Furnas Centrais Elétricas S.A. · Laboratório de Concreto de Itumbiara

Determinação da Fluência do Concreto

Edição revista, com reconstituição das curvas de fluência e ajuste de envelhecimento das funções $1/E$ e $F(k)$

AUTORES DO RELATÓRIO ORIGINAL

Eng. Walton Pacelli de Andrade
Eng. José Tomaz França Fontoura
Eng. Rubens Machado Bittencourt
Téc. Especializado Elcio Antonio Guerra

EDIÇÃO, RECONSTITUIÇÃO E CÁLCULOS

Flávio Mamede Pereira Gomes
Instituto Roy Carlson

O relatório original descreve o procedimento de ensaio de fluência segundo o Projeto de Norma 18:04.05-001 (CB-18) e apresenta os resultados de 57 ensaios em concretos das barragens de Itumbiara, Tucuruí, Ilha Grande e Balsas Mineiro e da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Esta edição transcreve o texto integral, organiza os resultados em fichas por dosagem, reconstitui as curvas de fluência e substitui as equações de envelhecimento da Tabela 1 original por ajustes exponenciais monótonos.

setembro de 2026

Nota desta edição

O relatório *Determinação da Fluência do Concreto* circulou como cópia datilografada, digitalizada em 2001 com qualidade insuficiente para leitura automática. Esta edição reconstrói o documento em três camadas.

A primeira camada é a transcrição do texto (páginas 1 a 20 do original), do Resumo à Equação para Fluência. O texto foi mantido íntegro no conteúdo técnico; a ortografia foi atualizada e as unidades normalizadas (kgf/cm^2, kg/m^3, °C). As fotografias e os desenhos esquemáticos não puderam ser recuperados do scan e estão indicados por marcadores no ponto exato do texto, para inserção posterior a partir dos originais. Os símbolos gregos, manuscritos no original, foram interpretados pelo contexto do ensaio; o único ponto que exigiu decisão editorial — as constantes do extensômetro Carlson — está registrado em nota própria (Seção 2.2.3).

A segunda camada é a apresentação dos resultados (Figuras 3 a 17 do original, páginas 21 a 36), reorganizados em fichas por dosagem. Cada ficha reúne procedência e composição do concreto, os coeficientes $1/E$ e $F(k)$ da equação USBR por idade de carregamento, a curva de fluência reconstituída a partir desses coeficientes e o envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$. Todos os valores numéricos foram extraídos do original e conferidos por consistência (por exemplo, a percentagem da carga de ruptura foi verificada contra a razão entre tensão aplicada e tensão de ruptura em todos os ensaios).

A terceira camada é a contribuição própria desta edição: as equações de envelhecimento da Tabela 1 original (página 37), que usavam formas racionais e polinomiais da época, foram substituídas por ajustes exponenciais de um só termo, monótonos por construção, descritos no Capítulo 7 e consolidados na Tabela 7.1. As Figuras 18 a 23 do original, que ilustravam aquelas equações, ficam superadas; o Apêndice B registra o que elas continham.

Sumário

Nota desta edição ii

Lista de Tabelas v

I O relatório original 1

Resumo 2

Introdução 3

1 Preparação dos Materiais 4
1.1 Preparação dos Agregados . . . 4

2 Aparelhagem para Medição das Deformações 5
2.1 Princípio de Funcionamento . . . 5
2.2 Descrição do Extensômetro (3 e 4) . . . 5
2.2.1 Constantes de Calibração . . . 6
2.2.2 Dimensões dos Extensômetros . . . 7
2.2.3 Equação Geral da Deformação Unitária . . . 7
2.2.4 Aparelho de Medição . . . 7

3 Preparação dos Corpos de Prova 8
3.1 Dimensões dos Corpos de Prova . . . 8
3.2 Extensômetros Utilizados . . . 8
3.3 Colocação do Extensômetro . . . 8
3.4 Adensamento . . . 9
3.5 Proteção Contra Perda de Umidade . . . 9

4 Aparelhagem de Aplicação e Manutenção da Carga 10
4.1 Tipos de Aparelhagem . . . 10
4.2 Sistema de Pirtz (5) . . . 10
4.2.1 Célula de Carregamento Hidráulico . . . 10
4.2.2 Suprimento de Pressão e Sistema de Controle . . . 10
4.3 Sistema com Aplicação e Correção Manual da Carga . . . 11
4.3.1 Célula de Carregamento Hidráulico . . . 11
4.3.2 Suprimento de Pressão e Sistema de Controle . . . 12
4.3.3 Leituras das Deformações . . . 12
4.3.4 Cálculo das Deformações . . . 12

5 Equação para Fluência 13

II Resultados dos ensaios 14

6 Apresentação dos resultados 15
6.1 Dosagem 140.6.1 — Barragem de Itumbiara 16
6.2 Dosagens 120.6.3 e 140.6.3 — Barragem de Itumbiara 18
6.3 Dosagem E-1484/ANG 103 — Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (C.N.A.A.A.) 20
6.4 Dosagem E-1757/ANG 152 — C.N.A.A.A. 22
6.5 Dosagem E-1941/ANG 260 — C.N.A.A.A. 24
6.6 Dosagem E-2302/TUC 335 — Barragem de Tucuruí 26
6.7 Dosagem E-2039/TUC 322 — Barragem de Tucuruí 28
6.8 Dosagem E-963/TUC 192 — Barragem de Tucuruí 30
6.9 Dosagem E-963/TUC 192 — Barragem de Tucuruí 33
6.10 Dosagem E-2046/TUC 324 — Barragem de Tucuruí 36
6.11 Dosagem E-2300/TUC 333 — Barragem de Tucuruí 38
6.12 Dosagem E-2299/BM 126 — Barragem de Balsas Mineiro 41
6.13 Dosagem E-2363/IG 03 (76A) — Barragem de Ilha Grande 43
6.14 Dosagem E-2379/IG 05 (152 B′) — Barragem de Ilha Grande 45
6.15 Dosagem E-2380/IG 06 (152 A′) — Barragem de Ilha Grande 47

III Envelhecimento das funções de fluência 49

7 Envelhecimento de $1/E$ e $F(k)$ 50
7.1 Leitura dos resultados 51

IV Apêndices 53

A Bibliografia do relatório original 54

B Figuras 18 a 23 do original 55

C Síntese dos ensaios 56

Lista de Tabelas

6.1 Registro das fichas de resultados (Figuras 3 a 17 do original), por obra, agregado e dosagem. 15

7.1 Equações de envelhecimento de $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$ para todas as dosagens (substitui a Tabela 1, pág. 37, do original). Unidades: $10^{-6}/(\mathrm{kgf\,cm^{-2}})$; z em dias. 50

B.1 Registro das Figuras 18 a 23 do original (curvas de $1/E$ e $F(k)$ em função da idade). 55

C.1 Ensaios de fluência por obra: número de ensaios, idades de carregamento e dosagens. 56

Parte I

O relatório original

Resumo

Neste trabalho estão apresentados os resultados dos ensaios de fluência do concreto realizados no Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A., localizado na Usina Hidroelétrica de Itumbiara, e os procedimentos para a sua determinação.

Os procedimentos para a realização dos ensaios obedeceram às prescrições do Projeto de Norma 18:04.05-001, elaborado pela Comissão de Estudo de Determinação da Fluência do Concreto, do CB-18 (Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados), e estão apresentados de acordo com os seguintes tópicos:

- preparação dos materiais;
- aparelhagem para medição das deformações;
- preparação dos corpos de prova;
- aparelhagem de aplicação e manutenção de carga.

O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos, de tamanho compatível com o diâmetro máximo do agregado graúdo, utilizando extensômetros Carlson embutidos.

Os resultados dos ensaios referem-se a concretos de diferentes composições, preparados com agregados provenientes de diferentes obras.

Introdução

As variações volumétricas do concreto podem ocorrer quando o material ainda está fresco ou após o seu endurecimento.

O volume do concreto ou argamassa endurecidos corresponde geralmente a cerca de 98% daquele do concreto ou argamassa frescos, podendo, em alguns casos, ser menor, devido aos seguintes fatores:

- perda parcial de ar incorporado durante o manuseio, lançamento e vibração;
- perda devida à sedimentação e à exsudação.

Após o endurecimento, o concreto e a argamassa estão sujeitos a variações volumétricas decorrentes do decréscimo no volume combinado de cimento e água de amassamento durante a hidratação.

As variações volumétricas são medidas por variações de comprimento, por meio de aparelhos medidores de diversos tipos.

As variações de comprimento do concreto endurecido inserem-se em dois grupos.

Primeiro, a variação pode ser devida à expansão ou contração do concreto endurecido, resultante da molhagem, secagem, variações de temperatura ou do fenômeno autógeno. Este tipo de variação de comprimento, frequentemente conhecido como variação de volume, não deve ser confundido com a retração plástica ou retração por sedimentação, que ocorre no concreto fresco antes do início da pega.

A variação de volume decorrente da molhagem e secagem do concreto endurecido, submetido a temperatura constante, manifesta-se por um acréscimo quando o gel de cimento formado pela hidratação absorve umidade, e por um decréscimo quando libera umidade na secagem. Corpos de prova de concreto com agregados de diâmetro máximo de 38 mm, curados continuamente em ambiente úmido, mantêm seu comprimento original; já os corpos de prova mantidos em ambiente com temperatura constante e umidade relativa do ar de 50% sofrem uma retração de 0,04 a 0,07% ao fim de um ano. A retração por secagem é afetada por muitos fatores, como temperatura, umidade, dosagem e materiais (1).

A variação de comprimento autógena, resultante de fatores intrínsecos durante a hidratação da pasta de cimento, é medida em uma massa de concreto selada — protegida contra ganho ou perda de umidade —, mantida sem restrição (desimpedida) e à temperatura constante.

As variações de comprimento resultantes das variações de temperatura são medidas em corpos de prova selados, armazenados em salas com temperaturas variáveis, para a obtenção do coeficiente de expansão térmica (dilatação linear). Nas estruturas, essas variações volumétricas são obtidas por processos matemáticos, sendo função de numerosos fatores.

Segundo, outro tipo de variação de comprimento de interesse é a variação de comprimento ou deformação produzida por cargas de compressão ou de tração, aplicadas e mantidas por um tempo determinado. Essa deformação é a que chamamos de **fluência**.

1 Preparação dos Materiais

1.1 Preparação dos Agregados

Para a realização dos ensaios de fluência, os agregados deverão ser caracterizados por meio de pelo menos os seguintes ensaios:

- massa específica e absorção;
- granulometria.

A preparação dos agregados, após a caracterização, é descrita sumariamente a seguir.

Os agregados são saturados previamente em recipientes estanques (geralmente tambores de 200 litros), por um período nunca inferior a 24 horas. Após a saturação, é retirada a água em excesso, devendo a umidade ser controlada para que o agregado apresente estado de saturação próximo da condição saturado superfície seca. Para melhor controle desse estado, os agregados deverão ser preparados à sombra, após a retirada da água em excesso.

Após a preparação, os agregados são acondicionados em tambores lacrados, de maneira a conservar o estado de saturação. Por ocasião da utilização, o material é estocado na sala de dosagens — que deve possuir temperatura controlada —, onde permanece por um período nunca inferior a 24 horas. São coletadas amostras para a determinação da umidade.

2 | Aparelhagem para Medição das Deformações

2.1 Princípio de Funcionamento

Para a medição das deformações existem vários tipos de extensômetros que podem ser embutidos nos corpos de prova. Apresenta-se aqui somente a descrição do extensômetro Carlson, por ser o mais utilizado.

Lord Kelvin descobriu que a resistência de um fio condutor é função da deformação à qual ele é submetido, sendo que as deformações de tração geralmente aumentam a resistência e as de compressão a diminuem. Este princípio de Lord Kelvin foi estabelecido em 1856. Em 1927, Roy W. Carlson completou o projeto de seu primeiro extensômetro, que recebeu o seu nome, baseado nos estudos de Lord Kelvin.

O instrumento baseia-se na relação linear existente entre a tensão aplicada a um fio de aço e a sua resistência elétrica. A resistência de um condutor é dada pela equação:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \tag{1}$$

onde:

- R = resistência elétrica (ohms);
- ρ = resistividade;
- ℓ = comprimento do condutor;
- S = seção do condutor.

A tensão a que o fio está submetido é dada por:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

sendo $\varepsilon = \dfrac{\Delta\ell}{\ell}$, de modo que:

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell} \qquad \therefore \qquad \ell = \frac{E \cdot \Delta\ell}{\sigma}$$

Substituindo o valor de ℓ em (1):

$$R = \rho \cdot \frac{E \cdot \Delta\ell}{\sigma \cdot S}$$

O instrumento é projetado para tirar proveito das duas propriedades do fio de aço, ou seja: a resistência varia com a temperatura e com a tensão a que o fio está submetido.

2.2 Descrição do Extensômetro (3 e 4)

O extensômetro Carlson é constituído por um tubo de latão (ou outra liga semelhante) com a forma de um cilindro alongado, fechado nos dois extremos por dois flanges, que fazem a sua ancoragem no concreto que o envolve. No interior do cilindro existem duas hastes de aço ligadas diretamente aos flanges, que formam a estrutura do aparelho. Tais hastes são livres para

se deslocar uma em frente à outra quando se varia o afastamento das extremidades do aparelho. Nas hastes são fixados pequenos isoladores de porcelana, nos quais estão enrolados fios de aço formando duas bobinas. Tais fios possuem diâmetro de 0,06 mm e são mantidos a uma tensão de 7000 kgf/cm².

Como se vê pela Figura 1, a disposição dos isoladores de porcelana de fixação das bobinas na haste é feita de tal maneira que, quando ocorre um deslocamento relativo das duas hastes, uma das bobinas é comprimida e a outra é expandida.

Figura 1 — Representação esquemática do extensômetro

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

A relação entre a resistência da bobina que se expande e a da bobina que se comprime é sempre próxima da unidade e é usada como elemento sensível medidor das mudanças de comprimento do extensômetro. Ela é geralmente calibrada para cerca de 3×10^{-6} cm/cm para cada variação de 0,01% na relação de resistências (para o tipo mais comum de extensômetro, com 25 cm de comprimento). As relações entre as resistências não são afetadas por mudanças simultâneas de temperatura, porque as bobinas sofrem variações em percentagem igual.

O extensômetro funciona também como termômetro. A temperatura é medida tomando-se a soma das resistências das bobinas de expansão e de contração. Essa soma não é afetada materialmente pela variação de resistência devida a mudanças de comprimento, pois o acréscimo de uma compensa o decréscimo da outra quando somadas. A resistência dos extensômetros é de cerca de 70 ohms a 21,0 °C e aumenta cerca de 1 ohm para cada 5,0 °C de acréscimo de temperatura.

Uma correção de cerca de 12 a 13,5 $\times 10^{-6}$ cm/cm é feita para cada mudança de temperatura de 1,0 °C, por causa da estrutura do aparelho.

