REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

ANÁLISE EXPERIMENTAL, TEÓRICA E NUMÉRICA DE COMPRESSÃO EM CORPO DE PROVA DE CONCRETO

EXPERIMENTAL, THEORETICAL, AND NUMERICAL ANALYSIS OF COMPRESSION IN CONCRETE TEST SPECIMENS

ANÁLISIS EXPERIMENTAL, TEÓRICO Y NUMÉRICO DE LA COMPRESIÓN EN ENSAMBLES DE HORMIGÓN

Paulo Marques do Lago Junior

Engenheiro Civil e Mestrando em Engenharia de Estruturas, UNICAMP, Brasil

E-mail: paulolago7@yahoo.com.br

Resumo

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, sendo composto por uma mistura de água cimento e agregados. A fim de determinar os parâmetros trivialmente especificados para os diversos materiais desse tipo, tais como módulo de elasticidade e a resistência efetiva, foi conduzido um experimento de simples execução, capaz de ser reproduzido em qualquer laboratório que possua uma prensa capaz de comprimir elementos estruturais, onde um corpo de prova de concreto foi comprimido até a sua ruptura. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com aqueles resultantes a partir dos cálculos teóricos que regem o fenômeno e, numéricos, através do auxílio do software PrePomax, revelando uma boa aderência entre eles.
Palavras-chave: Análise experimental; Concreto; Módulo de elasticidade; Simulação numérica.

Abstract

Concrete is the most widely used material in civil construction, consisting of a mixture of water, cement, and aggregates. In order to determine the parameters commonly specified for various materials of this type, such as modulus of elasticity and effective strength, a simple experiment was conducted that can be reproduced in any laboratory equipped with a press capable of compressing structural elements, in which a concrete test specimen was compressed until it broke. The results obtained experimentally were compared with those resulting from the theoretical calculations governing the phenomenon and, numerically, with the aid of PrePomax software, revealing a good correlation between them.
Keywords: Experimental analysis; Concrete; Modulus of elasticity; Numerical simulation.

Resumen

El hormigón es el material más utilizado en la construcción civil, compuesto por una mezcla de agua, cemento y áridos. Con el fin de determinar los parámetros trivialmente especificados para los diversos materiales de este tipo, tales como el módulo de elasticidad y la resistencia efectiva, se llevó a cabo un experimento de sencilla ejecución, capaz de ser reproducido en cualquier laboratorio que disponga de una prensa capaz de comprimir elementos estructurales, en el que se comprimió una probeta de hormigón hasta su rotura. Los resultados obtenidos experimentalmente se compararon con los resultantes de los cálculos teóricos que rigen el fenómeno y, numéricos, con la ayuda del software PrePomax, revelando una buena adherencia entre ellos.
Palabras clave: Análisis experimental; Hormigón; Módulo de elasticidad; Simulación numérica.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

1. Introdução

O concreto é uma mistura composta por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água que, quando recém misturado, deve garantir condições de trabalhabilidade que proporcionem o seu manuseio e lançamento nas fôrmas, a fim de que, com o tempo, adquira aspecto definitivo e resistência.

Atualmente constituintes destinados a melhorar ou conferir propriedades especiais à mistura, os chamados aditivos, são frequentemente adicionados. Os aditivos são incorporados ao conjunto no intuito de conferir propriedades especiais, tais como: impermeabilidade da massa, diminuição do calor de hidratação, aumento da durabilidade, maior plasticidade quando fresco, rápido aumento da resistência quando endurecido, etc.

É atribuído ao concreto uma massa específica que varia entre 2.300 kg/m³ a 2.500 kg/m³ para o concreto simples e o concreto armado, respectivamente e, segundo Botelho (2019), em média, o concreto resiste à compressão dez vezes mais que à tração, sendo, para Petrucci (2005), a relação água cimento, a idade, a forma e graduação dos agregados, o tipo do cimento, a forma e dimensões dos corpos de prova, a velocidade de aplicação da carga de ensaio e a duração da carga, os principais fatores que afetam a resistência mecânica do concreto.

Com relação às propriedades elásticas do concreto, verifica-se em Botelho (2019) que, um corpo de prova sofrendo compressão é capaz de se deformar dentro de uma lei aproximadamente linear, conhecida como Lei de Hooke, até que se rompe inesperadamente, caracterizando-o como um material frágil. Porém, Petrucci (2005) afirma que

> "O concreto não segue perfeitamente a lei de Hooke, sendo que nos mais resistentes a zona aproximadamente elástica é maior do que nos menos resistentes." (Petrucci, 2005, p. 107).

