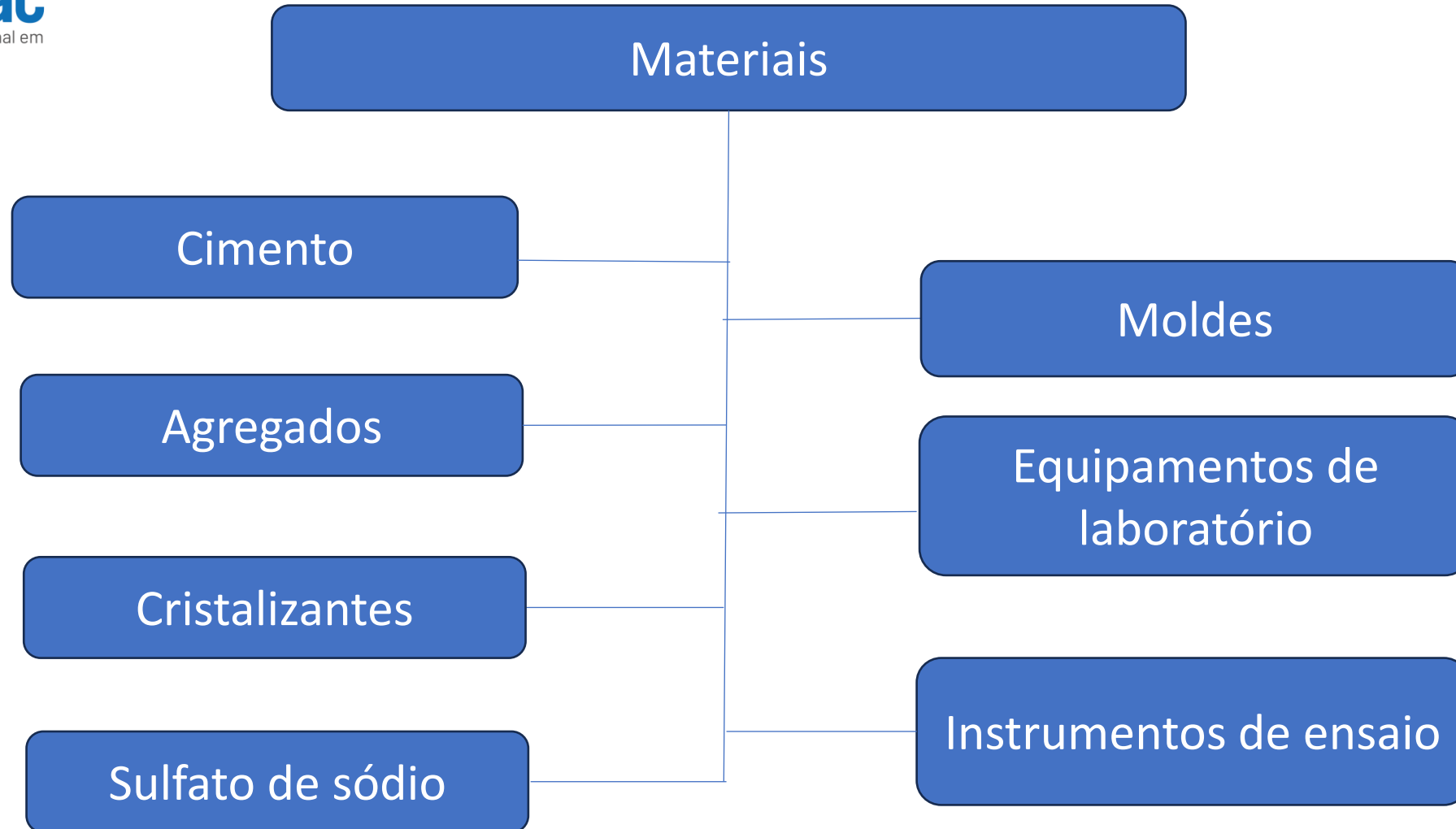
Incorporação de fibras sintéticas e naturais com aditivos químicos

