



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Produção de Curvas de Dosagem para Concretos Especiais com Base no Método IPT

Everton Alberto Barbosa Ferreira¹, Álvaro Mello Lima², Eliédson Rafael de Carvalho³, Jesimiel Pinheiro Cavalcante⁴

¹²³⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas / Departamento de Engenharia Civil

¹eabf1@aluno.ifal.edu; ²aml4@aluno.ifal.edu.br; ³eliedson.carvalho@ifal.edu.br; ⁴jesimiel.pinheiro@ifalpalmeira.edu.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de determinar analítica e graficamente o traço de um concreto especial por meio de curvas de dosagem, auxiliando no seu processo de fabricação. Inicialmente, por meio da Lei de Abrams, desenvolveu-se um modelo matemático otimizado que relaciona a resistência à compressão do concreto e o fator água/cimento para implementação computacional com auxílio da linguagem de programação *Python* e de bibliotecas como *Numpy* e *Matplotlib*. Posteriormente, utilizou-se o método de dosagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), com auxílio do Método dos Elementos Finitos (MEF) para tratamento numérico dos modelos utilizados. Desta forma, foi possível desenvolver uma ferramenta funcional que a partir dos dados de entrada (resistência característica à compressão do concreto, abatimento e classe de resistência do cimento), gera como saída um laudo técnico em formato de documento portátil (PDF). De modo geral, o laudo gerado dispõe dos parâmetros de saída de maneira organizada, bem como do diagrama de dosagem composto pelas curvas de Abrams, que relaciona a resistência do concreto requerida aos 28 dias e o fator água/cimento; curva de Lyse, que relaciona o traço unitário do concreto e o fator água/cimento; e a curva de consumo de cimento, que relaciona o consumo de cimento e o traço unitário correspondente, facilitando a visualização e interação do usuário com os dados. Por fim, a ferramenta mostrou-se capaz de trazer mais segurança e praticidade ao processo de dosagem de concretos especiais, bem como de reduzir a necessidade de ensaios laboratoriais devido a aplicação computacional dos modelos físico-matemáticos.

Palavras-chave: dosagem de concreto; método IPT; método dos elementos finitos.

Introdução

A utilização de matérias-primas naturais na fabricação do concreto, faz com que a determinação do seu traço, ou seja, a determinação da relação entre cimento e agregados utilizados em sua confecção, seja bastante heterogênea, variando conforme o tipo de concreto que se deseja produzir. Tal heterogeneidade faz com que sejam necessárias diferentes formas de dosagem a depender do tipo de concreto. Isso se dá devido a constante modificação das propriedades físicas destas partículas sólidas, fazendo com que seja difícil de se realizar estimativas precisas sobre as amostras.

Segundo Mehta e Monteiro (2008)

Cada uma das fases do concreto é de natureza multifásica. Toda partícula de agregado pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Analogamente, tanto a matriz da pasta como a zona de transição contêm geralmente uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, acrescentando-se ainda o fato de estarem sujeitas a modificações com o tempo, umidade ambiente e temperatura, o que torna o concreto, diferentemente de outros materiais de engenharia, um material com características parcialmente intrínsecas ao material (METHA; MONTEIRO, 2008).



Em geral, existem dois métodos de determinação do traço do concreto, sendo um deles um método desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o outro desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). O segundo método é mais adequado para a produção de concretos com características particulares de atendimento à necessidade, como desenvolvimento de produtos para aplicação em locais e condições em que o concreto convencional não seria aplicado, formando assim misturas chamadas de concretos especiais (FIGUEIREDO et al., 2004). Em contrapartida, o método da ABCP é mais usado para produção de concretos convencionais.

De acordo com Helene e Terzian (1992), o método de dosagem do IPT se mostra eficiente na dosagem de concretos especiais, entretanto, a demanda de ensaios laboratoriais para determinação de alguns parâmetros como teor ideal de argamassa pode dificultar sua execução. Além disto, o método também exige um conhecimento técnico-científico tal que por vezes acaba inviabilizando a execução devido à falta de praticidade. Assim, mesmo que as misturas de teste não demandem de uma logística complexa, apresentam variáveis que podem influenciar em seus resultados visuais, como por exemplo a mudança de operador. Desta maneira, o problema apresentado para a produção destes concretos, cada vez mais necessários nas obras civis, são os testes. No entanto, seria possível minimizar ou até mesmo revisar o problema, e ainda fazer com que a montagem e determinação destes traços especiais fossem rápidas e precisas, por meio da utilização de um método de previsão de comportamento destas misturas, que consiste na aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) para discretização e posterior aplicação das formulações que regem o comportamento do concreto.