Tendo em vista as propriedades já estabelecidas e consagradas para o concreto, o objetivo principal deste trabalho consistiu em submeter, ao esforço de compressão, um corpo de prova de concreto simples contendo as dimensões, restrições e aplicação de cargas demonstradas na Figura 1, até que se ocorresse a ruptura total do elemento.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

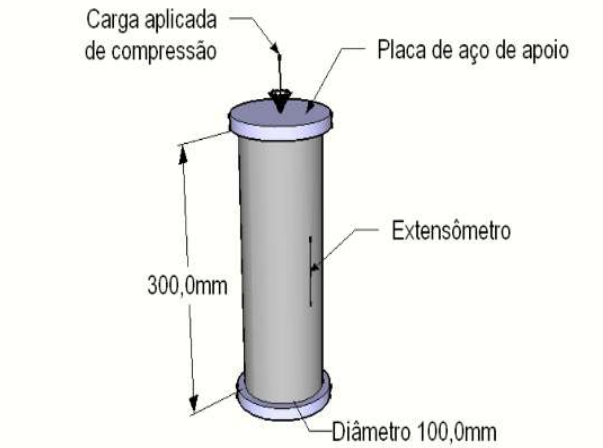


Figura 1: Dimensões e características do corpo de prova de concreto.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta pesquisa também buscou, a partir dos dados obtidos pelo extensômetro instalado na face do corpo de prova, obter parâmetros de deformação que proporcionassem a confecção dos gráficos carga por deslocamento e tensão por deformação, finalizando com a realização da comparação dos resultados experimentais com os respectivos resultados analíticos e numéricos.

Os resultados analíticos foram determinados com base na teoria da elasticidade levando-se em consideração as relações constitutivas que norteiam os materiais isotrópicos, aplicando-se as expressões presentes na literatura pesquisada. Já os resultados numéricos, foram obtidos através do método dos elementos finitos (MEF), realizando-se simulações numéricas via software PrePomax (2025).

2. Revisão bibliográfica

2.1 Relações tensão-deformação para meios isotrópicos

Um exemplo típico de um material frágil com diferentes propriedades na tração e na compressão é o concreto, cujo diagrama tensão deformação está representado na Figura 2. O declive da porção linear da curva tensão deformação, verificado tanto na tensão quanto na compressão, representa o módulo de elasticidade do material. Nota-se que o comportamento do material na compressão é diferente na tração, quando no primeiro caso há uma diminuição das tensões (σ) com o consequente aumento das deformações (ε), enquanto que no segundo o aumento das tensões é

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

proporcional ao aumento das deformações, ocorrendo uma ruptura de forma repentina.

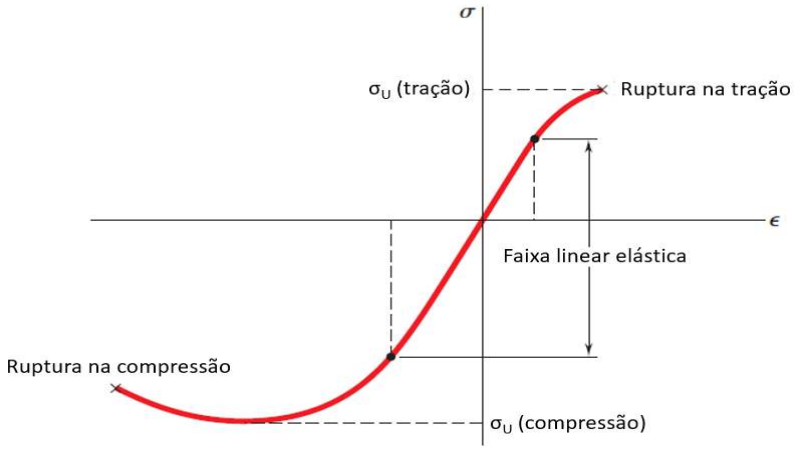


Figura 2: Diagrama tensão deformação de um típico material frágil como o concreto. Fonte: Adaptado de Beer 2015.

O concreto, embora seja considerado um material ortotrópico, ou seja, um material que exibe simetria das suas propriedades elásticas com respeito a dois planos ortogonais, ele comumente é tratado como um material isotrópico, isso devido à dificuldade de relacionar as constantes elásticas do ortotropismo nas análises relacionadas ao concreto.