Aditivos auto cicatrizantes





# Materiais e Métodos





## Métodos

### Preparo do Concreto

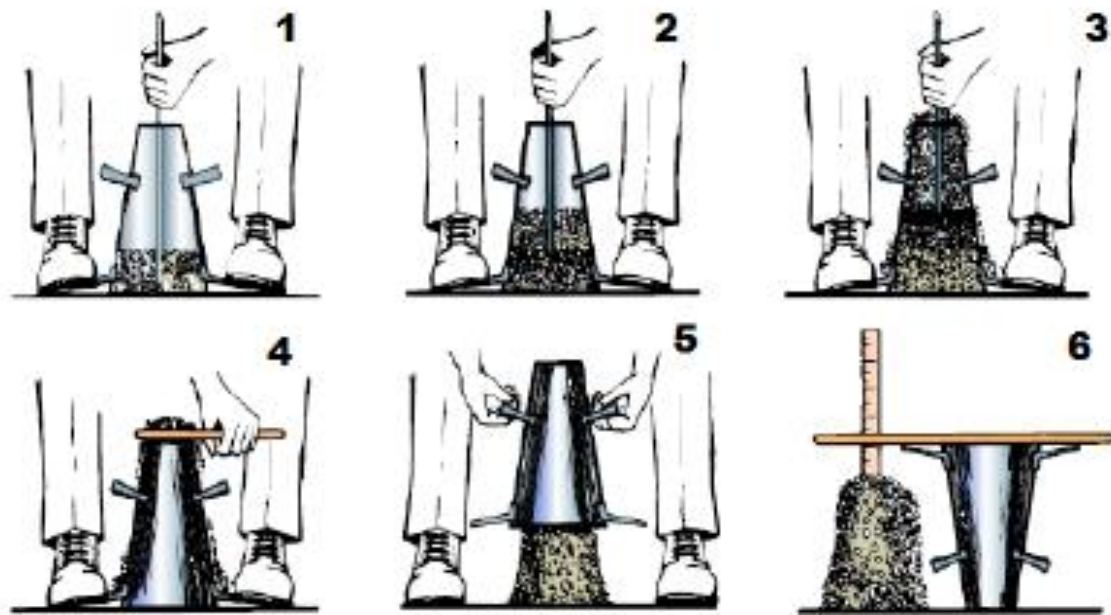


- ### Proporção da Mistura
- Cimento:  $350 \text{ kg/m}^3$
  - Agregado miúdo:  $700 \text{ kg/m}^3$
  - Agregado graúdo:  $1.200 \text{ kg/m}^3$
  - Água:  $175 \text{ litros/m}^3$
  - Aditivo cristalizante: 1,5% em relação à massa do cimento
  - Traço 1:2:3 a/c = 0,30