Segundo Rao (1999), a ideia principal do MEF é substituir um problema complicado por problemas mais simples e, eventualmente, encontrar sua solução. Ainda, devido ao crescimento exponencial dos computadores digitais, o método tem se mostrado cada vez mais eficiente na resolução de problemas da engenharia, visto que é possível realizar de maneira rápida e eficiente os inúmeros cálculos e iterações envolvidas na execução do MEF.

Uma das razões pelas quais o Método dos Elementos Finitos se tornou e continua sendo tão popular, é que utiliza como conceito fundamental a discretização, processo matemático no qual são construídas funções, modelos, variáveis e equações contínuas para elementos discretos. Assim, é possível utilizar procedimentos que sejam aplicados aos elementos discretos sem a necessidade de uma tomada de decisões da engenharia (ALVES FILHO, 2013). Desse modo, o MEF permite simular eventos e entender o comportamento de diferentes fenômenos antes mesmo da realização de ensaios laboratoriais ou experimentos de campo através da construção de modelos confiáveis e de um tratamento de dados adequado.

Este trabalho teve como finalidade a construção de uma ferramenta computacional capaz de realizar a determinação do traço de um concreto especial de forma prática, com auxílio dos métodos de dosagem referenciados bem como da utilização do MEF para discretização, a fim de determinar um laudo que relaciona dados de entrada como resistência a compressão aos 28 dias do concreto e classe de cimento, com alguns parâmetros como fator água/cimento, consumo de cimento e teor ideal de argamassa, reduzindo a necessidade de análises experimentais.

Metodologia

Inicialmente, estudou-se o método de dosagem do IPT, bem como métodos de análise numérica e suas aplicações. Em seguida, definiu-se um modelo para o funcionamento da ferramenta de dosagem, que consiste em acoplar módulos que serão construídos de forma individual e que possuem funções pré-estabelecidas bem definidas.

O primeiro módulo corresponde à Lei de Abrams (ABRAMS, 1918), que relaciona a resistência do concreto aos 28 dias (f_{cj}) e o fator água/cimento (a/c), levando em consideração as características dos materiais utilizados, de acordo com a Equação 1.

$$f_{cj} = \frac{k1}{k2 \left(\frac{a}{c}\right)} \quad (1)$$

Onde $k1$ e $k2$ são constantes que dependem das características dos materiais. Desse modo, foi desenvolvido um modelo matemático aplicando propriedades logarítmicas à Equação 1, tornando possível a obtenção de uma equação linearizada (Equação 2).

$$\ln(f_{cj}) = \ln(k1) - \left(\frac{a}{c}\right) \ln(k2) \quad (2)$$

Para a resolução numérica do modelo desenvolvido, foram utilizadas como referências as curvas correspondentes ao Diagrama de Duff A. Abrams, confeccionadas com auxílio de mais de 50 mil ensaios laboratoriais, publicadas em seu trabalho intitulado Design of Concrete Mixtures (ABRAMS, 1918) do qual foram extraídos dois pares (f_{cj} , a/c) e estes utilizados como condições de contorno para o tipo de cimento correspondente à curva selecionada. Durante esta etapa, realizou-se o processo de discretização via MEF a fim de que as condições de contorno estabelecidas anteriormente pudessem ser aplicadas. A Figura 1 demonstra o resultado do trabalho mencionado anteriormente, publicado oficialmente pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em anexo de reunião de técnicos em 1983.