A variação das deformações unitárias medidas pelo extensômetro é limitada. Os aparelhos podem se quebrar se alguma trinca se desenvolver no concreto e os atravessar, ou se forem solicitados acima de determinados esforços.

O tubo de latão que envolve a estrutura possui, em uma das extremidades, um fole que permite maior liberdade de deformações. O cilindro é envolvido por uma manga de algodão ou plástico, para impedir a aderência do concreto. As peças metálicas e as resistências do interior são protegidas da corrosão por óleo de mamona (óleo de castor), deixando-se um pequeno espaço para permitir as expansões do óleo. Uma pequena câmara é deixada para se fazer a conexão do cabo condutor.

O extensômetro é fornecido geralmente com um cabo condutor de aproximadamente 80 cm, envolvido por neoprene e com 3 ou 4 fios condutores. O condutor verde (ou vermelho) é comum às duas bobinas; o branco é ligado à extremidade da bobina de expansão; e o condutor preto, à extremidade da bobina de contração.

2.2.1 Constantes de Calibração

Cada aparelho é fornecido pelo fabricante com as seguintes constantes de calibração:

- R_{to} — Resistência total R_o à temperatura $T_o = 0\,\mathrm{C}$ (ou °F).
- β — Constante de temperatura: variação de temperatura (em graus centígrados, ou Fahrenheit) correspondente à variação de 0,01 ohm na resistência total.
- θ — Constante de calibração: variação da deformação unitária correspondente a uma variação de 0,01% na relação de resistências.
- γ — Constante de correção: variação da deformação unitária correspondente à variação de 1,0 °C.

2.2.2 Dimensões dos Extensômetros

Os extensômetros são fornecidos geralmente em três tamanhos: 20, 25 e 50 cm. Existem também os extensômetros miniatura, fornecidos nos comprimentos de 10 e 15 cm.

2.2.3 Equação Geral da Deformação Unitária

A deformação unitária real, medida através dos extensômetros, é dada por:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_a + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_a = \theta \cdot \Delta\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \qquad ; \qquad \Delta t = \beta \cdot \Delta R_t \qquad ; \qquad \varepsilon_t = \gamma \cdot \Delta t$$

onde:

- ε_r = deformação unitária real;
- ε_a = deformação unitária aparente;
- ε_t = correção da deformação unitária devida à temperatura;
- $\Delta\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ = variação da relação das resistências;
- Δt = variação da temperatura;
- ΔR_t = variação da resistência total;
- θ, β, γ e R_{to} = constantes dos extensômetros.

> **Nota do editor — símbolos gregos manuscritos**
>
> No original, os símbolos das constantes nas três igualdades desta subseção estão manuscritos e, tomados literalmente, ficam trocados em relação às definições do item 2.2.1 e à física do extensômetro Carlson. Foram aqui reordenados para manter a coerência dimensional e com as próprias definições: a deformação aparente vem da relação de resistências pela constante de calibração θ; a variação de temperatura vem da variação da resistência total pela constante de temperatura β ($\Delta t = \beta \cdot \Delta R_t$); e a correção de temperatura da deformação vem de Δt pela constante de correção γ ($\varepsilon_t = \gamma \cdot \Delta t$). Convém conferir o arranjo com o documento-fonte original.

2.2.4 Aparelho de Medição

As resistências elétricas e as relações de resistência são medidas com uma ponte projetada especialmente para essa finalidade, do tipo ponte de Wheatstone, que mede relações de resistência até 0,01% e resistências até 0,01 ohm. As leituras são feitas pelo método do zero, equilibrando-se a agulha do galvanômetro nesse ponto.

3 Preparação dos Corpos de Prova

3.1 Dimensões dos Corpos de Prova

As dimensões dos corpos de prova são governadas pelo diâmetro máximo do agregado:
- até 38 mm de diâmetro máximo: cilindros de 15 × 45 cm;
- diâmetro máximo de 76 mm: cilindros de 25 × 50 cm;
- diâmetro máximo de 152 mm: cilindros de 45 × 90 cm.

3.2 Extensômetros Utilizados

Para os corpos de prova de 15 × 45 cm, o extensômetro mais adequado é o de 10 ou 15 cm de comprimento. Nos corpos de prova de 25 × 50 cm, bem como nos de 45 × 90 cm, o extensômetro mais indicado é o de 25 cm de comprimento.

3.3 Colocação do Extensômetro

Para maior facilidade de colocação e melhor posicionamento, utiliza-se um disco de aço com um orifício no centro, por onde passa o cabo condutor do extensômetro. Além disso, o disco possui uma ranhura na qual o cabo fica embutido, de modo a não causar empecilho no carregamento do corpo de prova. O disco tem espessura mínima de 2 cm e é montado no fundo da forma; para maior facilidade de manuseio, deve ser bipartido. O diâmetro do orifício por onde passa o condutor tem dimensão um pouco inferior à do cabo, para impedir a fuga de água e argamassa do concreto (Fotografias 1 e 2). O extensômetro é instalado no meio da altura e no centro do corpo de prova (Fotografias 1 e 4).

Fotografias 1 e 2

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

O posicionamento do extensômetro no corpo de prova é complementado passando-se dois arames finos pela outra extremidade do aparelho e fixando-os no topo superior da forma por meio de um vergalhão. A Figura 2 mostra os detalhes de colocação do extensômetro, bem como o disco utilizado. Para o topo do corpo de prova, utiliza-se um disco semelhante ao do fundo.

Fotografias 3 e 4

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

Figura 2 — a) Posicionamento do extensômetro; b) Posicionamento dos discos e da jaqueta; c) Detalhe do disco inferior

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

3.4 Adensamento

O adensamento do concreto é feito por meio de vibrador elétrico de imersão, cuja agulha deverá ser função do diâmetro máximo do agregado.

Durante a vibração, deve-se tomar cuidado para que o extensômetro não seja danificado e adensar o concreto com cautela, para evitar o deslocamento do aparelho do centro da forma (Fotografias 5 e 6). Para os corpos de prova até 25 cm de diâmetro, o adensamento deverá ser feito em 2 ou 3 camadas.

Logo após o adensamento, deve-se cortar os arames de fixação, para que o extensômetro não fique com ligação rígida dentro da forma; caso permaneça rígido, poderão surgir microfissuras quando da retração do concreto dentro da forma.

O concreto deverá ficar 2 a 3 cm abaixo do topo da forma, para permitir a fixação do disco superior. Esse disco é fixado logo após o endurecimento do concreto, por meio de argamassa de mesma relação areia/cimento e mesmo fator água/cimento da dosagem estudada. A argamassa, além de fixar o disco, permite o seu nivelamento. Enquanto se aguarda o endurecimento da argamassa, o corpo de prova deverá ficar coberto com um plástico fino em contato direto, para impedir a evaporação da água.

Fotografias 5 e 6

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

3.5 Proteção Contra Perda de Umidade

O corpo de prova é desmoldado 24 horas após a moldagem e selado para evitar perda de umidade, que, se verificada, pode levar a resultados dúbios. Para tal selagem, o corpo de prova é envolvido por uma borracha colada com resina epóxi. Na colagem, ao se completar o envolvimento do corpo de prova, a resina é passada na emenda da borracha (Fotografias 7 a 9). No período de endurecimento da resina epóxi, a borracha é totalmente envolta por uma fita gomada de papel, para garantir melhor aderência (Fotografia 10).

Fotografias 7 a 10

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

4 Aparelhagem de Aplicação e Manutenção da Carga

4.1 Tipos de Aparelhagem

Existem vários tipos de aparelhagem para aplicação e manutenção da carga, sendo mais utilizada a que emprega circuito hidráulico. São apresentados dois tipos de aparelhagem: (1) sistema desenvolvido por Pirtz; (2) sistema com aplicação e correção manual da carga.

4.2 Sistema de Pirtz (5)

O sistema utilizado por Pirtz e associados alia três requisitos considerados importantes pelos autores:

1. desenvolve e mantém uma dada tensão em qualquer magnitude desejada;
2. requer um mínimo de manutenção e ajustes manuais;
3. a estrutura de carregamento é a mais leve possível, assegurando, no entanto, distribuição uniforme de tensões em toda a seção transversal do corpo de prova.

Tais requisitos são alcançados pelo uso de uma célula de carregamento hidráulico em conexão com um sistema de fornecimento de pressão controlada eletronicamente.

4.2.1 Célula de Carregamento Hidráulico

A célula de carregamento consiste em um cilindro de aço, em cujo interior há um encaixe em alto-relevo, como um prato invertido, para assegurar que um pistão de borracha seja adaptado para transmitir a pressão. Esse detalhe é visto na Fotografia 11.

Nesse cilindro de aço existem orifícios ligados por válvulas hidráulicas. Uma das válvulas recebe a pressão de óleo e a transmite ao pistão de borracha; a outra é usada para retirar o ar do óleo durante o carregamento da célula. Existe, na parte superior do cilindro, um orifício para purgar o óleo que porventura escape durante o ensaio; esse orifício fica próximo à face inferior do primeiro corpo de prova.

O pistão de borracha pode, em alguns ensaios, deixar passar determinada quantidade de óleo. Para eliminar essa passagem, foram utilizados teflon e fita isolante nas bordas do pistão.

Fotografia 11

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

4.2.2 Suprimento de Pressão e Sistema de Controle

A pressão do óleo exigida para operar as células é conseguida por meio de uma bomba injetora Bosch ou similar. A bomba injetora fornecida com o equipamento é de fabricação da Bobine Electric Company (*Fractional Horsepower Gear Motor*), operada por um motor de 1/20 HP, capaz de desenvolver um torque de 21 pol·lb a 57 rpm. O óleo é fornecido à bomba por um reservatório com capacidade suficiente para evitar manuseio frequente.

A principal razão para o emprego de uma bomba injetora é o seu baixo deslocamento e a sua alta capacidade de pressão. Para cada saída de óleo de um curso do pistão, a bomba desenvolve uma pressão de 140 kgf/cm² (2000 psi). Com uma bomba de deslocamento tão pequeno, o controle de pressão é simples porque não ocorre sobrecarga. O controle de pressão é feito ativando-se o motor da bomba por um regulador de pressão (*Minneapolis Honeywell Vane Type Electronic Pressure Regulator*), sensível a pequenos decréscimos de pressão da linha. A pressão desejada é pré-ajustada simplesmente no regulador, que, em conjunto com a bomba injetora, a manterá dentro de uma variação de 0,1%. A pressão inicial é fornecida por uma bomba injetora operada manualmente.

As Fotografias 12 a 14 ilustram a montagem de um conjunto de 3 corpos de prova de 25 × 50 cm para uma determinada idade de carregamento.

Fotografias 12 a 14

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

É previsto um acumulador de pressão para garantir o suprimento em caso de falta de energia. O acumulador usado é do tipo projetado para absorver choques no mecanismo do trem de aterrissagem de aviões pesados. Possui dois compartimentos separados por um diafragma flexível: um é carregado inicialmente com um gás, a uma pressão ligeiramente inferior à pressão de operação desejada, e o outro é conectado ao sistema de óleo. Ao mesmo tempo em que age como válvula de segurança numa queda de energia, o acumulador atua como tanque de compensação.

No equipamento utilizado no Laboratório de Concreto de Itumbiara, a estrutura de reação comporta três corpos de prova de 25 × 50 cm em cada unidade. Ela é construída com o prato superior em chapa de aço de 2 1/4 polegadas, ligada à célula de carregamento hidráulico por meio de 4 barras de aço de 2 1/4 polegadas de diâmetro (Fotografias 15 a 18). Entre o último corpo de prova e o prato superior é colocada uma rótula, para distribuição uniforme da pressão. Cada estrutura de reação é ligada ao sistema de suprimento e controle por tubos de aço ou cobre de 1/8 de polegada.

Fotografias 15 a 18

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

4.3 Sistema com Aplicação e Correção Manual da Carga

O sistema com aplicação e correção manual da carga mantida já é inteiramente fabricado no Brasil. Ele consiste em duas partes componentes:

1. célula de carregamento hidráulico (sistema de reação);
2. suprimento de pressão e sistema de controle (mantenedor de pressão).

4.3.1 Célula de Carregamento Hidráulico

A célula de carregamento hidráulico (sistema de reação) consiste em uma estrutura de aço (Fotografias 19 e 20) com um macaco hidráulico, ligado por mangueira de alta pressão ao circuito de pressão. Entre o macaco hidráulico e o prato de apoio (cabeçote) da estrutura é colocada uma rótula, para distribuir a pressão uniformemente por toda a seção transversal dos corpos de prova (Fotografia 19).

Para o controle mais preciso da carga aplicada e mantida nos corpos de prova, foram colocados manômetros entre o macaco e a mangueira de alta pressão ligada ao conjunto mantenedor de pressão (Fotografias 21 e 22).

Fotografias 19 a 22

imagem do original — a inserir a partir do documento-fonte

4.3.2 Suprimento de Pressão e Sistema de Controle

A pressão do óleo exigida para operar as células individuais de carregamento hidráulico é conseguida por meio de um conjunto de pressão permanente, dotado de reservatório de óleo suficiente para o emprego nos macacos hidráulicos. A pressão é obtida por duas alavancas que regulam a sua velocidade: uma aplica a pressão rapidamente e a outra, lentamente. O controle da pressão é exercido por pesos colocados em um dispositivo na parte inferior do sistema (Fotografias 19 e 20). Para cada célula é utilizado um manômetro, colocado na saída do circuito hidráulico do macaco, para o ajuste individual da pressão. No sistema de controle existe um manômetro que permite o controle da pressão de todo o conjunto, comunicando-se com suas válvulas de alta pressão. Havendo necessidade de operar células com pressões diferentes, serão necessárias tantas unidades de controle quantas forem as pressões.

No início do ensaio há necessidade de ajustes frequentes, pois não existe controle automático. Usualmente, nesse período (até 10 dias após a aplicação da carga) há necessidade de manter laboratoristas no turno noturno. A monitoração frequente nesse período, ajustando a pressão do circuito hidráulico, impede que a tensão aplicada nos corpos de prova se afaste do valor teórico pré-estabelecido.

4.3.3 Leituras das Deformações

Antes do carregamento definitivo, deverão ser realizados dois ciclos iniciais de carregamento e descarregamento nos corpos de prova, até a carga estabelecida no ensaio. Faz-se uma leitura nos aparelhos medidores de deformação imediatamente antes do carregamento definitivo (leitura de referência).

As leituras subsequentes, tanto da carga aplicada quanto das deformações, deverão ser feitas na seguinte sequência:

a) 30 segundos após o carregamento (deformação imediata);
b) 5, 10 e 30 minutos após o carregamento;
c) 1, 2 e 5 horas após o carregamento;
d) diariamente por uma semana;
e) duas vezes por semana até completar um mês;
f) semanalmente até completar o ensaio.