## Métodos

### Ensaio de Abatimento



## Métodos



### Modelagem

### Cura do concreto



### Teste de compressão com e sem o ataque de sulfatos

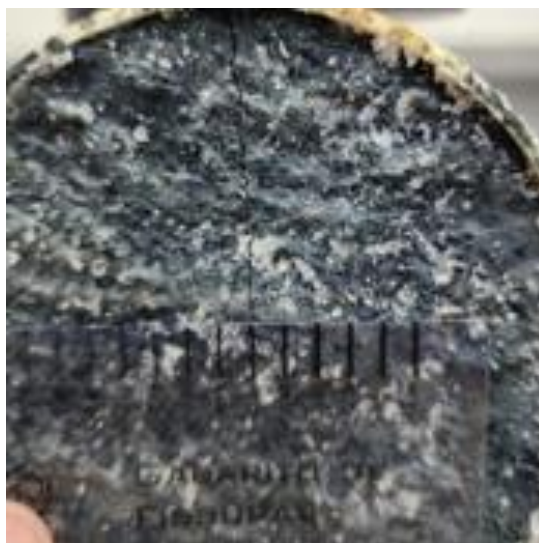
### Ruptura diametral



## Métodos

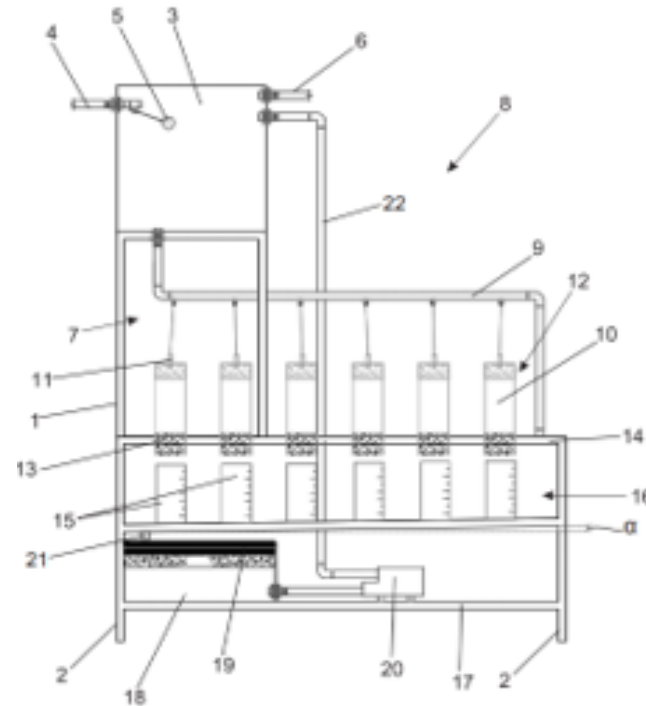
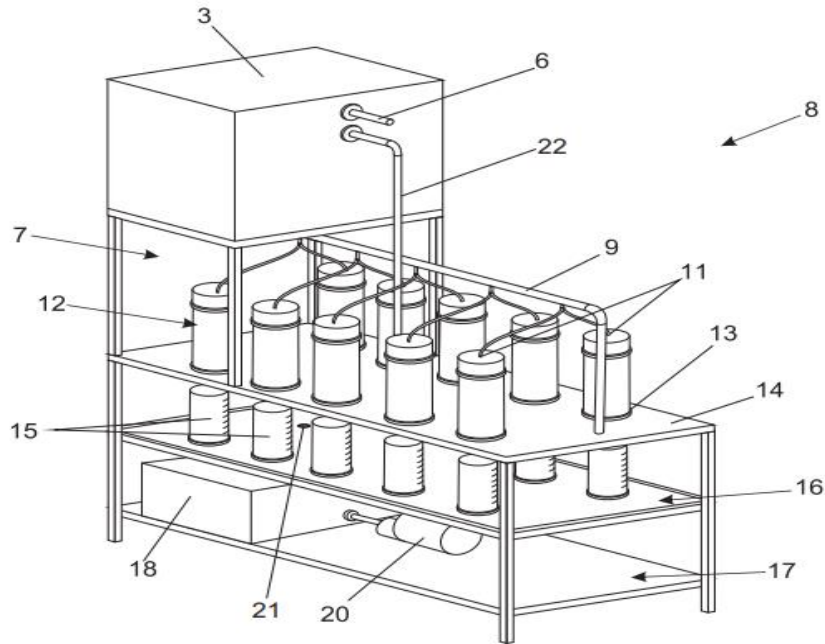
Teste de vazão com água sulfatada

