



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RAFAEL CAMPOS DE ALENCAR ARAÚJO

CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA À BASE DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADA
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Recife

2020

RAFAEL CAMPOS DE ALENCAR ARAÚJO

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA À BASE DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADA
EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

A663c Araújo, Rafael Campos de Alencar
Concreto de alta resistência à base de escória álcali-ativada em situação de incêndio / Rafael Campos de Alencar Araújo – Recife, 2020.
109 f.: figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.
Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Alta resistência. 3. Concreto de escória ativada. 4. Propriedades residuais. 5. Segurança contra incêndio. I. Oliveira, Ancelmo de Carvalho Pires de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-128

RAFAEL CAMPOS DE ALENCAR ARAÚJO

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA À BASE DE ESCÓRIA
ÁLCALI-ATIVADA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 18/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão ao Senhor Jesus pela graça, “Pois nele vivemos, nos movemos e existimos” (Atos dos Apóstolos 17.28). O desafio foi grande mas a graça foi suficiente.

À minha família, meus pais Marcylio e Márcia, que desde sempre me incentivaram aos estudos, com esforço, ensino e acompanhamento. Avós Alfredo e Zuleide, Alzinete, irmão Neto e parentes de modo geral, contar com o incentivo familiar é certamente um grande privilégio e estímulo.

À minha esposa Thalita, que por tantas vezes pacientemente abriu mão de minha presença e companhia para que este projeto se tornasse realidade.

Ao Professor Doutor Tiago Ancelmo pela sua orientação, dicas, apoio e comunicação do saber, não apenas acadêmico, mas também pessoal e profissional.

A todo o programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE.

Aos componentes docentes e discentes do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LABTAG) da UFPE, em especial ao Professor Doutor Antônio Acácio e ao colega Nilvan Teixeira pela inestimável parceria ajuda em dicas, preparação, estruturação, cessão do concreto por eles desenvolvido, moldagem e na realização dos ensaios. Gratidão também extensiva aos demais colegas do LABTAG com quem por algum tempo pude conviver.

Aos componentes do grupo de pesquisa Gestão e Tecnologia da Construção (GTC), cujas reuniões, questionamentos, ajuda e críticas se tornaram tão valiosos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME).

À Tecomat pelo apoio na retificação dos corpos de prova, em especial ao Professor Tibério Wanderley.

Aos amigos, em geral, e todos que de alguma forma contribuíram ou torceram para que pudesse alcançar e vencer esta etapa. Muito obrigado!

RESUMO

Vem crescendo a procura por concretos feitos a partir de aglomerantes alternativos tanto na academia quanto no setor produtivo. Diante das opções, o concreto de escória ativada figura como alternativa de destaque, seja pela sua alta resistência desde as primeiras idades, baixa permeabilidade e porosidade, baixo calor de hidratação, durabilidade, etc. Todavia, para que haja um dimensionamento e uso estrutural adequado, torna-se necessário o conhecimento do material em suas diversas condições, inclusive de Segurança Contra Incêndio (SCI). Este trabalho se propõe a avaliar propriedades residuais do concreto de escória álcali-ativada, mediante confecção de três traços do mesmo, nas relações água/ligante 0,28, 0,36 e 0,44; ativação mediante uso de silicato de sódio e quantificação de suas propriedades residuais (abordagem experimental). Os espécimes foram levados a altas temperaturas (200, 400 e 600 °C) através de taxa de aquecimento constante no valor de 5 °C/min e na temperatura elevada foram mantidos por intervalo de tempo de 3 h, seguindo-se resfriamento lento. Após o quê os corpos de prova de concreto foram ensaiados à compressão, velocidade de pulso ultrassônico, absorção, índice de vazios e massa específica. Os resultados obtidos, em geral, expressam boa performance do concreto de escória para as temperaturas utilizadas, apresentando resistência residual à compressão de 50% tal como o concreto de cimento Portland, além de demonstrar tendência de superar, tanto em números absolutos quanto percentuais, o concreto de cimento Portland para temperaturas acima de 600 °C. Os ensaios microestruturais da pasta de escória apontam para formação de fases que são mais estáveis às temperaturas elevadas. Tais fases cristalinas seriam responsáveis pela performance do material em situação de incêndio.

Palavras-chave: Alta resistência. Concreto de escória ativada. Propriedades residuais. Segurança contra incêndio.

ABSTRACT

The demand for concretes made from alternatives binders has been growing both in academia and in the productive sector. Given the options, the activated slag concrete is presented as a prominent alternative, whether for its high resistance since the first ages, or for the low permeability and porosity, low heat of hydration, durability, etc. However, for there to be an adequate dimensioning and structural use, knowledge of the material in question becomes necessary in its various conditions, including Fire Safety (FS). This work aims to evaluate the residual properties of alkali-activated slag concrete, by making three mixes of this concrete, in the relations water/binder 0.28, 0.36 and 0.44; activation by sodium silicate and measurement of its residual properties (experimental approach). The specimens were taken to high temperatures (200, 400 and 600 °C) through a constant heating rate of 5 °C/min and were maintained for a period of 3 h in high temperature, followed by slow cooling. After the process of exposure to high temperature and slow cooling, the concrete specimens were tested at compression, ultrasound pulse velocity, absorption, voids index and specific mass. The results obtained in general express good performance of the slag concrete for the temperatures used, presenting 50% residual compressive strength such as Portland cement concrete, in addition to demonstrating a tendency to overcome, both in absolute numbers and in percentage, the Portland cement concrete for temperatures above 600 °C. The microstructural tests of the slag paste point to the formation of phases that are more stable at high temperatures. Such phases would be responsible for the performance of the material in a fire situation.

Keywords: High resistance. Activated slag concrete. Residual properties. Fire safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estimativa da produção de Escória de Alto Forno (EAF) no mundo (a) e Brasil (b).....	16
Figura 2 –	Face (a) e tardoza (b) de painel de concreto com diferentes agregados indicados após queima e resfriamento brusco.....	21
Figura 3 –	Temperaturas medidas e calculadas no pilar.....	22
Figura 4 –	Comportamento de um pilar de concreto armado sob fogo, carregado excentricamente – medido (contínuo) versus calculado (tracejado).....	23
Figura 5 –	Representação esquemática dos históricos de carregamento e temperatura para ensaios no regime estacionário de temperaturas.....	26
Figura 6 –	Curva tensão-deformação do concreto em função da temperatura elevada.....	28
Figura 7 –	Mudança na coloração do concreto: superfícies com agregados expostos e externa dos espécimes.....	33
Figura 8 –	Correlação entre Propriedades Residuais do concreto e diferenças colorimétricas (ΔE).....	34
Figura 9 –	Ensaio de pórtico tridimensional (a) em escala real submetido a incêndio (b) e carregado posteriormente (c).....	36
Figura 10 –	Resistência à tração na flexão (a) e compressão (b) de argamassas à base de escória ativada para diferentes ativadores.....	41
Figura 11 –	Resistência à compressão (a) e Módulo de Elasticidade (b) dos espécimes de escória álcali-ativada (AAS) e cimento Portland convencional (OPC).....	43
Figura 12 –	Retração (a) e fluência (b) dos concretos de escória (AAS) e cimento convencional (OPC).....	44
Figura 13 –	Efeitos do aumento do teor de Na_2O e módulo de sílica em pastas de escória álcali-ativada com teores de (a) 4% de Na_2O , (b) 6% de Na_2O e (c) 10% de Na_2O	45
Figura 14 –	Evolução das propriedades da interface em argamassas de escória ativada desde o primeiro dia ao terceiro mês.....	46

Figura 15 – Resistência relativa residual à compressão e à tração na flexão obtidas nas argamassas.....	50
Figura 16 – Resistência residual à compressão de pastas de escória álcali-ativadas.....	51
Figura 17 – Resistência relativa residual à compressão (a) e à flexão (b).....	54
Figura 18 – Resistência residual à compressão para os concretos: de cimento Portland convencional (OPCC), de escória álcali-ativada (AASC) e compostos na proporção de 50% (50/50).....	55
Figura 19 – Resistência residual do concreto de escória ativada para as diversas dosagens de Na ₂ O nas condições de cura ao ar (A), em solução saturada de NaOH (B), sob umidade relativa de 80% e temperatura de 60 °C (C) em comparação ao concreto convencional (OPC).....	57
Figura 20 – Secagem (a) dos agregados miúdo (b) e graúdo (c).....	61
Figura 21 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo utilizados nos concretos confeccionados.....	62
Figura 22 – Pesagem insumos com menor precisão (a), maior precisão (b) e mistura em argamassadeira (c).....	66
Figura 23 – Lançamento (a), adensamento (b) e selagem (c) dos espécimes.....	67
Figura 24 – Corpos de prova de pasta de escória e cimento Portland na moldagem (a) e selagem (b).....	68
Figura 25 – Identificação dos exemplares confeccionados após retificação.....	69
Figura 26 – Massa dos concretos de escória (a) e cimento Portland (b) armazenados em estufa a 105 °C em função do tempo.....	70
Figura 27 – Representação esquemática do aquecimento dos corpos de prova.....	71
Figura 28 – Corpos de prova no interior do forno elétrico após resfriamento lento.....	71
Figura 29 – Termopares e sistema de leitura de dados.....	72
Figura 30 – Linhas tracejadas indicando as posições de medida tomadas dos corpos de prova cilíndricos para diâmetro (a) e altura (b).....	73
Figura 31 – Pesagem de massa seca (a) de corpos de prova e submersa (b).....	74
Figura 32 – Ensaio de determinação de Velocidade de Pulso Ultrassônico através do concreto (a) e registro de leituras computacional (b).....	75
Figura 33 – Corpos de prova na prensa (a) e forma de ruptura de corpo de prova (b)....	77

Figura 34 –	Massa relativa dos concretos de escória (a) e cimento Portland (b) armazenados em estufa.....	79
Figura 35 –	Temperatura dos gases no forno elétrico e dos concretos de escória álcali-ativada e cimento Portland.....	80
Figura 36 –	Absorção e índice de vazios nos concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC).....	82
Figura 37 –	Massa específica dos concretos de escória ativada (a) e de cimento Portland (b) em função da temperatura.....	83
Figura 38 –	Comparação do aspecto visual externo dos concretos de escória ativada e cimento Portland (a) coloração esverdeada no núcleo do concreto de escória (b) e fissuração no espécime de cimento Portland (c).....	84
Figura 39 –	Resistência residual à compressão para os concretos de escória ativada (a) e cimento Portland (b).....	88
Figura 40 –	Correlação entre perda relativa de resistência residual à compressão e perda relativa residual de Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU).....	92
Figura 41 –	Resistência à compressão residual versus Velocidade de Pulso Ultrassônico nos concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC).....	93
Figura 42 –	Módulo de elasticidade dinâmico residual para os concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC).....	95
Figura 43 –	Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico residual e resistência residual à compressão para os concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC).....	96
Figura 44 –	Resultados de ensaios DRX para o traço II da pasta de escória ativada em função das temperaturas de ensaio.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Vantagens dos cimentos e concretos de escória álcali-ativada em comparação a seus análogos em cimento Portland tradicional.....	14
Tabela 2 –	Fatores de redução $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2000 kg/m ³ a 2800 kg/m ³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos.....	31
Tabela 3 –	Fatores de redução de resistência e módulo de elasticidade estático para CAR ensaiado por Lima (2005) em função da temperatura de exposição.....	33
Tabela 4 –	Tabela resumo dos estudos de concreto em situação de incêndio.....	37
Tabela 5 –	Porosidade, densidade aparente, resistências à compressão e à tração na flexão.....	49
Tabela 6 –	Resultados absolutos de resistência residual à compressão e à tração na flexão em função do agregado (miúdo) utilizado.....	53
Tabela 7 –	Propriedades da escória de alto forno e cimento Portland.....	63
Tabela 8 –	Composição química em teor de óxidos (%) da escória de alto forno e cimento Portland.....	63
Tabela 9 –	Propriedades do silicato de sódio.....	64
Tabela 10 –	Propriedades do superplastificante Hyperkem TM 42.....	64
Tabela 11 –	Resumo do consumo dos traços de concreto de cimento Portland confeccionados.....	65
Tabela 12 –	Resumo do consumo dos traços de concreto de cimento Portland confeccionados.....	66
Tabela 13 –	Resistência à compressão para os concretos de escória ativada ensaiados...	86
Tabela 14 –	Resistência à compressão para os concretos de cimento Portland ensaiados.....	87
Tabela 15 –	Resistência residual relativa média à compressão dos espécimes de escória ativada e cimento Portland.....	90
Tabela 16 –	Resultados de velocidade de pulso ultrassônico para os concretos de escória ativada e cimento Portland ensaiados no modo direto.....	91
Tabela 17 –	Módulo de elasticidade residual dinâmico para os concretos de escória ativada e cimento Portland.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO (ABORDAGEM CRONOLÓGICA)	20
2.2	CONCRETO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADA.....	39
2.2.1	Ativação alcalina.....	39
2.2.2	Propriedades mecânicas.....	40
2.2.3	Retração e fluência.....	43
2.2.4	Hidratação da escória álcali-ativada.....	45
2.2.5	Propriedades residuais.....	48
2.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	58
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	60
3.1	MATERIAIS.....	60
3.1.1	Agregados.....	60
3.1.2	Ligantes.....	62
3.1.3	Ativador.....	64
3.1.4	Superplastificante.....	64
3.2	METODOLOGIA.....	65
3.2.1	Preparo dos corpos de prova.....	66
3.2.2	Remoção de umidade dos corpos de prova.....	69
3.2.3	Aquecimento dos corpos de prova.....	70
3.2.4	Instrumentação dos corpos de prova.....	72
3.2.5	Controle geométrico.....	73
3.2.6	Absorção, índice de vazios e massa específica.....	73
3.2.7	Velocidade de Pulso Ultrassônico.....	74

3.2.8	Resistência à compressão.....	76
3.2.9	Difração por Raios X (DRX).....	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
4.1	TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA.....	78
4.2	MONITORAMENTO DE TEMPERATURAS.....	79
4.3	ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA.....	81
4.4	ASPECTO VISUAL.....	83
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	85
4.6	VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO.....	90
4.7	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
	REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

A busca pós-moderna por sustentabilidade, eficiência energética, as transformações do mercado, o estabelecimento dos preceitos de desempenho e durabilidade, a difusão de perspectivas multicritérios e a curiosidade do homem por inovação tem conduzido o meio técnico a perspectivas de novos materiais para serem usados como ligantes, em substituição do consagrado cimento Portland. Surgida na Ucrânia em meados do século XX, a ideia de produção de concretos à base de escória álcali-ativada vem ganhando espaço nas pesquisas, que já pontuam diversas vantagens sobre o concreto de cimento Portland convencional.

Autores como Puertas (1995) e Wang et al. (1995) listam diversos ganhos do uso de concreto de escória álcali-ativada sobre o concreto de cimento Portland (Tabela 1), sendo boa parte dos quais também verificáveis, em certo grau, nos concretos com substituição parcial do clínquer. Tais vantagens são comentadas também por autores como Collins e Sanjayan (1999), Collins e Sanjayan (2000), Bakharev et al. (2000), Collins e Sanjayan (2001), Mehta e Monteiro (2001), Mehta (2003), Al-Otaibi (2008), Chi (2012), Gjrv (2015) e Chi (2016). Além do quê, diversas aplicações da escória ativada, factíveis em uso estrutural, são avaliadas por Provis (2018), oferecendo destaque aos predicados deste ligante alternativo. Naturalmente, alguns cuidados especiais, que podem ser vistos como desvantagens, também estão listados na literatura.

Substituições da ordem de 80% de cimento Portland por escória de alto-forno na produção de concretos com relação água/ligante de 0,40 conduziram a valores de difusividades de cloretos da ordem de $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ aos 28 dias, chegando até a $1,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ após um ano, o que represente cerca de 17% da difusividade obtida para concreto de cimento Portland tradicional na mesma idade, conforme Gjrv (2015); resultado semelhante fora obtido por Al-Otaibi (2008) quando substituição de 60% em concreto de fator água/ligante foi fixado em 0,48 apresentou redução da permeabilidade aos cloretos da ordem de 50% e 75% aos 28 e 180 dias, respectivamente. A probabilidade de corrosão de armaduras protegidas por um concreto de tal matriz porosa resulta inferior ao verificado em concretos convencionais.

Tabela 1 – Vantagens dos cimentos e concretos de escória álcali-ativada em comparação a seus análogos em cimento Portland tradicional

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Resistência mecânica maior e de desenvolvimento mais rápido	Endurecimento mais rápido
Menor calor de hidratação	
Melhor impermeabilidade	
Melhor comportamento frente a carbonatação	Possibilidade de que se produza maior reação álcali-agregado
Maior resistência ao gelo-degelo	
Maior resistência a altas temperaturas	
Maior resistência a ataque químico	Maior retração e formação de microfissuras
Maior resistência da zona de transição	
Maior proteção das armaduras metálicas	
Resistência bacteriológica e biocida	Maior formação de eflorescências
Menor custo e maior economia de energia	

Fonte: Adaptado de Puertas (1995).

Não obstante as linhas de investigação relativas à durabilidade do concreto de escória ativada figurarem em tom modesto frente ao concreto de cimento Portland convencional, avanços fundamentais na consolidação do conhecimento da durabilidade deste concreto são constatados em Al-Otaibi (2008), Chi (2012) e Chi (2016) dentre outros. O mesmo é visto com apreciável margem de desempenho na matéria sobre o concreto convencional.

Com o avanço das tecnologias, do processo produtivo, do meio socioeconômico, do conhecimento dos direitos do consumidor (usuário das edificações) e a edição da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) relativa ao desempenho das edificações, a engenharia tem perseguido o atendimento às mais diversas prescrições relativas a sustentabilidade e desempenho. A segurança das estruturas em situação de incêndio também foi contemplada pela referida norma e, para o atendimento da mesma, faz-se necessário o conhecimento do comportamento do material usado, inclusive em situação de incêndio.

Dessa forma, atenção especial recai na segurança estrutural, isto é, a avaliação das propriedades resistentes do arcabouço estrutural para o caso das altas temperaturas atingidas durante um incêndio. Em busca da mitigação dos riscos de colapso, ou seja, superação do Estado Limite Último de Ruína, a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) estabelece a necessidade de atendimento das normas NBR 14432 (ABNT, 2001), na minimização do risco de colapso, e da NBR 15200 (ABNT, 2012), quando da análise estrutural em situação de incêndio.

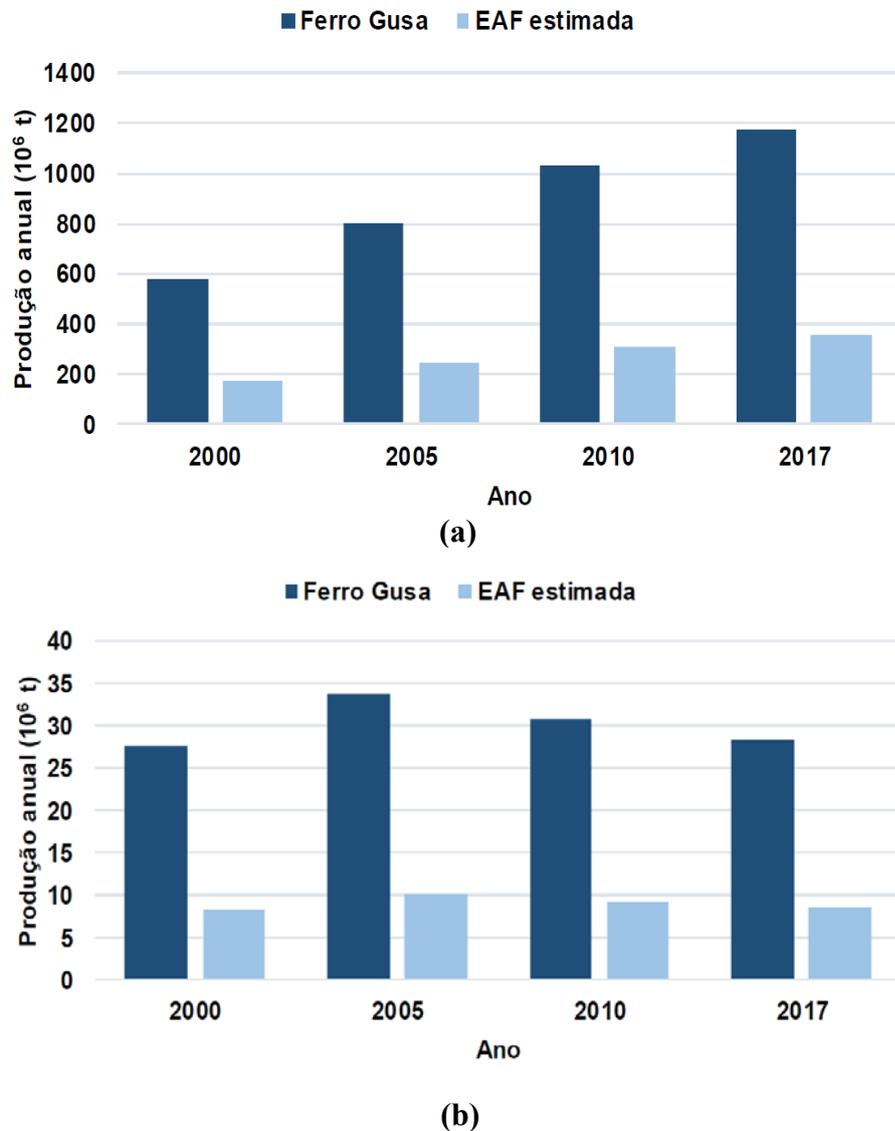
1.1 JUSTIFICATIVA

Resultados obtidos por Zuda et al. (2006), Guerrieri et al. (2009), Chi (2012) e Rovnaník e Dufka (2015) apontam para capacidade de recuperação ou manutenção de resistência residual à compressão de argamassas e/ou concretos de escória ativada sob altas temperaturas o que torna este material e esta propriedade relevantes para a Segurança Contra Incêndio (SCI). A degradação de compostos hidratados, bem como a capacidade de reorganização da microestrutura, ou mesmo formação de novas estruturas cristalinas, seriam responsáveis pelo bom desempenho deste concreto sob altas temperaturas.

É válido ressaltar que a utilização de escória ativada como ligante substituto do cimento Portland é relativamente menos conhecida ou divulgada nos meios produtivos e, em escala relativamente modesta, nos centros de formação profissional. Sendo mais comuns os estudos e pesquisas nos estágios de utilização em pasta e/ou argamassas; de menor disponibilidade ainda se mostra a literatura relativa a tal concreto em situação de incêndio.

Frente a estimativa de produção mundial em torno de 120 milhões no ano de 2005 citada por Dal Molin (2005), Araújo Júnior (2019) aponta produção mundial de aproximadamente 380 milhões de toneladas de escória de alto-forno em 2017 a partir de uma estimativa de que 30% do Ferro Gusa produzido se torne Escória de Alto Forno (Figura 1a). Na Figura 1a, tem-se as estimativas de produção de Escória de Alto Forno no mundo e na Figura 1b, tem-se a estimativa para o Brasil.

Figura 1 – Estimativa da produção de Escória de Alto Forno (EAF) no mundo (a) e Brasil (b)



Fonte: Araújo Júnior (2019).

Segundo Dal Molin (2005), em 2004 o Brasil teria produzido cerca de 11,4 milhões de toneladas de escória de alto-forno (EAF). O Brasil representaria em 2017, cerca de 2 a 2,5% da produção mundial de escória ainda segundo Araújo Júnior (2019), claro indicativo de seu considerável potencial de desenvolvimento de concretos sustentáveis e de grande desempenho utilizando escória de alto-forno como o ligante substituto do tradicional cimento Portland

(Figura 1b). Configurando-se, deste modo, boa interação entre economia e sustentabilidade no uso deste concreto.

Uma forma disponível para representar a influência da temperatura na resistência dos materiais componentes consiste na aplicação de coeficientes retirados de curvas resistência-temperatura, onde a resistência na temperatura elevada, nada mais é do que o produto da resistência obtida na condição ambiente por um certo coeficiente de redução, função das propriedades térmicas do cimento utilizado, agregado, temperatura, duração da exposição, tipo de solicitação, etc. Consideração análoga pode ser feita para o módulo de elasticidade do material. A análise do comportamento em situação de incêndio de um material pode ser de modo a contemplar a resistência exatamente à temperatura elevada ou mesmo sua resistência residual. Este trabalho opta pela análise do concreto de escória álcali-ativada em termos de resistência residual.

1.2 OBJETIVOS

Neste item são apresentados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Contribuir no conhecimento das propriedades mecânicas residuais do concreto de alta resistência à base de escória ativada mediante uso de silicato de sódio, no conhecimento de sua microestrutura e viabilidade de uso em Segurança Contra Incêndio (SCI).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são, dentre outros:

- Confeccionar concreto de alta resistência utilizando substituição total do cimento Portland por escória álcali-ativada;

- Avaliar a influência da relação água/ligante nas propriedades físicas (absorção, índice de vazios e densidade) residuais do concreto de escória álcali-ativada buscando correlação destas propriedades com a resistência;
- Construir curvas resistência residual-temperatura e módulo dinâmico residual-temperatura dos concretos de cimento tradicional e de escória nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C e as relações água/ligante de 0,28, 0,36 e 0,44;
- Analisar a composição, estabilidade e eventuais alterações dos compostos hidratados da pasta dos ligantes antes e pós-fogo, elucidando pontos teóricos relativos a hidratação do cimento de escória, pontuando semelhanças e diferenças relativas ao concreto de cimento convencional.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 reservou-se à introdução do tema do concreto de escória em situação de incêndio, bem como apresentando justificativa para a abordagem do tema a nível de pesquisa de mestrado.

No capítulo 2, foi estabelecida a fundamentação teórica presente no estado da arte. A abordagem passa pelas primeiras referências encontradas sobre avaliação de propriedades resistentes de concretos em situação de incêndio, acompanhando de modo geral o direcionamento/avanço dos modelos, materiais e estudos propostos até o surgimento do concreto de escória ativada no âmbito histórico. Na vertente do concreto de escória ativada, são abordados referenciais teóricos relativos às suas propriedades mecânicas frente às do concreto convencional, ativadores utilizados, comportamento quanto à retração, fluência, mecanismo e produtos de hidratação, concluindo na abordagem das propriedades residuais de argamassas e concretos de escória ativada.

No capítulo 3, são caracterizados os materiais utilizados, consumo e método de dosagem utilizado, além dos equipamentos, procedimentos e métodos aplicados na confecção dos

espécimes, instrumentação, acondicionamento, cura, secagem, queima, ruptura, etc. Deste modo, procura-se ensejar a reprodutibilidade dos resultados, bem como avanço na temática.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos do programa experimental estabelecido, os resultados obtidos, registros do trabalho desenvolvido estabelecendo pontes entre o referencial teórico e o trabalho ora realizado.

No capítulo 5, são postas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, procede-se com a apresentação de diversos dos estudos constituintes da trama do conhecimento sobre concreto em situação de incêndio, suas muitas etapas e marcos, culminando na revisitação compilatória da situação de pesquisa e uso de concretos de escória ativados alcalinamente.

Sendo resistência ao fogo geralmente considerada em dois níveis: ao nível do próprio material e ao nível dos elementos estruturais compostos a partir do concreto. A revisão cronológica do estado da arte deixa claro o enfoque das pesquisas ainda caminhando sob o espectro bipartido: material e peça; ainda assim, permite capturar o consolidado, bem como as lacunas a serem preenchidas neste campo do conhecimento.

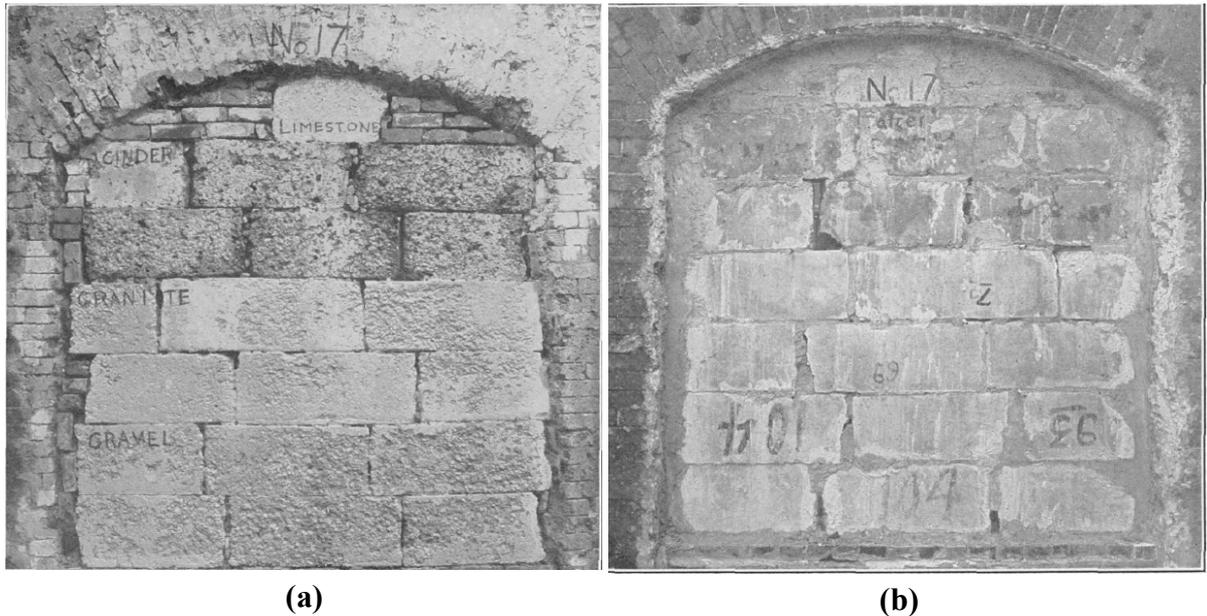
2.1 CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO (ABORDAGEM CRONOLÓGICA)

Os estudos pioneiros do concreto sob fogo remontam ao início do século XX. Autores abordam o tema com vistas na capacidade de resistência ao fogo. Dentre eles, Humphrey (1909) apresenta relatório de ensaios de diversos materiais, dentre eles blocos e vigas de concreto constituídos de diversos agregados, sob ação do fogo, checando ocorrência de lascamento (*spalling*), temperaturas resistidas e fissuramento ao longo do tempo, seguindo-se ponderação das propriedades de resistência após o fogo, nas situações de aquecimento oferecidas ao longo dos ensaios: carga de temperatura em uma ou ambas as faces das amostras dispostas nos painéis. As conclusões obtidas pelos autores referem-se de modo objetivo à resistência dos materiais ao fogo, ou dito de outro modo, ao tempo necessário para fissuramento e *spalling* dos painéis expostos ao ensaio (Figura 2).

Anderberg e Thelandersson (1976), utilizaram base teórica de resistência e deformação do concreto (em suas diversas parcelas) confrontada com o comportamento de corpo de prova de 75 mm x 150 mm ensaiados sob diversas variáveis como: queima sob tensão constante, tensão

constante após queima, queima até a ruptura, etc. Os autores obtiveram resultados sensivelmente precisos para a época, de modo a concluir a validade da modelagem proposta.

Figura 2 – Face (a) e tardo (b) de painel de concreto com diferentes agregados indicados após queima e resfriamento brusco



Fonte: Humphrey (1909).

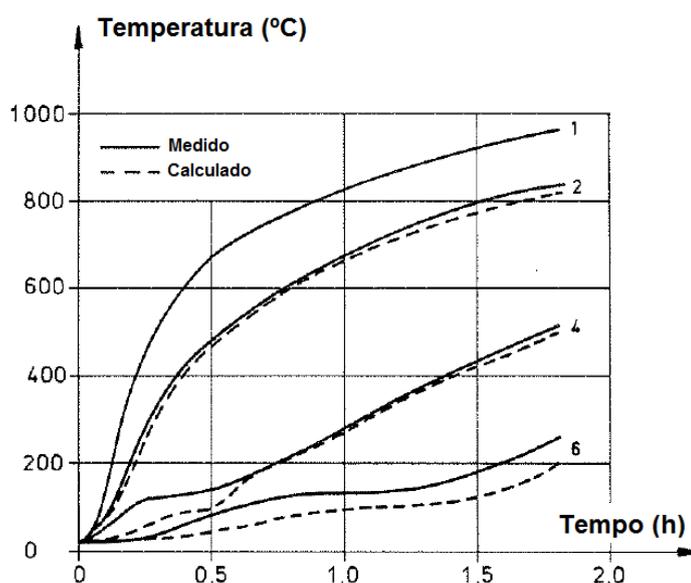
Em estudo de avaliação das propriedades do concreto sob elevadas temperaturas a fim de prever seu comportamento quando utilizado em vigas e/ou lajes convencionalmente armadas ou protendidas, bem como a distribuição de temperaturas interna às peças dentre outras variáveis como a influência da escolha dos agregados nas propriedades e desempenho termomecânica, Abrams (1977) constata que associada à distribuição de temperaturas nos elementos, tem-se a redução relativa da capacidade resistente a partir do quê o procedimento de análise em camadas brota naturalmente, sendo ainda feito na atualidade.

Em peças de concreto sob condições de contorno termicamente definidas (aquecimento rápido), Bazant e Thongutai (1979) apresentam previsão da pressão exercida pelo vapor de água no interior dos poros do concreto (poropressão da água) quando da queima das peças,

haja vista a importante correlação existente entre a poropressão no aquecimento e o comportamento termomecânico do concreto. Lançando mão de análise teórica e equacionamento diferencial associada a estudo experimental calibrante dos resultados teóricos, os autores embora não tenham logrado exatidão nos prognósticos, lançam luz em importante variável do problema: o teor de umidade presente no concreto exposto ao fogo.

Seguindo já o ideal da predição do comportamento de peças de concreto armado e protendido, lançando mão de *softwares* computacionais com alimentação de modelos físicos teóricos de tensão-deformação tanto do concreto como do aço da armadura, Anderberg e Fórsen (1982) se dispõem na análise termomecânica acoplada. É possível verificar a previsão térmica (Figura 3) bem como a acurácia da proposição feita pelos autores na Figura 4.

Figura 3 – Temperaturas medidas e calculadas no pilar

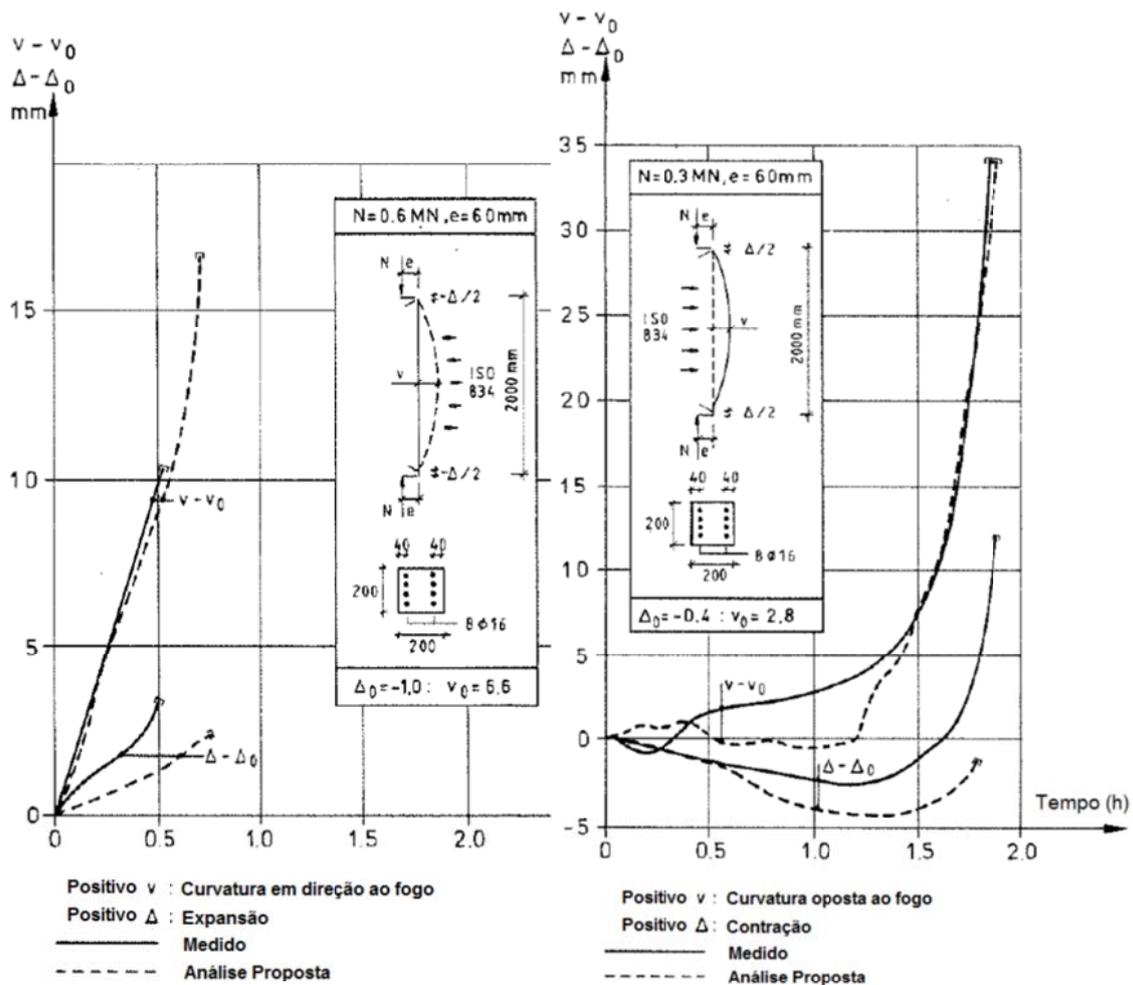


Fonte: Adaptado de Anderberg e Fórsen (1982).

A análise assume, portanto, caráter iterativo, utilizando como *input* da análise mecânica a precedente análise térmica. A modelagem física simplificada do concreto levou em conta as parcelas da deformação relativas às ações térmica, mecânica, de fluência e de transiente

termomecânico; no aço, por outro lado, foi desprezada a parcela transiente. Referente às deformações de origem térmica, incluindo a retração, foi obtida em espécimes sob temperatura variável; na parcela mecânica, baseada nas relações tensão-deformação obtidas sob temperatura constante e estabilizada; na parcela de fluência, ou dependente do tempo, esta foi medida sob temperatura constante e estabilizada; quanto à preponderante parcela de transiente, contabiliza o efeito causado pelo aumento de temperatura sob tensão constante.

Figura 4 – Comportamento de um pilar de concreto armado sob fogo, carregado excentricamente – medido (contínuo) versus calculado (tracejado)



Fonte: Anderberg e Försen (1982).

Silva (1997) avança na mesma direção de estudo, ao avaliar o comportamento resistente de peças de aço e peças mistas submetidas a temperatura no domínio do tempo, isto é, faz uso das curvas de incêndio, discutindo a capacidade de representação das quase coincidentes curvas de incêndio padrão ISO 834 (1975) e ASTM E 119 (1988); tal contraponto é perfeitamente válido, haja vista que tais curvas padrão somente ascendem, enquanto no incêndio real, ou natural, tem-se ramo ascendente e posterior ramo descendente.

Daí por diante, o padrão dos estudos se consolida sob o espectro computacional e numérico. *Softwares* baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) tornam-se a via principal de curso da pesquisa de Silva (1997), refletindo a tendência não somente da realização de simulação térmica, mas termomecânica. A partir desta análise acoplada e das recomendações normativas brasileira e europeia, o autor propõe metodologia simplificada para dimensionamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio.

É interessante constatar o fato de que: neste período a metodologia de análise de estruturas em situação de incêndio já havia se cristalizado, porém, em grande maneira, direcionada às edificações em aço. Por outro lado, de maneira ainda incipente, normatização brasileira da temática do concreto em situação de incêndio fora editada nas páginas da NBR 5627 (ABNT, 1980).

Na cadência do desenvolvimento, evolução tecnológica do concreto, métodos de dosagem, controle de qualidade na execução, etc., os concretos de alta resistência passam a ganhar mais espaço em meados do século XX, contando com edificações emblemáticas na resistência à compressão, algumas das quais listadas por Aïtcin (2000). Naturalmente, boa parte das linhas de pesquisa volta-se na direção da avaliação do desempenho dos “superconcretos” em situação de incêndio, não menos pela atividade investigativa da academia do que pelos acidentes envolvendo incêndio nas estruturas de concreto.

Em termos de microestrutura, sabe-se que a microestrutura do concreto de alto desempenho é mais densa, contando com uma zona de transição com o agregado graúdo delgada ou mesmo

inexistente (AITCIN, 2000). Daí, as propriedades mecânicas do agregado graúdo influenciam algumas das propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. Segue-se que a lei da relação água/ligante não é mais verdadeira no caso de alguns concretos de alto desempenho quando utilizados agregados de baixa densidade. Neste caso, a ruptura ocorre através do agregado, indicando ser ele o ponto mais frágil do concreto. Além do quê, espera-se sensível influência dos agregados também em seu desempenho em situação de incêndio.

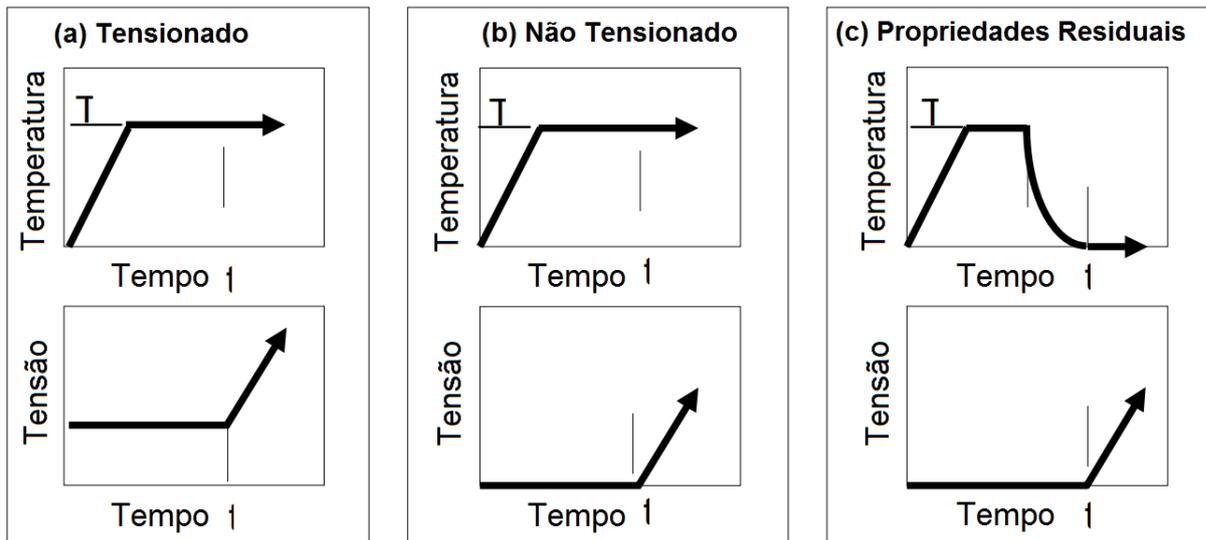
Dado que o uso do Concreto de Alta Resistência (CAR) em pilares de edificações permitiria maior área útil da obra, o uso deste concreto foi intensificada nessa peça estrutural, direcionando conseqüentemente o interesse dos pesquisadores no desempenho da peça com ele confeccionada. Orientando-se por este vetor, Kodur (1999) estabelece diretrizes do comportamento mediante ao fogo de concretos de alta resistência frente ao convencional; pontuando a influência sobre o fenômeno de *spalling* da resistência à compressão do concreto, umidade do concreto, densidade, intensidade do fogo, forma e dimensões, armadura transversal, condições de carregamento e tipo de agregado. No esboço de suas recomendações: a adição de fibras de polipropileno para redução do *spalling*, bem como fibras de aço, ensejando melhor resistência à tração e reduzindo também o *spalling*, o uso de agregado carbonático em vez do silicoso, cuidados adicionais com o confinamento produzido pelos estribos, etc.

Trabalho de referência é devido a Phan e Carino (2000) na compilação dos eixos de ensaios nos concretos, em função das condições de pré-carregamento ou não, antes, durante ou após (propriedades residuais) o regime estacionário de temperatura ser alcançado. Tais condições podem ser vistas na Figura 5 e simulam estrutura por meio de ensaios subdivididos em:

- (a) pré-carregamento (*stressed tests*) antes do início do aquecimento da ordem de 20 a 40% da resistência à compressão do espécime, seguindo-se o restante do carregamento após transcorrido certo tempo no patamar estacionário de temperatura.

- (b) estrutura carregada somente após atingir o regime estacionário (*unstressed tests*), a partir do que o espécime será submetido às solicitações de carga e terá seu desempenho avaliado;
- (c) carregamento somente após resfriamento da peça aquecida (*residual properties*), em que pesaria análise de estrutura pós incêndio, neste caso o espécime ora sofre solicitação de temperatura e somente quando cessada a solicitação e seu efeito (aquecimento) se processa o carregamento.

Figura 5 – Representação esquemática dos históricos de carregamento e temperatura para ensaios no regime estacionário de temperaturas



Fonte: Adaptado de Phan e Carino (2000).

Concernente aos processos físico-químicos ocorridos no interior do concreto pelo aumento da temperatura são conhecidos e dispostos por diversos autores como Mehta e Monteiro (2001), Bertolini (2010), Hager (2013) dentre outros, tais como:

- Desidratação inicial de fases como Etringita e C-S-H a temperaturas abaixo de 100 °C;
- Liberação da água (dos poros) e evaporação por volta dos 100 °C;
- Decomposição da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em torno dos 500 °C;
- Transformação do quartzo a 570 °C;

- Decomposição das fases C-S-H acima de 600 °C;
- Descarbonatação do Calcário (CaCO_3) acima de 800 °C;
- Início de sinterização entre 1150 °C e 1200 °C.

Aprofundando a análise do desempenho das peças estruturais propriamente ditas, Meda, Gambarova e Bonomi (2002) se lançam ao estudo de peças flexo-comprimidas em concreto convencional e concreto de alto desempenho no propósito de: analisar a condição residual dos diagramas de interação dos pilares após diferentes durações de exposição ao incêndio padrão; identificar padrões de desempenho de ambos os tipos de concreto sob incêndio, de modo a permitir entendimento dos respectivos comportamentos e comparações entre si; verificar a influência da disposição da armadura no desempenho da peça, a eficácia do uso de envelopamento protetor em agregado leve, bem como trabalhar a ideia de redução da seção como artifício de cálculo para considerar danos causados pelo fogo na peça em CAR.

Meda, Gambarova e Bonomi (2002) constata experimentalmente a proteção ao fogo razoavelmente maior oferecida pelo CAR às barras de armadura, dada a menor difusibilidade deste concreto; ainda observam ganhos significativos em termos de desempenho quando feito uso de envelopamento (a base de concreto leve) da peça; estabelecem o novo diagrama tensão-deformação do material sob fogo e influência da disposição das barras, tanto mais positiva sobre a capacidade resistente da seção pós-fogo quanto mais próxima do núcleo da seção, onde a degradação da resistência mecânica é menor em relação às camadas mais externas.

O levantamento de dados de desempenho dos materiais em situação de incêndio a servir de *input* nos *softwares* de análise termomecânica passaria pela análise experimental dos concretos (de alto desempenho ou não) e aços nas condições de altas temperaturas estabelecidos por Phan e Carino (2000). Nesse sentido, a curva tensão-deformação do material configurou-se objetivo da análise acurada, havendo concessões normativas para metodologias simplificadas. A NBR 15200 (ABNT, 2012) estabelece, para os concretos do grupo I de resistência (C20 a C50), identificados por massa específica seca maior do que 2000

kg/m³ e não superior a 2800 kg/m³, o diagrama tensão-deformação do concreto submetido à seguinte equação e representado na Figura 6:

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \frac{3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)}{2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

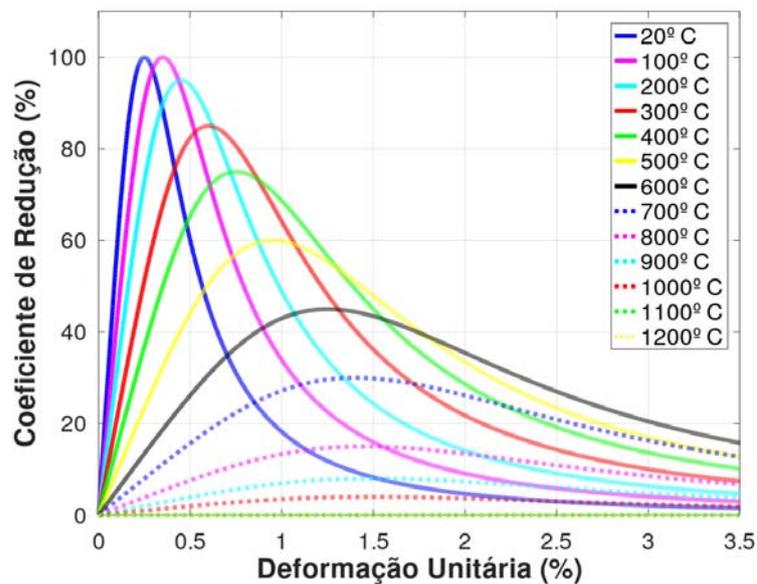
$\sigma_{c,\theta}$ é o valor da tensão à compressão do concreto à temperatura elevada θ , expresso em megapascals (MPa);

$f_{c,\theta}$ é o valor da resistência à compressão do concreto à temperatura elevada θ , expresso em megapascals (MPa);

$\varepsilon_{c,\theta}$ é a deformação linear específica do concreto à temperatura elevada θ (adimensional);

$\varepsilon_{c1,\theta}$ é a deformação linear específica do concreto correspondente à tensão máxima do concreto à temperatura elevada θ (adimensional).

Figura 6 – Curva tensão-deformação do concreto em função da temperatura elevada



Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012).

Notadamente, o aquecimento é acompanhado pela queda de resistência e maiores deformações; verifica-se brusca variação no módulo de elasticidade do material. Para Mehta e Monteiro (2001), a maior sensibilidade ao fogo do módulo de elasticidade frente a resistência mecânica é devida ao microfissuramento da zona de transição. Isto é, em situação de incêndio o microfissuramento existente na região assume maiores proporções, influenciado pelas propriedades térmicas diferenciadas entre agregados e pasta hidratada de cimento.

Hager (2013), abordando a interação do agregado graúdo e da pasta sob aquecimento de 600 °C, atribui em grande parte os danos à incompatibilidade de deformações de origem térmica entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia da pasta. O aquecimento causa o crescimento volumétrico do agregado e, concomitantemente, a contração da pasta do entorno, provocando a maior microfissuração na zona de transição.

A praticidade e simplicidade esperada pelo setor produtivo tomam forma nos métodos simplificados de análise das estruturas em situação de incêndio. Dentre tais, caracterizam-se duas zonas da estrutura em concreto afetadas em incêndio: aquelas próximas ao incêndio, onde o limite dos 500 °C foi ultrapassado e aquelas distantes ou em camadas suficientemente profundas da peça de modo que a temperatura resultasse abaixo dos 500 °C mas não inferior a 100 °C (BERTOLINI, 2010).

Afirmção interessante é colocado por Bertolini (2010): na zona com temperaturas de 500° C a 600° C a manutenção de coesão razoável do concreto admitiria considerar resistência residual à compressão pelo menos igual a 75% da original. Na estrutura, ou parte dela, distanciada do incêndio e conseqüentemente submetida a temperaturas na faixa inferior (100 – 500 °C) não seria necessária intervenção imediata visto não haver significativa alteração da resistência mecânica do concreto e esta resistência poderia satisfazer às margens de segurança estrutural.

Linha de análise semelhante é proposta no método da isoterma de 500 °C. O método consiste na consideração de uma seção reduzida de concreto em situação de incêndio, sendo indicada

por Silva (2016) para cálculo de pilares de concreto armado sob fogo. Após análise térmica e determinação das curvas isotermas, desprezando-se a parte da seção que resulte fora da isoterma de 500 °C (pelo dano causado acima dessa temperatura) e admite-se a porção de concreto dentro da tal isoterma dotado das propriedades resistentes do concreto armado à temperatura ambiente.

O método dos 500 °C é admitido na EN 1992-1-2 (EUROCODE, 2004), além de estar alinhado aos resultados de Lima (2005): “a temperatura crítica para a deterioração térmica do concreto está compreendida entre 400 e 600 °C, pois neste intervalo houve uma sensível redução das propriedades mecânicas avaliadas”.

No início do século XXI, o olhar multicritério passa a ganhar centralidade nas discussões, pesquisas e mesmo na agenda produtiva da construção civil. Naturalmente, e não obstante aos demais pontos a serem atendidos, tem-se no desempenho estrutural o foco principal do estudo da segurança das edificações em situação de incêndio.

É importante pontuar que o entendimento acerca do comportamento das estruturas mistas sob fogo é um aspecto da resistência das edificações ao fogo que, por sua vez, é componente do pacote de segurança da edificação com vistas a prover a evacuação segura dos ocupantes, na prevenção do alastramento do incêndio e minimização das perdas em termos de vida e valores monetários (WANG, 2005, p.87).

Wang (2005) ainda faz referência ao desempenho de três sistemas mistos, em diversas variantes, ao longo de sua revisão das pesquisas recentes à época: lajes, pilares e ligações sob fogo; o autor lista análise realizada através do MEF por pesquisadores, proposições analíticas, bem como ensaios feitos em escala real e reduzida. Observa a necessidade de mais estudos e pesquisas para completa compreensão do comportamento termomecânico das lajes sob deformações, seus mecanismos de falhas, o direcionamento dos estudos para as variantes construtivas mais recentes e, sobretudo, destaca a escassez de dados experimentais que subsidiem a análise e simulação estrutural global da edificação.

Usando o Método das Diferenças Finitas (MDF) no tempo e no espaço como alternativa para análise termomecânica de análise em vigas de concreto armado, Hsu e Lin (2006) modelam a capacidade resistente da peça à tração na flexão e ao corte via teoria básica de concreto armado, com equilíbrio entre zonas comprimida e tracionada da seção transversal. As mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais componentes são alimentadas por modelos normativos tais como do EUROCODE e ACI (*American Concrete Institute*). Apesar da boa precisão obtida, a modelagem não inclui o caso de redução da seção resistente nem *spalling*, muito embora os autores tenham atingido altas temperaturas devido ao aquecimento das vigas segundo a ASTM E 119 por 30, 60 e 120 min.

A NBR 15200 (ABNT, 2004), seguindo normas internacionais como o EUROCODE, aponta coeficientes de redução de resistência e módulo de elasticidade que permitem, com razoável segurança, avaliação expedita de estruturas de concreto em situação de incêndio (Tabela 2).

Tabela 2 – Fatores de redução $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos

Temperatura (°C)	Agregado Silicoso		Agregado Calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1000	0,04	0,00	0,06	0,00
1100	0,01	0,00	0,02	0,00
1200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2004).

A norma aponta para os 200 °C como temperatura a partir da qual há algum dano em termos de resistência. Parece confirmar, ao menos parcialmente, a tese do método dos 500 °C, visto que abaixo dos 500 °C cerca de 80% da resistência é, em média, mantida e acima disso, aproximadamente 50%.

Kodur (2007) transparece preocupação semelhante, ao apresentar equação para cálculo de tempo de resistência de pilares mistos, confeccionados a partir de concretos de alta resistência, em situação de incêndio, em função do agregado, da resistência do concreto, da taxa de armação, carregamento, cobrimento, etc, dado o aquecimento seguindo a ASTM E-119 (2001). Análise não-linear via MEF, com modelagem do quadro fissuratório, seria feita em lajes de concreto armado sob fogo por Liao e Huang (2018), com boa precisão de comportamento da peça, sobretudo na análise térmica e apreciável precisão na análise de deslocamentos da mesma sob ambas as cargas: térmica e mecânica.

Para diversas temperaturas (300 °C, 500 °C e 700 °C) e permanências no estado estacionário (3h, 6h, 9h), Toumi et al. (2009) analisam as propriedades residuais de espécimes cúbicos e prismáticos de concretos comuns e de alta resistência levados à temperatura de interesse através de taxa de aquecimento de 10° C/min. Observando não somente a tendência de perda de resistência a medida que os espécimes passaram mais tempo sob altas temperaturas, mas também a influência positiva da adição de fibras de polipropileno na resistência residual à compressão dos concretos comuns e de alta resistência. Por outro lado, para espécimes de alta resistência, ensaiados à tração na flexão, os autores perceberam indiferença à presença das fibras.

Já Lima (2005) avalia propriedades macro e microestruturais do concreto, pasta e argamassas de concretos produzidos sob diversas variáveis da produção e queima: temperaturas de exposição (Ambiente, 200 °C, 400 °C, 600 °C e 900 °C), tipo de agregado (granítico e basáltico), presença e teor de adições minerais (sílica ativa e metacaulim) bem como a compactidade do concreto. Uma vez elevados à temperatura preestabelecida, a uma taxa de 27,4 °C/min, os espécimes cilíndricos (10 x 20 cm) permaneceram sob tal condição por 30

min, sendo em seguida resfriados ao ar. Os resultados obtidos pelo autor para o CAR, em termos residuais relativos, para módulo de elasticidade e resistência à compressão encontram-se na Tabela 3. O autor confirma ainda a assertividade da NBR 15200 (ABNT, 2004) em seus fatores de redução, confirma o melhor desempenho de agregados basálticos, influência direta da compactação do concreto na susceptibilidade ao *spalling*, efetividade de fibras, etc.

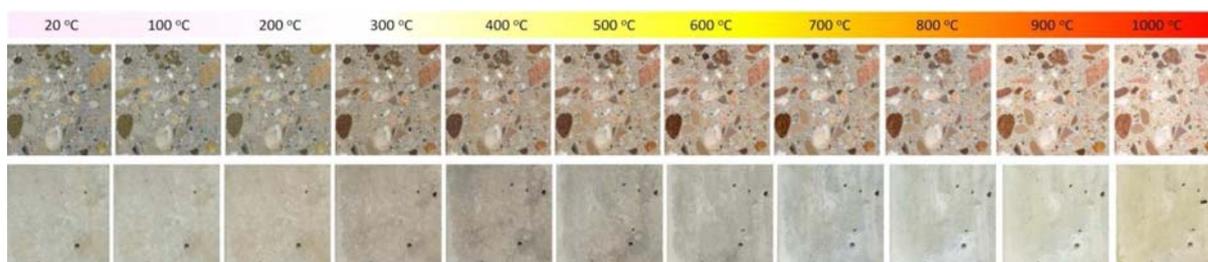
Tabela 3 – Fatores de redução de resistência e módulo de elasticidade estático residuais para CAR ensaiado por Lima (2005) em função da temperatura de exposição

Fator de Redução	Temperatura				
	Ambiente	200 °C	400 °C	600 °C	900 °C
$f_{c,\theta}/f_c$	1,00	0,97	0,87	0,62	0,18
$E_{c,\theta}/E_c$	1,00	0,93	0,77	0,26	-

Fonte: Adaptado de Lima (2005).

Considerando as variáveis: tipo de agregado, relação água/cimento e temperatura de exposição do espécime, Wendt (2006) trabalha o campo da espectrofotometria do concreto após situação de incêndio, objetivando inferir dados de propriedades residuais do concreto aquecido também a 27,4 °C/min a partir da coloração superficial do espécime. Sabe-se de estudos como em Wendt (2006) e Hager (2013) que o concreto de cimento Portland sofre mudança na coloração a medida que exposto às diversas temperaturas, variando numa escala de cinza (externamente) e coloração vívida para os agregados (interiormente), como se vê na Figura 7.

Figura 7 – Mudança na coloração do concreto: superfícies com agregados expostos e externa dos espécimes

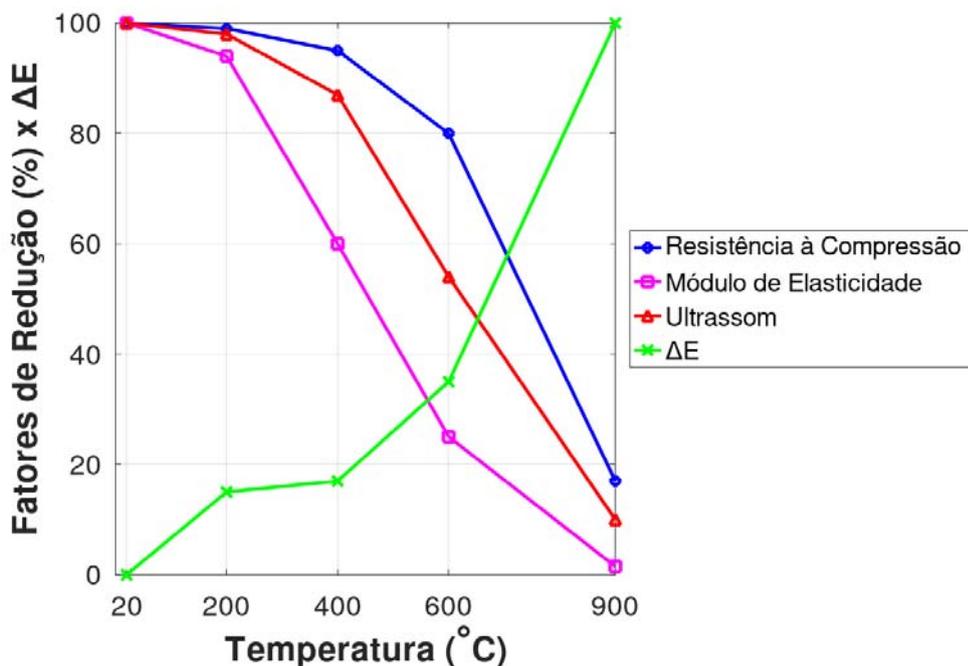


Fonte: Hager (2013).

Também Bertolini (2010) aponta que em situação de incêndio o concreto muda de cor, assumindo coloração rosa quando a temperatura fica na faixa de 300 °C e 600 °C, cinza até 900 °C e marrom a temperaturas superiores. Wendt (2006) obtém forte correlação entre as variáveis resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e velocidade de propagação de onda ultrassônico no exemplar (Figura 8).

Desta sorte, a observação expedita da coloração de uma estrutura de concreto atingida por incêndio permitiria identificar as zonas mais deterioradas, bem como fazer estimativa preliminar da severidade e extensão do dano na peça. Todavia, Wendt (2006) é clara ao afirmar que foi possível perceber diferenças de cor mais marcantes apenas nas temperaturas de 600 °C e 900 °C, de modo a se ter sentimento de imprecisão quanto à escala e tonalidade de cores dos corpos de prova queimados.

Figura 8 – Correlação entre Propriedades Residuais do concreto e diferenças colorimétricas (ΔE)



Fonte: Adaptado de Wendt (2006).

O meio mais confiável para análise da coloração dos exemplares seria, portanto, o uso de espectrofotômetro, muito embora a estimativa expedita inicial feita quando da inspeção da estrutura/concreto após incêndio preserve seu devido valor em campo.

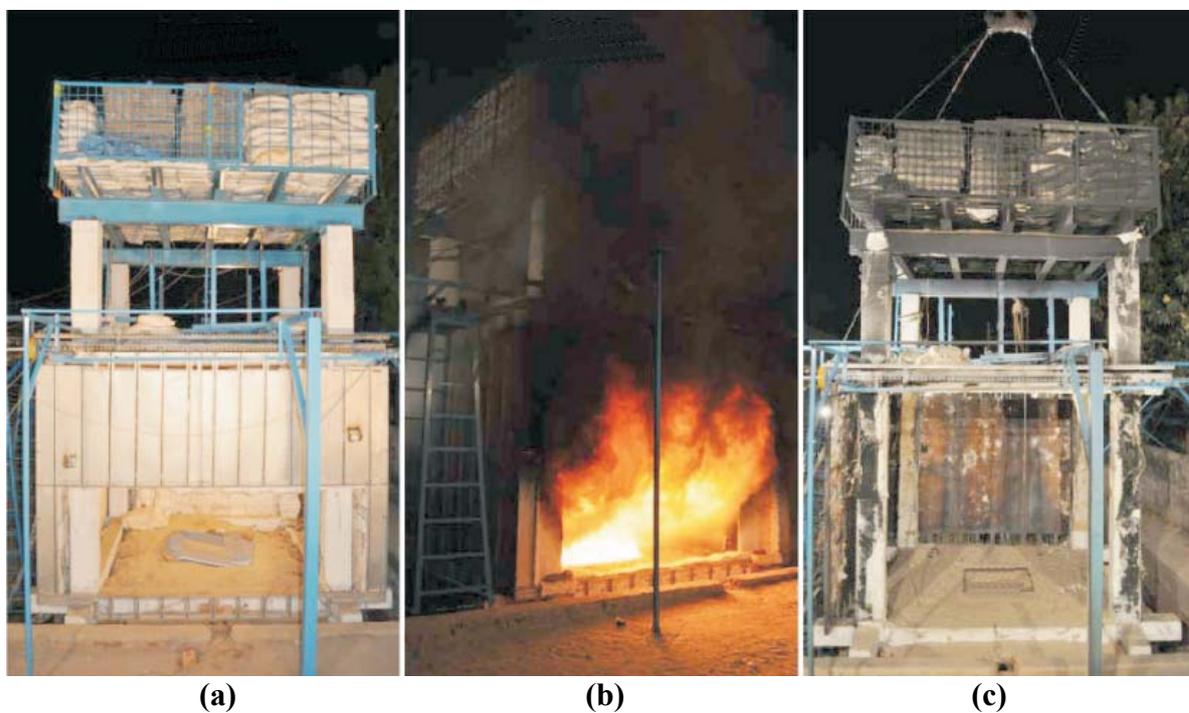
A correlação entre resistência residual à compressão e Velocidade de Pulso Ultrassônico também são explorados por Blankson e Erdem (2013) e Hager et al. (2013) para concretos de cimento Portland, sendo ele de alta resistência ou não.

Diversos outros trabalho experimentais avaliaram não apenas o comportamento das peças sob solicitação termomecânica, mas também sobre o grau de acerto e segurança da prescrição normativa, brasileira ou não (COSTA; SILVA, 2003; PIRES, 2006; KLEIN JÚNIOR, 2011).

Particular destaque pode ser oferecido a Sharma et al. (2012), dado o estudo em verdadeira grandeza com estrutura aporticada nas dimensões 3m x 3m x 3m; em que pese o pórtico haver sido previamente exposto a vibrações representantes de sismo, posteriormente o mesmo foi submetido a aquecimento agressivo (180 °C/min) e mantido por 1 hora na temperatura de 900° C sem colapsar (Figura 9) para verificação de sua integridade após o dano e distribuição de temperaturas.

Apesar de o trabalho de Sharma et al. (2012) se limitar ao registro das temperaturas atingidas pelas peças e verificar ocorrência ou não de *spalling*, estudos em escala real certamente apresentam melhor correlação com a realidade física que os modelos de corpos de prova ou mesmo das peças isoladas, de modo a ser uma provável tendência para obtenção de avanços na área de Segurança Contra Incêndio (SCI) aliada à já consagrada simulação numérica.

Figura 9 – Ensaio de pórtico tridimensional (a) em escala real submetido a incêndio (b) e carregado posteriormente (c)



Fonte: Sharma et al. (2012).

Para fins de resumo do exposto, é apresentada a seguir uma tabela (Tabela 3), onde constam, listadas por década, diversas das contribuições citadas ao longo da revisão feita neste item, objetivando demonstrar a progressão da pesquisa até o atual estado da arte. Na referida tabela, fica claro o desenvolvimento do estudo do concreto em situação de incêndio, inicialmente de maneira desintegrada e, posteriormente, de forma acoplada nos campos: da temperatura, sua distribuição, etc., bem como no campo mecânico, ou seja, na capacidade resistente durante e após aquecimento. Ressalta-se também a linha de progressão, partindo desde corpos de prova, passando pela utilização de peças estruturais e culminando nos ensaios em escala real de estruturas submetidas a incêndio.

Tabela 4 – Tabela resumo dos estudos de concreto em situação de incêndio

Década	Autor/Discussão
1900	Humphrey (1909) estuda painéis compostos por blocos de concreto, tempo para <i>spalling</i> /fissuramento, influência dos agregados e temperaturas máximas resistidas.
	Anderberg e Thelanderson (1976) avaliam o concreto a partir de corpos de prova 75 x 150 mm nas variáveis: temperatura de exposição e inferência da resistência a partir de modelos teóricos.
1970	Abrams (1977) pondera a relação entre a distribuição das temperaturas nos elementos estruturais expostos às temperaturas elevadas e a redução relativa da capacidade de carga das peças. Necessidade da avaliação/análise por camadas.
	Bazant e Thongutai (1979) utilizam modelagem teórica e equacionamento diferencial no estudo da distribuição de temperaturas em elemento estrutural submetido a altas temperaturas e previsão da poropressão no mesmo, haja vista que o fenômeno de <i>spalling</i> está associado às poropressões elevadas.
	Edição da NBR 5647 (ABNT, 1980) , fixando as condições particulares exigíveis para obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo.
1980	Anderberg e Fórsen (1982) utilizam modelagem teórica para análise termomecânica acoplada com propriedades resistentes tanto do aço como do concreto em função da temperatura. Acurácia e precisão dos resultados obtidos mostrou certa deficiência, não obstante a análise acoplada ser mais realista.
	Silva (1997) avalia por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) o comportamento resistente de peças de aço e mistas (concreto e aço) sob as curvas de incêndio normatizadas: ASTM E 119 (1988) e ISO 834 (1975).
1990	Kodur (1999) avalia o comportamento de pilares de concreto armado confeccionados com concreto de alta resistência e concreto convencional, sua susceptibilidade ao <i>spalling</i> em função do tipo de concreto, da umidade, densidade do concreto, intensidade do fogo, geometria da peça, armadura, tipo de agregado e condições de carregamento.
	Phan e Carino (2000) sistematizam os tipos de ensaio nos concretos em situação de incêndio: pré-carregado (<i>stressed tests</i>) e então submetido a temperatura elevada, carregado ao ser atingida a temperatura elevada (<i>unstressed tests</i>) e carregado após o resfriamento do concreto aquecido (<i>residual properties</i>)
2000	Mehta e Monteiro (2001) listam os processos físico-químicos ocorridos no interior do concreto em função da temperatura elevada. O que se verifica também em autores como Bertolini (2010) e Hager (2013) .
	Meda, Gambarova e Bonomi (2002) avaliaram o comportamento residual de peças flexocomprimidas de concreto armado, influência das armaduras no diagrama de interação residual, efetividade de técnicas de envelopamento, seção transversal residual resistente.

Tabela 4 (continuação) – Tabela resumo dos estudos de concreto em situação de incêndio

Década	Autor/Discussão
	<p>A NBR 15200 (ABNT, 2004) dispõe relações entre a resistência e módulo do concreto na temperatura elevada e na temperatura ambiente em função do tipo de agregado (carbonático ou silicoso), considerando os concretos de massa específica normal (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³).</p>
	<p>O método dos 500 °C é admitido na EN 1992-1-2 (EUROCODE, 2004).</p>
	<p>Wang (2005) revisa o desempenho de sistemas mistos de pilares, lajes e vigas, apontando para a necessidade de melhor entendimento do comportamento de lajes em situação de incêndio, bem como a escassez de dados experimentais que subsidiem a análise e simulação estrutural global das edificações.</p>
	<p>Lima (2005) avalia propriedades macro e microestruturais do concreto de alta resistência (CAR) através de espécimes cilíndricos 10 x 20 cm, influência positiva dos agregados basálticos, compacidade do concreto e efetividade do uso de fibras na susceptibilidade ao <i>spalling</i>, além de registrar os fatores de redução obtidos para o CAR, em função da temperatura de exposição ensaiada.</p>
2000	<p>Hsu e Lin (2006) modelam a capacidade resistente de peças de concreto armado à flexão e ao corte utilizando teoria básica do concreto armado, onde a modelagem física do material em função da temperatura foi dada por normativas como EUROCODE e ACI, obtiveram alguma precisão, todavia a modelagem não incluiu a condição de redução da seção resistente, nem considerou <i>spalling</i>.</p>
	<p>Wendt (2006) obtém boa correlação entre as variáveis: resistência residual à compressão, módulo de elasticidade estático, velocidade de pulso ultrassônico e diferenças colorimétricas obtidas mediante espectrofotômetro em concreto submetido às altas temperaturas. Trabalho semelhante é posto por Hager (2013) onde escala de cores é vista tanto na superfície externa quanto na superfície com agregados expostos em função da temperatura de exposição do concreto.</p>
	<p>Kodur (2007) apresenta equação para cálculo de tempo de resistência de pilares mistos, confeccionados a partir de concreto de alta resistência, considerando aquecimento segundo a ASTM E-119 (2001) e em função do tipo de agregado utilizado, resistência do concreto, taxa de armação, carregamento, cobrimento, etc.</p>
	<p>Klein Júnior (2011) avalia experimentalmente o comportamento de pilares de concreto armado em situação de incêndio solicitados à flexão composta normal, ponderando o grau de acerto e segurança de prescrições normativas, trabalhos semelhantes com outras peças são vistos em Costa e Silva (2003) e Pires (2006).</p>
2010	<p>Sharma et al. (2012) estudam em verdadeira grandeza estrutura apertada nas dimensões de 3m x 3m x 3m, submetida inicialmente a vibrações de simulação de sismo, porém em seguida, aquecidas agressivamente (180 °C/min) e mantida por 1h a 900 °C, com acompanhamento da distribuição de temperaturas na estrutura tridimensional e verificação da ocorrência ou não de <i>spalling</i>.</p>

2.2 CONCRETO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADA

Neste capítulo são abordados os itens referentes ao comportamento do concreto confeccionado a partir de escória ativada alcalinamente, tais como: tipo de ativador, propriedades de retração, fluência, porosidade, compostos hidratados, etc., sua influência no desempenho do mesmo, culminando no estudo de suas propriedades residuais, além disso, estudos em pastas e argamassas que sugerem aspectos do desempenho do concreto também são incluídos, inclusive em situação de incêndio.

“Escória de alto-forno é um subproduto não metálico da indústria do ferro e consiste essencialmente de silicatos e aluminatos de cálcio e magnésio” (MEHTA, 2003), as impurezas dos elementos contidos nos altos-fornos é que fornecem os elementos da sua constituição, quais sejam: minério de ferro, coque e fundente – basicamente constituído de calcário e dolomita. Quando o resfriamento da escória é lento, há formação de distintas fases cristalinas; por outro lado, quando o resfriamento é brusco não há tempo suficiente para formação de fases cristalinas e o material formado tem microestrutura vítrea (amorfa), sendo potencialmente reativo (DAL MOLIN, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2001). A escória amorfa ao passar por moagem poderá ser utilizada como ligante em substituição parcial ou total do clínquer Portland.

2.2.1 Ativação alcalina

O processo de ativação da escória foi proposto por Purdon (1940 *apud* Puertas, 1995) na década de 1940. O desenvolvimento propriamente dito de ligante de escória ativada alcalinamente viria somente duas décadas adiante com Glukhovsky (1960 *apud* Puertas, 1995). Tal concreto surgiria com maior ênfase na extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), mais precisamente na Ucrânia, anos depois.

As substâncias ativadoras têm por função, segundo Puertas (1995), de acelerar a solubilização da escória, favorecer a formação de hidratos estáveis de baixa solubilidade e favorecer a

formação de uma estrutura compacta com estes hidratos formados. Em se tratando das substâncias ativadoras propriamente ditas, o autor assim dispõe:

[...] compostos alcalinos ou alcalino-terrosos como hidróxidos (ROH , $\text{R}(\text{OH})_2$), sais de ácido fraco (R_2CO_3 , R_2S , RF), sais de ácido forte (Na_2SO_4 , CaSO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$) e sais silícicos do tipo $\text{R}_2\text{O} \cdot (\text{n})\text{SiO}_2$, onde R é um íon alcalino do tipo Na, K ou Li. Entre eles, principalmente o NaOH , o Na_2CO_3 e silicato de sódio (*waterglass*) são os ativadores alcalinos mais efetivos do ponto de vista mecânico e de outras propriedades (PUERTAS, 1995, p.54).

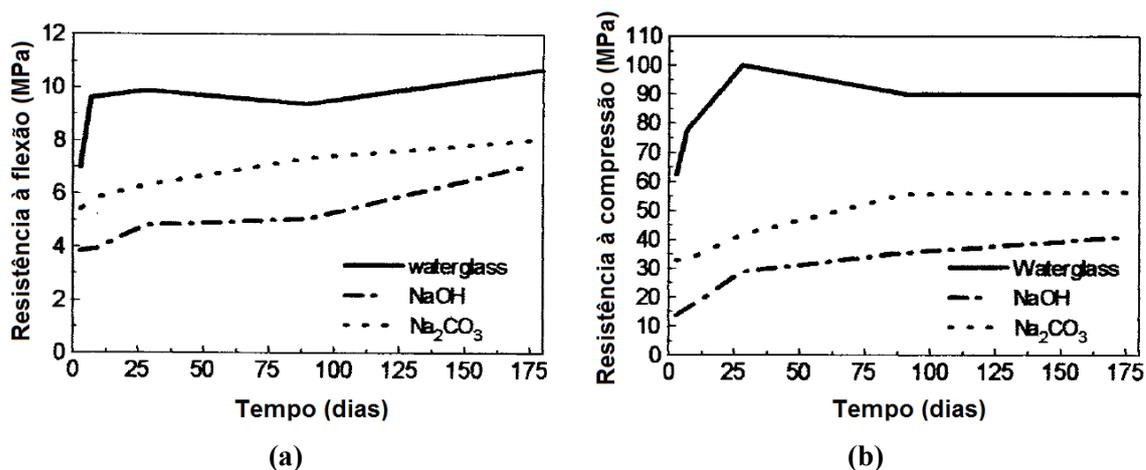
Bakharev et al. (2000) indicam que o silicato de sódio é o melhor ativador sob o ponto de vista de desenvolvimento mecânico do concreto de escória ativada. Variando o teor de Na_2O (4% e 7%) e o módulo de sílica (0,75 e 1,25) para uma relação água/ligante de 0,5 com escória neutra, o autor constata que quanto maior o teor de ativador maior a resistência à compressão enquanto a resistência de tração na flexão permanece praticamente inalterada; por outro lado, constatou-se perda acelerada da trabalhabilidade no estado fresco. Observou-se perda de resistência nas idades mais avançadas com o uso de aditivos e, em particular, da ordem de 25% aos 28 dias devido ao superplastificante, além de acentuar expressivamente a retração no concreto.

“Escória granulada de alto forno ativada com silicato de sódio em solução é a melhor fórmula para boas resistências” (WANG et al., 1999). Brough e Atkinson (2002) avaliaram argamassas de escória em sua resistência mecânica, hidratação e microestrutura, constataram menor porosidade na interface pasta-agregado miúdo quando a escória foi ativada com silicato de sódio.

A resistência desenvolvida mediante ativação com silicato de sódio avaliada pelos autores foi superior ao que se obteve com KOH (BROUGH; ATKINSON, 2002), Na_2CO_3 (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 2003) e NaOH (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 2003; BEN HAHHA et al., 2011). O desenvolvimento de resistência à compressão e à tração na flexão

(ensaio dos três pontos) mediante ativação com silicato de sódio (*waterglass*) frente outros ativadores é visto na Figura 10 para diferentes idades das argamassas.

Figura 10 – Resistência à tração na flexão (a) e compressão (b) de argamassas à base de escória ativada para diferentes ativadores



Fonte: Adaptado de Fernández-Jiménez et al. (2003).

Mithun e Narasinhram (2014) relembram que há satisfatória ativação das escórias através do silicato de sódio em faixas de módulo de sílica específicas para a natureza da escória, isto é, para escórias básicas de 1,0-1,5, para escórias neutras de 0,9 a 1,3 e, finalmente, para escórias ácidas de 0,75 a 1,25.

Por outro lado, estudos entusiasmantes têm sido realizados com cinza de casca de arroz e microsilica em solução de NaOH; apresentando desempenho superior ao silicato de sódio comercial e resistências em pastas de escória tão altas quanto 100 MPa (BERNAL et al., 2015).

2.2.2 Propriedades mecânicas

Wang et al. (1995) indicam que, sem uso de aditivos nem cuidados especiais de moldagem, concretos de 60 a 150 MPa podem ser executados com substituição total do clínquer pela

escória ativada. Araújo Júnior (2019) obteve resistência à compressão superior a 40 MPa no 1º dia e superior a 86 MPa aos 28 dias, utilizando um teor de Na₂O de 5% da massa da escória. Influenciando na resistência, o ativador utilizado parece exercer papel importante não apenas pelo desenvolvimento de resistência, mas também sob o espectro do arranjo microestrutural resultante (WANG; SCRIVENER, 1995; BAKHAREV et al., 2000; BROUGH; ATKINSON, 2002). Ben Haha et al. (2011) aponta também para o teor de aluminatos na escória como responsável por ganhos de resistência da ordem de 20% em pastas.

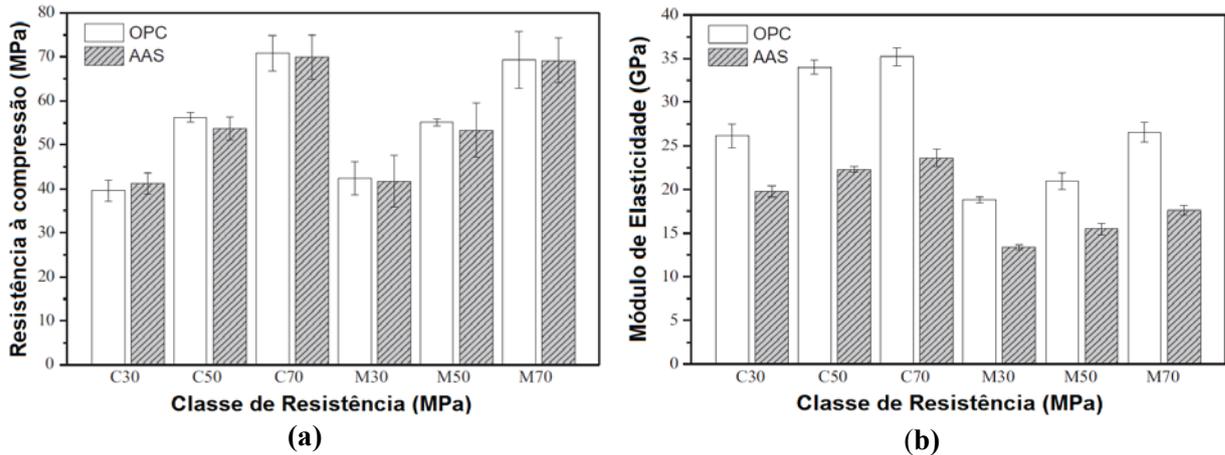
Collins e Sanjayan (1999) obtiveram resultados de superioridade da ordem de 30% sobre o convencional no quesito de resistência à tração na flexão. Uma vez mais, o módulo de elasticidade se mostrou cerca de 12% inferior ao obtido no concreto convencional, o que poderia ser agravado em serviço estrutural, não somente pelos resultados de retração e fluência do concreto de escória, mas sobretudo em situação de incêndio.

Mithun e Narasinhham (2014) avaliaram as propriedades do concreto de escória álcali-ativada curado ao ar. Dotado de fator água/ligante 0,45 com ativação alcalina a partir da mistura de NaOH e solução de silicato de sódio com módulos variáveis de sílica desde 0,5 a 1,5 (0,5; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50) as resistências cresceram crescendo o teor de Na₂O em 4, 6 e 8%; por outro lado, quando há incremento do módulo de sílica (Ms) há perda de trabalhabilidade. Um módulo de sílica ótimo foi alcançado em 1,25, onde a máxima resistência para os concretos de escória ativada são obtidas, sendo maiores em pelo menos 15 MPa que as dos concretos convencionais (numa mesma relação água/ligante 0,45) para as várias dosagens de Na₂O, sobretudo para 8% de Na₂O.

Estudo comparativo sistemático sobre as características de escória ativada e cimento Portland em concretos e argamassas foi desenvolvido por Ding et al. (2018). Dentre os resultados obtidos, destaca-se que para uma mesma resistência à compressão, ambos os concretos apresentaram semelhante resistência à tração. Por outro lado, o módulo de elasticidade dos

concretos e argamassas de escória se demonstrou cerca de 25-35% inferior aos de concreto de cimento Portland (Figura 11).

Figura 11 – Resistência à compressão (a) e Módulo de Elasticidade (b) dos espécimes de escória álcali-ativada (AAS) e cimento Portland convencional (OPC)



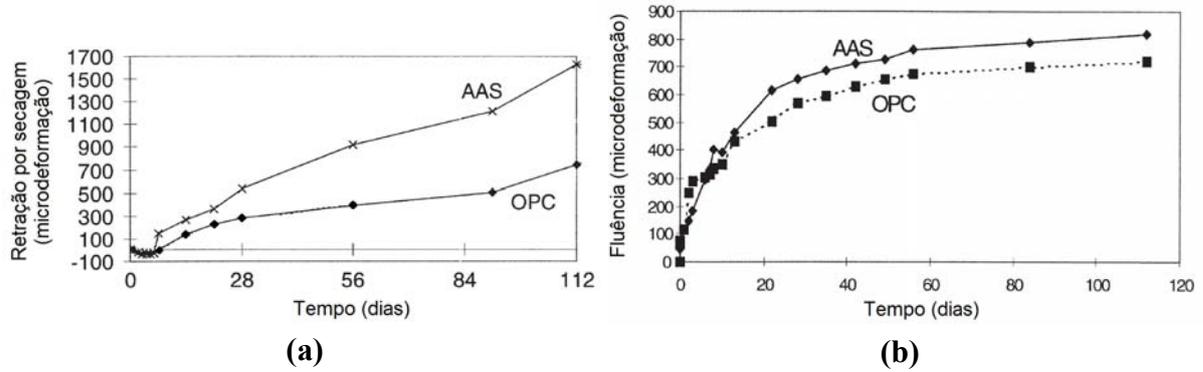
Fonte: Adaptado de Ding et al. (2018).

2.2.3 Retração e fluência

A partir de estudos realizados por autores como Collins e Sanjayan (1999), sabe-se que concretos de escória ativada apresentam retração (e fluência) superior ao concreto convencional (Figura 12). Além disso, constata-se considerável parcela de retração autógena, a qual seria influenciada de forma direta, juntamente com a retração por secagem, pelo teor de ativador utilizado no preparo de argamassas e pastas à base de escória álcali-ativada segundo o trabalho de Melo Neto (2002).

Como indicam Bakharev et al. (2000), o uso de teores maiores de silicato de sódio conduz a maiores resistências desde as primeiras idades, apresentando, porém, menor trabalhabilidade, reação imediata e endurecimento rápido do concreto. Melo Neto et al. (2008), todavia, acenam para a inafastável consequência de aumento da retração que decorreria do uso de teores mais arrojados do silicato ativador.

Figura 12 – Retração (a) e fluência (b) dos concretos de escória (AAS) e cimento convencional (OPC)



Fonte: Adaptado de Collins e Sanjayan (1999).

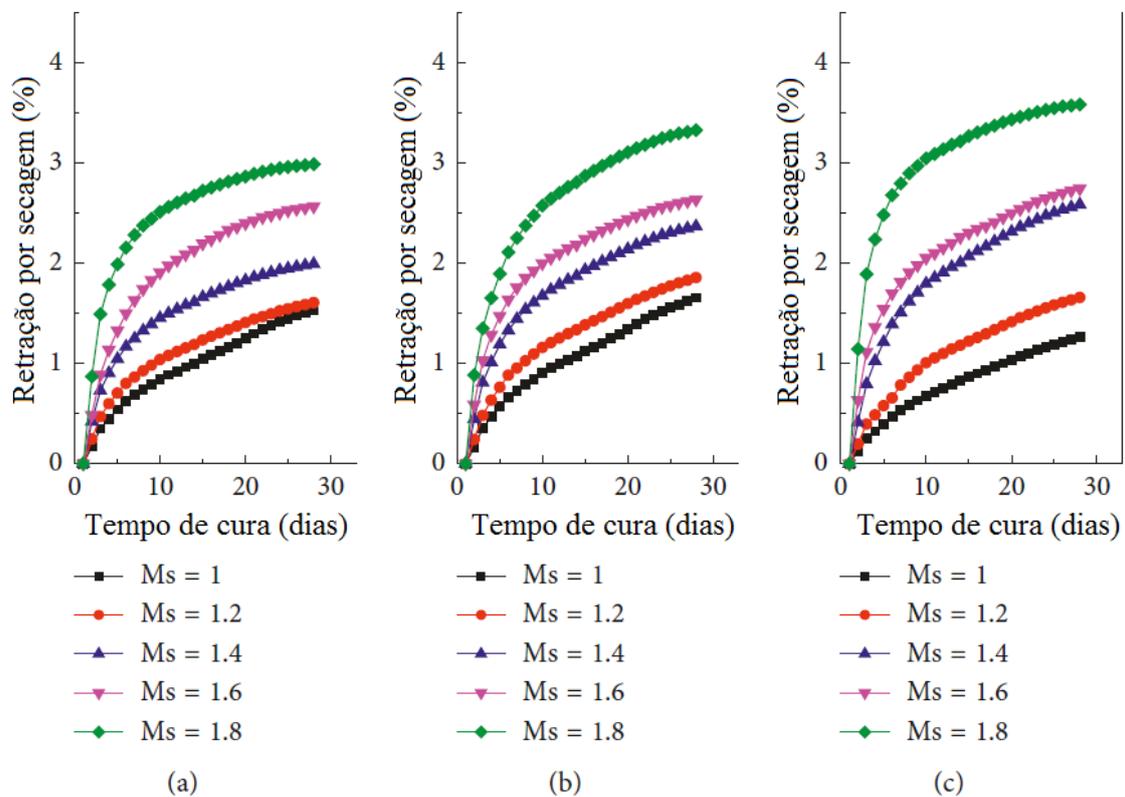
Dos resultados obtidos com ensaios de pastas, argamassas e concretos feitos a partir de escória ativada com silicato de sódio, Collins e Sanjayan (2001) depreendem que o módulo de sílica M_s ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) do ativador exerce influência inversamente proporcional na resistência às primeiras idades; os autores comentam ainda a otimização do módulo de sílica em função da natureza básica ou neutra da escória.

Chi (2012), por sua vez, verificou que a retração dos espécimes de escória ensaiados para uma fixada relação água/ligante (0,5), um dado módulo de sílica (0,8), diferentes teores de Na_2O (4, 5 e 6%) e diferentes condições de cura é invariavelmente maior que o observado no concreto convencional; além disso, quanto maior o teor de Na_2O , maior a perda de trabalhabilidade. Não obstante, o concreto de escória curado numa câmara úmida regulada para temperatura de 60 °C e umidade relativa de 80% apresentou a menor retração, em seguida apresentaram menor retração aqueles corpos de prova curados em solução de NaOH e ao ar, respectivamente. O autor indica que o C-S-H formado durante a cura quente (UR 80% e 60 °C) tem menos água, deste modo seria fundamental para o combate à retração.

Jiao et al. (2018), ao analisarem as propriedades de engenharia de pastas confeccionadas à base de escória álcali-ativada mediante uso de silicato de sódio e hidróxido de sódio à temperatura ambiente, para uma relação água/ligante fixada em 0,35 e variando módulo de

sílica (1,0; 1,2; 1,4; 1,6 e 1,8), com teores de Na_2O variando entre 6%, 8% e 10% constataram que houve crescente retração por secagem de forma proporcional ao incremento de módulo de sílica (Figura 13). Além disso, para os módulos de sílica 1,4 e 1,6 foram obtidos os menores resultados de porosidade, para um teor de 8% no Na_2O , também nestas condições foi constatado o melhor desempenho mecânico.

Figura 13 – Efeitos do aumento do teor de Na_2O e módulo de sílica em pastas de escória álcali-ativada com teores de (a) 4% de Na_2O , (b) 6% de Na_2O e (c) 10% de Na_2O



Fonte: Adaptado de Jiao et al. (2018).

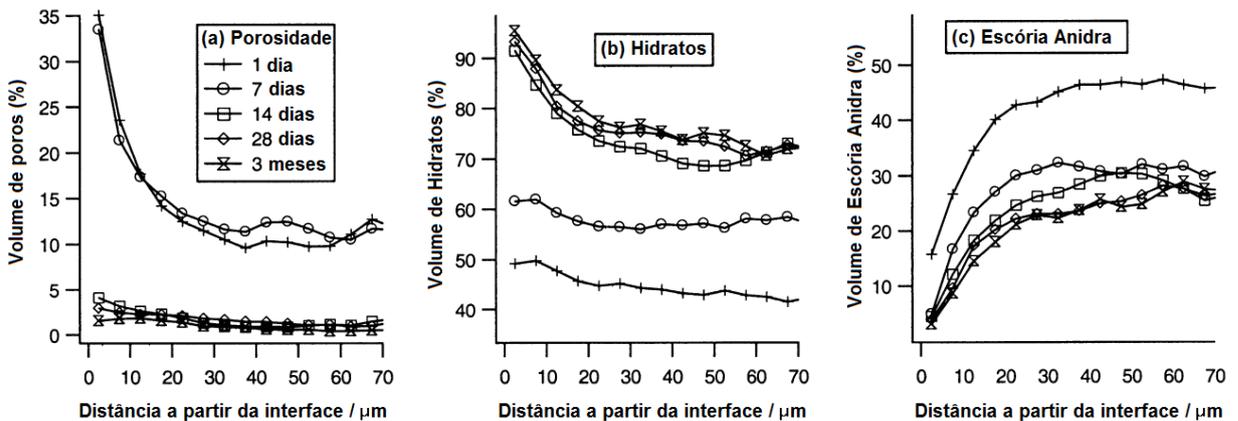
2.2.4 Hidratação da escória álcali-ativada

Concernente ao mecanismo de reação dos ligantes álcali-ativados, para Pacheco-Torgal et al. (2008), tal mecanismo ainda não é bastante entendido. Não obstante, Wang e Scrivener (1995) concluíram que independentemente do ativador usado, o principal produto de hidratação é o

silicato de cálcio hidratado com baixa relação Ca/Si em variados graus de cristalinidade, havendo ainda fases cristalinas de hidrotalcita. Tal constatação surge de forma semelhante em autores como, Silva e Agopyan (1998), Melo Neto (2002), Gruskovnjak et al. (2006), Chen e Brouwers (2007), Ben Haha et al. (2011), Ji et al. (2017), He et al. (2018), Jiao et al. (2018). Ligeiras variações são encontradas a depender do ativador utilizado e dosagens do mesmo, com alguns relatos da presença de etringita, hidrogel, dentre outros compostos.

Após estudos com argamassas à base de escória álcali-ativada, Brough e Atkinson (2002) concluíram que os produtos de hidratação do ligante ativado com silicato de sódio são amorfos e uniformemente distribuídos no espaço ocupado pela argamassa. Ademais, observaram que as propriedades da interface do silicato de sódio nas argamassas são excelentes, com baixos níveis de porosidade na interface com o agregado (Figura 14).

Figura 14 – Evolução das propriedades da interface em argamassas de escória ativada desde o primeiro dia ao terceiro mês



Fonte: Adaptado de Brough e Atkinson (2002).

Resulta claro que na vizinhança da interface há pouca escória no estado anidro (Figura 14c), grande parcela de compostos hidratados (Figura 14a) e porosidade praticamente constante através da argamassa (Figura 14b). Segundo Mehta e Monteiro (2001), a porosidade na pasta de cimento hidratada pode ser dividida entre: poros do gel (ou entre as camadas de C-S-H), vazios capilares e poros de ar incorporado, em ordem crescente de dimensões dos poros. No

tocante a isso, Brough e Atkinson (2002), Chen e Brouwers (2007) avaliam que na hidratação da Escória Álcali-Ativada (EAA) há maior porosidade na faixa dos poros do gel do que se tem em pastas de cimento Portland, ou seja, a maioria dos poros no estado endurecido estando localizada na faixa dos poros do gel (com dimensões da ordem de 5Å a 25Å) implica no refinamento da matriz porosa da pasta.

Dado que a solubilidade dos produtos hidratados de uma pasta de escória ativada é inferior àquela dos produtos hidratados de pasta confeccionada à base de cimento Portland, Puertas (1995) comenta tal propriedade como sendo indicativo de maior estabilidade química das pastas de escória. Ademais, o mesmo autor refere que a corrosão de armaduras em concreto de escória é aproximadamente 2 a 2,5 vezes menor que no seu correspondente de cimento Portland, dada sua menor porosidade. Tal ponto tem certa relevância visto ser a corrosão de armaduras considerada o carro-chefe das manifestações patológicas nas estruturas em concreto armado. Além do quê, o autor assevera que o calor de hidratação de cimentos de escória ativada alcalinamente é 1/3 a 1/2 menor que o observado pelo cimento Portland.

Al-Otaibi (2008), por sua vez, obteve que variando o teor de Na_2O desde 4% para 6%, o módulo de sílica (1,00 ou 1,65) conduziu a aumento da ordem de 20% na porosidade do concreto de escória ativada, para um fator água/ligante do concreto de 0,48; neste caso, as propriedades de transporte do concreto passariam a propiciar maior permeabilidade a agentes agressivos ao mesmo – apesar de a resistência ter aumentado. Ainda no espectro da durabilidade, após ensaios comparativos a profundidade da frente de carbonatação mais que dobrou, quando comparada ao concreto convencional, mas com tendência de queda aumentado o teor de Na_2O do ativador. Já para a reação álcali-agregado, o autor constatou baixa susceptibilidade, provavelmente pela ligação dos álcalis aos produtos de hidratação; no entanto, contrariamente à carbonatação, para maiores dosagens de Na_2O há tendência de maior expansão, havendo que se buscar o teor ótimo. Semelhantes indicativos de superioridade em relação ao concreto convencional tanto em termos de desempenho mecânico quanto em durabilidade também são obtidos por Chi (2012).

2.2.5 Propriedades residuais

Passando-se ao foco maior deste trabalho, tem-se a caracterização sobre seu desempenho em situação de incêndio – relativamente escassa na literatura frente ao concreto convencional. Segundo Wang et al. (1995), em temperaturas na faixa dos 500 °C – 700 °C, o concreto de escória pode manter seu desempenho estrutural, enquanto o concreto de cimento convencional perderia sua capacidade resistente abaixo dos 500 °C, tal afirmação, contudo, parece chocar-se frontalmente com o método dos 500 °C e mesmo com a NBR 15200 (ABNT, 2012) ou mesmo a EN-1992-1-2 (EUROCODE, 2004), ao menos no que se trata do concreto de cimento Portland convencional, o qual conservaria razoável capacidade resistente mesmo aos 500 °C.

Interessante estudo foi realizado por Mejía, Gutiérrez e Maldonado (2004), em que argamassas confeccionadas à base de escória ativada foram submetidas às temperaturas de 100 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C e 1000 °C, além da temperatura ambiente. O desempenho das argamassas de escória, sob o ponto de vista da resistência residual à compressão, porosidade, absorção e penetração de cloretos pelas normativas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Os autores reportam o desempenho superior das argamassas à base de escória ativada sobre as de cimento Portland nos diversos itens aferidos até a temperatura de 700 °C, ainda que a resistência mecânica inicial das argamassas de cimento fosse alta – 63,8 MPa ao fim dos 28 dias de cura. Importante apontamento é feito como conclusão da pesquisa:

Diferentemente dos cimentos tradicionais, os cimentos alternativos produzidos com base na EAA podem reter porcentagens elevadas de sua resistência mecânica original a temperaturas de 500° C, o que permite inclui-los na categoria dos materiais refratários (MEJIA; GUTIÉRREZ; MALDONADO, 2004, p.92).

Zuda et al. (2006) estudaram porosidade, densidade aparente, resistência à compressão, à tração na flexão, condutividade térmica e calor específico de argamassas feitas com escória, ativadas por meio de solução de silicato de sódio após secagem e subsequente submissão a temperaturas de 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 °C. Para avaliação dos parâmetros

mecânicos, foram moldados corpos de prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, desmoldados após 24 h e mantidos em cura submersa pelos 27 dias seguintes; após o período de cura os espécimes foram secos a 110 °C sendo em seguida submetidos à temperatura de ensaio fixada, mediante taxa de 10 K/min. Uma vez atingida a temperatura de interesse, os espécimes permaneciam a ela submetidos por 2 h, sendo em seguida, finalmente, resfriados lentamente. Os autores obtiveram resultados de ganho pouco expressivo na densidade aparente, queda também inexpressiva de porosidade e recuperação considerável de resistência residual absoluta para compressão e para tração na flexão (ensaio dos três pontos) em argamassas sob certas faixas de temperatura, sobretudo entre 800°C e 1200 °C (Tabela 5).

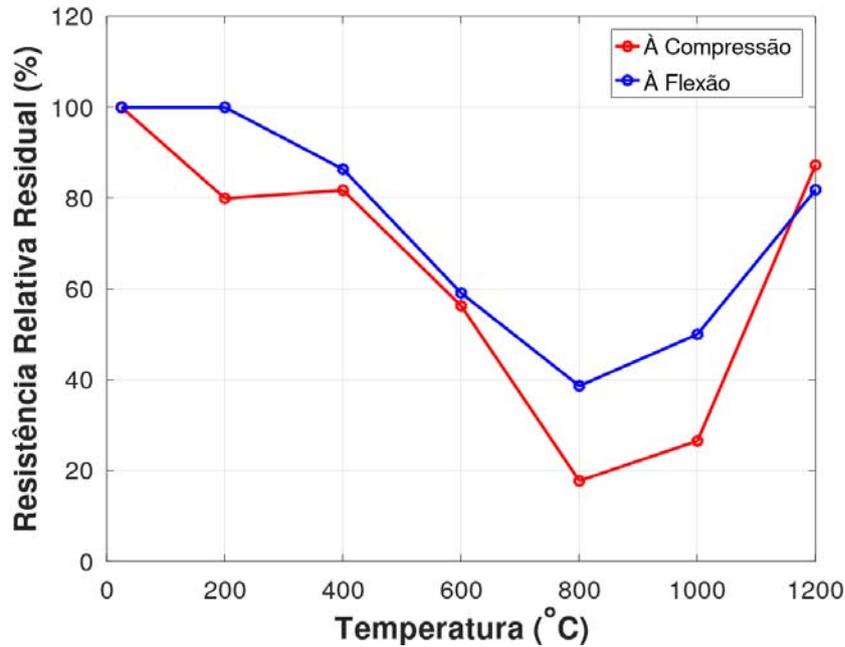
Tabela 5 – Porosidade, densidade aparente, resistências à compressão e à tração na flexão

Carga Térmica (°C)	Porosidade (%)	Densidade aparente (kg/m³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)
25	18	2170	55,8	4,4
200	22	2100	44,6	4,4
400	17	2170	45,6	3,8
600	22	2070	31,4	2,6
800	24	2030	9,9	1,7
1000	24	2050	14,8	2,2
1200	23	2050	48,7	3,6

Fonte: Adaptado de Zuda et al. (2006).

Os resultados em termos de resistência residual relativa na compressão e tração na flexão são vistos na Figura 15, nela a capacidade de recuperação de resistência das argamassas fica clara principalmente no intervalo de 800 – 1200 °C, no qual a resistência residual ascende desde 20% para 87% na compressão e desde 40% para 80% no caso da tração na flexão. Zuda et al. (2006) aponta que “a principal razão para a piora nas propriedades mecânicas do material [escória ativada] foi provavelmente a transição do SiO₂ nos agregados da forma β para a forma α a qual acontece a 573° C e é acompanhada por mudanças de volume”.

Figura 15 – Resistência relativa residual à compressão e à tração na flexão obtidas nas argamassas

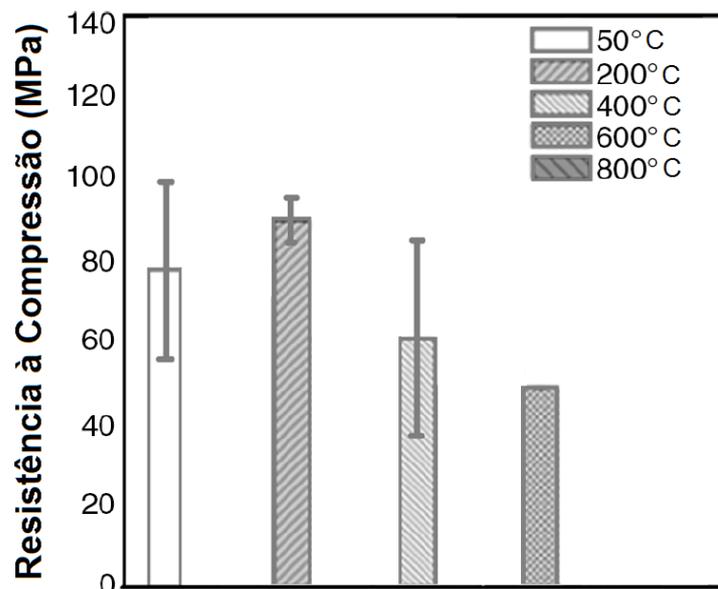


Fonte: Adaptado de Zuda et al. (2006).

Mendes, Sanjayan e Collins (2008), indicam ainda a relação entre a degradação da Portlandita e a perda de resistência à compressão em pastas confeccionadas à base de cimento convencional submetidas a altas temperaturas. Dado que um dos principais produtos de hidratação da pasta de cimento Portland é o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandita), esta se dissociaria em CaO por volta dos 400 °C, com contração do concreto; além do quê, eventual re-hidratação do CaO em $\text{Ca}(\text{OH})_2$, por sua vez, causaria fissuramento e desintegração do concreto. Sendo assim, substituições do cimento Portland em percentuais elevados, incluindo substituição total, produziriam pastas e, eventualmente, concretos menos porosos em situação pós-incêndio e mesmo mais estáveis perante altas temperaturas. Ademais disso, observaram que substituições de 35% de cimento Portland por escória já seriam suficientes para inibir *spalling* e fissuração em pastas de cimento Portland por eles expostas a altas temperaturas, o que sugere melhoramento da matriz porosa, mais estável e adaptada às poropressões desenvolvidas no ensaio.

Estudo com pastas de escórias ativadas alcalinamente foi realizado também por Bernal et al. (2015), os espécimes após desmolde e cura em câmara com umidade relativa de 90% e temperatura de 27 ± 2 °C por 28 dias, foram mantidos a 50 °C por 24 h para remoção de umidade e aquecidos às temperaturas de 200, 400, 600 e 800 °C. A taxa de aquecimento foi de 1 °C/min e, uma vez atingida a temperatura do ensaio, o patamar de temperatura foi mantido por 2 h, seguindo-se o período de resfriamento no interior do forno até que se alcançasse a temperatura ambiente de 25 °C no intuito de se minimizar choques térmicos e potenciais fissuras nos exemplares. Os resultados de resistência residual dos exemplares de pastas de escória álcali-ativadas ensaiados pelos autores podem ser observados na Figura 16, os mesmos relatam que não foi possível o ensaio a 800 °C pois os espécimes se desfaziam à mão, razão pela qual não constam resultados a esta temperatura na Figura 16.

Figura 16 – Resistência residual à compressão de pastas de escória álcali-ativadas



Fonte: Adaptado de Bernal et al. (2015).

As propriedades residuais de resistência à compressão, tração e tração na flexão serão influenciadas pelo teor de Na_2O , ou seja, pela dosagem da argamassa como apontam Tran e Kwon (2018). Não obstante a inserção de agregados graúdos em argamassa cause alteração no

comportamento mecânico da mesma e, sobretudo, em suas propriedades residuais, é razoável que, fixadas as demais variáveis, também o teor de Na_2O exerça influência no quanto de resistência mecânica será preservada no caso de concreto de escória propriamente dito.

No trato das argamassas de escória ativada também se encontra contribuição relevante de Rovnaník e Dufka (2015), os quais se debruçam sobre a análise da influência do agregado (miúdo) utilizado na argamassa, lançando mão de exemplares de argamassas moldados em forma prismática de 40 mm x 40 mm x 160 mm, guardando relação água/ligante 0,4, numa escória considerada neutra e utilizando ativador de silicato de sódio no teor de 20% da massa de escória.

Para os autores, ao ser submetida a altas temperaturas, a escória ativada teria como alteração principal ocorrendo entre 600 °C e 800 °C, quando a desidratação do C-A-S-H é completa e novas fases começariam a se cristalizar, entre as quais predominantemente a akermanita. Tal alteração se refletiria na morfologia, matriz porosa e especialmente no melhoramento das propriedades mecânicas da escória álcali-ativada. Neste caso, o fator limitante passaria a ser o agregado (miúdo), o qual, sendo quartzoso padeceria do incremento volumétrico mencionado aos 573° C, quando passaria da forma β para a forma α . A utilização de argila calcinada, cujas principais fases eram quartzo, cristobalita e mulita, demonstrou que o material, considerável refratário, influenciou positivamente o desempenho mecânico da argamassa.