Um material isotrópico possui propriedades elásticas que são independentes das orientações dos eixos, pois possui uma simetria rotacional com respeito a dois eixos perpendiculares, conforme identificamos em Saada (2014). Também é possível notar em Saada (2014) que, para materiais isotrópicos linearmente elásticos, uma tensão de cisalhamento resulta em nada, a não ser deformação por cisalhamento, tendo em vista que

> as relações tensão deformação podem, portanto, ser divididas em duas etapas: Primeiro a relação entre os componentes esféricos dos tensores de tensões e de deformações, e segundo a relação entre os componentes deviatóricos dos tensores de tensões e de deformações (Saada, 2014, p. 201).

Em Sadd (2005), a forma geral da lei de Hooke é dada pela Equação (1), onde a matriz de rigidez [C] é a inversa da matriz de flexibilidade [S], ou seja, $[C] = [S]^{-1}$, sendo a matriz [*S*] representada pela Equação (2). Por isto, pode-se deduzir que, de acordo com lei geral constitutiva tridimensional para um material elástico linear, cada

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

componente de tensão está linearmente relacionado a cada componente de deformação.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \tag{1}$$

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & sim. & & & \frac{1}{G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Onde
$\sigma_{ij} = vetor\ de\ tensões$
$C_{ijkl} = matriz\ de\ rigidez$
$e_{kl} = vetor\ de\ deformações$
$E = módulo\ de\ elasticidade$
$\nu = coeficiente\ de\ Poisson$
$G = módulo\ de\ elasticidade\ transversal$

Partindo destes pressupostos, o problema que será abordado neste trabalho pode ser exemplificado pelo esquema da estrutura demonstrada na Figura 3, onde inicialmente o corpo de prova de concreto que será submetido um esforço capaz de provocar uma tensão sobre a sua face superior, poderá ser analisado, de forma equânime, através da substituição da tensão por uma força concentrada *P* agindo sobre esta mesma superfície do corpo de prova.

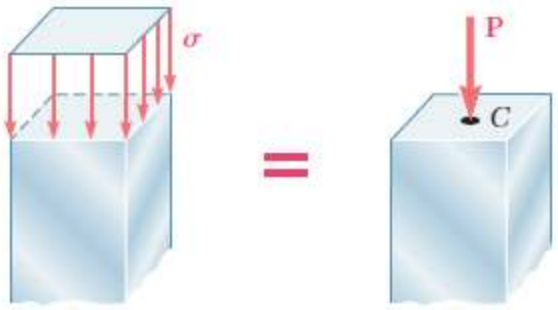


Figura 3: Corpo de prova comprimido.
Fonte: Beer 2015.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

Notamos em Assan (2015) que para uma dada barra com seção transversal de área *A*, solicitada por uma força normal *P*, a tensão na seção é calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{3}$$

Onde
$\sigma = tensão\ normal\ média$
$P = força\ nominal\ interna\ resultante$
$A = área\ da\ seção\ transversal\ da\ barra$

Beer (2015) caracteriza um material sofrendo deformações na tração ou na compressão e enfatiza que uma das variáveis a se considerar para identificar o material elástico é a deformação normal, dada pela Equação (4):

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \tag{4}$$

Onde
$\varepsilon = deformação\ específica$
$\delta = variação\ do\ comprimento\ da\ barra$
$L = comprimento\ inical\ da\ barra$

Uma análise da bibliografia de Hibbeler (2013) permite verificar que a tensão (*σ*), dada pela Lei de Hooke, o coeficiente de Poisson (*v*) e o módulo de elasticidade transversal (*G*), analiticamente podem ser expressos através das Equações (5), (6) e (7), respectivamente.

$$\sigma = E\varepsilon \tag{5}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \tag{6}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{7}$$

Onde
$\epsilon_{lat} = defomação\ específica\ lateral$
$\epsilon_{long} = defomação\ específica\ longitudinal$

Para Hibbeler (2013), muitos materiais de engenharia exibem o comportamento inicial linear elástico, pelo qual a tensão é proporcional à deformação, definida pela lei de Hooke dada pela Equação (5) e representa a porção inicial em linha reta do diagrama tensão deformação.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

2.2 Conceitos normativos

A resistência à compressão é obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova e o resultado será expresso em megapascals (*MPa*), com três algarismos significativos, conforme a ABNT NBR 5739 (2018).

Os carregamentos e descarregamentos devem obedecer à velocidade de (0,45 ± 0,15) *MPa*/s e de devem ser conduzidos por uma das metodologias apresentadas pela ABNT NBR 8522 (2021), sendo elas: Metodologia A, onde a tensão σ_a é fixada ou Metodologia B, onde a deformação específica ε_a é fixada.

