

COMPORTAMENTO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO SUBMETIDO À TEMPERATURAS ELEVADAS UTILIZANDO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Klayne Kattiley dos Santos Silva¹
klaynek@hotmail.com

Fernando Artur Nogueira Silva²
farturnog@gmail.com

Amâncio da Cruz Filgueira Filho³
amanciofilgueira@hotmail.com

Emerson Fernandes da Silva Alves⁴
messonandes@gmail.com

ÁREA: PATOLOGIA

Resumo

O estudo do comportamento de estruturas de concreto armado diante de elevadas temperaturas tem ganhado uma maior importância nos últimos anos principalmente após atualização de normas e a utilização de concretos de alto desempenho (CAD). O efeito de spalling é severo nestes tipos de concreto devido possuir uma baixa porosidade, o que dificulta o transporte do vapor gerado pela matriz durante o aquecimento, gerando tensões nestas regiões, tendo-se uma tendência do deslocamento ser instantâneo. Testes experimentais de fogo apresentam um custo elevado e inúmeras limitações, de modo que é impossível realizar testes de resistência ao fogo para todos os cenários possíveis de incêndio, a partir dessas observações houve a necessidade de buscar métodos alternativos para análise das estruturas submetidas a elevadas temperaturas. Este trabalho tem por objetivo simular o comportamento de peças de concreto de alto desempenho, com resistência à compressão estimada de 65 MPa, quando submetido a altas temperaturas, através de meios experimentais por ensaios não destrutivos (END) e análise numérica por modelagem computacional. Para os ensaios foram confeccionados corpos de prova de concreto e submetidos estes em elevadas temperaturas (500°, 700° e 900° C), à posteriori realizados ensaios de resistência à compressão e de módulo de deformação longitudinal, comparando os resultados com concretos em temperatura ambiente. Na análise numérica, foi realizada modelagem utilizando método dos elementos finitos (MEF) para observar o comportamento do concreto perante altas temperaturas. Para obtenção de resultados por simulação numérica foi utilizado o software comercial ANSYS.

Palavras-chave: Incêndio
resistência
CAD
métodos não destrutivos
simulação numérica

¹ Graduanda do Curso de Engenharia Civil; Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil

² Professor Doutor no Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco/ Universidade de Pernambuco, Brasil

³ Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil

⁴ Graduando do Curso de Engenharia Civil; Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN DE ALTO DESEMPEÑO SOMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Klayne Kattiley dos Santos Silva¹

klaynek@hotmail.com

Fernando Artur Nogueira Silva²

farturnog@gmail.com

Amâncio da Cruz Filgueira Filho³

amanciofilgueira@hotmail.com

Emerson Fernandes da Silva Alves⁴

messonandes@gmail.com

AREA: PATOLOGÍA

Resumen

El estudio del comportamiento de estructuras de hormigón armado frente a altas temperaturas ha ganado una mayor importancia en los últimos años principalmente tras la actualización de normas y la utilización de hormigones de alto desempeño (HAD). El efecto de spalling es severo en estos tipos de hormigón debido a tener una baja porosidad, lo que dificulta el transporte del vapor generado por la matriz durante el calentamiento, generando tensiones en estas regiones, teniendo una tendencia al desplome ser instantánea. Las pruebas experimentales de fuego presentan un alto costo y numerosas limitaciones, de modo que es imposible realizar pruebas de resistencia al fuego para todos los escenarios posibles de incendio, a partir de esas observaciones hubo la necesidad de buscar métodos alternativos para el análisis de las estructuras sometidas a altas temperaturas. Este trabajo tiene por objetivo simular el comportamiento de piezas de hormigón de alto desempeño, con resistencia a la compresión estimada de 65 Mpa, cuando sometido a altas temperaturas, a través de medios experimentales por ensayos no destructivos (END) y análisis numérico por modelado computacional. Para los ensayos se han confeccionado cuerpos de prueba de hormigón y sometidos éstos a altas temperaturas (500°, 750°, y 900° C), a posteriori realizados ensayos de resistencia a la compresión y de módulo de deformación longitudinal, comparando los resultados con hormigones a temperatura medio ambiente. En el análisis numérico, se realizó modelado utilizando método de los elementos finitos (MEF) para observar el comportamiento del concreto ante altas temperaturas. Para obtener resultados por simulación numérica se utilizó el software comercial ANSYS.

