



# ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRASSOM NA INFERÊNCIA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÕES DE POLÍMERO SINTÉTICO

**Palavras-Chave:** Parede diafragma, resistência, rigidez

**Autores/as:**

**Renan de O. Bianchi - UNICAMP**

**Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso (orientadora) – UNICAMP**

**Dr. Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva (coorientador) - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

Com o grande crescimento das construções civis nas últimas décadas, vem se estudando maneiras de facilitar a execução de grandes obras que encontram dificuldades devido à instabilidade dos solos em que estão situadas. Segundo Hachich et al. (1998) uma das alternativas para auxiliar na escavação dos solos, é a utilização de sistema de contenção com parede diafragma, que consiste em trincheiras abertas no terreno preenchidas com concreto armado, mantidas estáveis através do uso de polímero sintético.

A utilização do uso deste polímero durante as escavações, deve seguir as recomendações da ABNT-NBR 6122 (2019). Segundo Djelal et al. (2020) uma das patologias decorrentes da parede diafragma está relacionada a mistura do fluido polímero durante a concretagem, aumentando a infiltração das águas subterrâneas do maciço de solo após a execução dos painéis, comprometendo a capacidade do concreto de receber esforços.

O controle das paredes diafragma *in loco*, para verificar se a qualidade do concreto não foi comprometida através da mistura com o polímero sintético é uma das dificuldades encontradas por esse sistema. Segundo Silva (2020) um dos ensaios utilizados que não causam danos ao sistema de contenção de concreto, são os não destrutivos, como o ensaio de ultrassom. Estudos realizados por Savaliya et al. (2014), através de ensaio de ultrassom em estruturas de concreto, demonstram que o método é preciso para a detecção de patologias, com sensibilidade para detectar os defeitos e permitir melhor localização do mesmo após ter sido detectado.

Tendo em vista o que foi apresentado, o objetivo da presente pesquisa foi simular a patologia de parede diafragma com diferentes adições de polímero sintético junto ao concreto, propondo modelos de predição de resistência e rigidez obtidos em ensaios de propagação de ondas de ultrassom, para avaliação deste sistema de contenção *in loco*.

## METODOLOGIA:

Para a pesquisa foram confeccionados concretos com proporções de cimento, areia e brita 01 (1:1,8:2,5), sendo o cimento medido em massa, os agregados em volume e, 0,6 para relação água-cimento, conforme especificado para estruturas de parede diafragma (ABNT - NBR 6122, 2019). Considerando o traço padrão, foi adicionado, em relação à massa de cimento, diferentes porcentagens de polímero sintético 0%, 20%, 40% e 60% (Figura 1a). Após os ensaios de *slump test*, foram moldados, para cada adição polímero sintético, 12 corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento) e 1 corpo de prova prismático (400 x 400 x 300 mm<sup>3</sup>), simulando parte de uma parede diafragma após a execução. Após 28 dias foram utilizados ensaios com equipamento de ultrassom (USLAB, Agricef, Brasil) e transdutores de 45 kHz de frequência. As amostras cilíndricas foram ensaiadas por ultrassom, aos 28 dias, pelo método direto de propagação de ondas (Figura 1b), determinando-se a velocidade direta de propagação das ondas de ultrassom ( $V_D$ ) e, as prismáticas pelo método indireto (Figura 1c), obtendo-se a velocidade indireta de propagação da onda ( $V_I$ ). Para as amostras cilíndricas, também foi determinada a massa e as dimensões de cada corpo para cálculo da densidade. A partir da velocidade direta e da densidade do concreto ( $\rho$ ) foi determinado o coeficiente de rigidez ( $C_{LL} = \rho \cdot V^2$ ).

As amostras cilíndricas foram submetidas também aos 28 dias, ao ensaio de absorção por imersão, conforme especificações da ABNT - NBR 9778 (2005).

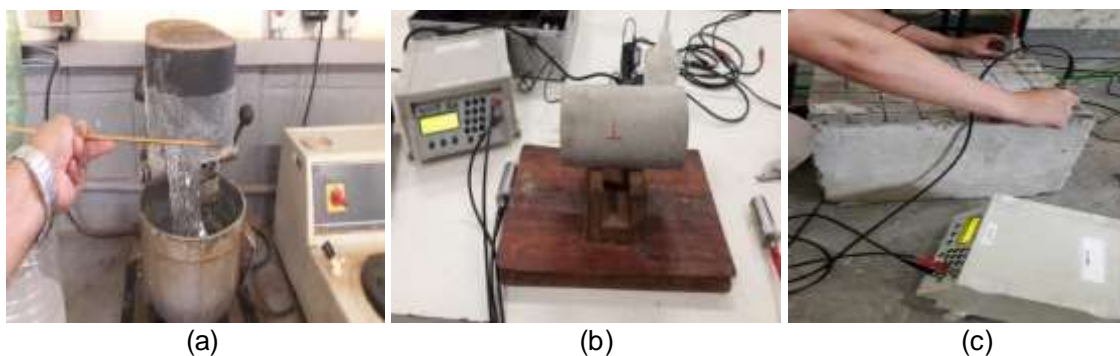


Figura 1. (a) Polímero sintético, (b) amostras cilíndricas submetidas ao ensaio direto de ultrassom (c) amostras prismáticas submetidas ao ensaio indireto de ultrassom.

Os corpos de provas foram então submetidos à ensaios de compressão instrumentada em máquina de ensaio (EMIC) para determinação da resistência ( $f_c$  - ABNT-NBR 5739, 2018) e do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$  - ABNT-NBR 8522, 2017). Os resultados dos ensaios foram utilizados na geração de modelos de predição das propriedades mecânicas a partir das velocidades de propagação de ondas de ultrassom.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A adição do polímero sintético apresentou comportamento similar gerado pela adição de água ao concreto, quando avaliamos a trabalhabilidade (valores de *slump*) e a densidade, ou seja, o aumento das adições de polímero ocasionou aumento na trabalhabilidade e redução na densidade

(Tabela 1). As propriedades mecânicas ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ) e acústicas ( $C_{LL}$ ,  $V_D$  e  $V_I$ ) do concreto também reduziram à medida que as adições de polímeros aumentaram, fato ocasionado pelo aumento da porosidade (quantidade de vazios) do concreto (Tabela 1).

Adição	Slump (mm)	Densidade média ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	$f_c$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	$C_{LL}$ (GPa)	$V_D$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )	$V_I$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )
0%	180	2223	17,41	23,28	30,16	3680	2639
20%	210	2097	8,80	13,10	21,26	3185	2520
40%	250	1934	6,17	7,48	13,14	2615	2127
60%	260	1900	4,60	2,95	12,83	2528	935

Todos os modelos de regressão lineares foram estatisticamente significativos no nível de significância de confiança 95% com ( $P$ -valor  $< 0,05$ ), sendo que os melhores modelos de previsão das propriedades de resistência ( $f_c$ ) e de rigidez ( $E_{ci}$ ) do concreto foram obtidos a partir do coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ) (Tabela 2). Os modelos encontrados seguem dentro das faixas de coeficientes de determinação encontrados na literatura entre ensaios mecânicos e propagação de ondas. Para a predição de  $f_c$  os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) nos estudos realizados por Mohamad et al., (2016), Silva et al. (2020), variaram entre 60 e 98% e, para  $E_{ci}$  entre 50 e 96%, (Giacon et al., 2010; Mohamed et al., 2016 e Silva et al., 2020). Correlações entre os parâmetros de rigidez ( $C_{LL}$ ) e as propriedades mecânicas de resistência ( $f_c$ ) e de módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) obtidos em ensaios de ultrassom e de compressão, respectivamente, foram encontrados por Giaccon et al., 2010 e Silva (2020), com modelos lineares e valores de  $R^2$  na faixa de 85% a 97% para  $E_{ci}$  e de 79% a 95% para  $f_c$ .

Parâmetro	Modelo	P-Valor	$R^2$ (%)	Erro de estimativa	Erro absoluto* (%)
$f_c \times V_D$	$f_c = -20,34 + 0,0098 \cdot V_D$	0,03	92,81	1,70	18,40
$f_c \times V_I$	$f_c = -5,25 + 0,0068 \cdot V_I$	0,04	81,65	1,87	20,30
$f_c \times C_{LL}$	$f_c = -3,96 + 0,68 \cdot C_{LL}$	0,025	97,46	1,57	9,70
$E_{ci} \times V_D$	$E_{ci} = -35,13 + 0,015 \cdot V_D$	0,01	96,91	1,83	18,90
$E_{ci} \times V_I$	$E_{ci} = -11,68 + 0,012 \cdot V_I$	0,04	89,00	1,90	20,60
$E_{ci} \times C_{LL}$	$E_{ci} = -8,56 + 1,05 \cdot C_{LL}$	0,020	97,97	2,14	12,37

\*relação entre o erro estimado e o valor médio.

A regressão entre a velocidade de ultrassom e a absorção apresentou modelo com  $R^2$  de 92% (Figura 2) e P-Valor de 0,04, menor que 0,05, demonstrando existir uma relação estatisticamente significativa entre os parâmetros, com nível de confiança de 95,0%. Nota-se que a adição de polímero sintético aumentou a absorção de água, deixando maiores quantidades de vazios (poros) após o processo de secagem (Figura 2). Isso ocorre devido a liberação da água de cura interna, que leva ao desinchaço das partículas de polímero, ocasionando mudanças na estrutura porosa dos materiais cimentícios (ARAÚJO e MAY, 2019). Os resultados

obtidos indicam que a técnica de propagação de ondas é sensível ao aumento do teor de água dentro das amostras de concreto, ocasionado pelo aumento da porosidade após a secagem do polímero sintético dentro da matriz cimentícia, diminuindo sua velocidade de ultrassom. Dessa maneira, o concreto terá um aumento de vazios (poros) e está sujeito a maiores absorções de água e menores densidade e propriedades mecânicas.

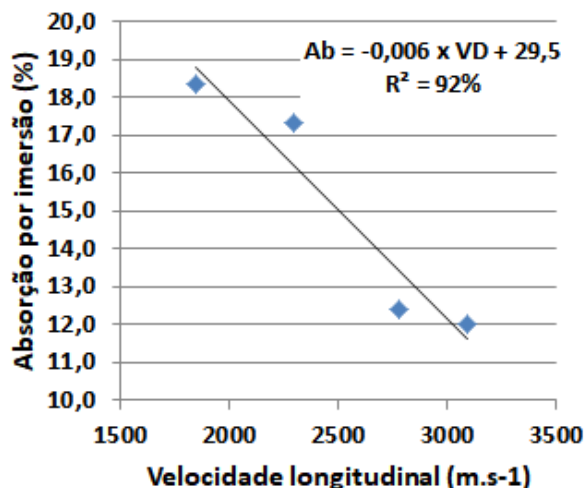


Figura 2. Modelo de regressão entre absorção por imersão e velocidade longitudinal.

## CONCLUSÕES:

O aumento nas concentrações de polímero sintético utilizados nos diferentes traços de concreto aumentaram a sua trabalhabilidade, reduzindo sua densidade e suas propriedades mecânicas ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ) e acústicas do material ( $V_D$ ,  $V_I$  e  $C_{LL}$ ). Os modelos de predição das propriedades mecânicas por meio de velocidades de ultrassom foram estatisticamente significativos, apresentando coeficientes de determinação superiores a 80% e erros inferiores aos encontrados em literatura. Dessa forma, fica demonstrada a sensibilidade do ensaio de propagação de ondas direto e indireto (avaliação *in loco*), na detecção de possíveis patologias encontradas (por meio da redução das propriedades mecânicas) em parede diafragma, utilizadas no sistema de contenção.

Além disso, nota-se que o aumento do teor de polímero sintético na confecção do concreto interfere diretamente na quantidade de absorção de água e, conseqüentemente, nas propriedades acústicas do material.

## BIBLIOGRAFIA:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67. **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. NBR 5739. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 8522. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

ARAÚJO, C.M.M, MAY, C.A. **Durabilidade de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. Monografia de projeto final em engenharia civil; Brasília; 124; 2019.

DJELAL, C.; VANHOVE, Y.; AZZI, A.; MADEC, O. **Recommendation for concrete mix design to prevent bleed channels on diaphragm walls**. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 1-13. 2020.

GIACON Jr, M., GONCALVES, R., SORIANO, J., AMALFI, G. **Caracterização do concreto utilizando ultrassom**. In: XXVIII CONAENDI - Congresso de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2010, Santos - SP. Anais CONAENDI 2010. v. 1. p. 1-9.

HACHICH, Waldemar et al. **Fundações: Teoria e Prática**. 2ª ed. São Paulo, Pini: 1998.

SAVALIYA, K. D., THAKER, K. K., DAVE, U. V. **Comparison between Different Methods of Ultrasonic Pulse Velocity Tests on Concrete**. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), (March), 41–44, 2014.

SILVA, R. R. C. da. **Propagação de ondas de ultrassom em sistemas de contenção par obras de terra. Tese de Doutorado**. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. p.113. 2020.

SILVA, R. R. C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C. P. **Classification and inspection of reinforced concrete elements for use in retaining walls using ultrasound tests**. Construction and Building Materials, v. 262, p. 120010, 2020.