Os procedimentos da Metodologia A, compostos por 4 etapas onde se determina as tensões σ_a e σ_b e o módulo de elasticidade inicial (E_{ci}), do corpo de prova em gigapascals (*GPa*), são dados pela Equação (8).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0{,}5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (8)$$

Onde
$\sigma_b = tensão\ maior\ (30\%\ da\ resistência\ à\ compressão)$
$0{,}5 = tensão\ básica\ am\ MPa$
$\varepsilon_b = defomação\ específica\ sob\ tensão\ maior$
$\varepsilon_a = defomação\ específica\ sob\ tensão\ básica$

Segundo a ABNT NBR 8522 (2021), a resistência efetiva $f_{c,ef}$, obtida ao final do ensaio, deve ser igual ou superior ao f_{ckj} especificado.

A ABNT NBR 8522 (2021) estabelece que módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) é uma propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta tangente à curva tensão deformação na origem e, considerando que o material está no regime elástico, equivale ao módulo de deformação secante ou cordal.

Quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) usando-se a expressão a seguir, a qual foi extraída da ABNT NBR 6118 (2024), para f_{ck} (resistência característica à compressão) ≤ 50 *MPa*:

$$E_{ci} = \alpha_E . 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

Onde
$\alpha_E = 1{,}2\ para\ basalto\ diabásio$
$\alpha_E = 1\ para\ granito\ de\ gnaisse$
$\alpha_E = 0{,}9\ para\ calcário$
$\alpha_E = 0{,}7\ para\ arenito$

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

O módulo de deformação secante pode ser obtido segundo o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522 (2021), ou estimado pela expressão extraída da ABNT NBR 6118 (2024):

$$E_{cs} = \alpha_i . E_{ci} \quad (10)$$

Sendo

$$\alpha_i = 0{,}8 + 0{,}2.\frac{f_{ck}}{80} \leq 1 \quad (11)$$

3. Materiais e métodos

Os materiais fundamentais utilizados na coleta de dados para atingir os objetivos deste trabalho, bem como as informações necessárias à reprodução do experimento idealizado pela Figura 1, consistiram nas seguintes etapas:

I. Primeiramente o corpo de prova de concreto, confeccionado com brita de granito gnaisse e possuindo *fckj* especificado de 28 *MPa*, recebeu limpeza no local determinado para a fixação do extensômetro.

II. Posteriormente procedeu-se a colocação de 1 extensômetro localizado no centro do corpo de prova de concreto, conforme Figura 4 (a).

III. O corpo de prova foi posicionado na prensa da marca EMIC, responsável por comprimir o corpo de prova, conforme Figura 4 (b).



(a) (b)

Figura 4: Corpo de prova (a) Extensômetro instalado e (b) Posicionamento na prensa. Fonte: Arquivo pessoal.

IV. Procedeu-se então à ligação dos fios dos extensômetros ao aquisitor de dados e o início do experimento, seguindo-se a metodologia de

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

carregamento descrita pela ABNT NBR 8522 (2021) até que houvesse a ruptura do corpo de prova.

V. Após a ruptura do corpo de prova, as informações referentes à deformação longitudinal e força aplicada ao longo do tempo do ensaio foram coletadas pelo aquisitor de dados e registradas em uma planilha, as quais estão detalhadas na Tabela 1.

VI. O módulo de elasticidade E_{ci} foi determinado a partir dos resultados experimentais obtidos.

VII. O modelo numérico do corpo de prova de concreto foi idealizado no software PrePomax (2025) contando com a utilização de um objeto do tipo sólido, malha de elementos finitos com discretização estrutural quadrada e tamanhos mínimo e máximo entre 0,5 e 100,0 mm. Foi adotado o resolvedor padrão do software denominado Pardiso.

VIII. Por fim, para a determinação dos resultados teóricos e numéricos, foi aplicado o valor do módulo de elasticidade E_{ci} na formulação teórica, descrita na revisão bibliográfica, e no software PrePomax, respectivamente.

4. Resultados e discussões

Após a execução das etapas I a V do experimento, conforme descritas no tópico anterior, o corpo de prova de concreto sofreu ruptura, vindo a apresentar o estado final representado na Figura 5.



Figura 5: Vista do corpo de prova após a sua ruptura.
Fonte: Arquivo pessoal.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

A carga determinada para o rompimento do corpo de prova foi estimada em 280 *kN*. No entanto, o corpo de prova rompeu com uma carga 259,654 *kN*, conforme informação emitida pelo software da prensa.