4.3.4 Cálculo das Deformações

O cálculo das deformações é feito a partir das leituras efetuadas nos extensômetros. Toma-se a leitura anterior ao carregamento como referência e, a partir daí, segue-se a mesma diretriz traçada para o cálculo das deformações obtidas por meio de extensômetros.

A diferença entre as leituras dos extensômetros imediatamente após o carregamento e as leituras anteriores ao carregamento fornece elementos para o cálculo das deformações elásticas (que possibilita o cálculo do módulo de deformação na idade em que é procedido o carregamento). As deformações acrescidas a essa deformação elástica já correspondem ao efeito de fluência.

5 | Equação para Fluência

Após a obtenção dos dados de fluência ou fluência específica, há que estabelecer a equação que a relacione com o tempo sob carga. Para o caso da obtenção da equação a partir dos dados de fluência específica, a expressão utilizada com mais frequência é a desenvolvida pelo U.S. Bureau of Reclamation:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} + F(k)\ \ln(t+1)$$

onde:

- ε = fluência específica + deformação elástica;
- $\frac{1}{E}$ = deformação elástica;
- $F(k)$ = coeficiente de fluência, definido pelo coeficiente angular da reta de fluência;
- t = idade sob carga.

Parte II

Resultados dos ensaios

6 | Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos em ensaios realizados no Laboratório de Itumbiara estão registrados nas fichas discriminadas na Tabela 6.1, de acordo com o tipo de agregado, origem e dosagem. Cada ficha reproduz os dados da figura correspondente do original: tipo dos agregados e Dmáx, cimentos e pozolanas, composição, percentagem de pasta, idade de carregamento, dimensões dos corpos de prova, tensão de ruptura, tensão aplicada, percentagem da carga de ruptura e os coeficientes da equação de fluência.

Tabela 6.1 – Registro das fichas de resultados (Figuras 3 a 17 do original), por obra, agregado e dosagem.

Fig.	Obra	Agregado graúdo	Dosagem	Dmáx (mm)	CP (cm)
3	Barragem de Itumbiara (GO/MG)	Basalto	140.6.1 (peneirado e integral)	152	25×50
4			120.6.3/ITB 6042 e 140.6.3/ITB 6822	152	45×90
5	Usina Nuclear de Angra dos Reis (RJ)	Gnaisse	E-1484/ANG 103	27	25×50
6			E-1757/ANG 152	27	25×50
7			E-1941/ANG 260	27	25×50
8	Barragem de Tucuruí (PA)	Metagrauvaque	E-2302/TUC 335	38	15×45
9			E-2039/TUC 322	76	25×50
10			E-963/TUC 192 (peneirado)	152	25×50
11			E-963/TUC 192 (integral)	152	25×50
12			E-2046/TUC 324	152	45×90
13			E-2300/TUC 333	152	45×90
14	Barragem de Balsas Mineiro (GO)	Cascalho (quartzo)	E-2299/BM 126	76	25×50
15	Barragem de Ilha Grande (PR)	Basalto	E-2363/IG 03	76	25×50
16			E-2379/IG 05	152	45×90
17			E-2380/IG 06	152	45×90

Convenções das fichas. Tensões em $\mathrm{kgf/cm^2}$; composição em $\mathrm{kg/m^3}$; $1/E$ e $F(k)$ em $10^{-6}/(\mathrm{kgf\,cm^{-2}})$; t é o tempo sob carga em dias e z a idade de carregamento. O rótulo da coluna de tensão de ruptura — *peneirado* ou *integral* — segue o que consta em cada figura do original; a percentagem da carga de ruptura refere-se sempre ao valor de ruptura tabulado. As curvas de fluência foram reconstituídas exatamente a partir dos coeficientes $1/E$ e $F(k)$ tabulados, na forma $\varepsilon = 1/E + F(k)\,\ln(t+1)$, em escala semilogarítmica como no original. Ao final de cada ficha registra-se o envelhecimento de D_0 e D_1 segundo o Capítulo 7.

6.1 Dosagem 140.6.1 — Barragem de Itumbiara

FIGURA 3 DO ORIGINAL

Dosagem 140.6.1

Barragem de Itumbiara · corpo de prova Ø 25 × 50 cm · dosagem estudada em Berkeley

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Itumbiara
Agregado graúdo	Basalto
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Paranaíba)
Cimento	G (CP 250)

Dados de composição

Material	kg/m³
Água	108
Cimento	135
Areia natural	551
Brita 19 mm	208
Brita 38 mm	346
Brita 76 mm	462
Brita 152 mm	693
Fator a/c	0,800
Aditivo incorporador de ar	0,06 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

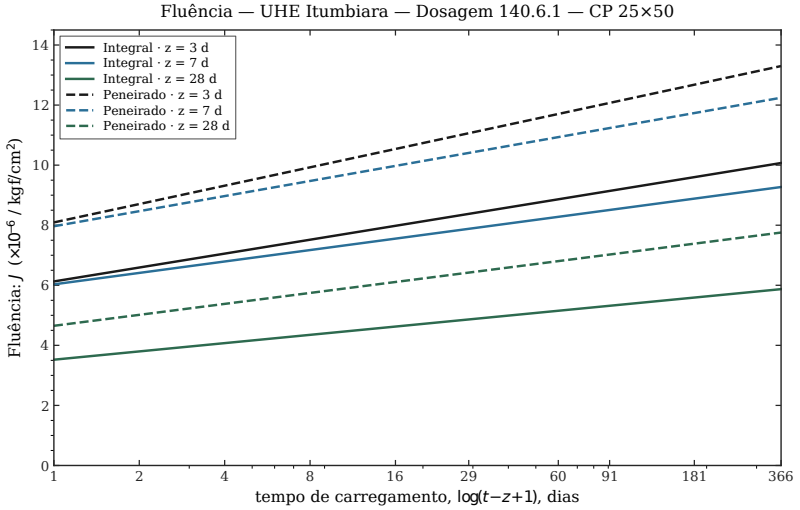
Concreto peneirado — exclusão da brita 152–76 mm · pasta 19,9 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	12,7	8,093	0,882
7	24,6	7,965	0,725
28	45,0	4,651	0,526

Concreto integral · pasta 15,1 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	12,7	6,128	0,668
7	24,6	6,031	0,549
28	45,0	3,522	0,398

No original consta “diâmetro máximo”; adota-se Dmáx (dimensão máxima característica). A numeração de laboratório passou depois a E-xxxx (“E” de experimental — laboratório de Goiânia). Em MPa: multiplicar $1/E$ e $F(k)$ por 10,197 (fator exato) ou por 10 (como no banco COPPE 2006, sob o rótulo 140,6,3, que coincide com o concreto integral desta ficha).

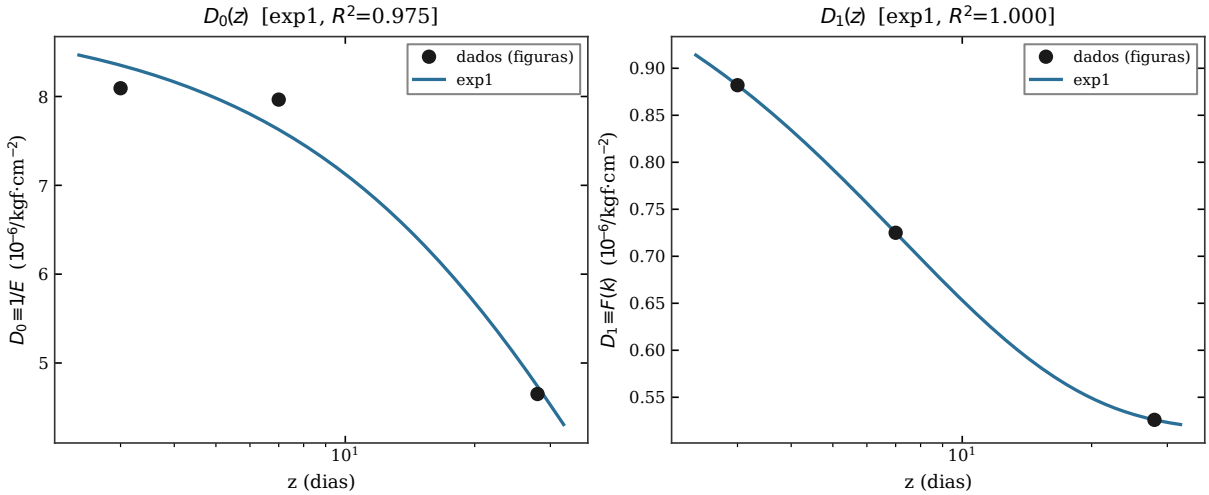


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_3, ε_7, ε_{28} (peneirado e integral).

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

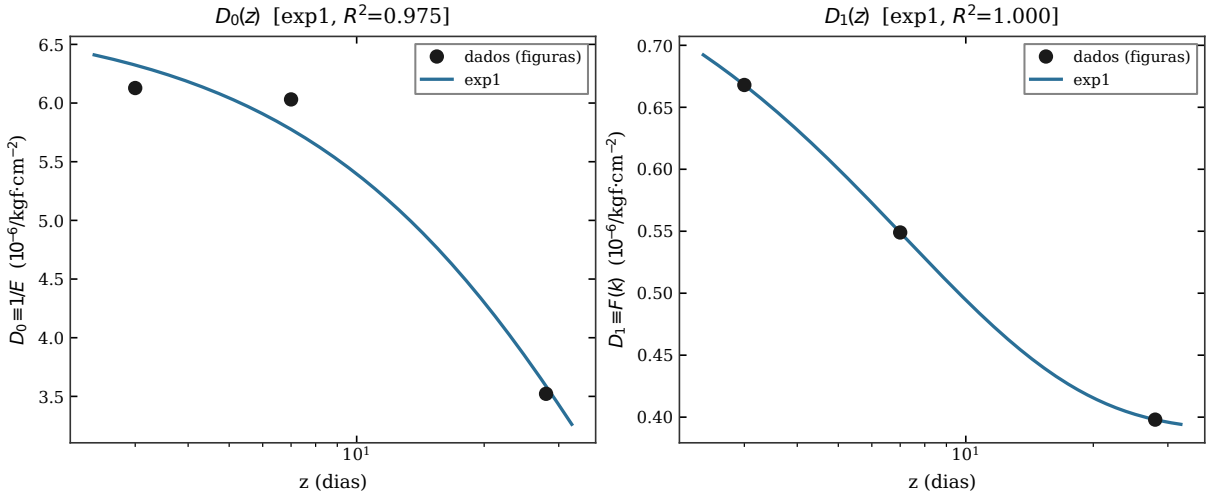
Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
peneirado	D_0	$D_0(z) = 8,94\,\mathrm{e}^{-z/44,1}$	0,975	
peneirado	D_1	$D_1(z) = 0,5148 + 0,558\,\mathrm{e}^{-z/7,172}$	1,000	
integral	D_0	$D_0(z) = 6,769\,\mathrm{e}^{-z/44,11}$	0,975	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,3894 + 0,4231\,\mathrm{e}^{-z/7,179}$	1,000	

Figura 3 — 140.6.1 peneirado



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — 140.6.1 peneirado.

Figura 3 — 140.6.1 integral



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — 140.6.1 integral.

6.2 Dosagens 120.6.3 e 140.6.3 — Barragem de Itumbiara

FIGURA 4 DO ORIGINAL

Dosagem 120.6.3/ITB 6042 e 140.6.3/ITB 6822

Barragem de Itumbiara · corpo de prova Ø 45 × 90 cm · concreto integral · idades de carregamento de 930 e 750 dias

Duas dosagens na mesma ficha, com procedência comum; cada uma foi carregada em uma única idade, avançada (930 e 750 dias).

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Itumbiara
Agregado graúdo	Basalto
Dmáx	152 mm
Cimento	P, G, R e C (CP 250)
Agregado miúdo	Areia natural (rio Paranaíba); areia artificial (basalto)
Pozolana	Fly-ash (Jorge Lacerda – SC)

Dados de composição

kg/m³	120.6.3	140.6.3
Água	110	100
Cimento	92	112
Pozolana	41	20
Areia natural	417	394
Areia artificial	152	143
Brita 19 mm	211	262
Brita 38 mm	361	382
Brita 76 mm	468	477
Brita 152 mm	701	692
Fator a/c_{eq}	0,719	0,707
Ar incorporado	0,20 %	0,19 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

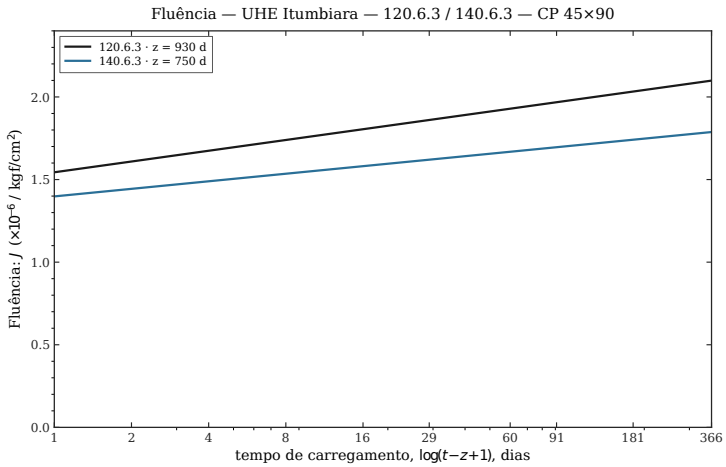
Concreto integral

Dosagem	Pasta %	Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
120.6.3	15,9	930	77,6	174	45	1,544	0,094
140.6.3	14,5	750	76,7	281	27	1,398	0,066

Envelhecimento das funç

Concreto	Grandeza	Equaç
120.6.3	D_0	$D_0(z$
120.6.3	D_1	$D_1(z$
140.6.3	D_0	$D_0(z$
140.6.3	D_1	$D_1(z$

Uma única idade de carre
traçar.



Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_{930} (dosagem 120.6.3) e ε_{750} (dosagem 140.6.3).

