

Avaliação da Deformação Lenta do Concreto da Ponte Ernesto Dornelles sobre o Rio das Antas/RS

*Eduardo Thomaz¹
Luiz Carneiro¹
Flávia Júdice²
Mayra Perlingeiro³*

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação experimental e teórica da deformação lenta do concreto da Ponte Ernesto Dornelles sobre o Rio das Antas, localizada na divisa entre os municípios de Bento Gonçalves e Veranópolis do Estado do Rio Grande do Sul. Por meio de um aparato de concreto armado, construído na época da execução da obra da ponte nos anos de 1950, parecido com o medidor de deformação lenta do concreto da ponte Plougastel na França idealizado por Eugène Freyssinet no ano de 1930, e composto por dois pilares verticais de 3050 mm de altura opostos e afastados entre si de 100 mm de comprimento, cada um com base engastada e extremidade superior suportando uma viga em balanço de 1200 mm de comprimento carregada com um bloco de 500 mm x 500 mm x 1500 mm de dimensões, pôde-se realizar experimentalmente a avaliação da deformação lenta do concreto, cujo valor foi comparado ao teórico baseado em formulações sobre flexão composta, retração e fluência para concreto armado. Constatou-se que os valores experimental e teórico da deformação lenta do concreto foram próximos entre si e que o coeficiente de fluência sugerido pela ABNT NBR 6118 (2014) foi praticamente igual ao encontrado experimentalmente.

Palavras-chave: Retração; Fluência; Concreto; Ponte.

Introdução

Devido às propriedades do concreto se modificarem ao longo do tempo, o que o caracteriza como um material reológico, a deformação de elementos estruturais de concreto é influenciada.

Elementos estruturais de concreto, quando sob tensão constante em um intervalo de tempo, apresentam deformação imediata, por ocasião do carregamento, e deformação devida à fluência e retração do concreto.

A deformação do concreto por fluência ocorre por conta da expulsão da água adsorvida nas lamelas dos produtos de hidratação do cimento (NEVILLE, 1996). Pode ser obtida experimentalmente por meio da ABNT NBR 8224 (2012) e é formada por duas parcelas: uma rápida e outra lenta.

A fluência rápida é irreversível, ocorre durante as primeiras 24 horas após a aplicação do carregamento carga que a gerou, produz deformações constantes ao

longo do tempo e depende da relação entre a resistência do concreto no instante da aplicação do carregamento e a sua resistência final.

A fluência lenta é constituída por duas outras parcelas (deformação específica lenta reversível e deformação lenta irreversível). A fluência lenta reversível independe da idade de cura do concreto e depende apenas da duração do carregamento, ao passo que a fluência lenta irreversível depende de alguns parâmetros, tais como a umidade relativa do ambiente, consistência do concreto no lançamento, espessura fictícia do elemento estrutural e idade fictícia do concreto no instante da aplicação do carregamento.

Resumidamente, a deformação específica do concreto por fluência é influenciada diretamente pelo processo de secagem. Cresce com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da umidade relativa do ar, das dimensões do elemento estrutural, do teor de agregados e do maior módulo de elasticidade dos agregados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

¹ Instituto Militar de Engenharia / Seção de Eng^a de Fortificação e Construção / ecsthomaz@terra.com.br, carneiro@ime.eb.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / flaviamoll@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal Fluminense / Departamento de Eng^a Civil / mayraperlingeiro@id.uff.br

Medidor de Fluência do Concreto da Ponte Plougastel

O engenheiro civil de estruturas francês, Eugène Freyssinet, criou, no ano de 1930, um medidor de fluência do concreto da ponte Plougastel na França.

Esse medidor era composto por dois pilares verticais opostos e afastados entre si, cada um com base engastada e extremidade superior suportando uma viga em balanço carregada com um bloco.

A Figura 1 ilustra um conjunto de medidores de fluência do concreto. As faces voltadas uma para outra dos pilares são armadas com barras de aço. A variação do comprimento relativo à distância das extremidades extremas superiores dos pilares corresponde aproximadamente à de um prisma concreto de 80 m de comprimento devido à mesma sollicitação (FREYSSINET, 1936).