O gráfico da Figura 6 demonstra os dados principais do ensaio realizado, trazendo a relação das cargas aplicadas ao longo do tempo até que se ocorresse a ruptura total do corpo de prova.

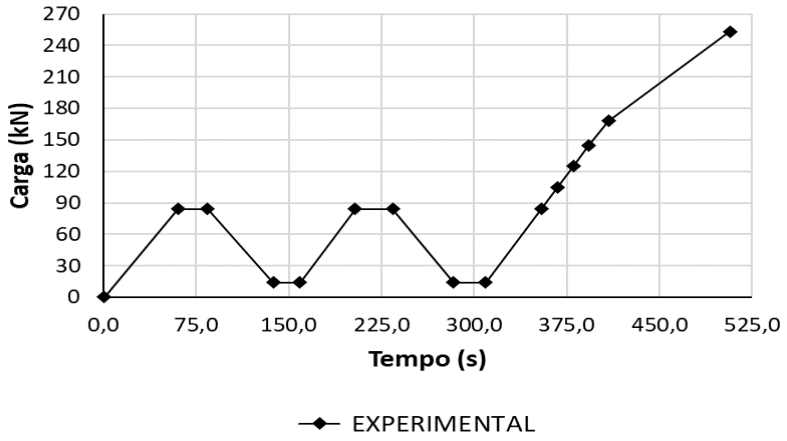


Figura 6: Carregamento ao longo do tempo.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 agrupa os dados que foram obtidos experimentalmente, sendo o alongamento em *mm* representada pela letra grega δ e a deformação em μmm representada pela letra grega ε. A tensão σ foi calculada através da aplicação da Equação (3), já a variação do comprimento da barra δ, pela Equação (4).

Tabela 1: Resultados experimentais.

Tempo (*s*)	Carga (*kN*)	ε (μmm)	σ (*MPa*)	δ (*mm*)
0,5167	0,070	0,000	0,009	0,000
60,217	83,992	342,650	10,694	0,103
84,217	83,922	345,017	10,685	0,104
137,480	13,985	38,230	1,781	0,011
158,980	13,995	36,813	1,782	0,011
203,600	83,982	339,817	10,693	0,102
234,100	83,982	343,117	10,693	0,103
283,130	13,995	39,643	1,782	0,012
309,050	13,995	37,757	1,782	0,011
354,200	84,031	339,817	10,699	0,102
367,170	104,400	412,483	13,293	0,124

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

380,130	124,760	484,717	15,885	0,145
392,630	144,400	553,617	18,386	0,166
408,580	167,980	639,517	21,388	0,192
506,900	253,280	639,517	32,249	0,192

Fonte: Elaborado pelo autor.

A resistência efetiva para o concreto, determinada conforme descrito na ABNT NBR 8522 (2021) e na seção 2.2 deste trabalho, pode ser conferida logo abaixo:

$$f_{c,ef} = 32{,}249\ MPa$$

A partir da leitura realizada no gráfico da Figura 6 (carregamento versus o tempo) e das deformações específicas coletadas pelo equipamento através do extensômetro instalado no corpo de prova, obteve-se os dados necessários para o cálculo do módulo de elasticidade inicial:

$$\sigma_b = 10{,}685\ MPa \therefore \varepsilon_b = 0{,}000345 \therefore \varepsilon_a = 0{,}0000382$$

Os módulos de elasticidade inicial E_{ci} e secante E_{cs}, para o material do corpo de prova de concreto, foram estimados a partir dos resultados experimentais, aplicando-se às equações (8) e (10), respectivamente, chegando aos seguintes valores:

$$E_{ci} = 33.199{,}881\ MPa \therefore E_{cs} = 29.236{,}530\ MPa$$

O coeficiente de Poisson ν para o concreto foi tomado como sendo igual a 0,2, como preconiza a ABNT NBR 6118 (2024). Já módulo de elasticidade transversal para o concreto foi estimado com base na divisão do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) por 2,4, conforme também preconiza a ABNT NBR 6118 (2024), admitindo-se, portanto, os seguintes valores:

$$\nu = 0{,}2 \therefore G = 12.181{,}888\ MPa$$

A partir desses valores encontrados, foi possível determinar as matrizes de flexibilidade [*S*] e de rigidez [*C*] para o material do elemento estrutural, aplicando-se a Equação (2).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

$$S = \begin{bmatrix} 3{,}012 & -0{,}602 & -0{,}602 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}602 & 3{,}012 & -0{,}602 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}602 & -0{,}602 & 3{,}012 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 8{,}209 & 0 & 0 \\ & sim. & & & 8{,}209 & 0 \\ & & & & & 8{,}209 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$$

$$C = \begin{bmatrix} 3{,}689 & 0{,}922 & 0{,}922 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}922 & 3{,}689 & 0{,}922 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}922 & 0{,}922 & 3{,}689 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1{,}122 & 0 & 0 \\ & sim. & & & 1{,}122 & 0 \\ & & & & & 1{,}122 \end{bmatrix} \times 10^{4}$$