6.3 Dosagem E-1484/ANG 103 — Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (C.N.A.A.A.)

FIGURA 5 DO ORIGINAL

Dosagem E-1484/ANG 103

Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (C.N.A.A.A.) · corpo de prova Ø 25 × 50 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	C.N.A.A.A.
Agregado graúdo	Gnaisse
Dmáx	27 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Mambucaba); areia artificial e pedrisco
Cimento	Tipo II (ASTM)

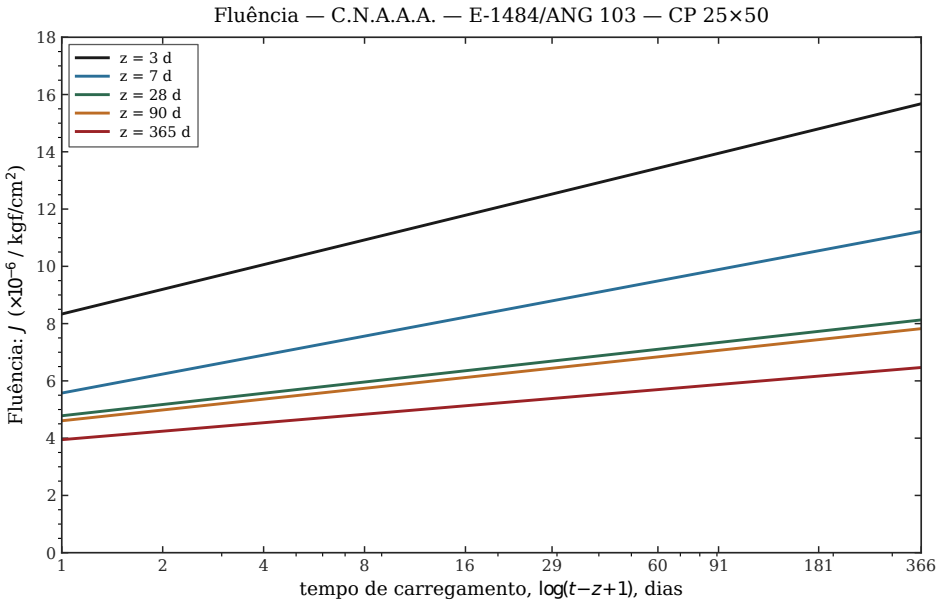
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	180
Cimento	400
Areia natural	473
Areia artificial	137
Pedrisco	69
Brita 20 mm	450
Brita 27 mm	674
Fator a/c	0,450
Aditivo incorporador de ar	0,02 %
Plastificante	0,20 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 30,7 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, integral kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	67,5	181	37	8,335	1,244
7	84,4	256	33	5,575	0,956
28	105,5	385	27	4,782	0,567
90	105,5	476	22	4,607	0,545
365	105,5	513	21	3,947	0,427

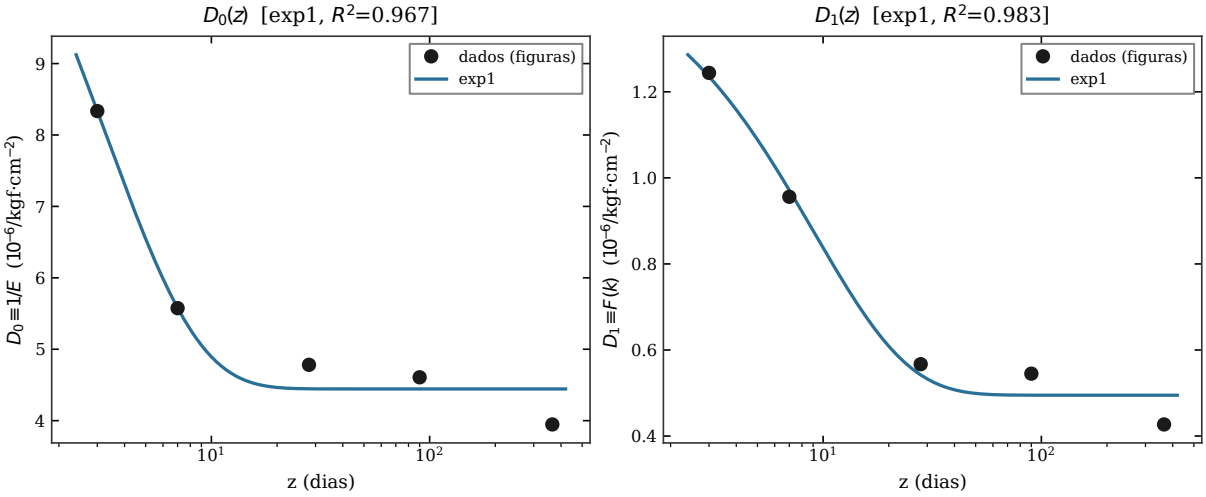


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_3, ε_7, ε_{28}, ε_{90}, ε_{365}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 4,444 + 9,804\,\mathrm{e}^{-z/3,246}$	0,967	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,4949 + 1,031\,\mathrm{e}^{-z/9,075}$	0,983	

Figura 5 — E-1484/ANG 103



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-1484/ANG 103.

6.4 Dosagem E-1757/ANG 152 — C.N.A.A.A.

FIGURA 6 DO ORIGINAL

Dosagem E-1757/ANG 152

C.N.A.A.A. · corpo de prova Ø 25 × 50 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	C.N.A.A.A.
Agregado graúdo	Gnaisse
Dmáx	27 mm
Cimento	M – Tipo II (ASTM)
Agregado miúdo	Areia natural (rio Mambucaba); areia artificial e pedrisco
Pozolana	Fly-ash (J. Lacerda – SC)

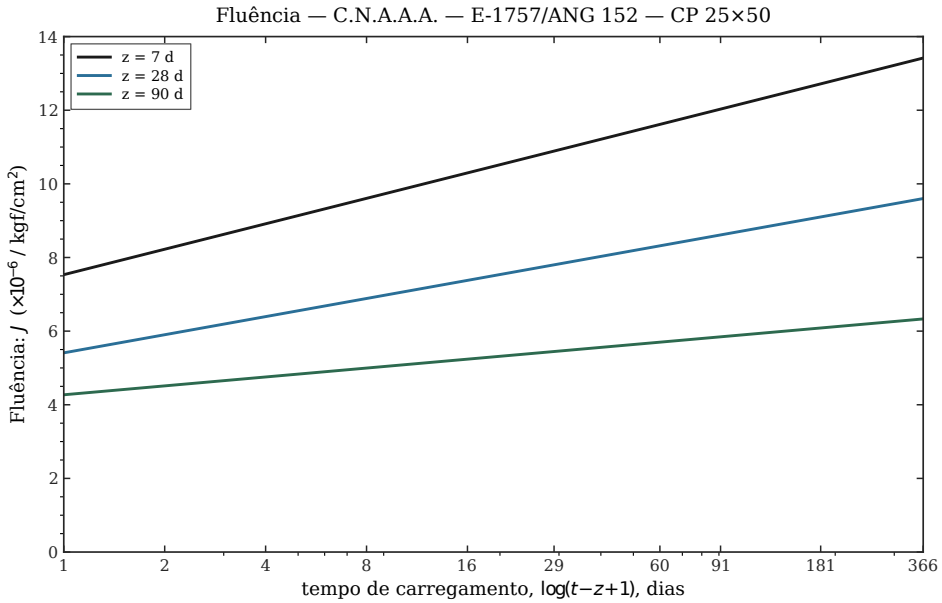
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	190
Cimento	338
Pozolana	57
Areia natural	462
Areia artificial	135
Pedrisco	67
Brita 20 mm	370
Brita 27 mm	687
Fator a/c_{eq}	0,449
Aditivo incorporador de ar	0,03 %
Plastificante	0,20 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 32,4 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, integral kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	67,5	170	40	7,533	0,997
28	105,5	289	37	5,410	0,710
90	105,5	395	27	4,271	0,349

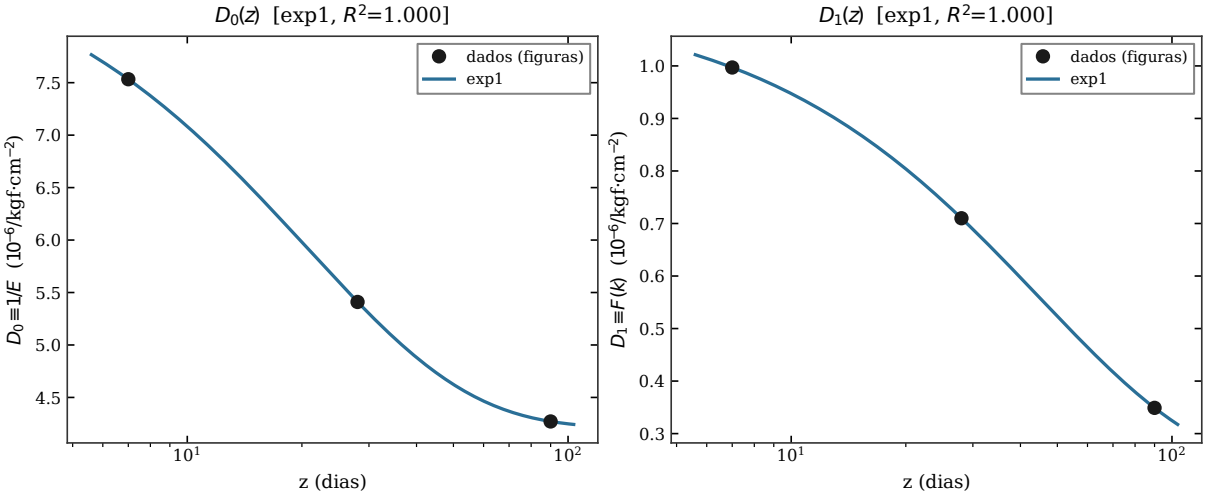


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 4,212 + 4,665\,\mathrm{e}^{-z/20,6}$	1,000	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,2272 + 0,8993\,\mathrm{e}^{-z/45,01}$	1,000	

Figura 6 — E-1757/ANG 152



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-1757/ANG 152.

6.5 Dosagem E-1941/ANG 260 — C.N.A.A.A.

FIGURA 7 DO ORIGINAL

Dosagem E-1941/ANG 260

C.N.A.A.A. · corpo de prova Ø 25 × 50 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	C.N.A.A.A.
Agregado graúdo	Gnaisse
Dmáx	27 mm
Cimento	A
Agregado miúdo	Areia natural (rio Mambucaba); areia artificial (gnaisse)

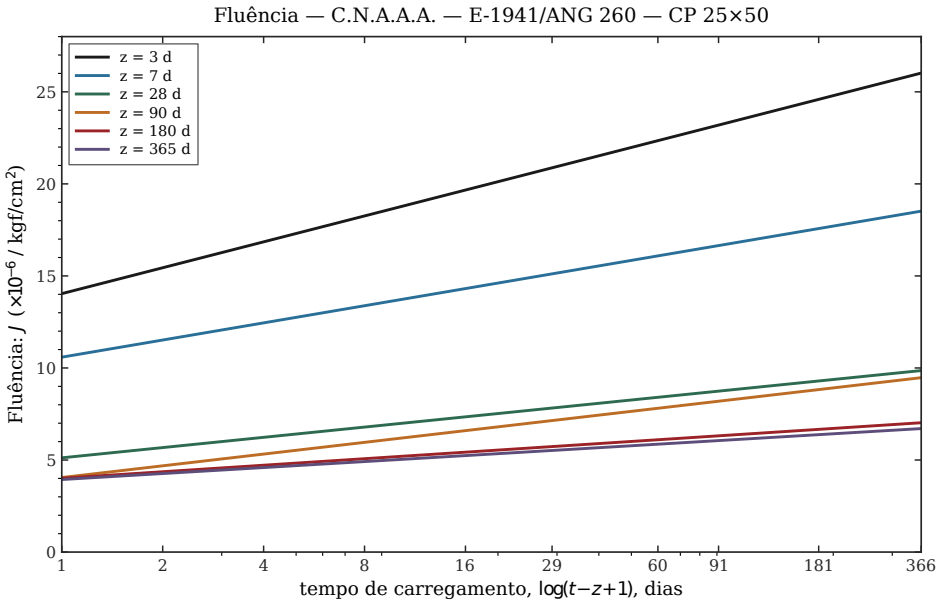
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	185
Cimento	336
Areia natural	632
Pedrisco	114
Brita 20 mm	381
Brita 27 mm	709
Fator a/c	0,551
Plastificante	0,25 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 29,2 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, integral kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	30,0	75	40	14,037	2,030
7	30,0	114	26	10,586	1,344
28	105,5	302	35	5,119	0,803
90	105,5	393	27	4,048	0,919
180	105,5	399	26	4,009	0,511
365	105,5	393	27	3,940	0,469

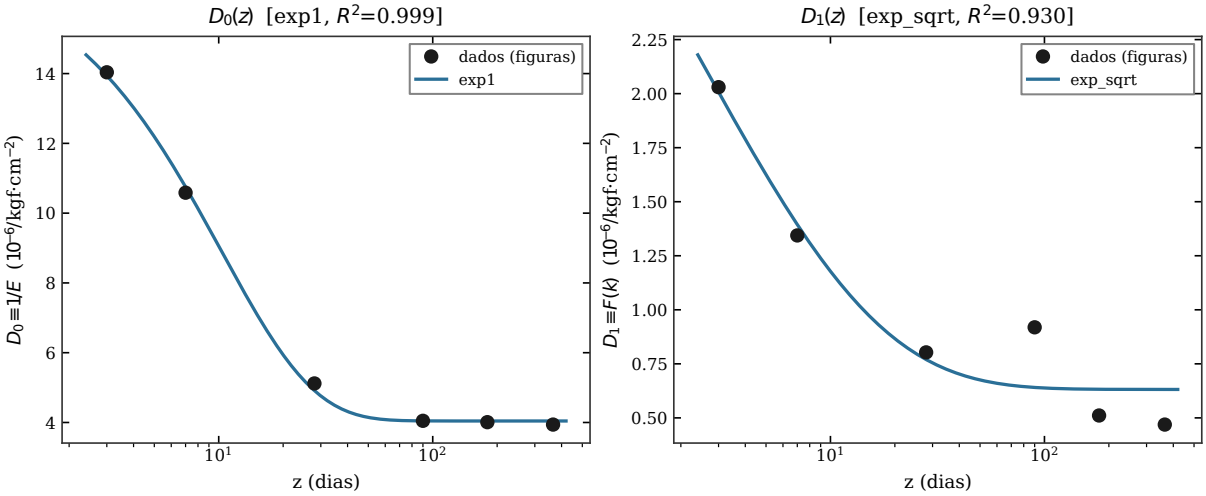


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_3, ε_7, ε_{28}, ε_{90}, ε_{180}, ε_{365}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 4,043 + 13,25\,e^{-z/10,29}$	0,999	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,6315 + 4,206\,e^{-\sqrt{z}/1,55}$	0,930	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)

Figura 7 — E-1941/ANG 260



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-1941/ANG 260.