Análise da autocicatrização



# Resultados e Discussões

## Equipamento de teste de vazão (Patenteado)





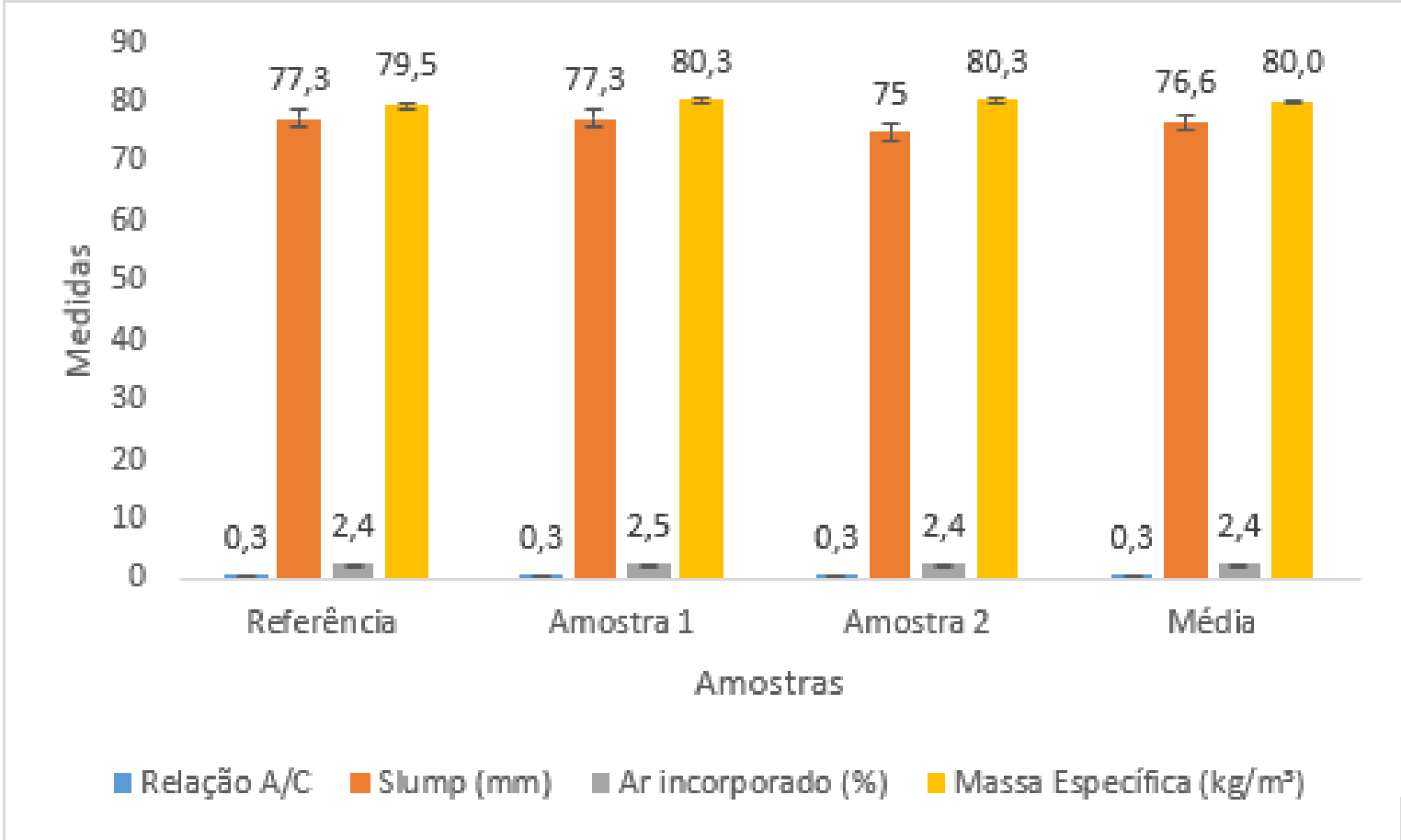
Ensaio	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
Relação A/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,00
<u>Slump</u> (mm)	77,3	77,3	75	76,6±	1,35
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,4	2,4±	0,06
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	79,5	80,3	80,3	80,0±	0,46

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)





# Análise do Concreto no Estado Fresco



Fonte: Autor (2025)





## Teste de compressão sem a Exposição ao Sulfato

Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
7	28,2	29,0	30,1	29,1	0,95
14	29,2	30,2	31,5	30,3	1,15
28	31,1	32,2	32,2	31,8	0,64
56	31,3	34,5	35,5	33,8	2,19
90	32,5	35,2	35,7	34,4	1,69

Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2025)