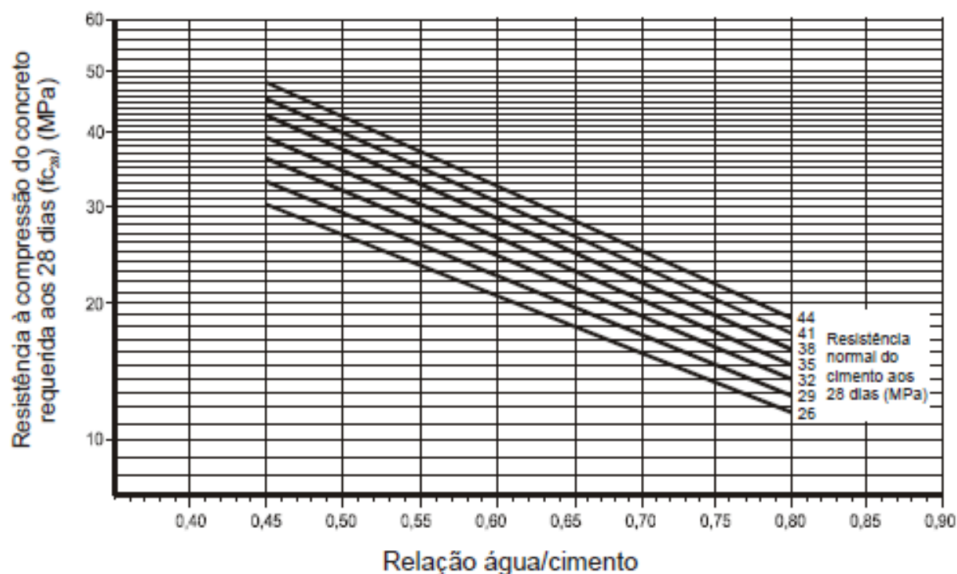


Figura 1 – Curvas de Abrams dos Cimentos – ABCP.

Estas condições de contorno foram utilizadas como banco de dados para calibrar o módulo da ferramenta que corresponde à etapa de construção das curvas de Abrams, porém, disponibilizou-se no algoritmo escrito em Python, com ambiente de desenvolvimento Linux, a possibilidade de calibração pelo próprio usuário da ferramenta. Desta forma, deu-se início ao desenvolvimento do primeiro módulo proposto.

Posteriormente, desenvolveu-se um algoritmo capaz de resolver numericamente o sistema de equações linearizadas por meio de operações matriciais utilizando a biblioteca NumPy aplicada ao modelo matemático proposto, de forma que fosse possível encontrar as constantes k_1 e k_2 , e construir as curvas de Abrams correspondentes para os sete tipos de cimentos disponibilizados (podendo ser expandidos pelo usuário, inclusive sua calibração). Em seguida, ainda utilizando a biblioteca NumPy e com auxílio de condições de contorno pré-estabelecidas correspondentes a pares de valores de a/c e m , equacionou-se a curva correspondente a Lei de Lyse (1936), que é representada pela Equação 3.

$$m = k_3 + k_4 \left(\frac{a}{c} \right) \quad (3)$$

Na qual, m representa o traço unitário do concreto e k_3 e k_4 representam constantes que correspondem apenas às propriedades dos materiais trabalhados.

Em seguida, foi possível realizar uma relação direta entre estes dois parâmetros e finalizar a curva que os relaciona. Posteriormente, por meio do desmembramento do traço unitário, com auxílio do teor ideal de argamassa determinado ou não pelo usuário, bem como do valor de a/c encontrado inicialmente, foi possível desenvolver e equacionar uma curva para o consumo de cimento C por meio da Equação 4.

$$C = \frac{\gamma_c}{1 + a + p + \frac{a}{c}} \quad (4)$$

Na qual, a representa a quantidade proporcional de areia do traço desmembrado, p representa o elemento proporcional de brita do traço e γ_c corresponde à massa específica do concreto.