6.6 Dosagem E-2302/TUC 335 — Barragem de Tucuruí

FIGURA 8 DO ORIGINAL

Dosagem E-2302/TUC 335

Barragem de Tucuruí · corpo de prova Ø 15 × 45 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Tucuruí
Agregado graúdo	Metagrauvaque
Dmáx	38 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Tocantins)
Cimento	Y e Z (CP 320)
Pozolana	Cimepar

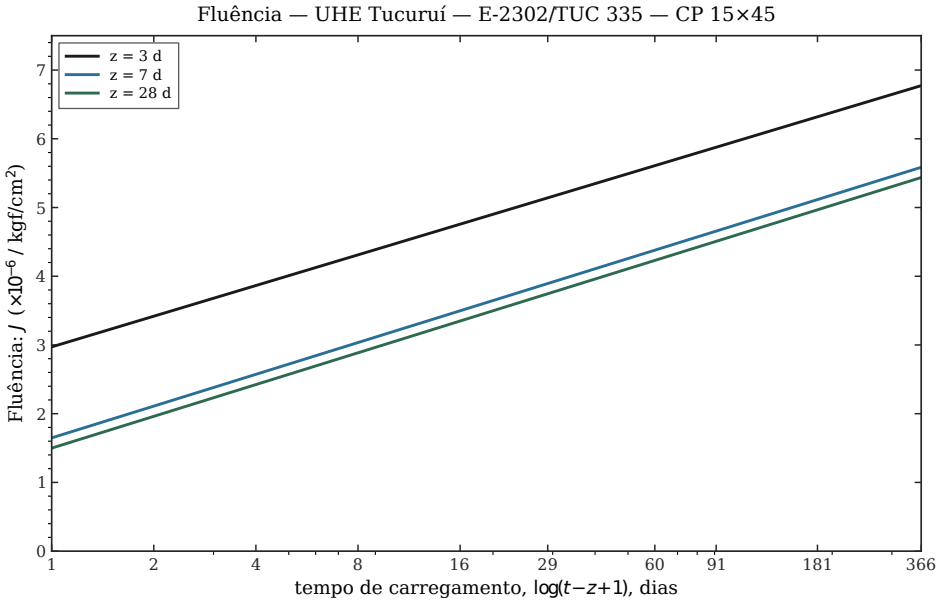
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	130
Cimento	345
Pozolana	54
Areia natural	643
Brita 19 mm	507
Brita 38 mm	760
Fator a/c_{eq}	0,320
Aditivo incorporador de ar	0,03 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 26,0 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, integral kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	122,5	299	41	2,972	0,644
7	148,1	369	40	1,648	0,667
28	148,1	466	32	1,499	0,667

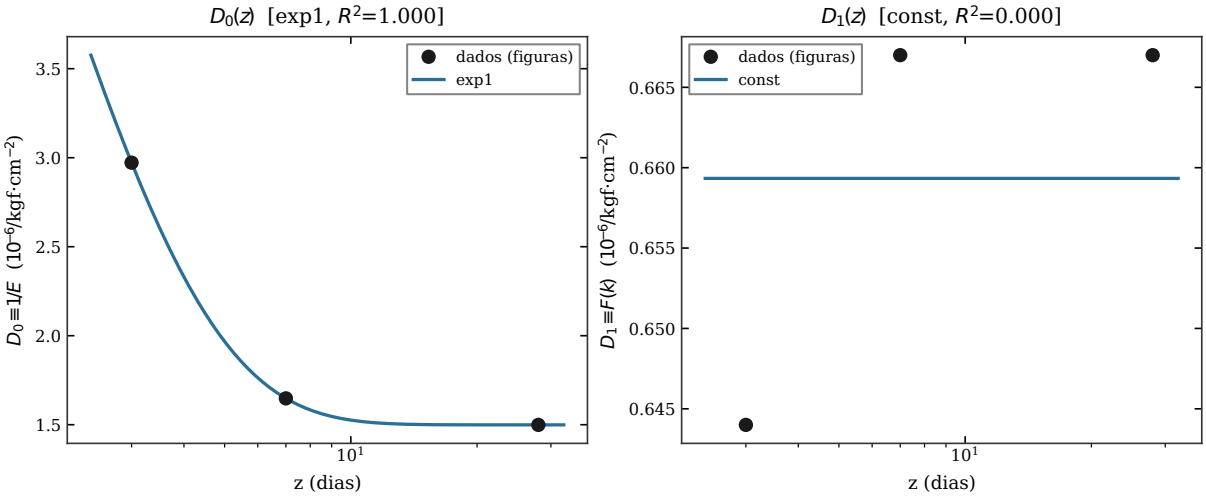


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_3, ε_7, ε_{28}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 1{,}499 + 8{,}212\,\mathrm{e}^{-z/1{,}746}$	1,000	
integral	D_1	$D_1(z) = 0{,}6593$	—	dado não decrescente: constante

Figura 8 — E-2302/TUC 335



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2302/TUC 335.

6.7 Dosagem E-2039/TUC 322 — Barragem de Tucuruí

FIGURA 9 DO ORIGINAL

Dosagem E-2039/TUC 322

Barragem de Tucuruí · corpo de prova Ø 25 × 50 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Tucuruí
Agregado graúdo	Metagrauvaque
Dmáx	76 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Tocantins)
Cimento	Z (CP 320)
Pozolana	Jupiá

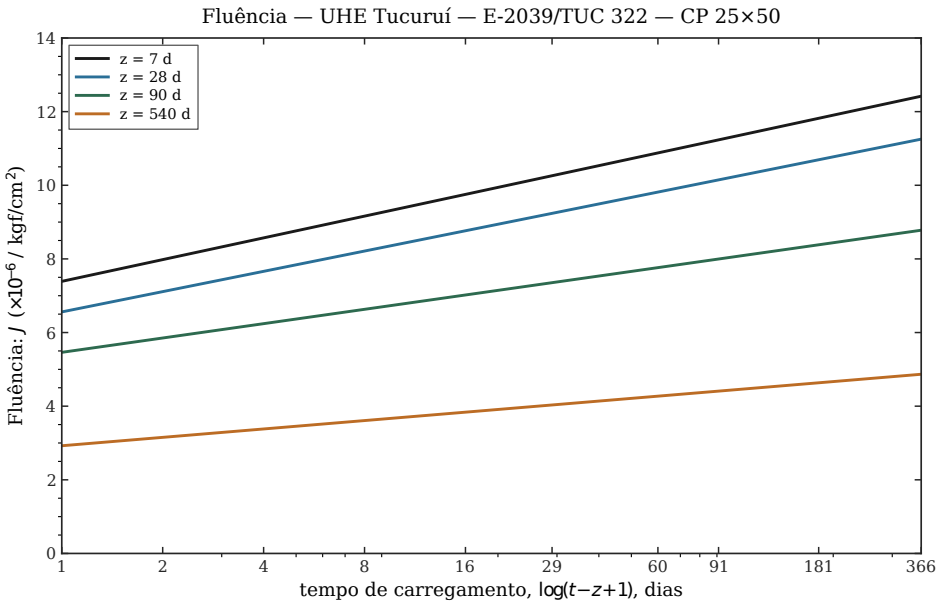
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	100
Cimento	94
Pozolana	13
Areia natural	799
Brita 19 mm	282
Brita 38 mm	494
Brita 76 mm	643
Fator a/c_{eq}	0,900
Aditivo incorporador de ar	0,13 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 13,5 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Ruptura, integral kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	24,6	57	58	42	7,390	0,852
28	35,2	89	91	39	6,560	0,795
90	35,2	95	134	26	5,462	0,562
540	35,2	97	169	21	2,925	0,329

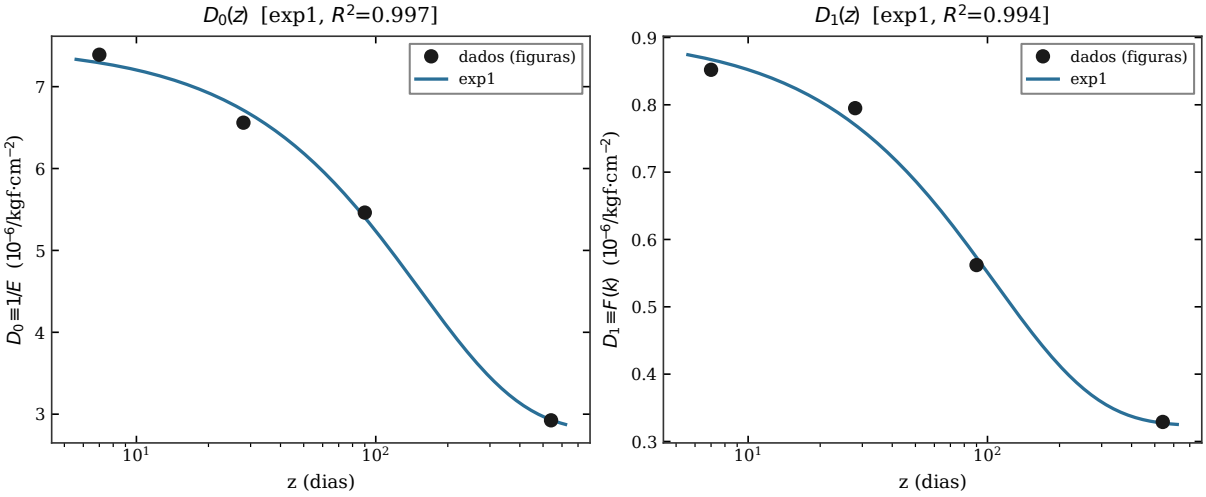


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}, ε_{540}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 2{,}795 + 4{,}708\,\mathrm{e}^{-z/152{,}3}$	0,997	
integral	D_1	$D_1(z) = 0{,}3236 + 0{,}5805\,\mathrm{e}^{-z/106{,}8}$	0,994	

Figura 9 — E-2039/TUC 322



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2039/TUC 322.

6.8 Dosagem E-963/TUC 192 — Barragem de Tucuruí

FIGURA 10 DO ORIGINAL

Dosagem E-963/TUC 192

Barragem de Tucuruí · corpo de prova Ø 25 × 50 cm · concreto com exclusão da brita 152–76 mm

Mesma dosagem da Figura 11 (E-963/TUC 192). Esta ficha (Fig. 10) traz o concreto peneirado — com exclusão da brita 152–76 mm; a Figura 11 traz o concreto integral.

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Tucuruí
Agregado graúdo	Metagrauvaque
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Tocantins)
Cimento	G e R (CP 250)

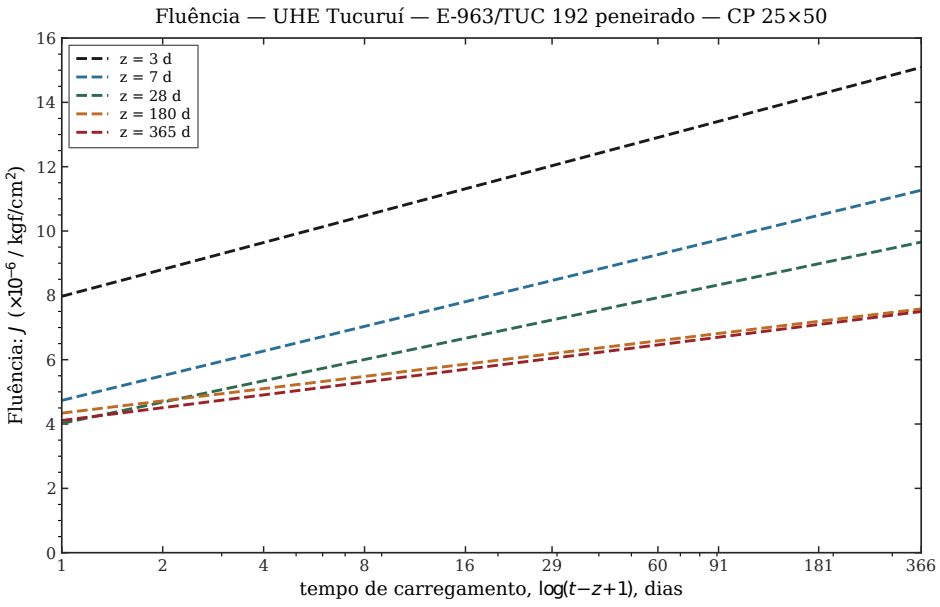
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	86
Cimento	120
Areia natural	568
Brita 19 mm	222
Brita 38 mm	342
Brita 76 mm	464
Brita 152 mm	694
Fator a/c	0,717
Aditivo incorporador de ar	0,07 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto peneirado · pasta 16,6 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	19,3	49	39	7,970	1,206
7	19,3	101	19	4,734	1,107
28	43,9	164	27	4,019	0,955
180	84,4	223	38	4,339	0,549
365	84,4	218	39	4,110	0,574

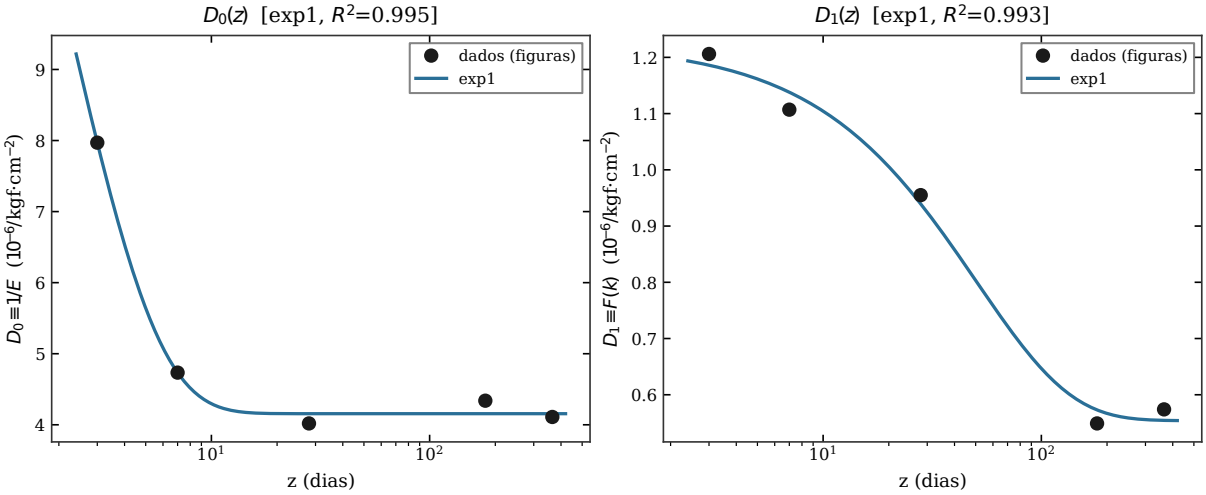


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_3, ε_7, ε_{28}, ε_{180}, ε_{365}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
peneirado	D_0	$D_0(z) = 4,156 + 15,7\,e^{-z/2,12}$	0,995	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
peneirado	D_1	$D_1(z) = 0,5539 + 0,6708\,e^{-z/50,54}$	0,993	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)

Figura 10 — E-963/TUC 192 peneirado



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-963/TUC 192 peneirado.

6.9 Dosagem E-963/TUC 192 — Barragem de Tucuruí

FIGURA 11 DO ORIGINAL

Dosagem E-963/TUC 192

Barragem de Tucuruí · corpo de prova Ø 25 × 50 cm · concreto integral

Mesma dosagem/composição da Figura 10; aqui o concreto integral (a coluna de tensão de ruptura permanece rotulada "concreto peneirado" no original).