Palabras clave: Incendio

Resistencia

HAD

Métodos no destructivos

Simulación numérica

Introdução

O crescente avanço tecnológico das últimas décadas propiciou o surgimento de ferramentas capazes de promover a otimização de processos e análises nas mais diversas áreas de conhecimento. Na engenharia, em especial no âmbito estrutural, essas ferramentas tornaram mais simples a análise de estruturas como um todo. Essas ferramentas podem produzir diretrizes que vão desde como um material se comporta frente à determinada situação até o grau de comprometimento da estrutura em análise, tornando os resultados experimentais ainda mais precisos ou até mesmo fazendo com que eles nem sejam necessários.

Com o avanço tecnológico, viu-se a necessidade de incorporar novas tecnologias ao estudo de estruturas de concreto para obter resultados capazes de simular os efeitos numa estrutura real. Com a utilização de ensaios por métodos não destrutivos, e softwares de aproximação numérica, com aplicação do método dos elementos finitos (MEF), faz-se cada vez menos necessária a extração de corpos de prova da estrutura para análise de determinados efeitos no concreto.

Uma das situações responsáveis pelo comprometimento de uma estrutura é a exposição ao fogo (elevadas temperaturas). A variação térmica é responsável por alterar as propriedades de resistência e deformação dos elementos estruturais de concreto. O conhecimento acerca da ação de elevadas temperaturas em elementos estruturais de concreto se constitui, pois, de insumo de relevante importância e vem ganhando cada vez mais atenção do meio acadêmico e da pesquisa aplicada.

Neste particular, as simulações numéricas têm um importante papel a desempenhar porque podem produzir uma importante gama de informação de qualidade para se entender a resposta estrutural de elementos de concreto submetidos a elevadas temperaturas.

O presente trabalho apresenta os resultados do concreto estrutural de resistência característica à compressão de 65 Mpa submetido à ação das temperaturas de 500°, 750° e 900°C em mufla e de ensaios por ultrassom, bem como através de recursos de modelagem numérica de software de análise por elementos finitos.

1 – Concreto submetido a elevadas temperaturas

O concreto possui características mecânicas muito específicas que viabilizam sua utilização e fazem com que seja o principal material de construção utilizado no Brasil. Um dos fatores que justificam essa ampla utilização é a sua durabilidade quando submetido a variadas condições incluindo-se nesta categoria as situações de incêndio (METHA e MONTEIRO, 2008).

As propriedades do concreto podem ser comprometidas quando o concreto é submetido de alguma forma à elevadas temperaturas. Embora este material apresente uma boa resistência ao fogo, suas propriedades podem ser alteradas dependendo de alguns fatores, tais como temperatura máxima a que a estrutura foi exposta, tempo de exposição, velocidade de resfriamento e etc.

A elevação gradual da temperatura causa efeitos distintos no concreto, que pode ir de uma simples alteração da coloração, devido à calcinação superficial, até a perda de resistência mecânica, esfarelamento superficial ou a própria desintegração da estrutura.

2 – Efeitos da ação térmica em concretos de alto desempenho

O concreto, por ser um material heterogêneo, possui certa quantidade de água em seu interior. Quando submetido a altas temperaturas, como no caso de incêndio, a água passa para o estado gasoso dentro da estrutura de concreto, resultando em acréscimo de pressão no concreto, provocado pela tentativa de fuga dos gases aquecidos.

Os concretos de alto desempenho, ou seja, que possuem alta resistência apresenta uma matriz bastante compacta e de porosidade reduzida, o que conduz ao desenvolvimento de pressões internas elevadas quando este é submetido a altas temperaturas, ocasionando assim um fenômeno chamado “spalling” que configura um descolamento de placas de concreto justamente devido a esse aumento de pressão. Além de spalling, que nesse tipo de concreto é explosivo (mais intenso do que em um concreto de menor resistência), os danos do incêndio para o concretos de alta resistência envolvem redução de resistência e desenvolvimento de fissuras.