Os autores estabeleceram metodologia de desmolde no dia seguinte à confecção dos exemplares, com subsequente cura em água por outros 27 dias a 20° C. Após este período os espécimes foram expostos ao ar seco por outros 5 dias antes de serem expostos às altas temperaturas de 200, 400, 600, 800 e 1000 °C. As temperaturas de ensaio foram atingidas mediante uma taxa de aquecimento de 5 °C/min em mufla sendo mantidos na temperatura de interesse por 1 hora e permitindo o resfriamento lento dos espécimes até a temperatura da sala.

Os resultados dos ensaios de resistência residual absoluta à compressão e de tração na flexão das argamassas (ensaio dos três pontos) constam na Tabela 6 enquanto que os valores relativos podem ser observados na Figura 17, onde claramente se percebe a considerável capacidade de recuperação de resistência na faixa dos 800 °C aos 1200 °C.

Tabela 6 – Resultados absolutos de resistência residual à compressão e à tração na flexão em função do agregado (miúdo) utilizado

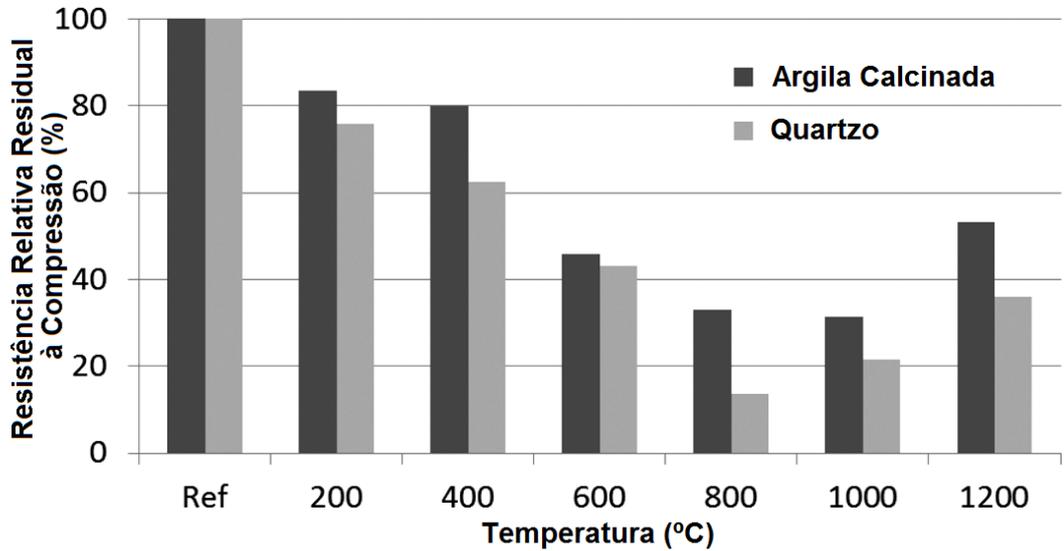
Temperatura (°C)	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Flexão (MPa)	
	Areia Quartzosa	Argila Calcinada	Areia Quartzosa	Argila Calcinada
25	73	92	9,6	10,4
200	55	77	4,4	7,5
400	46	74	3,8	6,2
600	31	42	2,6	4,8
800	10	31	1,7	4,2
1000	16	29	1,0	5,0
1200	26	49	2,9	12,5

Fonte: Adaptado de Rovnaník e Dufka (2015).

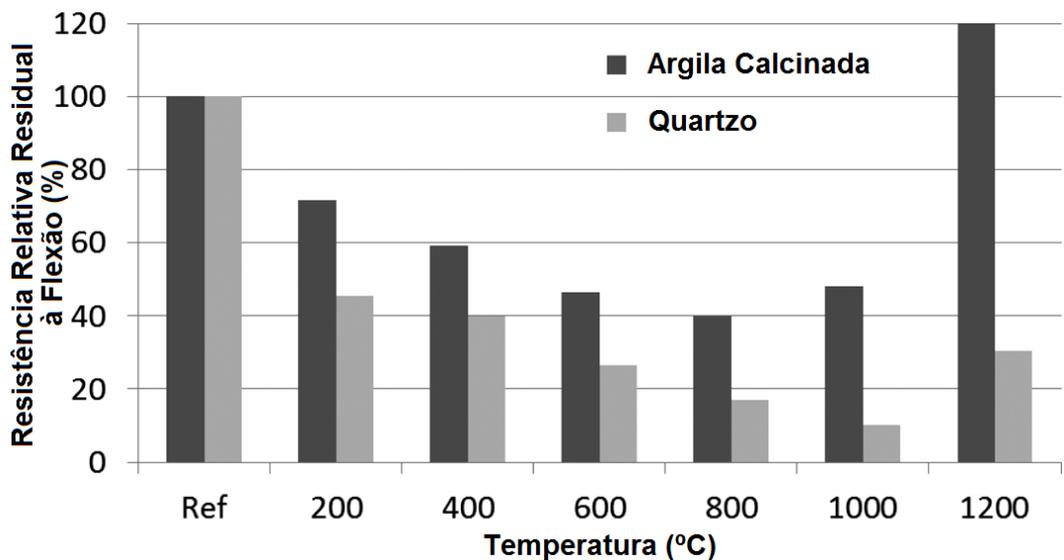
Pelos estudos de Rovnaník e Dufka (2015), resulta clara a relação de influência do agregado miúdo na resistência residual de argamassas e, provavelmente, também no concreto de escória ativada. A argila calcinada está para a argamassa de escória assim como o agregado carbonático está para o concreto de cimento Portland, ou seja, seu uso implica em melhor desempenho mecânico-residual e, neste caso específico, sobretudo a temperaturas mais elevadas.

Para os autores, o desempenho mecânico-residual observado notadamente atípico, sobretudo no intervalo dos 800-1200 °C, atribui-se ao fato de o agregado miúdo (argila calcinada) ser mais estável nas temperaturas elevadas, o processo de sinterização do agregado em contato com a matriz de escória ativada hidratada se daria melhor no uso da argila calcinada como agregado miúdo, em vez da areia quartzosa. Ademais há que se considerar a formação de fases mais estáveis às temperaturas elevadas, como é o caso da akermanita, o que também implicaria em melhor desempenho mecânico-residual das argamassas.

Figura 17 – Resistência relativa residual à compressão (a) e à tração na flexão (b)



(a)



(b)

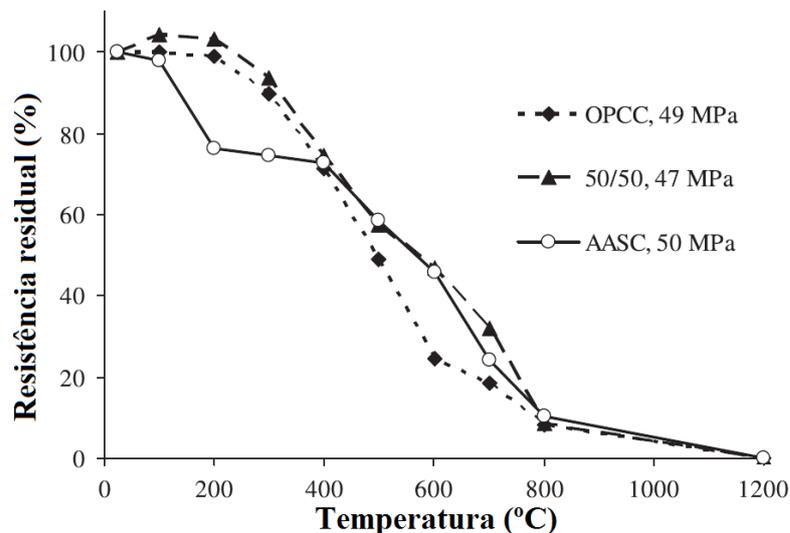
Fonte: Adaptado de Rovnaník e Dufka (2015).

Guerrieri et al. (2009) investigou a resistência residual de espécimes cilíndricos 10 x 20 cm de concretos de escória álcali-ativada, moldado a uma relação água/ligante de 0,5 e módulo de sílica aproximadamente 1,0. Às temperaturas 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 1200 °C por meio de taxa de aquecimento de 10 °C/min, o concreto foi elevado à temperatura de

ensaio e nela mantida por 1 hora, seguindo-se o período de resfriamento lento a taxa inferior a 1 °C/min. Obtiveram resistência residual de 76, 73, 46 e 10% para as temperaturas de 200, 400, 600 e 800 °C, respectivamente (Figura 18). Também Guerrieri et al. (2009) verificaram similaridade existente no comportamento dos concretos de escória ativada e o concreto confeccionado à base de cimento Portland misturado em proporção de 50% com escória na faixa dos 400-1200° C. Esta similaridade indicaria que para haver efetiva distinção entre os concretos a substituição total do clínquer Portland pela escória ativada seria necessária.

Visto que não há Portlandita a ser degradada no concreto de escória, o autor indica a incompatibilidade térmica existente entre a pasta de escória ativada e o agregado graúdo como possível causa de perda de resistência, tal incompatibilidade também é apontada como causa de perda de resistência por Bernal et al. (2012). Ainda assim, na faixa de 400 a 700 °C o concreto de escória apresenta resistência residual superior à resistência encontrada para o concreto de cimento Portland (Figura 18).

Figura 18 – Resistência residual à compressão para os concretos: de cimento Portland convencional (OPCC), de escória álcali-ativada (AASC) e compostos na proporção de 50% (50/50)



Fonte: Adaptado de Guerrieri et al. (2009).

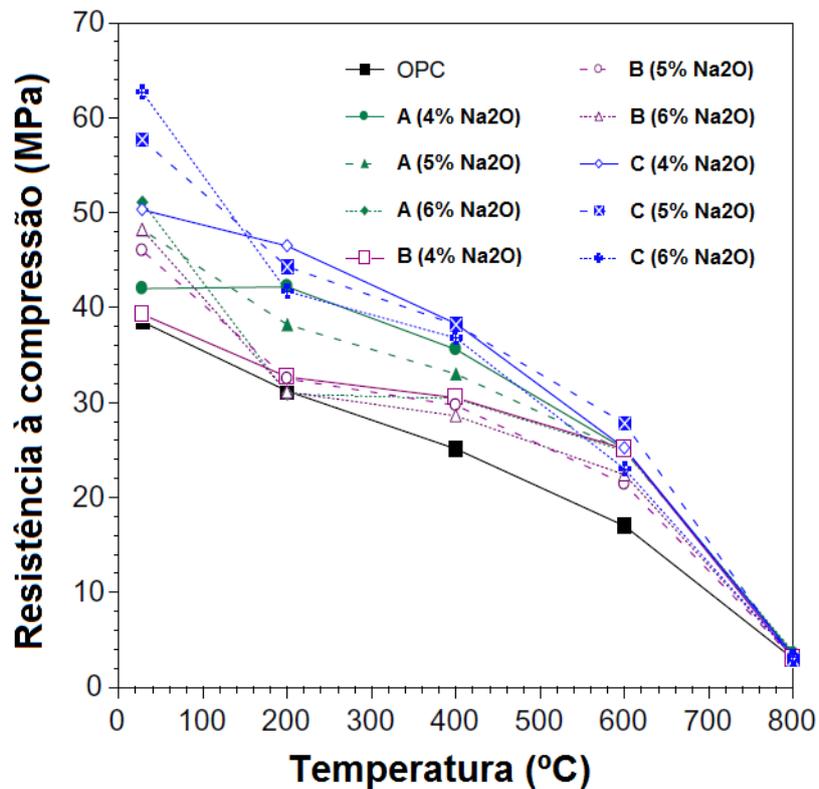
Estudo de particular interesse é visto em Chi (2012), na investigação das propriedades do concreto de escória endurecido, durabilidade e condições de cura (em altas temperaturas). Com espécimes de 10 x 20 cm, desmoldagem 24 h depois da concretagem foram utilizadas as seguintes condições de cura: ao ar, em solução saturada de hidróxido de cálcio e em câmara úmida (80% de umidade relativa) à temperatura de 60 °C. O autor também variou a concentração de Na₂O em 4%, 5% e 6% para um Módulo de Sílica (Ms) valendo 0,8 e relação água/ligante 0,5.

A metodologia utilizada para avaliação da resistência residual às temperaturas elevadas feita por Chi (2012) se deu do seguinte modo: os espécimes foram submetidos a uma taxa de aquecimento média entre 6-7 °C/min até alcançar a temperatura do ensaio (200, 400, 600 e 800 °C), sendo em seguida nela mantida por 1 h, aproximadamente, passando depois por resfriamento gradual à temperatura da sala durante 24 h antes de serem conduzidos aos ensaios de resistência residual à compressão.

A temperatura de cura por volta dos 60 °C na câmara propiciou ganhos de resistência mecânica à compressão dos espécimes de Chi (2012) frente aos demais curados ao ar ou mesmo curados em solução de NaOH, tal resultado é encontrado também por outros autores como Türker et al. (2016). Sendo ainda o concreto de escória álcali-ativada de Chi (2012) capaz de apresentar aos 200 °C resistência residual acima de 100%, 83% e 92% para os casos de cura ao ar, em câmara úmida 80% de umidade relativa e à temperatura de 60 °C, respectivamente; tal ganho de resistência, ou amenização na tendência de perda também podem ser observadas na faixa de 200 °C – 400 °C, sobretudo na condição de cura em solução de NaOH, independente do teor de Na₂O. Desta temperatura em diante o fator de redução do concreto de escória nesta condição de cura praticamente se estabiliza nas temperaturas que se seguem, enquanto o concreto convencional prossegue perdendo resistência a taxas mais severas. Os resultados obtidos para as diversas dosagens de Na₂O e as diversas condições de cura podem ser vistos na Figura 19.

Chi (2012) registra ainda que não foram observados sinais de lascamento no concreto de escória, enquanto no concreto convencional foi constatado a partir da temperatura de 600 °C em diante. O melhor desempenho do concreto curado à temperatura de 60 °C e umidade relativa de 80% pode ser interpretada mediante o registro de menor retração na secagem do concreto curado nesta condição, o que proporcionaria menor fissuramento em relação aos demais tipos de cura e, conseqüentemente, melhor desempenho mecânico residual.

Figura 19 – Resistência residual do concreto de escória ativada para as diversas dosagens de Na₂O nas condições de cura ao ar (A), em solução saturada de NaOH (B), sob umidade relativa de 80% e temperatura de 60 °C (C) em comparação ao concreto convencional (OPC)



Fonte: Adaptado de Chi (2012).

2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Com o objetivo de sintetizar, em linhas gerais, o capítulo pode-se destacar com relação ao concreto de cimento Portland em situação de incêndio que o estudo se deu, inicialmente de maneira desintegrada e, posteriormente, de forma acoplada nos campos: da temperatura, sua distribuição, etc., bem como no campo mecânico, ou seja, na capacidade resistente durante e após aquecimento. A princípio com corpos de prova (estudo do material isolado), posteriormente em peças estruturais (concreto armado) e mais recentemente em estruturas tridimensionais, ou seja, em escala real.

Relativo ao concreto de escória ativada, destaca-se que:

- O uso do silicato de sódio como ativador, variando geralmente entre 4% a 8% de Na_2O , em relação à massa de escória e que, embora o aumento desta dosagem conduza a melhor desempenho mecânico, há perda de trabalhabilidade e crescimento na retração do concreto.
- Para uma mesma relação água/ligante os autores apontam para o desenvolvimento de resistência à compressão tal qual se obtém o concreto de cimento Portland, havendo não poucos registros de as resistências dos concretos de escória ultrapassar as resistências dos concretos de cimento Portland. Todavia há também registro de que o módulo de elasticidade para os concretos de escória é inferior ao módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland em torno de 12%, 25% e até 35%.
- A retração no concreto de escória ativada se mostra superior à retração do concreto de cimento Portland sobretudo na parcela autógena e de retração por secagem, as quais serão diretamente influenciadas pelo teor de Na_2O , bem como pelo Módulo de Sílica (MS).
- O principal produto de hidratação do concreto de escória ativada é o C-S-H, sendo que a hidratação deste concreto resulta em uma matriz porosa mais refinada do que a observada nos concretos de cimento Portland.
- O desempenho mecânico residual de argamassas e concretos de escória relatadas pelos autores apontam para uma capacidade de recuperação de resistência residual,

sobretudo às temperaturas mais elevadas. Apontam para a formação de fases mais estáveis em condições de temperaturas elevadas (akermanita), como razão para o desempenho em situação de incêndio obtido. Por outro lado, a utilização de agregados quartzosos implicaria em perda de desempenho aos 573 °C, diante da alteração do quartzo da fase α para a fase β , o que ocorre acompanhado de incremento volumétrico e fragilização na zona de transição.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados o programa experimental adotado, referenciais normativos, características dos materiais (insumos), equipamentos utilizados e as etapas deste trabalho por meio de registro fotográfico.

O programa experimental voltado para avaliação das propriedades residuais teve foco bipartido: mecânico e microestrutural; contando com corpos de prova de concreto e corpos de prova à base de pasta. A análise das propriedades mecânicas residuais deu-se a partir do preparo de 144 corpos de prova de concreto cilíndricos 10 x 20 cm, confeccionados à base de cimento Portland (72 corpos de prova) e escória ativada (72 corpos de prova), variando-se a relação água/ligante de 0,28, 0,36 e 0,44 em cada um dos ligantes. Para a análise microestrutural, por sua vez, a mesma se deu a partir da confecção de 24 corpos de prova 5 x 10 cm de pasta, sendo 12 de escória e 12 de cimento Portland igualmente em função da relação água/ligante 0,28, 0,36 e 0,44 em cada um dos ligantes.

As temperaturas fixadas para exposição tanto das pastas como dos concretos foram 200 °C, 400 °C e 600 °C, seguindo-se resfriamento lento no interior do forno elétrico e posterior realização dos ensaios. Os ensaios feitos com os corpos de prova de concreto foram os de compressão, velocidade de pulso ultrassônico, absorção, índice de vazios e porosidade; por outro lado, os corpos de prova de pasta foram submetidos a ensaios de Difração por Raios X (DRX).