A Tabela 2 mostra os resultados analíticos e numéricos, sendo estes obtidos através do software PrePomax (2025) e aqueles a partir da aplicação das Equações (1) a (7), observando que a Equação (1) foi invertida, resultando em $e_{kl} = S_{ijkl}\sigma_{ij}$.

Tabela 2: Resultados analíticos e numéricos.

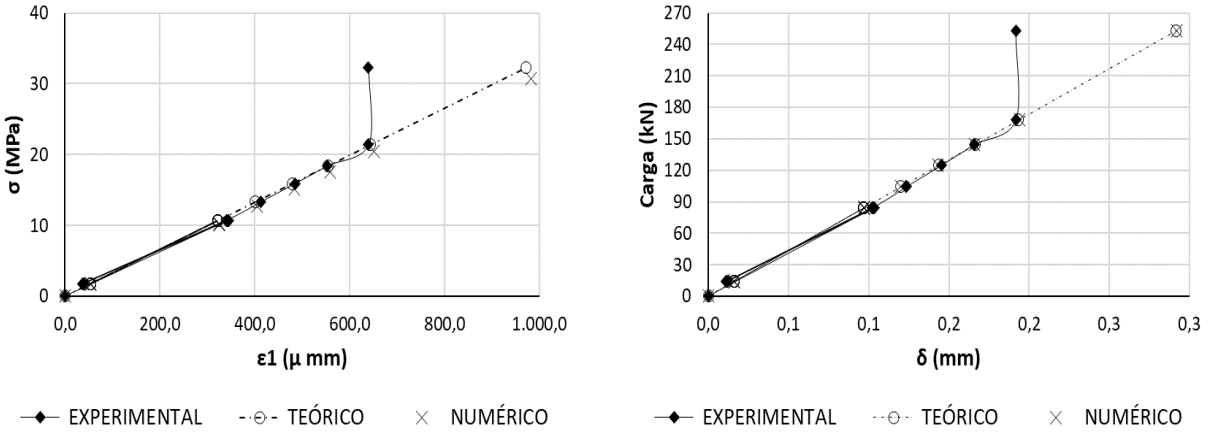
Tempo (*s*)	Carga (*kN*)	Analítico			Numérico		
		ε1 (*μmm*)	σ1 (*MPa*)	*δ1* (*mm*)	ε2 (*μmm*)	σ2 (*MPa*)	*δ2* (*mm*)
0,5167	0,070	0,000	0,009	0,000	0,000	0,009	0,000
60,217	83,992	322,110	10,694	0,097	325,584	10,210	0,097
84,217	83,922	321,839	10,685	0,097	325,313	10,200	0,097
137,480	13,985	53,645	1,781	0,016	54,211	1,699	0,016
158,980	13,995	53,675	1,782	0,016	54,249	1,701	0,016
203,600	83,982	322,079	10,693	0,097	325,545	10,200	0,097
234,100	83,982	322,079	10,693	0,097	325,545	10,200	0,097
283,130	13,995	53,675	1,782	0,016	54,249	1,701	0,016
309,050	13,995	53,675	1,782	0,016	54,249	1,701	0,016
354,200	84,031	322,260	10,699	0,097	325,734	10,210	0,097
367,170	104,400	400,393	13,293	0,120	404,693	12,690	0,120
380,130	124,760	478,466	15,885	0,144	483,615	15,160	0,143
392,630	144,400	553,797	18,386	0,166	559,747	17,550	0,166
408,580	167,980	644,219	21,388	0,193	651,152	20,410	0,194
506,900	253,280	971,359	32,249	0,291	981,807	30,780	0,292

Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre os resultados obtidos de forma experimental, analítica e numérica podem ser melhor visualizados através dos gráficos da Figura 7. O dado experimental discrepante nos gráficos se refere ao tempo 506,90*s*, momento este em que o extensômetro se rompeu e cessou as leituras das deformações.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