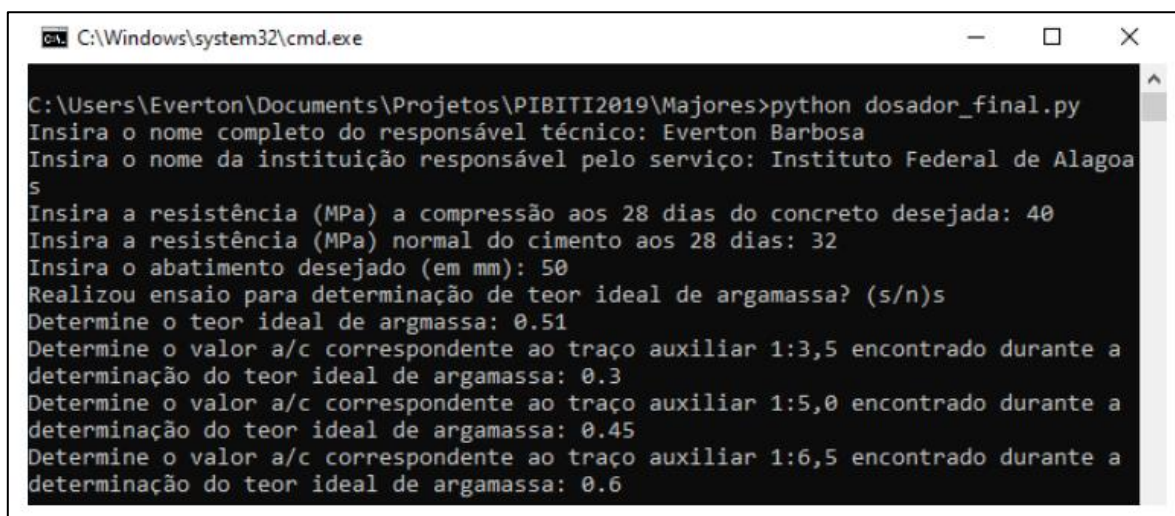
Desta forma, foi possível finalizar numericamente a construção do digrama de dosagem. Com auxílio da biblioteca Matplotlib da linguagem Python, construíram-se as curvas que o compõe utilizando um recurso de plotting.

Por fim, com intuito de gerar uma saída de fácil visualização para o usuário, desenvolveu-se um modelo *template* utilizando o sistema de composição tipográfica LaTeX no formato de laudo técnico. O *template* desenvolvido em LaTeX pode ser facilmente customizado pelo usuário de acordo com sua necessidade e preferência. Além disso, neste documento estão contidas algumas variáveis que serão alteradas de acordo com o resultado que o usuário obtiver ao utilizar a ferramenta. Assim, construiu-se um algoritmo em Python capaz de modificar o *template*, escrevê-lo em outro arquivo de saída, compilá-lo em formato LaTeX e convertê-lo para a extensão de visualização em PDF, resultando no laudo final para o usuário.

A validação da ferramenta desenvolvida neste trabalho, se deu por meio da realização de teste prático onde foram adicionados dados de entrada arbitrários razoáveis com o intuito de que a ferramenta forneça os valores dos parâmetros de dosagem dentro de um intervalo já esperado.

Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta um exemplo-modelo do teste prático de utilização da ferramenta, em ambiente Windows. Neste exemplo, foram inseridos valores arbitrários para os parâmetros de entrada como resistência a compressão aos 28 dias desejada do concreto, resistência normal do cimento, abatimento e teor ideal de argamassa, bem como os parâmetros correspondentes ao ensaio de determinação deste, como ilustra a Figura 2. Estes valores foram utilizados para aplicação manual do método e posterior verificação.