Com o spalling explosivo da superfície livre do concreto, em geral estrutura perde aproximadamente 75% de sua resistência original (quando em temperatura ambiente) se exposta à cerca de 600°C durante um longo período de tempo. Essa queda considerável se deve à completa decomposição dos hidratos de cimento. Segundo Meneses (2011) as estruturas podem ainda suportar temperaturas na ordem de 700°C a 800°C conservando resistência suficiente em um tempo hábil para que os resgates sejam feitos sem o colapso da estrutura. Quando em temperaturas mais elevadas o concreto perde praticamente todas as suas propriedades mecânicas, ficando a estrutura totalmente comprometida.

3 – Metodologia

Foi analisado o efeito do concreto sob altas temperaturas por duas metodologias distintas, a primeira por ensaios não destrutivos e a segunda por via de software de análise por método dos elementos finitos.

3.1. Ensaios não destrutivos

Foi examinado o efeito de temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas e elásticas do concreto estrutural confeccionando corpos de prova de concreto e submetendo eles a temperaturas elevadas de 500°C, 750°C e 900°C em autoclave. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação longitudinal para os corpos de prova afetados pela ação de temperaturas elevadas e comparados estes com corpos de prova de concreto integros. Por fim, foi realizado ensaios de ultrassom nos corpos de prova submetidos a elevadas temperaturas.

3.1.1. Materiais e métodos

Para a realização da pesquisa foram confeccionados doze corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 5738:2015, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento. O traço utilizado na confecção deste concreto está descrito abaixo. Os valores correspondem a unidades de Kg.

Tabela 1- Traço utilizado para a confecção do concreto.

Cimento	Silica ativa	Ag. Miúdo	Ag. Graúdo	Água	Aditivo superplastificante
1	0,085	1,94	2,58	0,33	0,012

O traço utilizado foi para a confecção de um concreto com resistência à compressão estimada de 65 MPa, aspecto que justifica a utilização da sílica ativa e do superplastificante. O primeiro é responsável por deixar o concreto mais denso, sem muitos poros, e o segundo por garantir uma boa trabalhabilidade no estado fresco. A utilização do superplastificante se mostrou necessária porque a relação água/cimento é muito baixa.

O abatimento foi determinado através do teste utilizando tronco de cone, segundo a ABNT NBR 15823-2:2010. A partir desse traço foi obtido um abatimento de 95 mm.

Os corpos de prova foram separados aleatoriamente e identificados de acordo com a temperatura à qual seriam submetidos (Figura 1), conforme indicado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Identificação dos corpos de prova em função da temperatura de exposição

Corpo de prova	Temperatura (°C)
A	500
B	750
C	900
D	20



Figura 1 - Classificação dos corpos de prova em função da temperatura de exposição. Fonte: Autoria própria

3.1.2. Ensaio de ultrassom

Um dos métodos utilizados para inspeção das peças de concreto foi o ensaio não destrutivo (END) por ultrassom. O ensaio por ultrassom tem como objetivo determinar a integridade do material (concreto) na estrutura. O instrumento é viável para a inspeção em concreto e pode ser utilizado para a localização de vazios, falhas ou defeitos no interior da peça analisada. O aparelho fornece o tempo que a onda leva para percorrer a peça, o que possibilita a obtenção das suas velocidades de propagação, conforme figura 2.



Figura 2 - Os dados foram obtidos por meio de transmissão direta. Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova confeccionados foram submetidos às temperaturas de 500°C, 750°C e 900°C numa mufla. Após o atingimento da temperatura desejada, os corpos de prova foram mantidos por mais uma hora para que a temperatura fosse homogeneizada no interior da peça. O tempo médio para o alcance de cada temperatura estudada foi de cerca de 1 hora e 20 minutos. O resfriamento dos corpos de prova após o processo de homogeneização de temperatura foi realizado de maneira lenta tendo levado cerca de 3 a 4 horas, dentro da própria mufla.

Após o resfriamento dos corpos de prova foram realizadas leituras do tempo de ondas ultrassônicas longitudinais. Depois de coletados os dados todos os corpos de prova (A, B e C que foram submetidos a temperaturas elevadas, e D que permaneceram em temperatura ambiente) foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, conforme a ABNT NBR 5739:2007. A Figura 3 ilustra o ensaio de compressão realizado e a forma típica de ruptura observada.



Figura 3 – Ensaio de compressão simples. Fonte: Autoria própria.

3.2. Simulação numérica utilizando-se de software

Foi feito uma análise numérica do efeito de temperaturas elevadas no concreto utilizando-se do software de análise por elementos finitos ANSYS. O primeiro passo para formular uma análise no software é definir a geometria do elemento a ser modelado, nesse caso foi utilizada uma geometria que representa um corpo de prova cilíndrico de 10x20 (em cm).