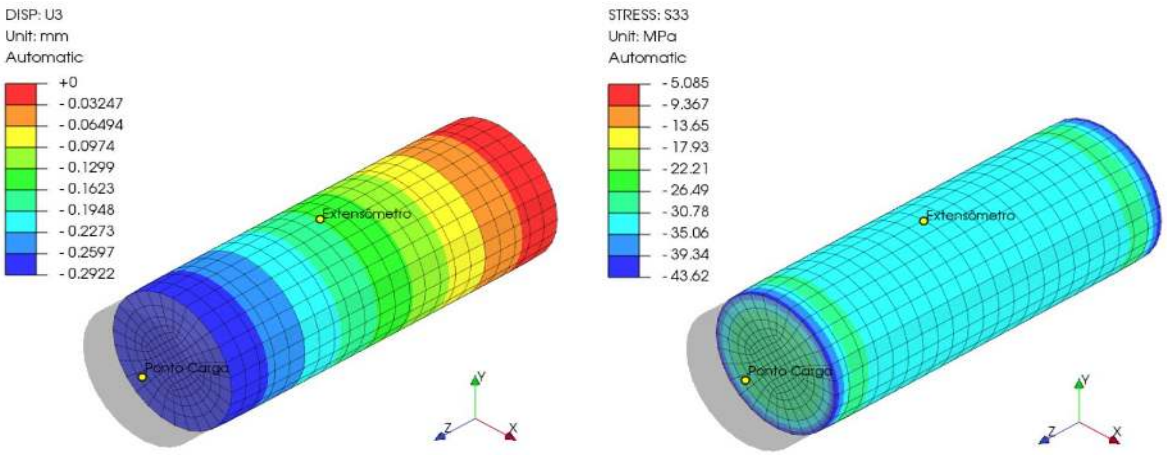
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16



(a) (b)

Figura 7: Diagramas (a) Tensão x Deformação e (b) Carga X Deslocamento.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 8 (a) e (b) mostram os resultados numéricos obtidos para os deslocamentos e tensões devido ao carregamento da carga concentrada máxima de 253,280 *kN*. As escalas numéricas, à esquerda das figuras, relacionam os deslocamentos e as tensões às respectivas cores ao longo do elemento estrutural. Nota-se que as tensões obtidas de forma numérica junto às bordas do corpo de prova cilíndrico (43,62 *MPa*), são maiores do aquelas obtidas de forma analítica, aproximando-se mais do resultado experimental.



(a) (b)

Figura 8: Resultados da simulação numérica (a) Deslocamentos e (b) Tensões.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 3 é possível verificar uma comparação entre os resultados presentes nas Tabelas 1 e 2 através da razão entre as deformações, tensões e deslocamentos obtidos de forma analítica e numérica pelos respectivos valores

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

obtidos de forma experimental. A baixa divergência encontrada para os valores médios (μ), aliada aos baixos valores obtidos para os parâmetros estatísticos relacionados ao desvio padrão (S) e erro padrão (EP), demonstraram uma boa aderência dos resultados numéricos e teóricos aos experimentais.

Tabela 3: Análise estatística dos resultados.

Carga (*kN*)	ε1/ ε	ε2/ ε	σ1/ σ	σ2/ σ	*δ1/ δ*	*δ2/ δ*
0,070	0,000	0,000	1,000	0,958	0,000	0,000
83,992	0,940	0,950	1,000	0,955	0,940	0,944
83,922	0,933	0,943	1,000	0,955	0,933	0,937
13,985	1,403	1,418	1,000	0,954	1,403	1,395
13,995	1,458	1,474	1,000	0,955	1,458	1,449
83,982	0,948	0,958	1,000	0,954	0,948	0,951
83,982	0,939	0,949	1,000	0,954	0,939	0,942
13,995	1,354	1,368	1,000	0,955	1,354	1,345
13,995	1,422	1,437	1,000	0,955	1,422	1,413
84,031	0,948	0,959	1,000	0,954	0,948	0,951
104,400	0,971	0,981	1,000	0,955	0,971	0,970
124,760	0,987	0,998	1,000	0,954	0,987	0,983
144,400	1,000	1,011	1,000	0,955	1,000	0,999
167,980	1,007	1,018	1,000	0,954	1,007	1,011
253,280	1,519	1,535	1,000	0,954	1,519	1,522
μ	1,055	1,067	1,000	0,955	1,055	1,054
S	0,370	0,374	0,000	0,001	0,370	0,368
EP	0,096	0,097	0,000	0,000	0,096	0,095