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users\Everton\Documents\Projetos\PIBITI2019\Majores>python dosador_final.py
Insira o nome completo do responsável técnico: Everton Barbosa
Insira o nome da instituição responsável pelo serviço: Instituto Federal de Alagoas
Insira a resistência (MPa) a compressão aos 28 dias do concreto desejada: 40
Insira a resistência (MPa) normal do cimento aos 28 dias: 32
Insira o abatimento desejado (em mm): 50
Realizou ensaio para determinação de teor ideal de argamassa? (s/n)s
Determine o teor ideal de argmassa: 0.51
Determine o valor a/c correspondente ao traço auxiliar 1:3,5 encontrado durante a
determinação do teor ideal de argmassa: 0.3
Determine o valor a/c correspondente ao traço auxiliar 1:5,0 encontrado durante a
determinação do teor ideal de argmassa: 0.45
Determine o valor a/c correspondente ao traço auxiliar 1:6,5 encontrado durante a
determinação do teor ideal de argmassa: 0.6
```

Figura 2 – Inserção dos parâmetros de entrada da ferramenta.

Na Figura 2 está disposto um modelo de inicialização da ferramenta, por meio do terminal, para uma situação em que não foi realizado o ensaio de determinação do teor ideal de argamassa. Neste exemplo, inseriu-se o nome do responsável técnico, instituição responsável pelo serviço (caso haja), bem como parâmetros necessários para a realização dos cálculos como a resistência a compressão do concreto aos 28 dias desejada, resistência normal do cimento aos 28 dias, abatimento etc. Além disso, como apresentado nos métodos, a ferramenta questiona o usuário acerca da realização do ensaio de determinação do teor ideal de argamassa: caso tenha sido realizado, o usuário pode inserir todos os parâmetros obtidos que se fazem necessário; caso contrário, a ferramenta tomará valores arbitrários razoáveis.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



**INSTITUTO
FEDERAL**
Alagoas

LAUDO TÉCNICO DE DOSAGEM

Método: IPT-EPUSP
Responsável Técnico: Everton Barbosa
Instituição: Instituto Federal de Alagoas
Assunto: Dosagem de concretos especiais.
Data: 24 de agosto de 2020

O presente laudo foi realizado por meio de modelos matemáticos aplicados ao método de dosagem do IPT-EPUSP. Por meio de alguns parâmetros como resistência a compressão desejada do concreto aos 28 dias, resistência do cimento que será utilizado, abatimento e dados referentes ao ensaio de teor ideal de argamassa, foi possível determinar o traço ideal e suas respectivas curvas de dosagem. Segue abaixo os resultados obtidos:

- Fator a/c máximo para se obter uma resistência de 40 MPa: **0.42**
- Traço unitário para o um fator a/c = 0.42: **1:4.71**
- Traço desmembrado para o teor ideal de argamassa fornecido $\alpha = 0.51$: **1:1.91:2.8:0.42**
- Consumo de cimento: **392.49 kg/m³**

Figura 3 – Primeira página do laudo técnico de dosagem gerado pela ferramenta como saída.

Em seguida, o algoritmo parte para a segunda etapa do processo de funcionamento, que consiste na confecção do diagrama de dosagem e, posteriormente, o laudo técnico. Nesta etapa, o algoritmo em Python resolve numericamente todos os modelos utilizados, obtendo os parâmetros necessários para a confecção do diagrama, e modifica o arquivo template LaTeX de acordo com os parâmetros inseridos anteriormente pelo usuário. Logo após, a ferramenta compila este arquivo em extensão TeX para PDF em um arquivo de saída, como mostrado na Figura 3.

A Figura 3 apresenta as saídas da ferramenta no laudo de dosagem correspondente aos valores dos parâmetros principais utilizados na ferramenta, enquanto a Figura 4 mostra o diagrama de dosagem. Por meio do diagrama de dosagem apresentado na Figura 4, é possível observar que o traço resultante apresenta valores aproximadamente iguais aos valores obtidos por meio da aplicação manual do método utilizado. Além disto, também é possível perceber que o comportamento das curvas está de acordo com os valores dos parâmetros de traço desmembrado e consumo de cimento correspondentes.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