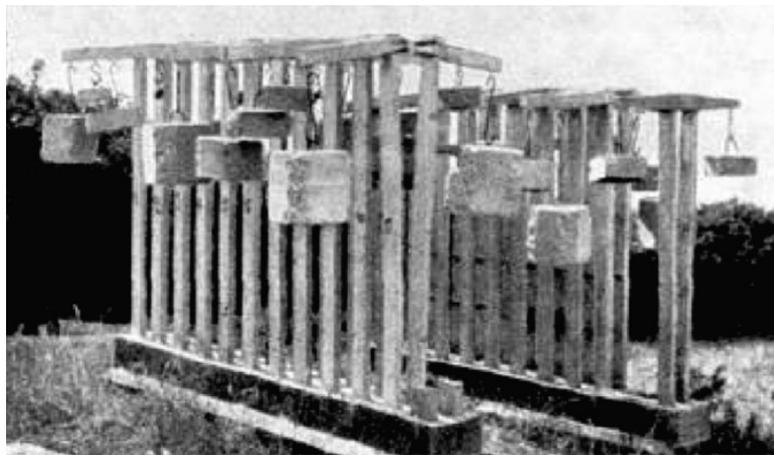


Figura 1 – Conjunto de medidores de fluência do concreto da ponte Plougastel (FREYSSINET, 1936).

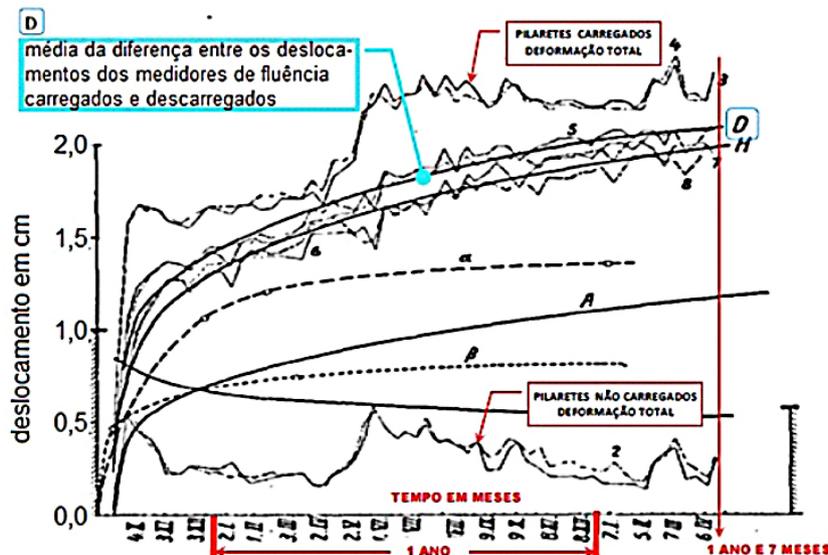


Figura 2 – Curvas deslocamento – tempo dos medidores de fluência (FREYSSINET, 1936).

A Figura 2 apresenta os valores de deslocamento, isto é, a variação do comprimento relativo à distância das extremidades extremas superiores dos pilares que compõem o medidor de fluência, em função do tempo. Em destaque, pode-se notar a curva D, que foi elaborada a partir da média da diferença entre os deslocamentos dos medidores de fluência carregados e descarregados. Verifica-se que, nas primeiras idades, este deslocamento foi cerca de 1 cm e, após em torno de 1 ano e 7 meses, 2 cm.

A Ponte Plougastel (Figura 3), ou Ponte Albert Louppe, projetada por Eugène

Freyssinet, está localizada sobre o rio Elorn, perto de Brest, na França, conectando Plougastel-Daoulas e Le Relecq-Kerhuon. Sua construção iniciou-se em 1926 e foi concluída em 1930. É uma ponte em arco com tabuleiro superior, de 9 m de largura, sustentado por montantes em concreto armado, de

cerca de 888 m de comprimento total, composta por três arcos de em torno de 188 m e de 27,5 m de altura.