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Tucuruí
Agregado graúdo	Metagrauvaque
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Tocantins)
Cimento	G e R (CP 250)

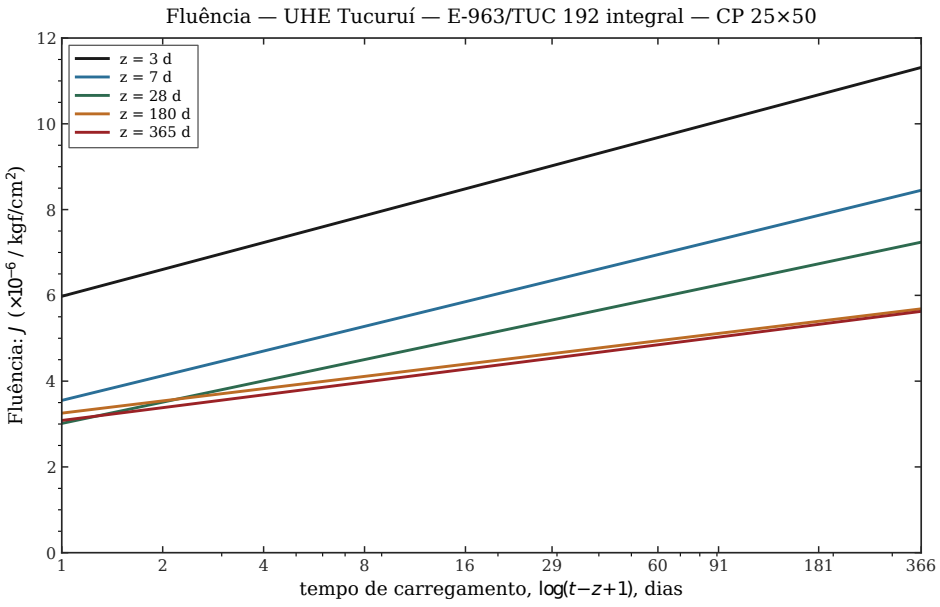
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	86
Cimento	120
Areia natural	568
Brita 19 mm	222
Brita 38 mm	342
Brita 76 mm	464
Brita 152 mm	694
Fator a/c	0,717
Aditivo incorporador de ar	0,07 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 12,4 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
3	19,3	49	39	5,978	0,904
7	19,3	101	19	3,551	0,830
28	43,9	164	27	3,014	0,716
180	84,4	223	38	3,254	0,412
365	84,4	218	39	3,083	0,431

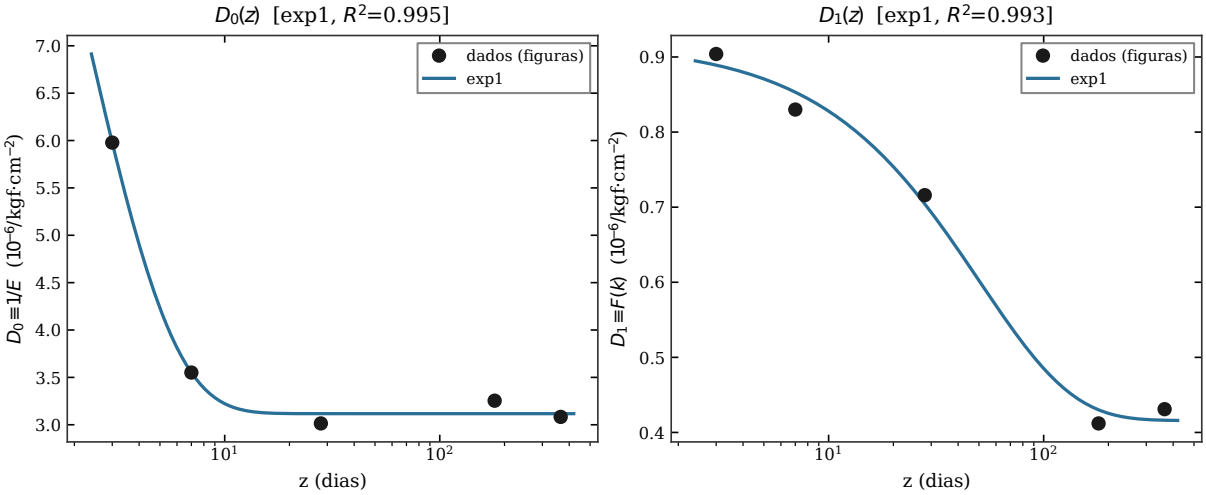


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_3, ε_7, ε_{28}, ε_{180}, ε_{365}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 3,117 + 11,77\,\mathrm{e}^{-z/2,121}$	0,995	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
integral	D_1	$D_1(z) = 0,4159 + 0,5023\,\mathrm{e}^{-z/50,49}$	0,993	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)

Figura 11 — E-963/TUC 192 integral



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-963/TUC 192 integral.

6.10 Dosagem E-2046/TUC 324 — Barragem de Tucuruí

FIGURA 12 DO ORIGINAL

Dosagem E-2046/TUC 324

Barragem de Tucuruí · corpo de prova Ø 45 × 90 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Tucuruí
Agregado graúdo	Metagrauvaque
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Tocantins)
Cimento	Z (CP 320)
Pozolana	Jupiá

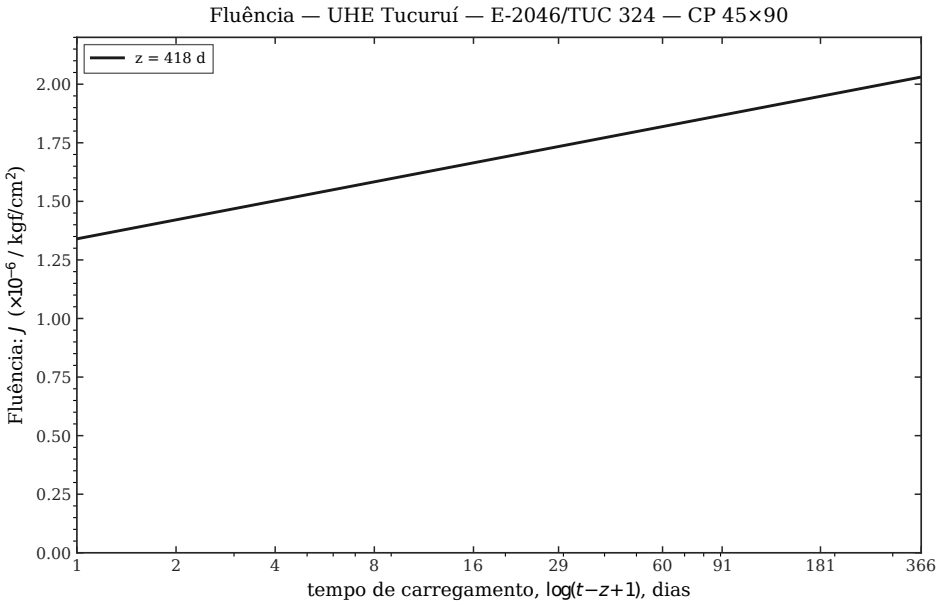
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	76
Cimento	84
Pozolana	23
Areia natural	578
Brita 19 mm	221
Brita 38 mm	342
Brita 76 mm	466
Brita 152 mm	692
Fator a/c_{eq}	0,678
Aditivo incorporador de ar	0,18 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 11,2 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
418	51,8	165	31	1,340	0,117



Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_{418}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 1,34$	1,000	uma idade: constante
integral	D_1	$D_1(z) = 0,117$	1,000	uma idade: constante

Uma única idade de carregamento: as funções são registradas como constantes; não há curva de envelhecimento a traçar.

6.11 Dosagem E-2300/TUC 333 — Barragem de Tucuruí

FIGURA 13 DO ORIGINAL

Dosagem E-2300/TUC 333

Barragem de Tucuruí · corpo de prova Ø 45 × 90 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Tucuruí
Agregado graúdo	Metagrauvaque
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (rio Tocantins)
Pozolana	Cimepar (João Pessoa – SE)
Cimento	Y e Z (CP 320)

Dados de composição

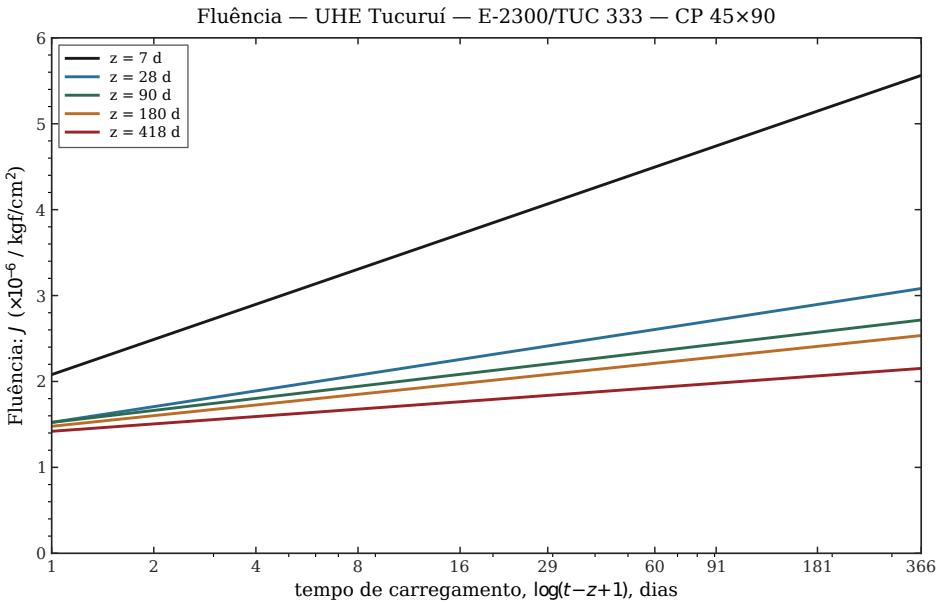
Material	kg/m³
Água	83
Cimento	84
Pozolana	25
Areia natural	638
Brita 19 mm	216
Brita 38 mm	332
Brita 76 mm	449
Brita 152 mm	667
Fator a/c_{eq}	0,740
Aditivo incorporador de ar	0,06 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 11,9 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	30,2	97	31	2,080	0,590
28	39,0	129	30	1,524	0,264
90	68,0	173	39	1,523	0,202
180	71,3	196	36	1,478	0,179
418	51,8	165	31	1,420	0,124

No original a pozolana Cimepar aparece com "(João Pessoa – SE)"; João Pessoa é da Paraíba — conferir a procedência no documento-fonte.

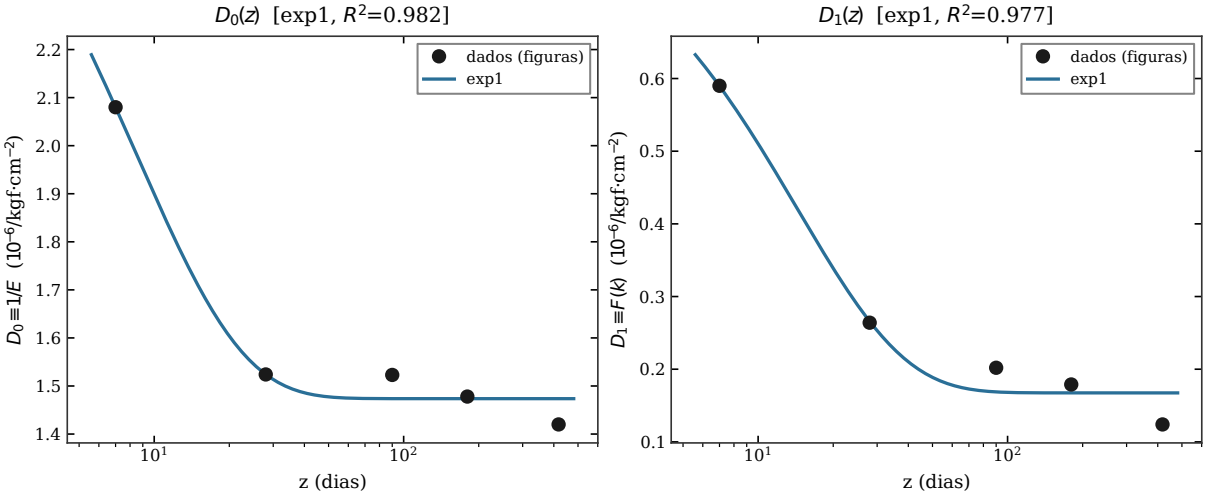


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}, ε_{180}, ε_{418}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 1,474 + 1,388\,\mathrm{e}^{-z/8,45}$	0,982	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,1674 + 0,6863\,\mathrm{e}^{-z/14,42}$	0,977	

Figura 13 — E-2300/TUC 333



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2300/TUC 333.

6.12 Dosagem E-2299/BM 126 — Barragem de Balsas Mineiro

FIGURA 14 DO ORIGINAL

Dosagem E-2299/BM 126

Barragem de Balsas Mineiro · corpo de prova Ø 25 × 50 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Balsas Mineiro
Agregado graúdo	Cascalho (quartzo)
Dmáx	76 mm
Agregado miúdo	Areia natural — jazida JC-02
Cimento	G (CP 320)

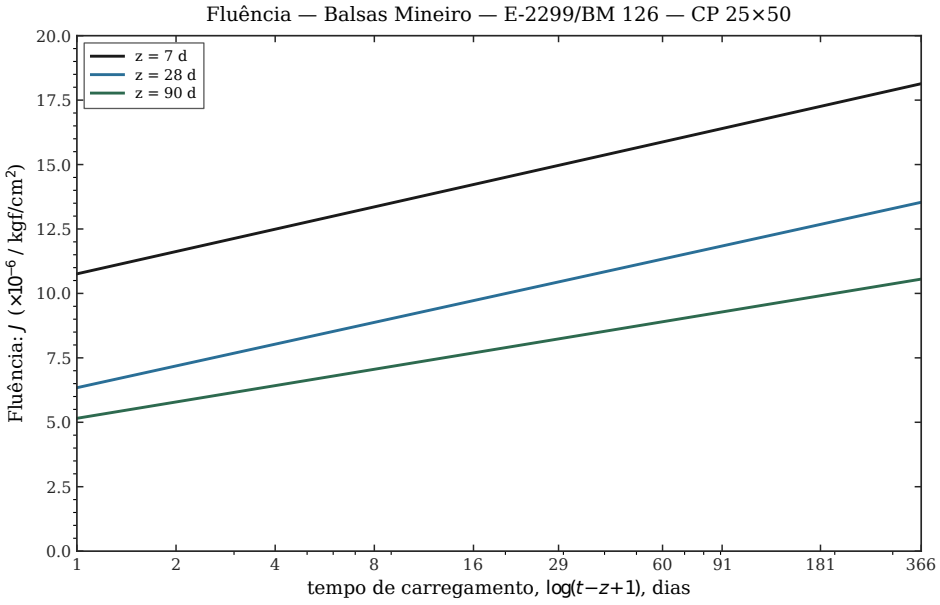
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	88
Cimento	107
Areia natural	517
Brita 19 mm	428
Brita 38 mm	539
Brita 76 mm	564
Fator a/c	0,819
Aditivo incorporador de ar	0,11 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 12,2 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Ruptura, integral kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	15,8	53	33	48	10,759	1,250
28	15,8	70	59	27	6,341	1,219
90	31,6	104	75	42	5,154	0,915