# Resultados e Discussões

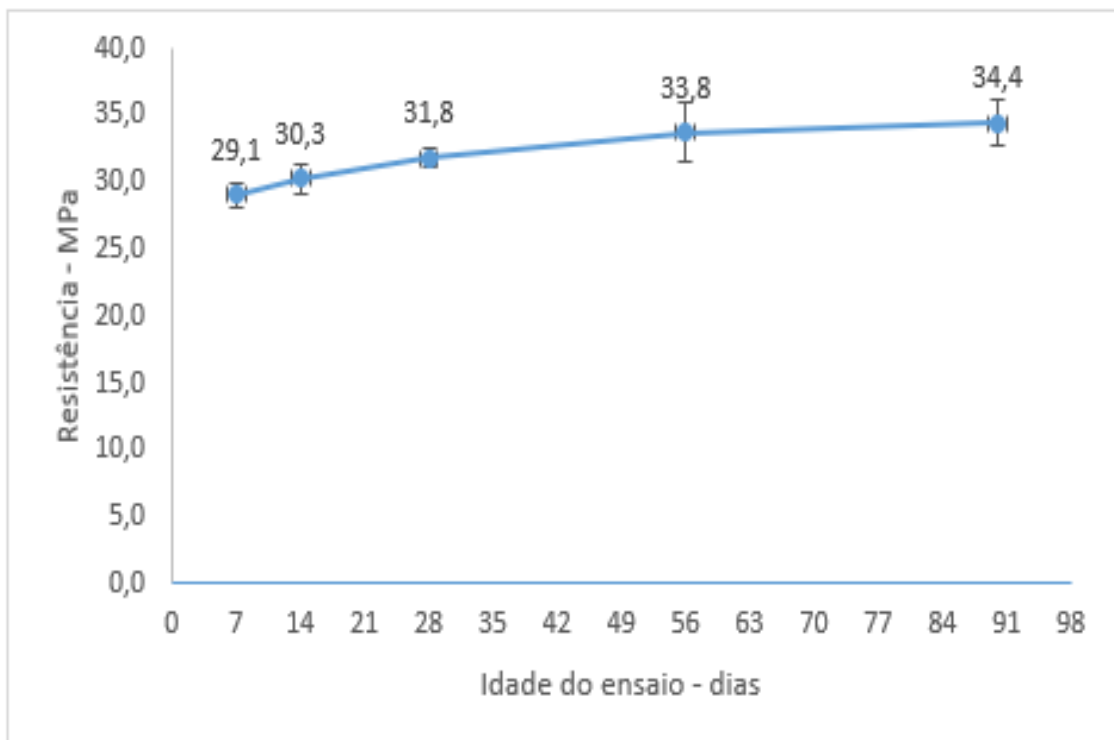
## Teste de compressão com Exposição ao Sulfato

Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
7	22,0	23,8	24,2	23,3	1,16
14	28,0	29,5	30,0	29,2	1,04
28	34,5	36,2	37,0	35,9	1,30
56	36,2	38,1	38,8	37,7	1,35
90	35,0	36,5	37,45	36,3	1,26