Parte da ponte foi destruída pelo exército alemão em 1944. Pouco tempo, depois, foi fechada para recuperação. Foi reaberta cinco anos depois após obra de alargamento. Atualmente, a ponte de Plougastel é um marco na rota do evento de bicicleta ParisBrest-Paris.

Medidor de Fluência do Concreto da Ponte Ernesto Dornelles

No ano de 1950, o engenheiro civil de estruturas brasileiro, Antonio Alves de Noronha, construiu um conjunto de 9 medidores de fluência do concreto da ponte Ernesto Dornelles no Brasil, parecido com o idealizado por Eugène Freyssinet.

Cada medidor era composto por dois pilares verticais de 3050 mm de altura opostos e afastados entre si de 100 mm de comprimento, cada um com base

engastada e extremidade superior suportando uma viga em balanço de 1200 mm de comprimento carregada com um bloco de 500 mm x 500 mm x 1500 mm de dimensões, Figuras 4 a 7.

A Ponte Ernesto Dornelles (v. Figura 8), ou Ponte do Rio das Antas, projetada por Antonio Alves de Noronha, está localizada sobre o rio das Antas, na divisa entre os municípios de Bento Gonçalves e Veranópolis do Estado do Rio Grande do Sul. Sua construção iniciou-se em 1942 e foi concluída em 1952. É uma ponte em arco com tabuleiro intermediário, de 10,2 m de largura, sustentado lateralmente por montantes e ao centro por pendurais em concreto armado, de 278 m de comprimento total, 186 m de vão livre, 28 m de flecha e 46 m de altura total.

Foi um marco da engenharia nacional, pois era a ponte em concreto armado com maior vão livre das Américas, 186 m, na época de sua construção, perdendo o título de maior vão livre do mundo para uma ponte na Espanha, com 200 m de vão livre.

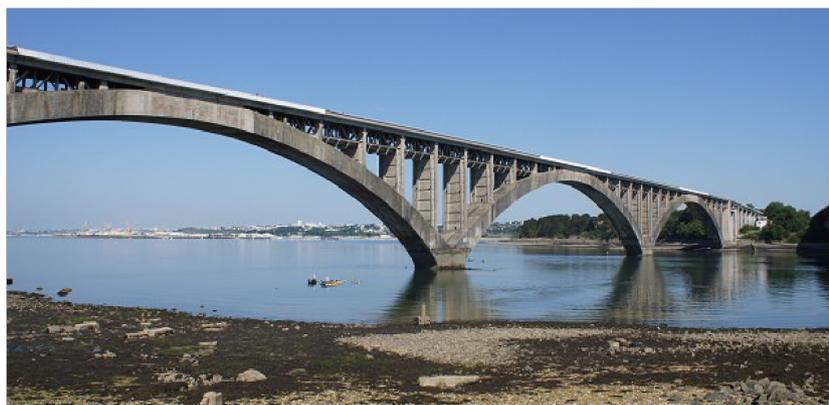


Figura 3 – Vista da ponte Plougastel – ponte Albert Louppe
(Disponível em: <https://structurae.net/structures/plougastel-bridge>, acesso em março de 2018).



Figura 4 – Conjunto de medidores de fluência do concreto da ponte Ernesto Dornelles (AUTORES).

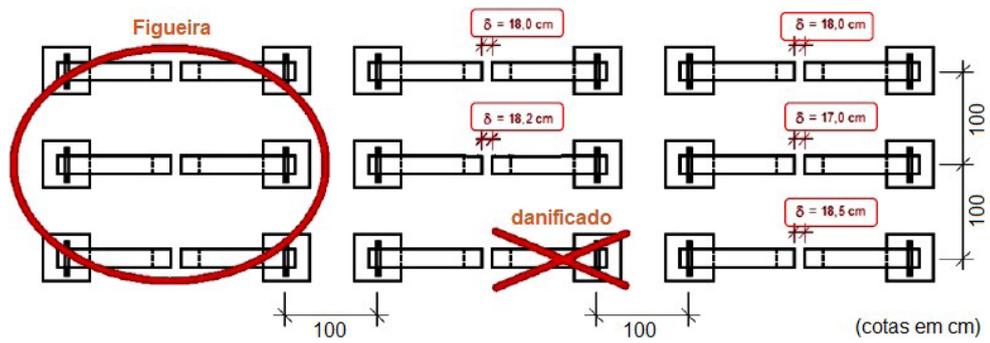


Figura 5 – Disposição dos nove medidores de fluência do concreto da Ponte Ernesto Dornelles (AUTORES).

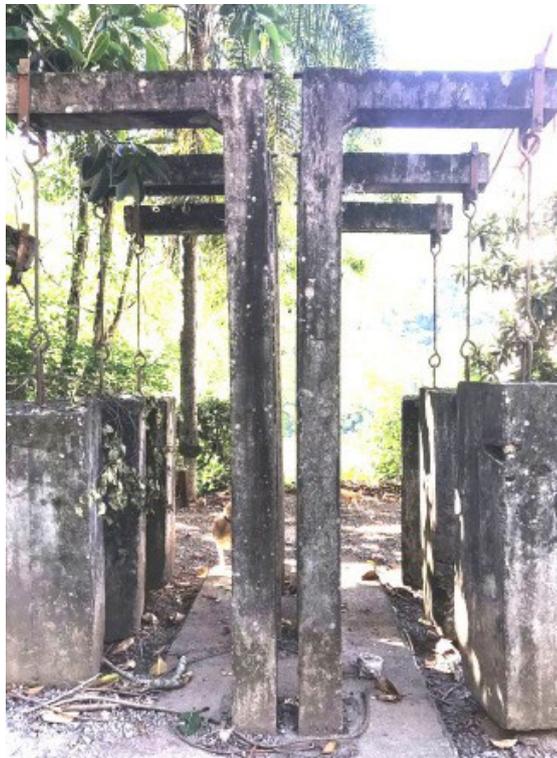


Figura 6 – Vista frontal de medidores de fluência do concreto da Ponte Ernesto Dornelles (AUTORES).

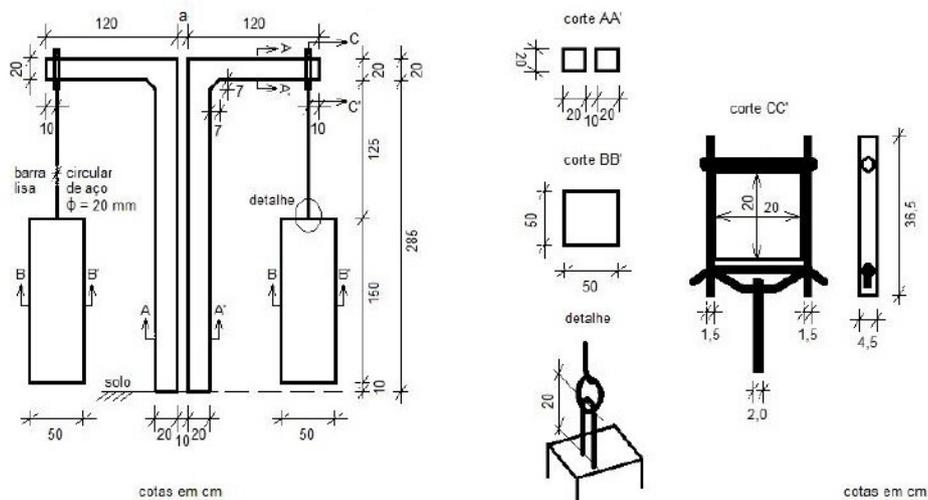


Figura 7 – Detalhes e dimensões de um dos medidores de fluência do concreto da ponte Ernesto Dornelles (AUTORES).

Esquema do Ensaio de Eugène Freyssinet

A Figura 9 mostra o esquema do ensaio de Eugène Freyssinet para a medição da fluência do concreto.

O medidor de fluência do concreto encontra-se descarregado e a distância entre face à face dos pilares opostos entre si é igual ao valor a (Figura 9a). Ao serem carregados na extremidade da viga em balanço com o uso de blocos de concreto, os pilares sofrem flexão e há uma variação do comprimento relativo à distância das extremidades extremas superiores dos pilares δ_o , conforme se vê na Figura 9b. Com o passar do tempo e carregamento, o concreto sofre fluência e retração e a variação do comprimento relativo à distância das extremidades extremas superiores dos pilares passa a ser δ_t .

Cálculo da Distância entre os Pilares

Considerando a fluência e a retração do concreto para os pilares do ensaio de Eugène Freyssinet, pode-se calcular o deslocamento, isto é, a variação do comprimento relativo à distância das extremidades extremas superiores dos pilares que compõem o medidor de fluência, com o uso de dois métodos propostos por Leonhardt (1979).

O primeiro método admite que o alongamento do aço no bordo tracionado não varia enquanto ocorrem a retração e a fluência do concreto no bordo comprimido, ao passo que no segundo método (MAYER, 1967), o alongamento do aço varia.

Para o caso de uma seção de concreto armado de $b \times d$ de dimensões sob flexo-compressão (momento fletor M e força normal de compressão N) e com armadura dupla (Figura 10), no estágio II, isto é, no



Figura 8 – Vista da ponte Ernesto Dornelles – ponte do Rio das Antas (AUTORES).

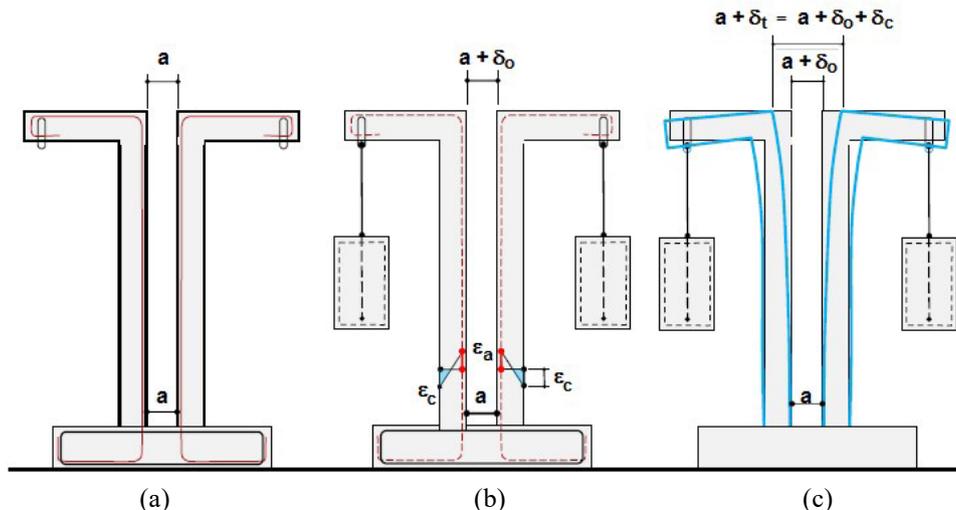


Figura 9 – Esquema do ensaio de Eugène Freyssinet (AUTORES).

regime elástico linear e sem tração no concreto, a altura da linha neutra x é dada pela Equação 1.

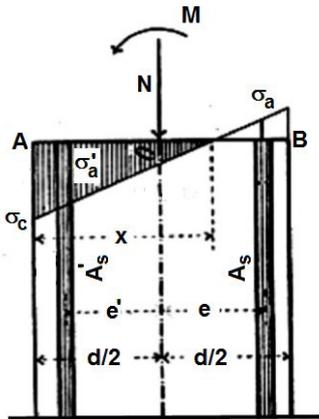


Figura 10 – Tensões normais em uma seção sob flexo-compressão (AUTORES).

$$x^3.N/6 - x^2.(N.d/4 - M/2) + x.n/b.[M.(A_s + A'_s) - N.(e'.A_s - e.A'_s)] + M.n/b.[A_s.(e' - d/2) - A'_s.(e + d/2)] - N.n/b.[A_s.e'.(e' - d/2) + A'_s.e.(e + d/2)] = 0 \quad (1)$$

onde n é a razão entre o módulo de elasticidade do aço E_a e o do concreto E_c .

Após a determinação do valor de x , calculam-se os valores de tensão σ_a e σ_c e deformação específica ϵ_a e ϵ_c do concreto e do aço.

A partir de investigação realizada *in loco* pelos autores deste trabalho, no mês de novembro de 2017, verificou-se que a armadura de aço na face tracionada dos pilares era formada por 4 barras de 16 mm de diâmetro e a distância a (Figura 9) era de 100 mm.

Sabendo que os valores de M , N , b , d , A_s , A'_s , e e e' são iguais a 9400 Nm, 9400 N, 200 mm, 200 mm, 800 mm², 0 mm², 82 mm e 0 mm, chega-se a 86,9 mm para o valor de x . Assim, os valores de σ_a e σ_c são iguais a 72,5 MPa e 7,8 MPa. Admitindo os valores de E_a e E_c iguais a 205 GPa e 24 GPa, os valores de ϵ_{ao} e ϵ_{co} são 0,35‰ e 0,32‰, que são os valores de deformação inicial dos materiais do pilar carregado com o bloco de concreto.

O valor de deformação específica do concreto devido à retração pode ser estimado por meio da Tabela 8.2, item 8.2.11 da ABNT NBR 6118 (2014). Sabendo que a umidade média ambiente anual é em torno dos 75 % e a espessura fictícia da seção do pilar é 100 mm (razão entre o dobro da área e o perímetro da seção do pilar) e adotando um tempo de 30 dias, a deformação específica de retração do concreto ϵ_{cs} e o coeficiente de fluência ϕ são em torno de 0,33‰ e 2,4.

O valor de deformação específica do concreto devido à fluência ϵ_{cc} é o produto entre ϵ_{co} e ϕ , isto é, $0,32‰ \cdot 2,4 = 0,77‰$.

Portanto, a deformação específica total do concreto ϵ_{ct} , que é a soma da deformação específica inicial do concreto $\epsilon_{co} = 0,32‰$, da deformação do concreto devido à retração $\epsilon_{cs} = 0,33‰$ e da deformação específica do concreto devido à fluência $\epsilon_{cc} = 0,77‰$, é igual a 1,42‰.

A Figura 11 ilustra o pilar de altura h após flexo-compressão, onde se pode ver o seu raio de curvatura R e o deslocamento δ na sua extremidade superior. Como os valores de N e M são praticamente constantes, o valor de R no pilar também é constante e o valor de δ pode ser calculado com o uso da equação do círculo.

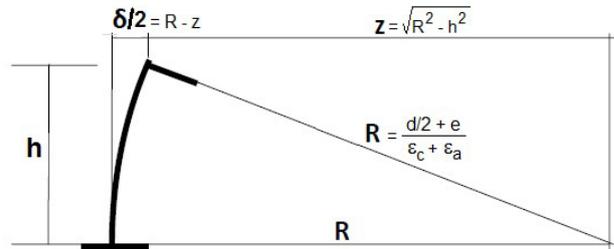


Figura 11 – Esboço do pilar sob flexo-compressão (AUTORES).

Sabendo que $d/2 + e$, ϵ_a , ϵ_{co} e h são iguais a 182 mm, 0,35‰, 0,32‰, e 2950 mm, quando o pilar é inicialmente carregado com o bloco de concreto, chega-se a 271641,8 mm para o valor de R . Assim, os valores de z e δ_0 são iguais a 271625,8 mm e 32,0 mm. Considerando a fluência e retração, os valores de ϵ_a e ϵ_{ct} passam para 0,35‰ e 1,42‰, e, portanto, os valores de R , z e δ_1 são iguais a 102824,9 mm, 102782,5 mm e 84,7 mm. Assim a distância no bordo superior entre os pilares que formam um medidor de fluência ($a + \delta_1$) é 184,7 mm.