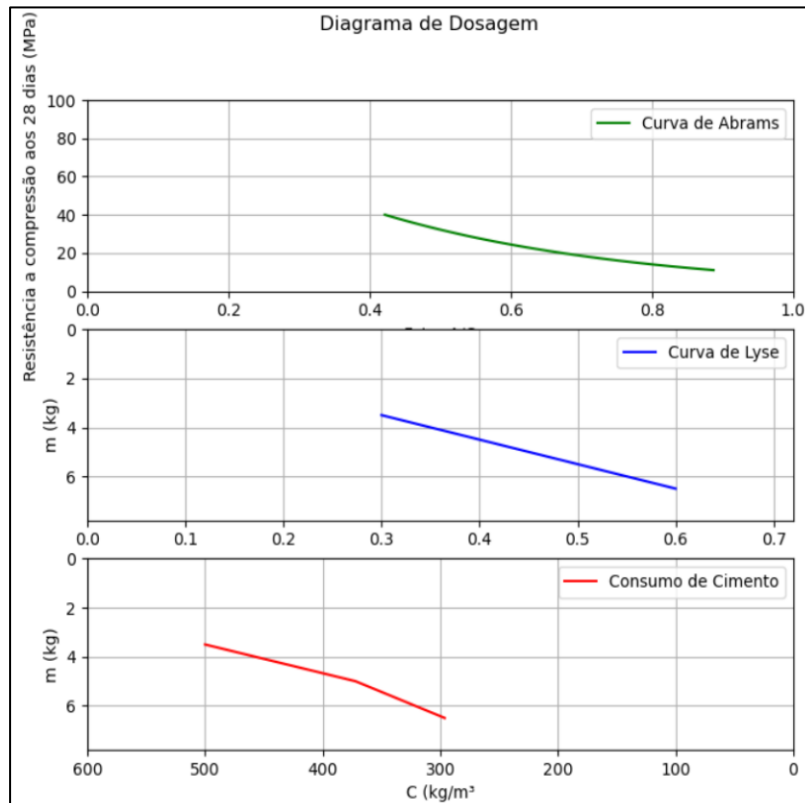


Figura 4 – Segunda página do laudo técnico que corresponde ao diagrama de dosagem.

Vale ressaltar que o arquivo *template* foi desenvolvido de forma que fosse possível customizá-lo de acordo com as necessidades do usuário de forma simples e prática, sendo apenas necessário modificar o arquivo LaTeX e adicionar variáveis, caso seja necessário, ao dicionário construído em Python no código principal da ferramenta.

Outro ponto importante a ser destacado é que não faz parte do escopo deste trabalho a fabricação e teste de resistência à compressão do concreto elaborado a partir do traço resultante da aplicação da ferramenta. No entanto, essa análise pode compor a realização de trabalhos futuros.

Contudo, é possível considerar que os resultados obtidos por meio do teste prático foram satisfatórios, uma vez que a utilização da ferramenta apresenta uma saída de fácil visualização para o usuário e com valores dos parâmetros de dosagem obtidos dentro de um intervalo tecnicamente viável, com base na literatura sobre o método de dosagem IPT, assim, considerando que não houve nenhuma divergência de valores para os modelos utilizados.

Considerações Finais

Nesse trabalho, foi possível desenvolver uma ferramenta capaz de resolver as equações correspondentes às leis de Abrams, Lyse e Molinari, bem como tratá-las numericamente a fim de determinar os principais parâmetros envolvidos na dosagem de concretos.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A ferramenta desenvolvida mostrou-se capaz de confeccionar o diagrama de dosagem de concretos pelo método IPT, sintetizando os principais indicadores de saída por meio de um laudo técnico de dosagem. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação computacional dos conceitos envolvidos é capaz de trazer mais segurança e, principalmente, praticidade no desenvolvimento físico-matemático dos modelos utilizados. Além disso, o mecanismo também conseguiu reduzir a necessidade de realização de ensaios laboratoriais, como havia sido proposto inicialmente.

Além disso, acrescenta-se que a ferramenta pode ser otimizada por meio do desenvolvimento de uma interface mais amigável ao usuário, em especial no que diz respeito a inserção dos parâmetros e execução do código. Esta também pode ser aprimorada em trabalhos futuros por meio da adição de funcionalidades tais como a determinação dos índices físicos por meio dos parâmetros necessários.

Por fim, este artigo exerce um papel fundamental para a produção de conhecimento acerca da dosagem de concretos especiais, uma vez que apresenta uma ferramenta computacional com grande potencial para aplicação prática.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Referências

- ABRAMS, D. A. Design of concrete mixtures, Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, United States of America. 1918.
- ALVES FILHO, A. Elementos finitos: a base da tecnologia CAE, 6ª Ed., Editora Érica, São Paulo, SP, Brasil. 2013.
- FIGUEIREDO, A. D.; DJANIKIAN, J. G.; HELENE, P.R.L.; SELMO, S. M. S.; JOHN, V. M. Concretos especiais. São Paulo, Escola Politécnica – USP. 2004.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto, Brasília, DF, Brasil. 1992.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. Concreto – Microestrutura, propriedades e materiais. IBRACON, 2008
- RAO, S. S. The finite element method in engineering. 3 ed, USA: Butterworth-Heinemann, 1999.
- LYSE, I. A study of the quality, the design and the economy of concrete. Journal of the Franklin Institute. Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, USA. 1936.