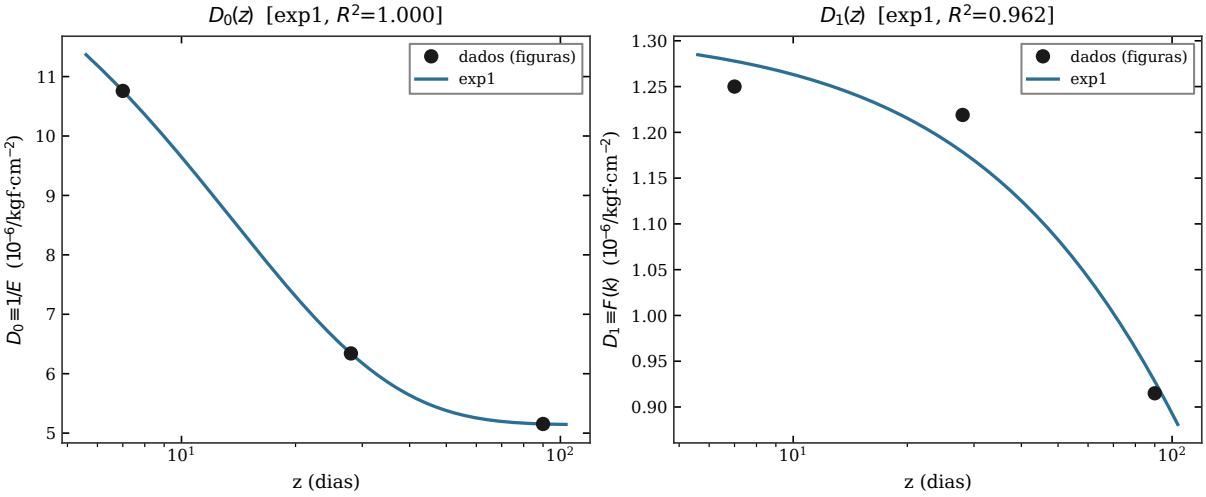


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 5{,}141 + 9{,}398\,\mathrm{e}^{-z/13{,}6}$	1,000	
integral	D_1	$D_1(z) = 1{,}313\,\mathrm{e}^{-z/259{,}4}$	0,962	

Figura 14 — E-2299/BM 126



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2299/BM 126.

6.13 Dosagem E-2363/IG 03 (76A) — Barragem de Ilha Grande

FIGURA 15 DO ORIGINAL

Dosagem E-2363/IG 03 (76A)

Barragem de Ilha Grande · corpo de prova Ø 25 × 50 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Ilha Grande
Agregado graúdo	Basalto
Dmáx	76 mm
Agregado miúdo	Areia natural (Guaíra)
Cimento	I (CP 320)
Pozolana	Fly-ash (Jorge Lacerda – SC)

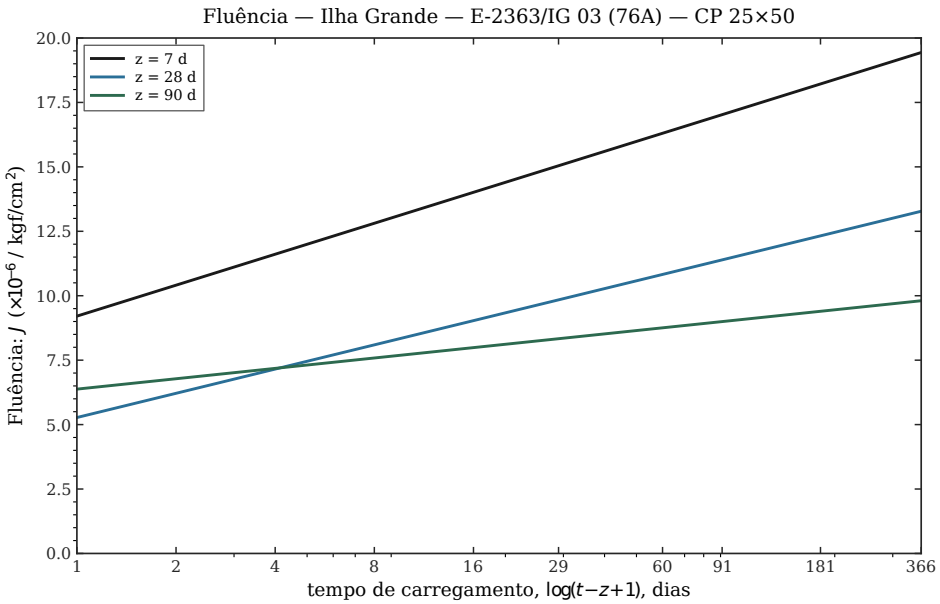
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	105
Cimento	95
Pozolana	10
Areia natural	686
Brita 19 mm	529
Brita 38 mm	436
Brita 76 mm	650
Fator a/c_{eq}	0,955
Aditivo incorporador de ar	0,15 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 14,0 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	17,6	44	40	9,208	1,733
28	17,6	69	26	5,274	1,356
90	31,6	85	37	6,376	0,581

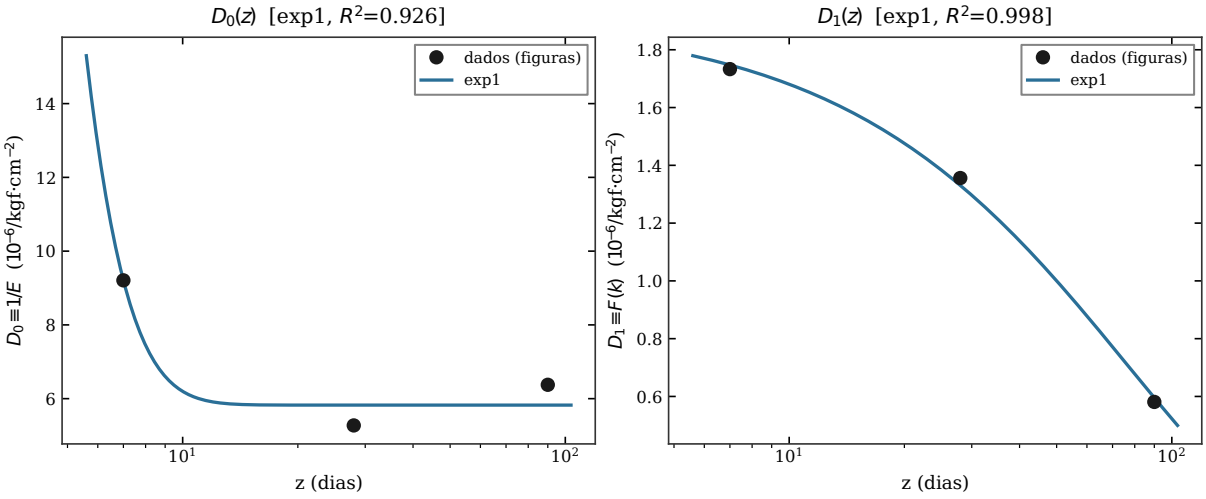


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 5{,}825 + 582{,}7\,\mathrm{e}^{-z/1{,}36}$	0,926	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
integral	D_1	$D_1(z) = 1{,}914\,\mathrm{e}^{-z/77{,}08}$	0,998	

Figura 15 — E-2363/IG 03



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2363/IG 03.

6.14 Dosagem E-2379/IG 05 (152 B') — Barragem de Ilha Grande

FIGURA 16 DO ORIGINAL

Dosagem E-2379/IG 05 (152 B')

Barragem de Ilha Grande · corpo de prova Ø 45 × 90 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Ilha Grande
Agregado graúdo	Basalto
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (Guaíra)
Cimento	I (CP 320)
Pozolana	Fly-ash (Jorge Lacerda – SC)

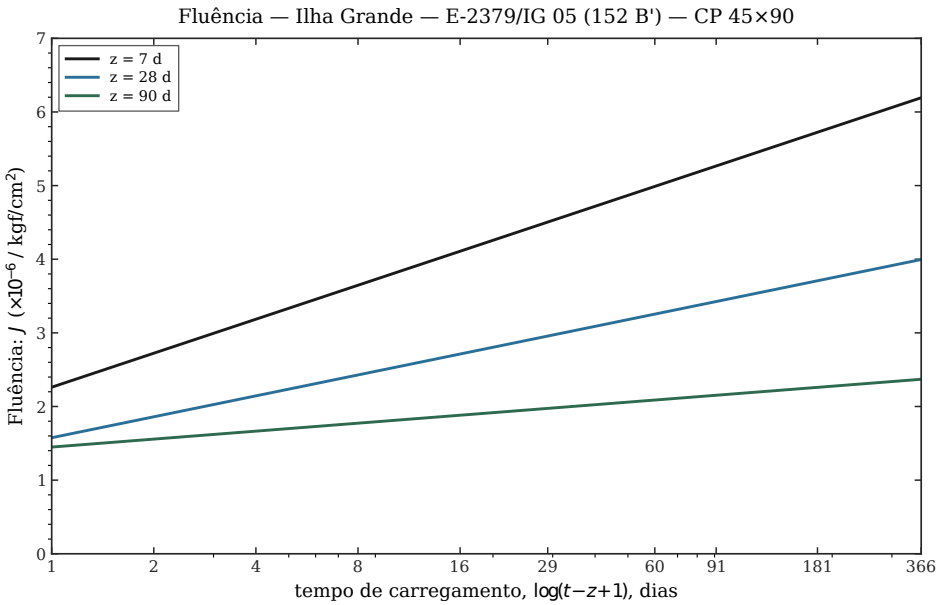
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	90
Cimento	114
Pozolana	20
Areia natural	558
Brita 19 mm	381
Brita 38 mm	315
Brita 76 mm	454
Brita 152 mm	617
Fator a/c_{eq}	0,670
Aditivo incorporador de ar	0,28 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 13,6 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	17,3	59	29	2,262	0,666
28	33,1	103	32	1,576	0,410
90	52,6	160	33	1,449	0,156

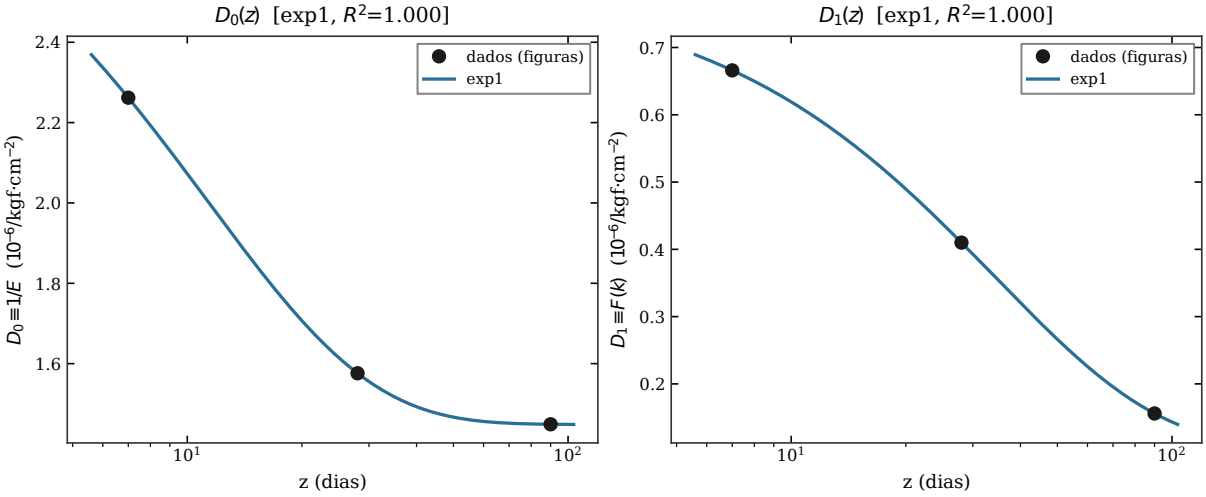


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 1,448 + 1,509\,e^{-z/11,33}$	1,000	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,1059 + 0,6866\,e^{-z/34,38}$	1,000	

Figura 16 — E-2379/IG 05



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2379/IG 05.

6.15 Dosagem E-2380/IG 06 (152 A') — Barragem de Ilha Grande

FIGURA 17 DO ORIGINAL

Dosagem E-2380/IG 06 (152 A')

Barragem de Ilha Grande · corpo de prova Ø 45 × 90 cm

Procedência e tipos de materiais

Obra	Barragem de Ilha Grande
Agregado graúdo	Basalto
Dmáx	152 mm
Agregado miúdo	Areia natural (Guaíra)
Cimento	I (CP 320)
Pozolana	Fly-ash (Jorge Lacerda – SC)

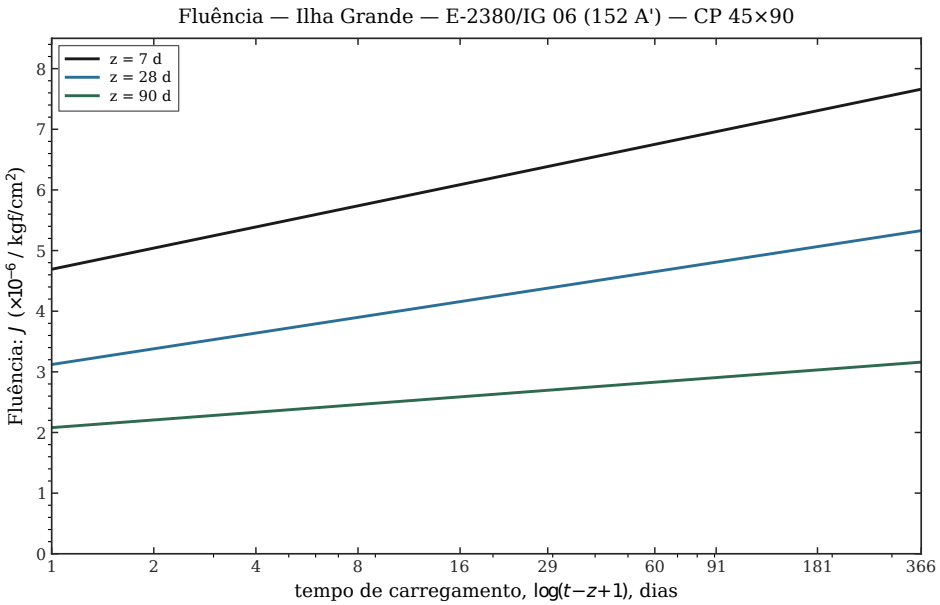
Dados de composição

Material	kg/m³
Água	90
Cimento	86
Pozolana	10
Areia natural	540
Brita 19 mm	396
Brita 38 mm	324
Brita 76 mm	460
Brita 152 mm	636
Fator a/c_{eq}	0,900
Aditivo incorporador de ar	0,36 %