Admitindo que o alongamento do aço no bordo tracionado varia enquanto ocorrem a retração e a fluência do concreto no bordo comprimido, o valor de δ_c é dado pela Equação 2, formulada por MAYER (1967).

$$\delta_c = \delta_0.[1/12.(n.100.\mu)0,5.(1 + \mu'/\mu) - 1].(\phi.\epsilon_{co} + \epsilon_{cs})/\epsilon_{co} \quad (2)$$

onde μ e μ' são as taxas de armadura de tração e de compressão na flexão.

Como δ_0 , n , μ , μ' , ϕ , ϵ_{co} , ϵ_{cs} são iguais a 32 mm, 8,54, 0,022, 0, 2,4, 0,32‰ e 0,33‰, o valor de δ_c é igual a 39,7 mm. Então, o valor de δ_1 , que é a soma entre δ_0 e δ_c , é 32,0 mm + 39,7 mm = 71,7 mm. Em consequência, a distância no bordo superior entre os pilares que formam um medidor de fluência ($a + \delta_1$) é 171,7 mm.

De forma resumida, os valores calculados

para a distância no bordo superior entre os pilares que formam um medidor de fluência ($a + \delta_{\tau}$) foram iguais a 184,7 mm, admitindo que o alongamento do aço no bordo tracionado não varia enquanto ocorrem a retração e a fluência do concreto no bordo comprimido, e 171,7 mm, considerando que o alongamento do aço no bordo tracionado varia enquanto ocorrem a retração e a fluência do concreto no bordo comprimido.

Os valores medidos ($a + \delta_{\tau}$) pelos autores *in loco*, no mês de novembro de 2017, ou seja, cerca de 67 anos após a construção do conjunto de medidores de fluência (Figura 12), variaram entre 170 mm e 185 mm e foram muito próximos dos calculados.

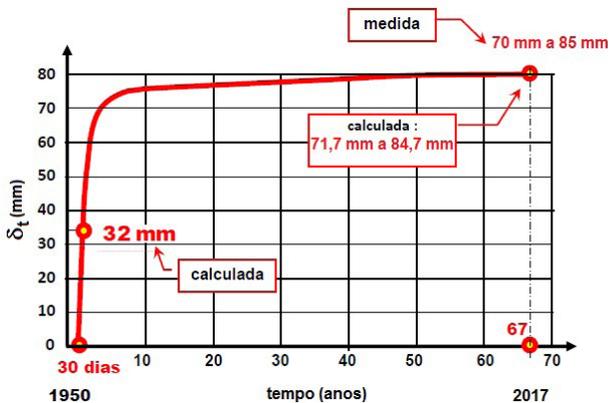


Figura 12 – Valores calculados e medidos de δ_{τ} (AUTORES).

Conclusões

De posse dos dados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que:

- comprovou-se, por meio de um medidor de fluência idealizado por Eugène Freyssinet, que os valores sugeridos para deformação

específica de retração e coeficiente de fluência do concreto pela ABNT NBR 6118 (2014) são confiáveis;

- o método proposto por Mayer (1967), para avaliação da deformação de retração e fluência do concreto, se mostrou eficaz.
- os valores experimental e teórico da deformação específica lenta do concreto foram próximos entre si e que o coeficiente de fluência sugerido pela ABNT NBR 6118 (2014) foi praticamente igual ao encontrado experimentalmente.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. ABNT NBR 8224 – Concreto endurecido – Determinação da fluência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

FREYSSINET, E. Aspects nouveaux des problèmes du ciment arme. IABSE publication, Mémoires AIPC, IVBH Abhandlungen, Volume 4, 1936.

LEONHARDT, F. Construção de concreto – Verificação da capacidade de utilização, Volume 4, Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, Brasil, 1979.

MAYER, H. Die Berechnung der Durchbiegung von Stahlbetonbauteilen. DAfStb, Cad. 194, Berlim, W. Ernst u. Sohn, 1967.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4ª Ed., Mc Graw Hill Education, 2014.

NEVILLE, A. M. Properties of Concrete, 4ª Ed. John Wiley & Sons Inc., 1996.