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados nesta seção demonstram a eficácia do extensômetro para a captação das deformações no experimento realizado. Contudo, vale ressaltar que o rompimento do extensômetro ocorreu concomitantemente com o rompimento do corpo de prova, vindo a se tornar um fator limitante para que houvesse uma comparação mais extensa entre os dados coletados e os resultados obtidos de forma analítica e numérica. Nesse sentido, a carga de ruptura se tornou um fator importante na determinação dos parâmetros do material, o que proporcionou a obtenção dos módulos de elasticidades E_{ci} e E_{cs} condizentes com a classe e resistência do concreto ensaiado.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

5. Conclusão

As tensões e deformações máximas que proporcionaram o rompimento do corpo de prova verificadas a partir dos resultados experimentais, as quais resultaram em 32,249 *MPa* e 639,517 *μmm*, respectivamente, estão dentro do trecho linear elástico verificado no gráfico tensão deformação para o concreto. Quanto ao valor empírico determinado para resistência efetiva do concreto ($f_{c,ef}$), o qual resultou em 32,249 *MPa*, é superior ao *fckj* especificado para o concreto do corpo de prova, ou seja, 28,00 *MPa*, atendendo ao que estabelece a ABNT NBR 8522 (2021).

A comparação realizada entre os resultados referentes às tensões, deformações e deslocamentos constatados de forma experimental, teórico e numérica, revelou que houve uma boa convergência entre eles, permitindo destacar que o objetivo do trabalho foi alcançado ao deixar claro que a presente pesquisa demonstrou que os métodos numéricos, através da utilização de softwares que empregam uma abordagem direcionada ao MEF, podem conduzir a resultados satisfatórios, sendo um ótimo aliado na resolução de problemas de engenharia.

Com base no aumento da utilização do MEF pelos profissionais de engenharia, os resultados obtidos contribuem para a ampliação da perspectiva sobre a importância do emprego dos métodos analíticos para a comparação com resultados numéricos, quando houver a impossibilidade da materialização do problema de forma empírica. Neste contexto, vale ressaltar a eficácia das expressões analíticas apresentadas na revisão bibliográfica, uma vez que proporcionaram resultados muito próximos daqueles obtidos experimentalmente, o que pode ser confirmado a partir dos resultados obtidos para o erro padrão, os quais são inferiores aos dos resultados numéricos.

6. Referências bibliográficas

Andolfato, Rodrigo Piernas; Camacho, Jefferson Sidney; Brito, Gilberto Antônio de. Extensometria básica. P. 1-46, Unesp, Ilha Solteira, 2004. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf

Assan, Aloisio Ernesto. Método dos elementos finitos. 1. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2013.

Assan, Aloisio Ernesto. Resistência dos materiais. 1. ed. Campinas: Editora da

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 25/10/2025 - **Accepted:** 13/11/2025
Vol:20.02
DOI: 10.61164/s3n7w707
Pages: 1-16

Unicamp, 2015.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 8522: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação à compressão. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação brasileira de normas técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2024.

Beer, Ferdinand P.; Junior, E. Russell Johnston; Dewolf, John T.; Mazurek, David F. Mechanics of Materials. 7. ed. New York: MC Graw Hill Education, 2015.

Borovinšek, Copyright (C) 2025 Matej. PrePomax. Versão 2.3.6: KIMM – Korean Institute of Machinery & Materials; SmartDo – Smart Design Optimization. Disponível em: https://prepomax.fs.um.si/downloads/

Botelho, Manoel Henrique Campos; Marchetti, Osvaldemar. Concreto armado eu te amo. 10. ed. São Paulo: Blusher, 2019.

Doebelin, Ernest O. Measurement systems application and design. 4. ed. Nova York, 1990.

Junior, Paulo Marques do Lago. Validação dos resultados numéricos de uma placa de acrílico fletida através da metodologia teórica e empírica. Souza EAD Revista Acadêmica Digital, Ipatinga/MG, ed. 90, p. 1-15, out., 2025. Disponível em: https://zenodo.org/records/17409133

Hibbeler, Russel Charles. Resistência dos materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

Petrucci, Eladio G.R. Concreto de cimento Portland. 14. ed. Brasil, 2005

Saada, Adel S. Elasticity theory and applications. 2. ed. India, 2014.

Sadd, Martin H. Elasticity theory, applications and numerics. 1. ed. USA, 2005.

Weber, Albano Luiz. Metrologia e instrumentação. P. 1-15, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Departamento de Engenharia Mecânica, 2008. Disponível em: http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf