

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NO FENÔMENO *SPALLING* EXPLOSIVO

DA SILVA, Ketlyn Maynara Soerensen.¹
PERES, Maria Vânia Nogueira do Nascimento.²

RESUMO

Um dos fenômenos responsáveis pela degradação do concreto, quando exposto a elevadas temperaturas, é o *spalling*, caracterizado pelo deslocamento, de maneira agressiva ou não, de fragmentos da superfície da peça de concreto. Seus mecanismos estão relacionados ao acúmulo de tensão no interior da peça, devido à evaporação da água. Este fenômeno pode ser influenciado, principalmente, pelas propriedades do concreto e condições de exposição, sendo que ainda não há estudos sobre todos os fatores que possam, de alguma maneira, gerar influência na ocorrência do *spalling*. O presente estudo teve como objetivo analisar a influência que o tipo de cimento exerce sobre a ocorrência do *spalling*. Para isto, foram realizados ensaios de compressão, em elevadas temperaturas, e perda de massa em amostras com 04 (quatro) tipos de cimento diferentes e traços exatamente iguais. Através do estudo, foi possível perceber que o cimento influencia na perda de resistência, sendo que está se deu de 91% para o CP II-F e para o CP II-Z, de 87 % para o CP IV-RS e de 92% para o CP V-ARI. Em relação ao *spalling*, foi possível concluir que o cimento não gera alterações no concreto que venham desencadear o fenômeno por si próprio, na taxa de aquecimento do ensaio e a perda de massa é influenciada apenas pela evaporação da água e pelo desprendimento de fragmentos da peça.

PALAVRAS-CHAVE: *spalling*, cimento, elevadas temperaturas, resistência à compressão.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, o concreto é o material mais utilizado no meio da construção civil e, segundo Pedroso (2009), o que o destaca como elemento construtivo é sua resistência à água e sua plasticidade. Porém, Lima (2005) ressalta o fato de que, apesar da alta resistência apresentada pelo material em certos aspectos, quando se trata de elevadas temperaturas, como em um incêndio, as propriedades estruturais passam por alterações capazes de levar a estrutura até mesmo à ruína.

Apesar de ser considerado um material de baixa condutibilidade térmica e que não reage ao fogo, sua propagação ocorre de maneira lenta para o interior da estrutura por meio das áreas de contato e, durante este período, podem ocorrer transformações na micro e na macroestrutura, podendo ocasionar sérios danos à infraestrutura da edificação (BERTOLINE, 2010).

O *spalling* é um dos fenômenos que pode ocorrer quando o concreto é exposto a altas temperaturas, o que se dá pelo lascamento das camadas superiores da estrutura e, geralmente, ocorre nos primeiros 30 minutos de exposição de forma imprevisível. Classificado de acordo com seu grau

¹Acadêmico do 10º Período de Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. e-mail: ksketlyn@gmail.com

²Engenheira Civil, Mestre em Estruturas e Docente do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. e-mail: mariavania@fag.edu.br

de severidade, o *spalling* explosivo é considerado o mais perigoso, capaz de causar um deslocamento significativo na superfície da peça (KIRCHHOF, 2010).

De acordo com Lima (2005), o que proporciona condições para o acontecimento dessa manifestação é o aumento de tensões internas, em consequência da retração e do aumento de tensões devido às deformações térmicas.

Devido à grande divergência na literatura e à falta de estudos sobre certos fatores que podem influenciar a ocorrência do *spalling* explosivo, essa pesquisa busca esclarecer a conexão que há entre sua ocorrência e o tipo de cimento *Portland* utilizado, em virtude da influência que os minerais presentes em sua composição têm sobre a microestrutura do concreto produzido.

O estudo se limita a relacionar o tipo de *spalling*, a perda de massa e a redução da resistência à compressão com o tipo de cimento utilizado. O *spalling* será classificado por modelo recriado por Kirchhof (2010); a perda de massa será definida por uma comparação das massas antes e depois do fenômeno; e a resistência à compressão será definida pelo ensaio de compressão simples após a ocorrência do fenômeno.

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa consiste na realização de ensaios para entender como cada tipo de cimento (CP II-F; CP II-Z; CP IV-RS; CP V- ARI) influencia na ocorrência do *spalling* explosivo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

O concreto é um material resultante da mistura de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água. A qualidade final da mistura depende, principalmente, da qualidade dos materiais utilizados (PETRUCCI, 1998 e NBR 12655, ABNT, 2015).

2.1.1. Cimento *Portland*

Cimento é um material obtido por meio da mistura de *clínquer*, gesso e substâncias que modificam suas propriedades para melhor utilização e é composto, inicialmente, por cal, sílica,

alumina, óxido de ferro, magnésia, anidro sulfúrico, óxido de ferro, óxido de potássio e óxido de titânio (BAUER, 2008 e NBR 16697, ABNT 2018).

Neville (1997) denomina cimento *Portland* como aquele que não contém, em sua composição, mais do que 5% de outro material inorgânico. Já o cimento composto é aquele que contém, em sua composição, outros materiais, tais como: escória, pozolana e fíler, sendo que estes proporcionam ao cimento comum propriedades específicas que se adaptam melhor ao meio e à finalidade de emprego.

O CP I (cimento *Portland* comum) composto exclusivamente de *clínquer* e gesso foi o primeiro cimento *Portland* a ser fabricado e comercializado. O gesso tem como finalidade retardar o tempo de pega. Já o CP I-S (cimento *Portland* comum com adição) contém, em sua composição, um teor que varia de 1 a 5 % de material pozolânico. Concretos fabricados com esse tipo de cimento são empregados em obras que não necessitam, em geral, de propriedades especiais (ABCP, 2002 e NBR 16697, ABNT 2018).

Os cimentos *Portland* composto são divididos em CP II-E, CP-II-F e CP II-Z, compostos, respectivamente, por teores entre 6-34% de escória mais 0-15% de fíler, 11-25% de fíler e 6-14% de pozolana mais 0-15% de fíler. São considerados como material intermediário em relação ao cimento *Portland* comum e em relação àqueles com adições e, assim, suas propriedades atendem às necessidades usuais do mesmo modo que o CP I, porém com algumas vantagens (NBR 16697, ABNT 2018 e ABCP, 2002).

Segundo especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento *Portland* de alto forno ou CP III conta com teor que varia de 35 a 75% de escória mais 0-10% de material carbonático (fíler). De acordo com Neville (1997), as principais aplicações deste cimento são obras que necessitam de baixo calor de hidratação e, em consequência, melhor resistência a longo prazo, o que resulta em maior durabilidade, resistência a ataques químicos e melhor trabalhabilidade no estado fresco.

Os cimentos *Portland* Pozolânico são desenvolvidos a partir da adição de pozolana ao *clínquer*, feita em proporções que variam de 15 a 50% e, também, podem conter de 0-10% de adição de material carbonático (NBR 16697, ABNT 2018). Segundo Neville (1997), o cimento pozolânico apresenta melhor resistência a sulfatos e ácidos fracos, apresentando baixo calor de hidratação, mas sua resistência é considerada baixa, tanto aos 7 dias como aos 28 dias.

Já os cimentos *Portland* de alta resistência inicial ou CP V-ARI, são compostos por uma mistura de *clínquer* e fíler e os teores, dos mesmos, variam de 90-100% e 0-10%, respectivamente (NBR 16697, ABNT 2018). Apesar de ser adicionado em pequena proporção quando comparado à

pozolana e à escória, apresenta melhora significativa em propriedade como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência a fissuras. Porém, em consequência da alta resistência inicial, devido ser rico em C3S, componente responsável pela resistência inicial, libera alta quantidade de calor em poucas horas, contribuindo para o calor de hidratação alto (NEVILLE, 1997).

2.1.2. Agregados

Agregado é definido como “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o preparo de argamassa e concreto” (NBR 12655, ABNT 2015). No entanto, Neville (1997) se opõe que este seja inerte na total compreensão da palavra, já que ele é responsável por aumento na durabilidade do concreto quando comparado à pasta de cimento pura e devido à influência que suas propriedades têm na qualidade final do concreto.

2.1.3. Água de amassamento

A água de amassamento não pode conter impurezas que prejudiquem a reação com os componentes do cimento, pois normalmente as patologias causadas por ela estão ligadas ao excesso na composição e não as impurezas, já que em pequenas quantidades estas não apresentam danos notáveis ao concreto. As patologias mais comuns ligadas as impurezas presentes na água são: eflorescência na superfície do concreto e corrosão da armadura (PETRUCCI, 1998).

2.2. EFEITOS DA TEMPERATURA NOS MATERIAIS

Bertolini (2010) exemplifica as transformações que ocorrem nos materiais que compõem o concreto quando este é exposto a elevadas temperaturas: a decomposição da portlandita a 450 °C-550 °C, a expansão do quartzo a 575°C e a decomposição do calcário a 800 °C-900 °C. Já Schneider e Diedrichs (1981 *apud* Kirchhof, 2010) classificam as transformações que podem

ocorrer nos cristais do concreto quando submetido a elevadas temperaturas em nove estágios, os quais podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Transformação no concreto com a elevada temperatura

| Estágio | Temperatura (°C) | Transformação ou reação de decomposição |
|---------|------------------|---|
| 1 | 30-120 | Evaporação da água livre; |
| 2 | 30-300 | Desidratação da água não evaporável ou água quimicamente combinada do gel do cimento; |
| 3 | 120-600 | Liberação das águas livres e quimicamente combinada remanescentes; |
| 4 | 450-550 | Decomposição do hidróxido de cálcio; |
| 5 | 570 | Transformação do quartzo; |
| 6 | 600-700 | Decomposição do silicato de cálcio hidratado; |
| 7 | 780 | Recristalização das partículas de cimento não hidratadas; |
| 8 | 600-900 | Descarbonatação do agregado calcário; |
| 9 | 1100-1200 | Derretimento do Concreto. |

Fonte: Schneider e Diedrichs (1981 *apud* Kirshhof 2010).

2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS SOB EFEITOS DE ELEVADAS TEMPERATURAS

O concreto, quando submetido a elevadas temperaturas, como no caso de um incêndio, sofre redução em suas propriedades mecânicas, entre elas: resistência à compressão, tração e elasticidade. Para os autores Lima (2005), Lorenzon (2014) e Silva (2017), fatores como relação água e cimento, tipo de agregados, taxa de aquecimento, método de resfriamento, umidade do concreto, dimensões da peça, dentre outros, estão diretamente ligados a esta perda.

De acordo com Lima (2005), até 400 °C a perda de resistência à compressão é insignificante, cerca de 13%. Mas, após essa temperatura, a perda se torna mais significativa, sendo de 38% a 600 °C e de 82% a 800 °C. Hanger (2013) explica que isto acontece, principalmente, devido à decomposição da portlandita, que ocorre aos 400 °C, como já citado por Bertolini (2010).

Já a redução do módulo de elasticidade é de 46% a uma temperatura de 300 °C e de 73% a temperaturas de 450 °C (MORALES *et al.*, 2011). Porém, como já citado, vários fatores interferem nessa redução. Há uma divergência entre os autores, como, por exemplo, para Lima (2005), que explica que apesar da elasticidade apresentar uma redução bem maior que a resistência à compressão, em temperaturas inferiores a 400°C essa perda se limita a 23%, chegando a 74% em temperaturas de 600 °C.

Com relação à resistência à tração, a perda ocorre em consequência da evaporação da água absorvida pelo concreto e, quando a temperatura chega aos 600 °C, esta já está totalmente diluída, devido à evaporação da água de constituição e à degradação química da pasta (EUROCODE 2 PAR1-2, 2004).

2.4. O FENÔMENO *SPALLING* EXPLOSIVO

Spalling explosivo é um fenômeno caracterizado pelo deslocamento de pedaços ou camadas da peça, ocorrendo de forma violenta ou não, em estruturas de concreto quando expostas a elevadas temperaturas como no caso de incêndio (KIRCHHOF, 2010). Trata-se de fenômeno de comportamento imprevisível devido aos fatores que influenciam seu desencadeamento e, este acontecimento, pode estar ligado à natureza mineralógica do agregado, ao acúmulo de tensões térmicas no interior da peça gerada durante o aquecimento e devido ao comportamento da pasta de cimento em consequência da ação combinada da pressão nos poros e das tensões térmicas internas (BUCHANAN, 2001; TENCHEV e PURKISS, 2001 *apud* SOUZA, 2005).

2.4.1. Possíveis causas do *Spalling*

Lima (2005) observa que, em concretos com agregados graúdos de origem basáltica, a ocorrência do fenômeno é maior do que em concretos com agregados graníticos, devido à maior resistência capilar que acaba dificultando que os gases quentes, gerados no interior da peça, desloquem-se para o exterior.

Para Kirchhof (2010), o desencadeamento do fenômeno ocorre, principalmente, em estruturas de concreto de alta resistência e com uma umidade na faixa de 75%. Isso se deve, principalmente, à menor quantidade de poros na estrutura, o que dificulta que o vapor da água escape, gerando, assim, tensões de tração superiores as que o material resiste.

No entanto, a ocorrência não está somente ligada a propriedades intrínsecas do concreto. A espessura do cobrimento influencia, diretamente, no desenvolvimento do fenômeno, devido ao fato de esta ser uma característica de extrema importância para o aumento de temperatura na peça (GIL *et al.*, 2018).

2.4.2. Tipos de *spalling*

Malhotra (1984 *apud* KIRCHHOF 2010) e Kalifa *et.al* (2000 *apud* KIRCHHOF 2010) classificam o fenômeno em duas categorias: o *spalling* progressivo e o *spalling* explosivo, sendo que a primeira é dividida em duas subcategorias: *Surface spalling* e *Corner break-off*.

- a) *Surface spalling*: ocorre a formação de pequenos sulcos na superfície da peça, devido à fragmentação de agregados; os pedaços destacados devem ter tamanho inferior a 20 mm.
- b) *Corner break-off*: caracterizado pelo surgimento de fissuras nas bordas e extremidades da peça.
- c) O *Spalling* explosivo é identificado por meio da separação violenta de pedaços de concreto da peça.

3. METODOLOGIA

A metodologia foi proposta de forma a atingir os objetivos da pesquisa referentes à análise quanto à influência do tipo de cimento na ocorrência do fenômeno *spalling* explosivo, sendo apresentados os procedimentos de ensaios, variáveis envolvidas, instrumentos e procedimentos adotados e o meio de análise dos resultados.

Trata-se de um estudo experimental, em laboratório, com foco em analisar a influência que o tipo de cimento tem na ocorrência do fenômeno de lascamento do concreto em consequência da exposição a elevadas temperaturas. Para viabilizar o estudo, variáveis como tipo de agregado, umidade do concreto, relação água cimento, tamanho do corpo de prova, trabalhabilidade do concreto, tipo de cura, adição de aditivos minerais e classe de resistência do cimento foram mantidos constantes em todas as amostras, sendo pré-definido o valor mais adequado para cada.

3.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1. Cimento

Para a produção dos corpos de prova de concreto, foram utilizados cimentos *Portland* dos seguintes tipos:

- CP II-F: cimento *Portland* composto com fíler;
- CP II-Z: cimento *Portland* composto com pozolana;
- CP IV-RS: cimento *Portland* pozolânico resistente a sulfatos;
- CP V-ARI: cimento *Portland* de alta resistência inicial.

3.1.2. Agregado graúdo e miúdo

O agregado miúdo foi a areia média, classificada como areia regular, e o agregado graúdo utilizado foi brita de origem basáltica, classificada como brita 1. A determinação do tipo de agregado se deu de acordo com o exemplificado na Tabela 2, conforme especificações da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 2: Classificação granulométrica

| Agregado graúdo | | Agregado miúdo | |
|-----------------|---------------|----------------------|---------------|
| Material | Dimensão (mm) | Material | Dimensão (mm) |
| Pó de brita | 4,8 | Areia grossa | 1,2 a 2,4 |
| Brita 1 | 4,8 a 9,5 | Areia media a grossa | 0,6 a 1,2 |
| Brita 2 | 19 a 25 | Areia media | 0,6 a 0,3 |
| Brita 3 | 25 a 50 | Areia fina | 0,30 a 0,15 |
| Brita 4 | 50 a 76 | | |

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2. PRODUÇÃO DO CONCRETO

Os corpos de prova foram moldados para atingir uma resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias, a partir do uso do traço: 1:2:2,5 (cimento: areia: brita) e a relação água cimento de 0,50,

não sendo utilizado nenhum tipo de aditivo. Os materiais utilizados na composição dos concretos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Consumo de materiais (kg/m³)

| Materiais | Peso (kg/m ³) |
|-----------|---------------------------|
| Cimento | 440,88 |
| Areia | 881,76 |
| Brita | 1102,20 |
| Água | 220,44 |

Fonte: Autora (2019).

A mistura do concreto foi realizada com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, na qual seguiu-se a ordem de colocação dos materiais: 100% do agregado graúdo, 1/3 da água, acionou-se a betoneira por aproximadamente 30 segundos, 100% do cimento, 1/3 da água, acionou-se a betoneira por aproximadamente 30 segundos, 100% do agregado miúdo e, por fim, o restante da água.

Após a colocação de todo o material, a mistura foi agitada pelo tempo necessário para garantir a homogeneidade e trabalhabilidade do concreto. Ao finalizar o processo de mistura, foi realizado o controle da consistência do concreto, conforme determina a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A moldagem dos corpos de prova foi executada após o processo de mistura, seguindo as recomendações da NBR 5738 – Concreto: Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova (ABNT, 2015).

Para a realização do ensaio de compressão, foram moldados 06 (seis) corpos de provas cilíndricos, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada tipo de concreto estudado, totalizando 24 amostras. O concreto foi colocado no molde em duas camadas; a compactação foi mecânica, com a utilização de uma haste metálica, aplicando-se 12 golpes por camada.

Após a realização da concretagem e adensamento, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório por 24 horas. Decorrido este período, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura em uma câmara úmida com umidade e temperatura controladas ($UR \geq 95\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$), onde ficaram armazenados até a idade de 28 dias, quando foram realizados os ensaios.

3.3. GRAU DE SEVERIDADE DO *SPALLING*

Para determinar o grau de severidade do fenômeno, foram utilizados o modelo e a classificação propostos por Kirchhof (2010), representados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Classificação do *spalling*.

| Classificação do <i>spalling</i> | Ruídos | Tipo de fragmentação | Grau de severidade |
|----------------------------------|------------------------------|--|--------------------|
| Grau 1 | Estalos de baixa intensidade | Destacamento superficial de pequenas regiões da amostra | Baixo |
| Grau 2 | Estalos de média intensidade | Destacamento superficial envolvendo regiões maiores da amostra | Médio |
| Grau 3 | Estrondo forte | Explosiva (ruptura de parte da amostra) | Alto |

Fonte: Kirchhof (2010).

Tabela 5: Critério de classificação.

| Grau | Definição |
|------|---|
| 1 | Formação de pequenos sulcos na superfície do corpo de prova; |
| 2 | Surgimentos de zonas fragmentadas na superfície do corpo de prova, principalmente, em cantos e/ou aresta; |
| 3 | Lascamento explosivo acompanhado de separação e/ou rompimento de grande parte do corpo de prova. |

Fonte: Kirchhof (2010).

3.4. MÉTODOS DE ENSAIOS

3.4.1. Ensaio em elevada temperatura

Este ensaio foi realizado com o auxílio de uma mufla com grande capacidade de aquecimento. Sua programação foi realizada com base na NBR 5628 (ABNT, 2001). Para os primeiros 120 minutos, houve uma taxa de aquecimento de 15,4 °C por minuto e, após esse tempo, os corpos de prova foram mantidos em estufa por mais 60 minutos a uma temperatura de 924 °C, para garantir uma temperatura homogênea na amostra. Após esse procedimento, foram retirados da mufla e resfriados em temperatura ambiente.

3.4.2. Ensaio de perda de massa

Para a determinação da perda de massa, o procedimento realizado foi pesar as amostras antes e após a exposição a elevadas temperaturas, com o auxílio de uma balança previamente calibrada.

3.4.3. Ensaio de compressão simples

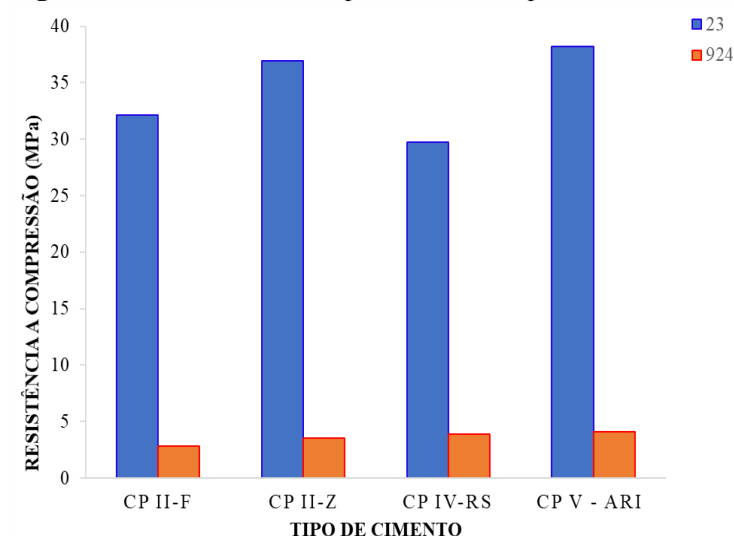
Para realizar o controle de resistência, foram rompidas três (03) amostras que não foram expostas a elevadas temperaturas e, sequencialmente, três (03) que foram expostas. Foi utilizada uma prensa hidráulica para aplicação de força sobre o corpo de prova até que este se rompa. A resistência à compressão foi determinada dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal. Este ensaio seguiu as exigências da NBR 5739 (ABNT, 2018).

4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1. Resistência a compressão

Os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão são apresentados na Figura 1.

Figura 1: Resistência à compressão em temperatura ambiente e a uma temperatura de 924°C



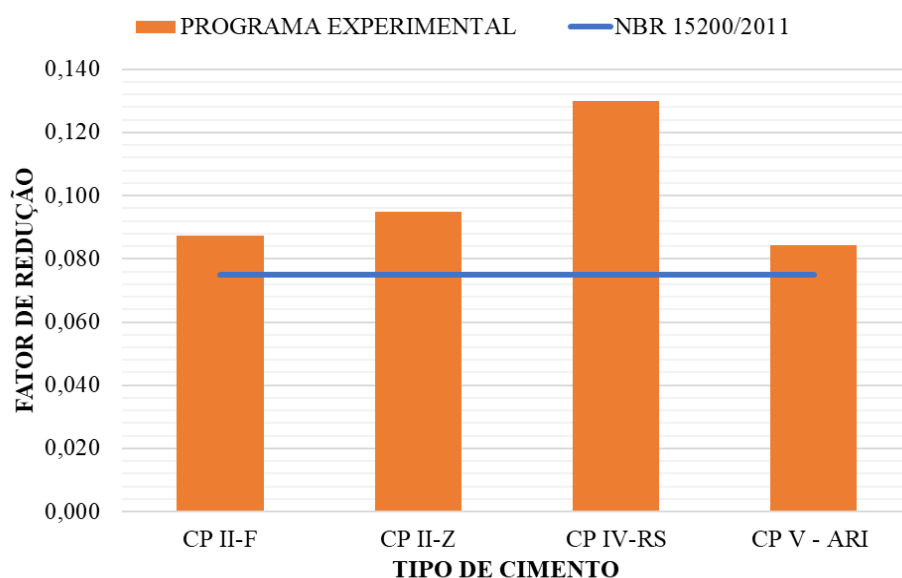
Fonte: Autora (2019).

A partir das análises referentes ao gráfico da Figura 1, é possível observar que o tipo de cimento utilizado tem grande influência na resistência final do concreto. A menor resistência obtida foi a do CP IV, que, entre os cimentos utilizados neste estudo é o que possui maior percentual de adição. De acordo com o estudo de Medeiros Junior *et. al* (2014), os cimentos com maiores teores de adição apresentam menor resistência aos 28 dias, quando comparados com os demais. Neville (1997), também considera o CP IV como um cimento de baixa resistência, o que justifica os resultados obtidos. A maior resistência obtida foi para o CP V-ARI, considerado um cimento mais puro, ou seja, com menor teor de adições.

Ainda é possível observar, na Figura 1, que quando os corpos de prova são expostos a altas temperaturas ocorre perda significativa de resistência. Essa redução de resistência ocorreu para todos os tipos de cimento, sendo a maior redução para o cimento CP V-ARI.

A Figura 2, apresenta o fator de redução de resistência à compressão em função do tipo de cimento, conforme NBR 15200 (ABNT, 2012). Nota-se que para nenhum dos tipos de cimento o valor da resistência à compressão foi mais baixo do que o proposto pela norma para a temperatura em estudo.

Figura 2: Fator de redução da resistência de compressão em função do tipo de cimento



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 2, também é possível observar que o cimento pozolânico apresentou uma perda menor quando comparado com os demais. De acordo com o estudo de Salum (2016), a resistência a

temperaturas das estruturas de concreto é melhor em concretos com cimentos *Portland* que à composição química resulte um lento desprendimento de calor. Dentre os cimentos utilizados no presente estudo o CP IV-RS é o único a apresentar esta propriedade. Para Salum (2016), isso ocorre devido o menor teor de C3S e C3A, que são os compostos que se hidratam mais rapidamente, já o CP V-ARI que apresentou uma perda maior, é de maior calor de hidratação.

4.2. GRAU DO *SPALLING*

Para a determinação do grau do *spalling*, os corpos de provas passaram por uma inspeção visual, na qual foram analisados os danos presentes em cada um deles, usando a escala descrita no capítulo 3. Essa inspeção pode ser analisada na Figura 3.

Figura 3: classificação do *spalling* de acordo com os danos sofridos pelo material



Fonte: Autora (2019).

Com a análise visual, foi possível determinar para cada tipo de cimento quais danos causados aos corpos de provas devido ao *spalling*, conforme apresentados na Figura 4. Pode ser observado essa porcentagem referente a cada grau, sendo que apenas 33% das amostras do CP II-F sofreu

spalling de grau médio, todas as demais apresentaram apenas a formação de pequenos sulcos dispersos na superfície, sendo que tal característica se enquadra como *spalling* de grau leve.

Figura 4: Tipo de cimento x frequência do *spalling*/grau

| cimento | frequencia do <i>spalling</i> (%) | | |
|----------|-----------------------------------|-------|------|
| | baixo | medio | alto |
| CP II-F | 67% | 33% | |
| CP II-Z | 100% | | |
| CP IV-RS | 100% | | |
| CP V-ARI | 100% | | |

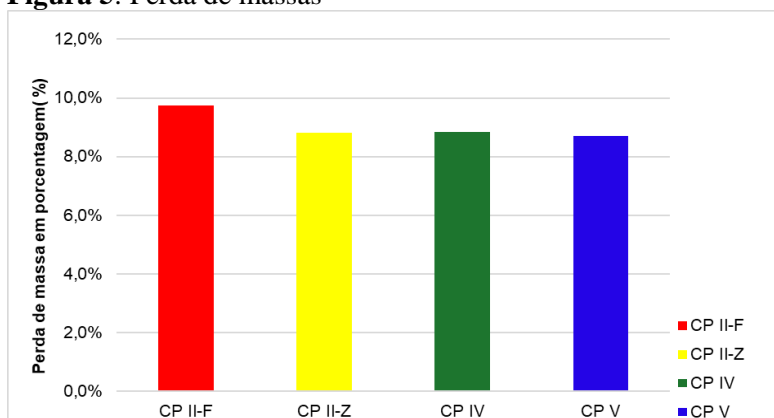
Fonte: Autora (2019).

Como a maior parte das amostras do CP II-F sofreram *spalling* de grau baixo, caracteriza-se que o fenômeno sofrido por esse cimento é de grau baixo. Todos os demais tipos de cimentos sofreram em 100% de suas amostras também o fenômeno grau baixo. Sendo assim é possível perceber, que os dados deste estudo estão de acordo com resultados apresentados por Kirchof (2010), que em concretos com resistência à compressão normal e baixo teor de umidade, a ocorrência de *spalling* do tipo explosivo era nula e que o tipo de cimento utilizada na produção do concreto não influencia na ocorrência do fenômeno.

4.3. PERDA DE MASSA

Na Figura 5, é possível observar a perda de massa para cada um dos tipos de cimentos.

Figura 5: Perda de massas



Fonte: Autora (2019).

Por meio da análise, percebe-se que não há diferenças significativas entre as perdas de massa, com exceção do CP II-F, que foi prejudicado devido à perda de fragmentos maiores de uma pequena parte das amostras. Para Fonseca (2010), a perda de massa está diretamente ligada à perda de umidade das amostras em consequência da evaporação de água que ocorre. Como todas as amostras foram mantidas fora da câmara úmida pelo mesmo tempo, pode-se afirmar que estas apresentavam umidades próximas, o que explica a uniformidade dos dados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fenômeno não se manifestou de maneira explosiva em nenhuma das amostras, o que, segundo Kirchhof (2010), ocorre quando ainda há conectividade suficiente entre as estruturas dos poros para permitir que o vapor da água escape e não gere tensões de tração superiores ao resistido pelo material. Desta forma, conclui-se que o tipo de cimento não gera influência suficiente na estrutura do concreto, para que este, em condições normais, sofra *spalling* explosivo quando submetido a elevadas temperaturas, na taxa de aquecimento do presente estudo.

Foi possível observar que o tipo de cimento utilizado influenciou diretamente na resistência a compressão tanto em temperaturas normais como após serem expostos a elevadas temperaturas, sendo que no primeiro caso, o fator é explicado devido a diferença nos teores de adições de fíler e pozolana e no segundo caso o fator está interligado a velocidade do desprendimento de calor, quanto mais lento, melhor é a resistência a altas temperaturas. Já para a perda de massa o tipo de cimento também não gerou influência significativa, já que a mesma está inteiramente ligada a evaporação de água e ao deslocamento de fragmentos da peça.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*. **ABCP**: guia básico da utilização de cimento *Portland*. 7. ed. São Paulo, 2002 (BT 106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de Cimento *Portland*- Controle, Preparo e Recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15200**: Projeto em estruturas de concreto em situação de incêndio, 2012.

_____. **NBR 16697**: Cimento *Portland* - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura e corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 248**: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BAUER. L.A.F. **Materiais da construção 1**. 5. ed. revisada (reimpressão). Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. Trad. Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE. **Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design. ENV 1992 -1-2**. CEN. Brussels, 2004.

FONSECA, R. O. **Concretos submetidos a ciclos de temperaturas elevadas. Estudos experimentais em corpos de prova localizados em unidades de produção de uma usina siderúrgica**. 2010. Dissertação- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

GIL, A. M.; FERNANDES, B.; BOLINA, F.L.; TUTIKIAN, B. F. Análise experimental do fenômeno de deslocamento em pilares de concreto armado pré-fabricados submetidos a elevadas temperaturas. **Estrutura dos materiais -Ibracon**, vol. 11, n.4, p. 856-875, ago. 2018.

HANGER, I. **Behaviour of cement concrete at high temperature**. *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*, vol. 61, n. 1, 2013.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de *spalling* explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas.** 2010. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de Concretos em temperatura Elevadas.** 2005. Tese (Doutorado em Construção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LORENZON, A. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas.** 2014. Departamento Acadêmico de construção civil do curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT.** México, v. 4, n. 2, p. 113-128, mai./agos. 2014.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A.M.P. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas.** Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, jan./mar. 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Trad. Salvador E. Giammusso. 2. ed. revisada. São Paulo: Pini, 1997.

PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e construção- Ibracon.** São Paulo, n.53, p.14-19, jan./mar, 2009.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento *Portland*.** 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante.** 2016. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, J. B. **Comportamento sob altas temperaturas de concreto com agregados reciclados de concreto.** 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SOUZA, A. A. A. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo.** 2005. Dissertação (Mestrado em concentração em edificações) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo e Departamento de Estrutural, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.