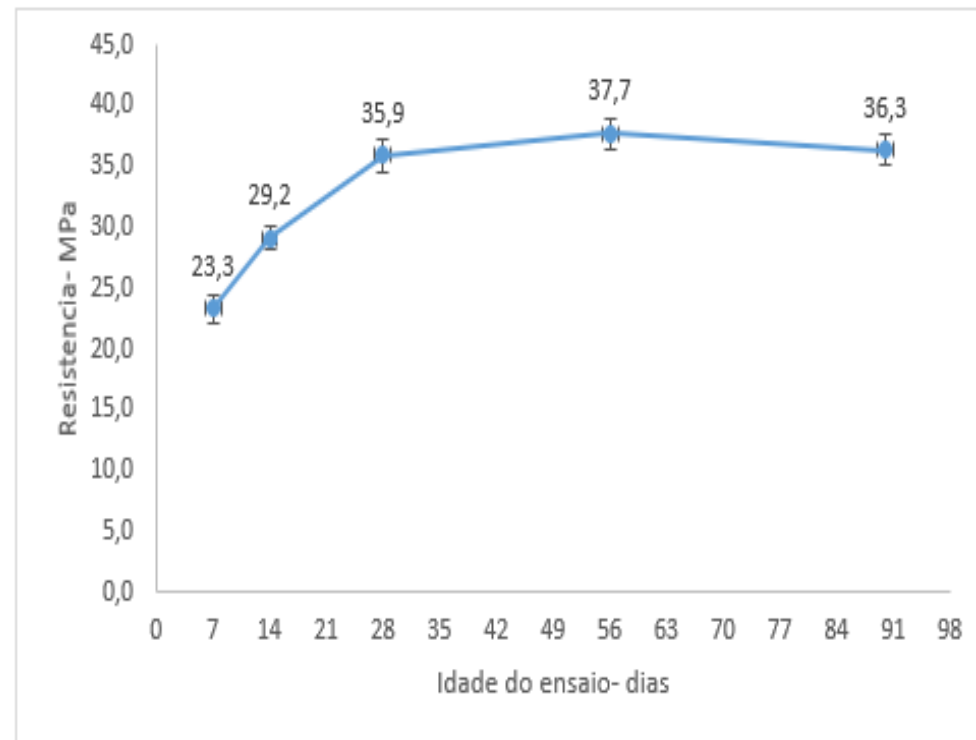
Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2025)



## Comparação dos Resultados sem e com a Exposição aos Sulfatos



Fonte: Autor (2025)



Fonte: Autor (2025)