Equações de fluência — $\varepsilon = 1/E + F(k)\ \ln(t+1)$

Concreto integral · pasta 12,2 %

Idade d	Tensão aplicada kgf/cm²	Ruptura, peneirado kgf/cm²	Carga de ruptura %	$1/E$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$	$F(k)$ $10^{-6}/(\text{kgf/cm}^2)$
7	15,0	46	33	4,692	0,503
28	26,9	82	33	3,121	0,374
90	40,2	132	30	2,080	0,183

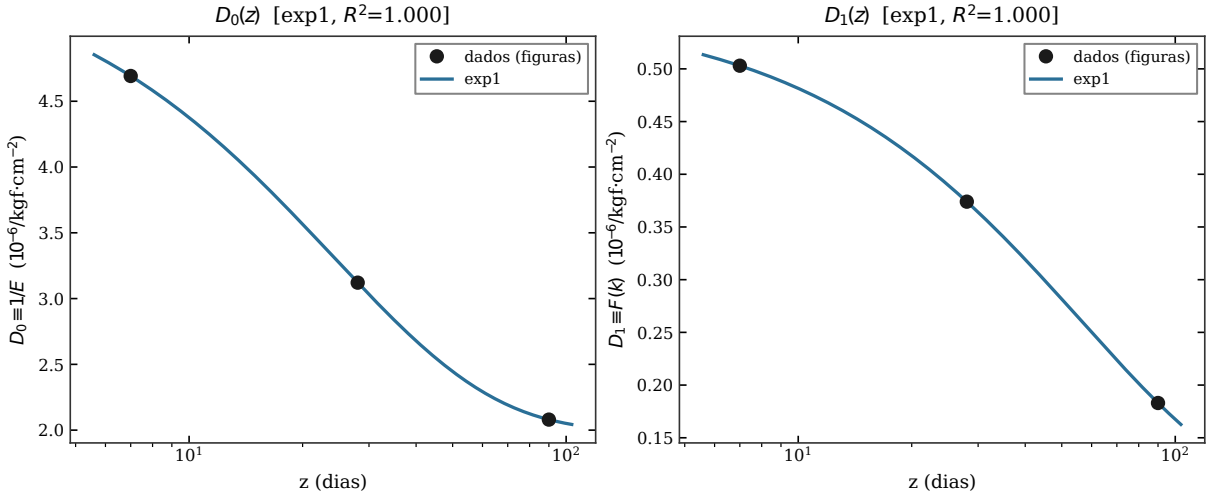


Curvas de fluência reconstituídas (modelo USBR) — curvas do original: ε_7, ε_{28}, ε_{90}.

Envelhecimento das funções $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$

Concreto	Grandeza	Equação de envelhecimento	R^2	Observação
integral	D_0	$D_0(z) = 1,994 + 3,609\,\mathrm{e}^{-z/24{,}05}$	1,000	
integral	D_1	$D_1(z) = 0,08721 + 0,4706\,\mathrm{e}^{-z/56{,}54}$	1,000	

Figura 17 — E-2380/IG 06



Pontos: valores de $1/E$ e $F(k)$ da ficha; linha: ajuste monótono — E-2380/IG 06.

Parte III

Envelhecimento das funções de fluência

7 | Envelhecimento de $1/E$ e $F(k)$

A página 37 do original (Tabela 1) ajustava $1/E(z)$ e $F(k)(z)$, em função da idade de carregamento z, com formas da época — $t^2/(at^2+bt+c)$, $a+b/t$, polinômios em t, $a\,e^{b/t}$. Essas formas não são reutilizadas nesta edição, por três razões: não garantem monotonicidade, extrapolam mal para idades avançadas e não se prestam a uso direto em modelos reológicos com envelhecimento.

Para cada dosagem das Figuras 3 a 17 definem-se

$$D_0(z) \equiv \frac{1}{E}(z), \qquad D_1(z) \equiv F(k)(z), \tag{7.1}$$

e ajusta-se a cada uma delas uma função de um só termo, escolhida entre

$$f(z) = a + b\,\mathrm{e}^{-z/c} \qquad \text{ou} \qquad f(z) = a + b\,\mathrm{e}^{-\sqrt{z}/c}, \tag{7.2}$$

conforme o coeficiente de determinação R^2; a forma em $\sqrt{z}$ só é adotada quando melhora o ajuste. Impõem-se $a \geq 0$, $b \geq 0$ e $c > 0$, de modo que a curva resultante seja monótona decrescente mesmo quando o dado experimental não o é — caso típico de $1/E$ na dosagem IG 03. As unidades são as do original, $10^{-6}/(\mathrm{kgf\,cm^{-2}})$. Quando a dosagem foi ensaiada em uma única idade, a função é registrada como constante.

O parâmetro a é o valor assintótico da função para concreto maduro; b mede a parcela de envelhecimento ainda por ocorrer na idade zero; c é o tempo característico, em dias (ou em $\sqrt{\text{dias}}$ na segunda forma). A Tabela 7.1 consolida os ajustes; as curvas correspondentes, com os pontos experimentais, estão ao final de cada ficha do Capítulo 6.

Tabela 7.1 – Equações de envelhecimento de $D_0(z) \equiv 1/E(z)$ e $D_1(z) \equiv F(k)(z)$ para todas as dosagens (substitui a Tabela 1, pág. 37, do original). Unidades: $10^{-6}/(\mathrm{kgf\,cm^{-2}})$; z em dias.

Dosagem	Fig.	Grandeza	Equação	R^2	Observação
Itumbiara					
140.6.1 peneirado	3	D_0	$D_0(z) = 8{,}94\,\mathrm{e}^{-z/44{,}1}$	0,975	
		D_1	$D_1(z) = 0{,}5148 + 0{,}558\,\mathrm{e}^{-z/7{,}172}$	1,000	
140.6.1 integral	3	D_0	$D_0(z) = 6{,}769\,\mathrm{e}^{-z/44{,}11}$	0,975	
		D_1	$D_1(z) = 0{,}3894 + 0{,}4231\,\mathrm{e}^{-z/7{,}179}$	1,000	
120.6.3/ITB 6042	4	D_0	$D_0(z) = 1{,}544$	1,000	uma idade: constante
		D_1	$D_1(z) = 0{,}094$	1,000	uma idade: constante
140.6.3/ITB 6822	4	D_0	$D_0(z) = 1{,}398$	1,000	uma idade: constante
		D_1	$D_1(z) = 0{,}066$	1,000	uma idade: constante
Angra (C.N.A.A.A.)					
E-1484/ANG 103	5	D_0	$D_0(z) = 4{,}444 + 9{,}804\,\mathrm{e}^{-z/3{,}246}$	0,967	
		D_1	$D_1(z) = 0{,}4949 + 1{,}031\,\mathrm{e}^{-z/9{,}075}$	0,983	
E-1757/ANG 152	6	D_0	$D_0(z) = 4{,}212 + 4{,}665\,\mathrm{e}^{-z/20{,}6}$	1,000	
		D_1	$D_1(z) = 0{,}2272 + 0{,}8993\,\mathrm{e}^{-z/45{,}01}$	1,000	
E-1941/ANG 260	7	D_0	$D_0(z) = 4{,}043 + 13{,}25\,\mathrm{e}^{-z/10{,}29}$	0,999	

continua

Dosagem	Fig.	Grandeza	Equação	R^2	Observação
		D_1	$D_1(z) = 0,6315 + 4,206\,e^{-\sqrt{z}/1,55}$	0,930	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
Tucuruí					
E-2302/TUC 335	8	D_0	$D_0(z) = 1,499 + 8,212\,e^{-z/1,746}$	1,000	
		D_1	$D_1(z) = 0,6593$	—	dado não decrescente: constante
E-2039/TUC 322	9	D_0	$D_0(z) = 2,795 + 4,708\,e^{-z/152,3}$	0,997	
		D_1	$D_1(z) = 0,3236 + 0,5805\,e^{-z/106,8}$	0,994	
E-963/TUC 192 peneirado	10	D_0	$D_0(z) = 4,156 + 15,7\,e^{-z/2,12}$	0,995	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
		D_1	$D_1(z) = 0,5539 + 0,6708\,e^{-z/50,54}$	0,993	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
E-963/TUC 192 integral	11	D_0	$D_0(z) = 3,117 + 11,77\,e^{-z/2,121}$	0,995	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
		D_1	$D_1(z) = 0,4159 + 0,5023\,e^{-z/50,49}$	0,993	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
E-2046/TUC 324	12	D_0	$D_0(z) = 1,34$	1,000	uma idade: constante
		D_1	$D_1(z) = 0,117$	1,000	uma idade: constante
E-2300/TUC 333	13	D_0	$D_0(z) = 1,474 + 1,388\,e^{-z/8,45}$	0,982	
		D_1	$D_1(z) = 0,1674 + 0,6863\,e^{-z/14,42}$	0,977	
Balsas Mineiro					
E-2299/BM 126	14	D_0	$D_0(z) = 5,141 + 9,398\,e^{-z/13,6}$	1,000	
		D_1	$D_1(z) = 1,313\,e^{-z/259,4}$	0,962	
Ilha Grande					
E-2363/IG 03	15	D_0	$D_0(z) = 5,825 + 582,7\,e^{-z/1,36}$	0,926	dado não monótono; curva forçada monótona ($b \geq 0$)
		D_1	$D_1(z) = 1,914\,e^{-z/77,08}$	0,998	
E-2379/IG 05	16	D_0	$D_0(z) = 1,448 + 1,509\,e^{-z/11,33}$	1,000	
		D_1	$D_1(z) = 0,1059 + 0,6866\,e^{-z/34,38}$	1,000	
E-2380/IG 06	17	D_0	$D_0(z) = 1,994 + 3,609\,e^{-z/24,05}$	1,000	
		D_1	$D_1(z) = 0,08721 + 0,4706\,e^{-z/56,54}$	1,000	

7.1 Leitura dos resultados

Os ajustes de D_0 atingem $R^2 \geq 0,97$ em doze das quinze dosagens com mais de uma idade; os dois casos abaixo desse patamar (E-1484/ANG 103 e E-2363/IG 03) correspondem a dados não monótonos, em que a restrição $b \geq 0$ força a curva a passar entre os pontos. Os ajustes de D_1 têm qualidade equivalente, com exceção de E-1941/ANG 260, cujo $F(k)$ oscila entre 90 e 180 dias e só admite a forma em $\sqrt{z}$ com $R^2 = 0,93$, e de E-2302/TUC 335, cujo $F(k)$ é praticamente constante nas três idades e foi registrado como tal.

Os tempos característicos c de D_0 separam duas famílias. Concretos de dosagem rica e Dmáx pequeno (Angra, 27 mm; Tucuruí TUC 335, 38 mm) envelhecem rápido, com c entre 2 e 20 dias; concretos massa de Dmáx 152 mm com pozolana (Tucuruí TUC 322, TUC 333; Ilha Grande) envelhecem mais lentamente, com c entre 10 e 150 dias. Os tempos característicos de D_1 são sistematicamente maiores que os de D_0 para a mesma dosagem, o que reproduz a observação

clássica de que o módulo de deformação estabiliza antes da fluência.

As dosagens carregadas em uma única idade avançada (120.6.3 e 140.6.3 aos 930 e 750 dias; TUC 324 aos 418 dias) fornecem apenas o valor assintótico, útil como referência de concreto maduro da mesma obra.

Parte IV

Apêndices

A | Bibliografia do relatório original

1. Carlson, Roy W. *Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors*. ASTM Proceedings of the Forty-first Annual Meeting of the American Society for Testing Materials, June–July 1938.
2. Pacelli, W. A.; Fontoura, J. T. F.; Bittencourt, R. M.; Guerra, E. A. *Um Método de Dosagens para Concreto Massa*. IBRACON — Instituto Brasileiro do Concreto, Colóquio sobre Concreto Massa. São Paulo, 06 a 10 de julho de 1981.
3. Carlson, Roy W.; Raphael, J. M. *Measurement of Structural Action in Dams*. Third Edition, August 1965.
4. Carlson, Roy W. *Manual for the Use of Strain Meters and Other Instruments for Embedment in Concrete Structures*. Fourth Edition, 1975.
5. Pirtz, David; Polivka, M.; Best, C. H. *A Loading System for Creep Studies of Concrete*. ASTM Bulletin n. 224, September 1957.
6. Pacelli, W. A. *Concreto Endurecido — Determinação da Fluência*. II Simpósio sobre Normalização de Cimento, Concreto e Agregados, novembro de 1982.

B | Figuras 18 a 23 do original

As Figuras 18 a 23 do relatório original (páginas 39 a 44) traçavam, em escala bilogarítmica, a deformação elástica $1/E$ e o coeficiente de fluência $F(k)$ em função da idade sob carga, com as equações da Tabela 1 original (página 37). Como essas equações foram substituídas pelos ajustes do Capítulo 7, as figuras não são reproduzidas; o registro abaixo preserva a correspondência entre figuras e dosagens para consulta ao documento-fonte.

Tabela B.1 – Registro das Figuras 18 a 23 do original (curvas de $1/E$ e $F(k)$ em função da idade).

Fig.	Obra	Agregado	Dosagens (Dmáx)
18	Barragem de Itumbiara	Basalto	140.6.1 — curva 1 (76 mm), curva 2 (152 mm)
19	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto	Gnaisse	E-1484/ANG 103, E-1757/ANG 152, E-1941/ANG 260 (27 mm)
20	Barragem de Tucuruí	Metagrauvaque	E-2302/TUC 335 (38 mm); E-2039/TUC 322 (76 mm); E-963/TUC 192 sem brita 152 mm e integral; E-2300/TUC 333 (152 mm)
21	Barragem de Ilha Grande	Basalto	E-2363/IG 03 (76 mm); E-2379/IG 05 e E-2380/IG 06 (152 mm)
22	Barragem de Balsas Mineiro	Cascalho (quartzo)	E-2299/BM 126 (76 mm)
23	Comparativa	—	140.6.1; E-1941/ANG 260; E-2300/TUC 333; E-2380/IG 06; E-2299/BM 126

C | Síntese dos ensaios

Tabela C.1 – Ensaios de fluência por obra: número de ensaios, idades de carregamento e dosagens.

Obra	Ensaios	Idades z (d)	Dosagens
Itumbiara	8	3, 7, 28, 750, 930	140.6.1 (peneirado e integral); 120.6.3/ITB 6042; 140.6.3/ITB 6822
Angra (C.N.A.A.A.)	14	3, 7, 28, 90, 180, 365	E-1484/ANG 103; E-1757/ANG 152; E-1941/ANG 260
Tucuruí	23	3, 7, 28, 90, 180, 365, 418, 540	E-2302/TUC 335; E-2039/TUC 322; E-963/TUC 192 (peneirado e integral); E-2046/TUC 324; E-2300/TUC 333
Ilha Grande	9	7, 28, 90	E-2363/IG 03; E-2379/IG 05; E-2380/IG 06
Balsas Mineiro	3	7, 28, 90	E-2299/BM 126
Total	57		