Para análise do efeito da temperatura no concreto, nesse trabalho foram utilizados dois tipos de análise térmica, um estado estacionário e um estado transitório. Para ambos os estados a temperatura a que o corpo de prova foi submetido foi a de 1000°C, a partir da qual, segundo a literatura, o concreto perde quase que por completo as suas propriedades mecânicas.

3.2.1. Estado Estacionário

Uma análise térmica em estado estavel calcula os efeitos de cargas térmicas estáveis em um sistema ou componente. A análise térmica em estado estacionário para determinar temperaturas, gradientes térmicos, taxas de fluxo de calor e fluxos de calor em um objeto que são causados por cargas térmicas que não variam ao longo do tempo. Foi definido a temperatura de 1000° C para o corpo de prova todo. Nesse tipo de análise não há variação de temperatura, como mostra a figura 4.

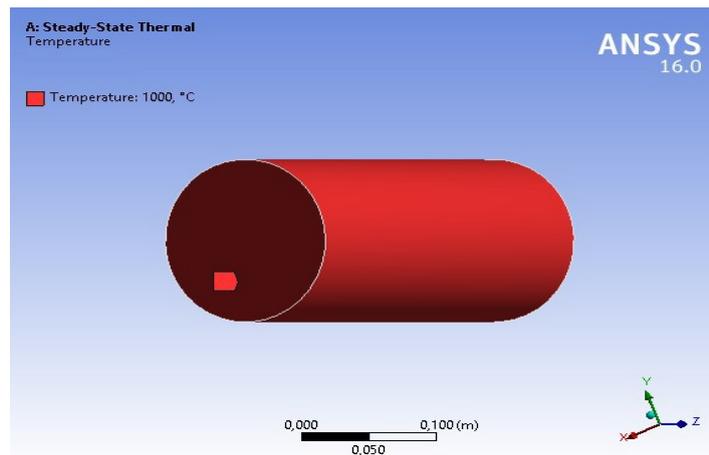


Figura 4 – Temperatura aplicada ao corpo-de-prova

3.2.1. Estado transitório

A análise térmica transitória determina as temperaturas e outras quantidades térmicas que variam ao longo do tempo. A temperatura para esse estado também foi 1000°C, porém, como se trata do estado transitório, a temperatura inicial 22°C, considerada como a temperatura ambiente.

O tempo de transição utilizado foi de uma hora (3600 segundos). A análise térmica transitória segue basicamente os mesmos procedimentos que uma análise térmica em estado estacionário. A principal diferença é que a maioria das cargas aplicadas em uma análise transitória são funções do tempo, conforme demonstrado na figura 5.

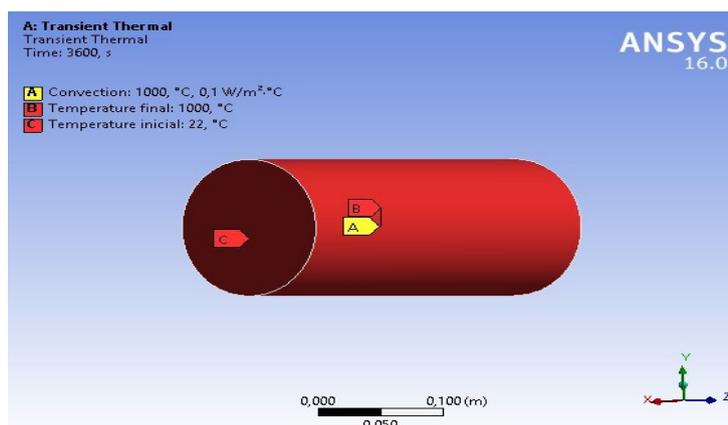


Figura 5 – Temperaturas inicial e final para o estado transitório aplicadas na peça.

4 – Resultados e Discussões

4.1 Ensaios experimentais

A Tabela 3 a seguir mostra os resultados das leituras de ondas ultrassônicas realizadas bem como da resistência à compressão obtida para cada temperatura estudada.

Tabela 3 – Resultados obtidos

Corpo de prova	Diâmetro	Comprimento de onda (m)	Tempo de onda (s)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	Resistência (MPa)
A	0,102	0,187	0,000094	1996,453	500	37,66
B	0,101	0,195	-	-	750	8,67
C	0,101	0,199	-	-	900	4,72
D	0,100	0,193	0,000039	4948,717	20	62,67

Os valores da tabela acima correspondem a uma média dos valores encontrados para cada classe (A, B, C e D). A figura 6 a seguir mostra o decréscimo da resistência em relação às temperaturas a que às peças foram submetidas.

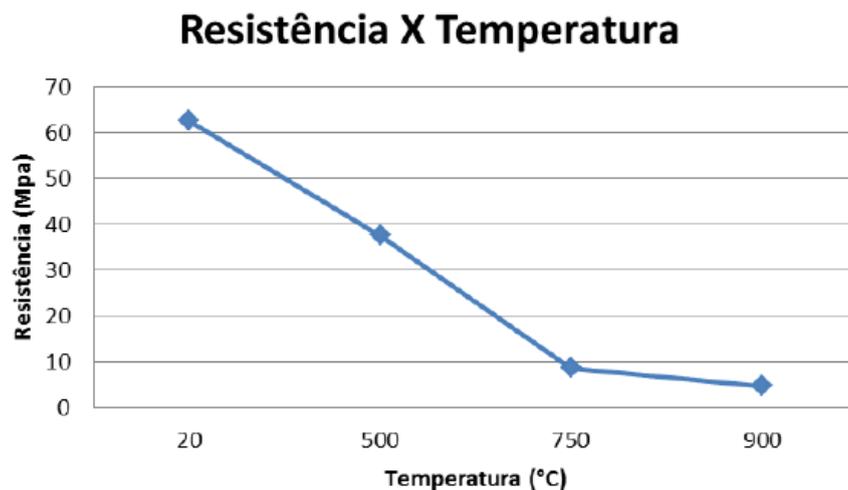


Figura 6 - Relação entre resistência e temperatura. Fonte: Autoria própria.

Foi observado que as peças mantidas à temperatura ambiente (cerca de 20° a 22°C) apresentaram velocidades entre 4000 e 5000 m/s, caracteriza um bom concreto. Já as peças que foram submetidas a temperaturas elevadas apresentaram um decréscimo bastante significativo, o que pode ser relacionado ao comprometimento das suas propriedades mecânicas. Pode-se notar na tabela 3 que os tempos de onda, conseqüentemente as velocidades, não puderam ser medidos para as classes B e C, porque a essas temperaturas o grau de fissuração da peça é muito alto, o que impossibilita uma leitura precisa, pois como existem muitas fendas e fissuras a onda tem dificuldades de passar do transdutor emissor para o receptor.

Na figura 6 é possível observar que a temperatura influencia diretamente na resistência, à compressão principalmente, e que quanto maior for a temperatura a que a estrutura é submetida menor sua resistência. Na maior temperatura estudada (900°C) o concreto já não possui uma

resistência significativa, pelo contrário, suas propriedades resistivas ficam completamente comprometidas, coerente com o comportamento indicado na literatura.

4.2 Análise numérica

O programa apresentou a distribuição do fluxo de calor de maneira direcional (para o estado estacionário), conforme foi solicitado no processo da modelagem. Os resultados foram fornecidos em W/m^2 (watt por metro quadrado) – Potência energética recebida por unidade de área, conforme demonstrado na figura 7. Também foi obtida a distribuição total de calor no estado transitório, que leva em consideração a variação térmica, bem como a variação de tempo, conforme demonstrado na figura 8. Os resultados para o potencial energético de transmissão de calor ou variação térmica, também foram fornecidos em W/m^2 .

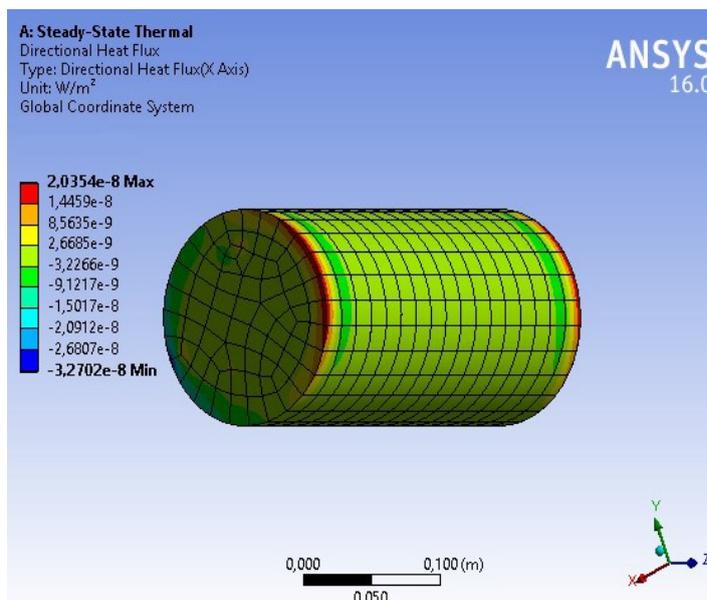


Figura 7: Fluxo direcional de calor no estado estacionário. Fonte: Autoria própria

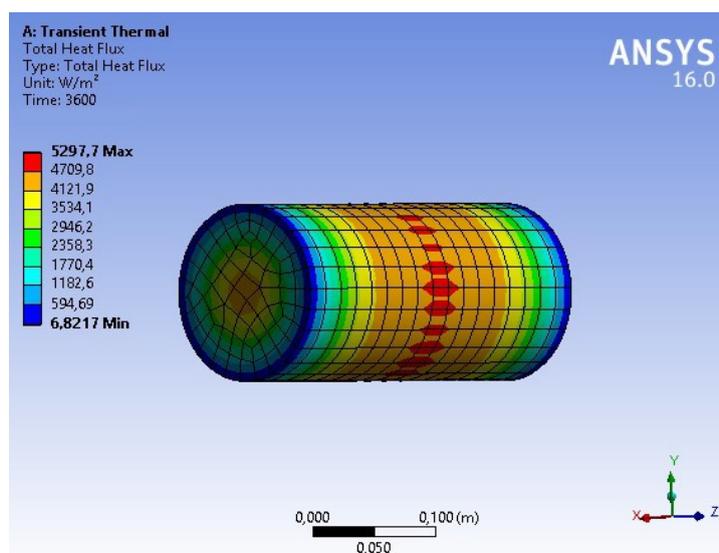


Figura 8: Fluxo total de calor no estado transitório. Fonte: Autoria própria.

5 – Conclusões

Os danos causados numa edificação quando em situação de incêndio podem ser irreversíveis tanto do ponto de vista estrutural, quanto do ponto de vista humano, os quais podem acarretar prejuízos em grande escala para a sociedade como um todo. Pesquisas relacionadas a este tema, e normas que abordem sobre estruturas em situação de incêndio trazem o amadurecimento e conscientização profissionais ligados à construção civil, que tendem a se desencadear para o desenvolvimento de técnicas e materiais que minimizem os efeitos danosos que elevadas temperaturas podem causar sobre a estrutura.

Os dois métodos utilizados no estudo de deterioração do concreto quando submetido à elevadas temperaturas, fornecem diretrizes do grau de comprometimento do elemento coerentes com as informações fornecidas pela literatura.

Os ensaios não destrutivos por ultrassom forneceram diretrizes no que diz respeito ao nível de fissuração do concreto frente a diferentes temperaturas, que apresentou uma proporção direta à queda da resistência nos corpos de prova estudados.

O método por elementos finitos, utilizado por meio de um programa computacional, utilizado neste estudo, se mostrou eficaz por fornecer uma visualização em 3D de como a temperatura se distribui na peça de concreto em função do tempo, mostrando que a distribuição de calor nos elementos estudados não é uniforme, indicando que as análises são coerentes com a literatura. Foi possível observar também que a saída de dados (output) ocorre de forma coerente desde que as informações de entrada de dados (input) sejam feitas de forma correta, respeitando particularidades e características do material em análise.

Bibliografia

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão dos corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: **Concreto auto-adensável: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2010.
- (4) MEHTA, P.K. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, IBRACON 2008.
- (5) MENESES, I.A. **Avaliação de concreto com adição de fibras de pet submetido a altas temperaturas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, 2011.
- (6) MOAVENI, S. **Finite element analysis. Theory and application with ANSYS**. New Jersey: Prentice hall, 1999.
- (7) FILHO, A.A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.
- (8) ASSAN, A.E. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.