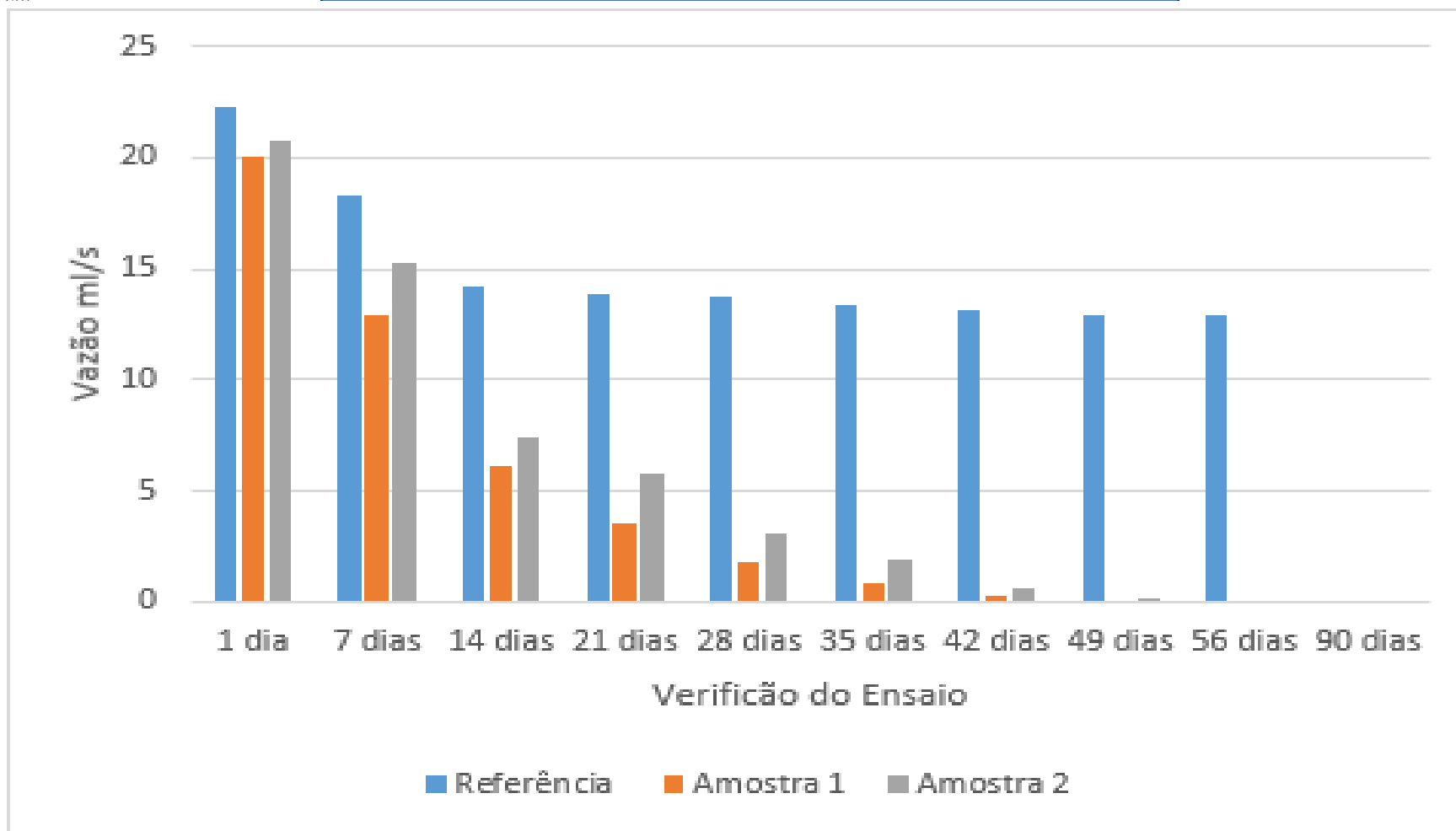
## Fechamento das Fissuras

	1 dia	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	90 dias
Referência	22,3	18,3	14,2	13,9	13,7	13,4	13,1	12,9	12,9	12,9
Amostra 1	20,1	12,9	6,1	3,6	1,8	0,9	0,3	0	0	0
Amostra 2	20,7	15,2	7,4	5,8	3,1	1,9	0,6	0,1	0	0
Média	21,03	15,47	9,23	7,77	6,2	5,4	4,67	4,33	4,30	0
Desvio Padrão	1,14	2,71	4,35	5,42	6,53	6,95	7,31	7,42	7,45	0,00





## Fechamento das Fissuras





## Análises e Resultados

- ➔ Amostras com cristalizante apresentaram aumento de resistência maior que as amostras sem cristalizante;
- ➔ Aos 7 dias as amostra com sulfato apresentaram menor resistência relação as amostras sem sulfato, e aos 28 dias, as amostras com sulfato apresentaram a resistência superior as amostras sem a presença de sulfatos
- ➔ Aos 56 foi comprovado um pico na resistência das amostras submetidas ao sulfato, porém aos 90 dias todas as amostras apresentaram uma queda de resistência.
- ➔ As amostras submetidas ao sulfato mesmo com a queda aos 90 dias, apresentaram resistência a compressão superior as amostras não submetidas ao sulfato.





## Análises e Resultados

- ➔ De modo geral, todas as amostras apresentaram crescimento de resistência ao longo do tempo;
- ➔ As amostras 1 e 2 contendo os aditivos cristalizantes mostraram maior estabilidade mecânica frente ao ataque dos sulfatos;
- ➔ A amostra 1 apresentou aumento de resistência de 4% e 6% em relação a amostra de referência, enquanto a amostra 2 apresentou desempenho superior entre 5% e 7%;
- ➔ As amostras com aditivos apresentaram selamento das fissuras entre 49 e 56 dias de exposição, enquanto as amostras sem aditivos permaneceram com percolação da água, indicando maior suscetibilidade à penetração de agentes agressivos.





## CONCLUSÕES

- ➔ O protocolo desenvolvido é eficaz para avaliar o processo de autocicatrização, de concretos submetidos ao ataque de sulfatos;
- ➔ Aditivos cristalizantes reduzem a permeabilidade e elevam a resistência do concreto.
- ➔ A cicatrização contribui para a durabilidade do concreto em ambientes agressivos.
- ➔ O método pode ser replicado em futuras pesquisas e validações normativas.





# Trabalhos Futuros

Avaliação do Concreto em diferentes ambientes agressivos;

Estudo com diferentes tipos de cimento;

Investigação microestrutural detalhada ;

Ensaio de durabilidade de longo prazo;

Aplicação em elementos estruturais em escala real.





# Obrigado!