3.1 MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais usados na confecção dos concretos.

3.1.1 Agregados

A areia quartzosa utilizada no preparo deste concreto foi lavada no intuito de minimizar variações provenientes da presença de fração fina bem como remoção de eventual material orgânico, após o que foi seca em estufa (105 °C ± 5 °C) por 24 h (Figura 20a), removendo assim a umidade do agregado miúdo (Figura 20b) e contornando o efeito do inchamento das areias. De igual modo, o agregado graúdo de origem granítica (brita 0) utilizado neste concreto foi submetido às mesmas condições de lavagem e secagem em estufa pelo mesmo período de tempo (Figura 20c).

Figura 20 – Secagem (a) dos agregados miúdo (b) e graúdo (c)

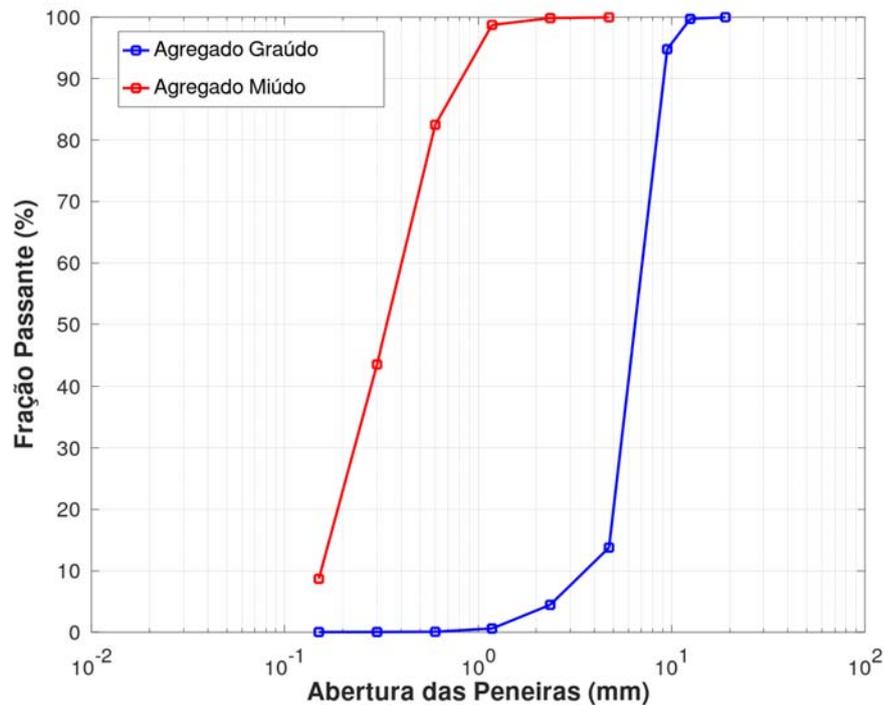


Fonte: O autor (2019).

Após secos, os agregados foram acondicionados em sacos plásticos, de forma a evitar ganho de umidade. Os agregados utilizados foram submetidos à caracterização disciplinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), estando os resultados de distribuição granulométrica obtidos constantes na Figura 21.

Os módulos de finura, calculados mediante a NBR NM 248 (ABNT, 2003), foram de 5,86 para a brita e 1,67 para a areia. Já as dimensões máximas características foram 12,5 mm e 1,18 mm, para a brita e areia, respectivamente.

Figura 21 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo utilizados nos concretos confeccionados



Fonte: O autor (2019).

3.1.2 Ligantes

A escória de alto-forno foi fornecida pela Cimento Mizu S/A enquanto que o cimento Portland (CPV – ARI MAX) pela Cimento Nacional. As especificações físicas de ambos ligantes constam na Tabela 7.

Concernente à composição química dos ligantes, tem-se na Tabela 8 a especificação em termos do teor de óxidos presentes para ambos os ligantes. Informação de certa relevância sob

a perspectiva da análise dos resultados de ensaio de Difração de Raios X (DRX) a que as amostras de pasta serão submetidas.

Tabela 7 – Propriedades da escória de alto forno e cimento Portland

Ensaio	Valor Médio	
	Escória de Alto Forno ¹	Cimento Portland ²
Massa específica (g/cm ³)	2,89	3,13
Finura Blaine (m ² /kg)	457,2	459,3
Índice de Finura #200 (%)	0,07	0,03
Retido na Peneira #325 (%)	1,33	0,78
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	-	29,3
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	-	42,7
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	-	49,2
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	-	57,6

Fonte: ¹Cimento Mizu S/A (2018); ²Cimento Nacional (2018).

Tabela 8 – Composição química em teor de óxidos (%) da escória de alto forno e cimento Portland

Óxido	Valor Médio (%)	
	Escória de Alto Forno ¹	Cimento Portland ²
CaO	42,33	64,29
SiO ₂	38,46	16,98
SO ₃	-	4,21
Al ₂ O ₃	10,50	4,10
Fe ₂ O ₃	0,40	2,79
MgO	6,96	1,82
K ₂ O	0,10	1,13
P ₂ O ₅	-	0,65
TiO ₂	-	0,30
Na ₂ O	0,10	0,29
SrO	-	0,06
V ₂ O ₅	-	0,03
MnO	-	0,03
NiO	-	0,01
ZnO	-	0,01
ZrO ₂	-	0,01

Fonte: ¹Cimento Mizu S/A (2018); ²Araújo Júnior (2019).

3.1.3 Ativador

O ativador utilizado foi o silicato de sódio fornecido pela Pernambuco Química S/A, dotado com um módulo de sílica (relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, em massa) igual a 1,73. As características do mesmo podem ser verificadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades do silicato de sódio

Propriedade	Valor
Estado Físico (25° C)	Líquido
Na ₂ O (%)	16,50
SiO ₂ (%)	28,50
Total de Sólidos (%)	45,00
Relação Si ₂ O/Na ₂ O	1,73

Fonte: Pernambuco Química S/A (2018).

3.1.4 Superplastificante

O Hyperkem™ 42 foi o superplastificante utilizado. Segundo o fabricante (Novakem) se trata de aditivo redutor de água superplastificante II (SP II), isento de cloretos, para uso em concreto usinado, pré-moldado e infraestrutura. Promove aumento do abatimento ou ganhos de resistências iniciais e finais sem maiores efeitos sobre o tempo de pega. As especificações do mesmo constam na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades do superplastificante Hyperkem™ 42

Propriedade	Valor Médio
Cor	Laranja
Aspecto Visual	Solução Homogênea
Teor de Sólidos (%)	48,0
Massa Específica (g/cm ³)	1,12
pH	4,2

Fonte: Novakem (2018).

3.2 METODOLOGIA

Relativo à dosagem no processamento da pesquisa, foi seguido o método do IPT/USP (HELENE; TERZIAN, 1992). Uma vez realizada para o concreto de cimento Portland, a mesma dosagem foi mantida para o concreto de escória ativada com o objetivo de, para uma mesma dosagem e mudando apenas o ligante, verificar o desempenho de ambos os concretos em situação de incêndio. Norteados-se pelo trabalho de Araújo Júnior (2019), foram estabelecidas as seguintes especificações:

- Proporção dos traços rico, intermediário e pobre, respectivamente: 1:2,5, 1:3,5, 1:4,5;
- Relação água/materiais secos (H) igual a 8%;
- Teor de argamassa (α) de 62%;
- Para o concreto de escória ativada, foi fixado em 5% o teor de Na_2O , em relação à massa de escória.

Os consumos resultantes da dosagem para cada concreto em função do traço podem ser observados na Tabela 11, para o concreto de cimento Portland, e na Tabela 12 para o concreto de escória ativada.

Tabela 11 – Resumo do consumo dos traços de concreto de cimento Portland confeccionados

Traço	a/lig.	Cimento Portland (g)	Agregado Miúdo (g)	Agregado Graúdo (g)	Água (g)	SP (g)
I	0,28	4805	5620	6389	1328	24
II	0,36	3710	6640	6341	1325	19
III	0,44	3020	7270	6310	1317	21

Fonte: O autor (2019).

A adição de superplastificante (SP) foi realizada de modo incremental, objetivando alcançar a trabalhabilidade necessária para a mistura e subsequente moldagem dos corpos de prova. Não foi utilizado aditivo superplastificante no concreto de escória ativada haja vista os relatos da

literatura sobre a influência negativa deste no desempenho mecânico dos concretos de escória, bem como da sua influência para maior retração no concreto de escória ativada.

Tabela 12 – Resumo do consumo dos traços de concreto de escória ativada confeccionados

Traço	a/lig.	Escória (g)	Silicato de Sódio (g)		Escória Ativada (g)	Agregado Miúdo (g)	Agregado Graúdo (g)	Água Adicional (g)
			Sólidos	Água				
I	0,28	4220	583,65	713,35	4804	5620	6390	632
II	0,36	3260	450,45	550,55	3710	6638	6341	786
III	0,44	2650	366,75	448,25	3017	7270	6310	880

Fonte: O autor (2019).

3.2.1 Preparo dos corpos de prova

Antes da confecção dos corpos de prova de concreto (10 x 20 cm), foi feita a pesagem (Figura 22) dos materiais. Ligante, areia e brita foram pesados em balança com precisão 5 g. Água, silicato e superplastificante foram pesados em balança de maior precisão (1 cg). A mistura foi feita em argamassadeira (Figura 22c) por 2 min e 30 s, sendo que o superplastificante e o silicato foram adicionados após certo grau de homogeneidade da mistura para os concretos de cimento Portland e escória, respectivamente.

Figura 22 – Pesagem dos insumos com menor precisão (a), maior precisão (b) e mistura em argamassadeira (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor (2019).

O adensamento das camadas do concreto lançadas foi feito através de vibrador, disposto no centro geométrico da forma e salvaguardada a distância da ordem de 1 cm entre agulha e o fundo da forma durante a concretagem da primeira camada. Após o adensamento mecânico da primeira camada (Figura 23b), foi lançada a consequente (Figura 23a) e adensada costurando-a na inferior mediante penetração da ordem de 1 cm na inferior.

Ademais disso, com o objetivo de mitigar a perda d'água para o meio, um filme plástico como selante foi sobreposto à forma com uso de ligas (elásticos) até a desmoldagem dos corpos de prova (Figura 23c).

Figura 23 – Lançamento (a), adensamento (b) e selagem (c) dos espécimes



(a)



(b)



(c)

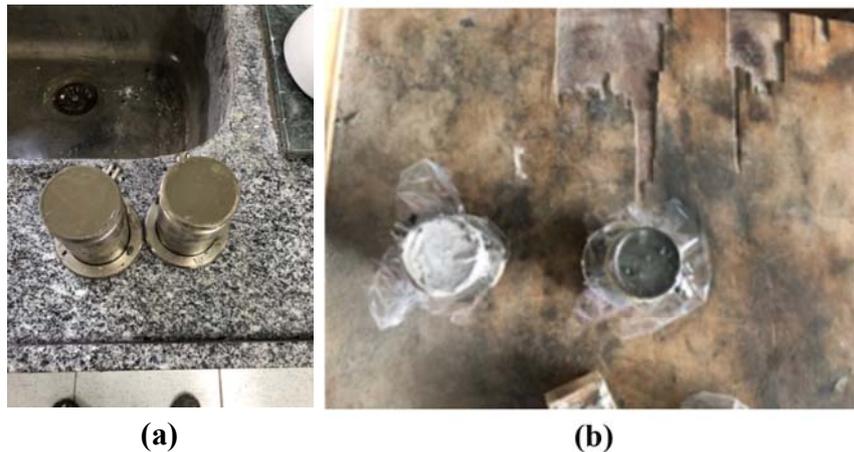
Fonte: O autor (2019).

No preparo dos corpos de prova à base de pasta 5 x 10 cm, a pesagem dos ligantes, água, silicato e superplastificante foi procedida em balança de precisão equivalente a 1 cg. Sendo a mistura feita em argamassadeira de menor porte também por 2 min e 30 s. Superplastificante e silicato foram adicionados após certo grau de homogeneidade da mistura, para as pastas de cimento Portland e escória, respectivamente.

O mesmo procedimento adotado na moldagem dos corpos de prova de concreto foram tomados para os de pasta, exceto pelo adensamento que foi realizado por mesa vibratória durante 200 s. Terminado o período, os mesmos foram, de igual modo, dispostos filmes plásticos como selantes à forma com uso de ligas (elásticos) até a desmoldagem dos corpos de prova (Figura 24b).

O desmolde do concreto e pasta se deu após 24 h da moldagem, sucedido da sua identificação quanto ao traço, ligante e dada de moldagem. Após o quê se procedeu o período de cura submersa dos espécimes até os 28 dias, realizada em câmara úmida.

Figura 24 – Corpos de prova de pasta de escória e cimento Portland na moldagem (a) e selagem (b)



Fonte: O autor (2019).

Anteriormente à queima dos espécimes, procedeu-se a retificação a úmido dos corpos de prova, obedecendo ao procedimento disposto na EN 12390 (BS, 2009). Após a retificação, os mesmos tiveram identificação renovada nas faces inferior e superior (Figura 25), retornando em seguida à condição de cura submersa até a data da exposição à estufa.

Figura 25 – Identificação dos exemplares confeccionados após retificação



Fonte: O autor (2019).

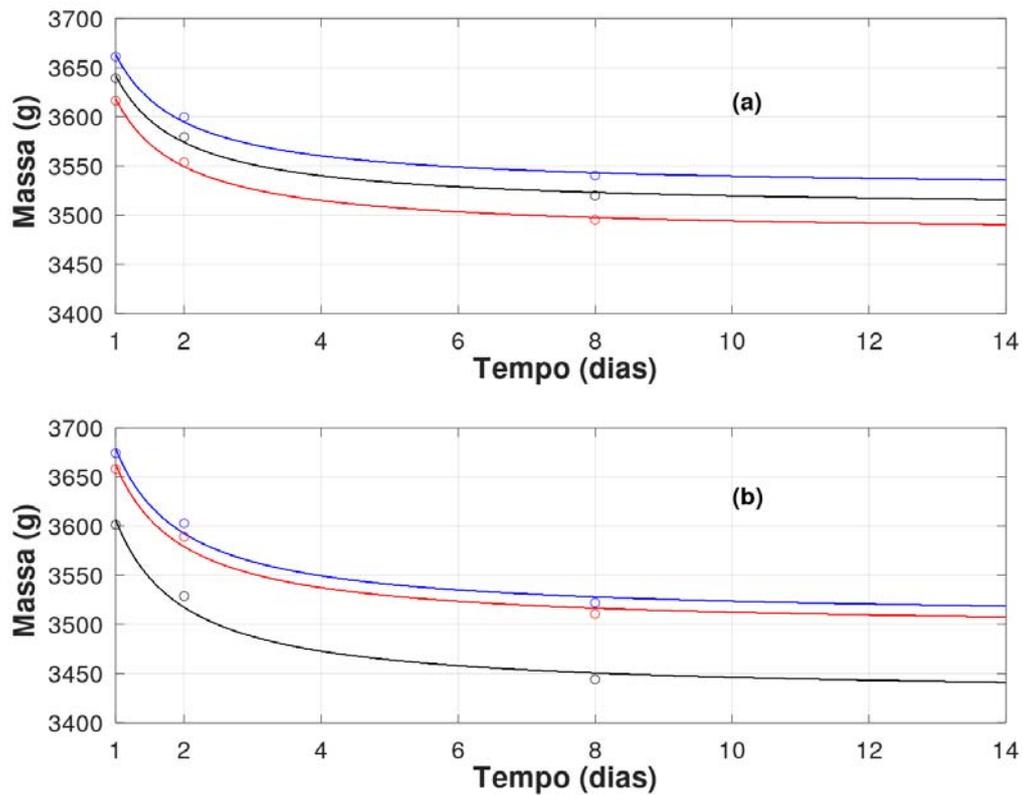
3.2.2 Remoção de umidade dos corpos de prova

No intuito de se precisar quanto da massa do concreto era proveniente da saturação (água absorvida), determinação do teor de umidade e mitigação do risco de *spalling*, as massas de 3 corpos de prova confeccionado a partir de cimento Portland e outros 3 a partir de escória ativada, em seus traços de fator água/ligante 0,44. As medidas foram feitas na data de entrada na estufa, no 2º dia e após 7 dias. Os dados coletados dos mesmos estão dispostos na Figura 26. O concreto moldado tendo como ligante a escória ativada apresentou menor dispersão de resultados e consequente superioridade em termos de acurácia.

É denominada neste trabalho condição de referência a condição unicamente de apenas secagem em estufa regulada na temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 7 dias, objetivando a remoção da água presente nos poros do concreto então saturado. Sabe-se que “a estrutura da pasta de cimento é parcialmente danificada devido à desidratação na temperatura de 105°C , a qual é padrão para secagem de materiais” (HAGER, 2013). Não obstante, por

indisponibilidade de outro meio de remover a umidade do corpo de prova, este foi o método adotado.

Figura 26 – Massa dos concretos de escória (a) e cimento Portland (b) armazenados em estufa a 105°C em função do tempo

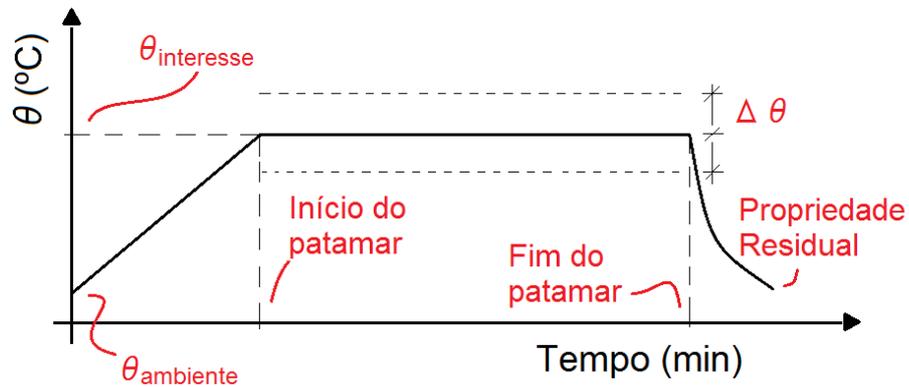


Fonte: O autor (2019).

3.2.3 Aquecimento dos corpos de prova

Os espécimes, para alcançar a temperatura de interesse (200 °C, 400 °C e 600 °C), foram aquecidos em forno elétrico a uma taxa de aquecimento constante no valor de 5 °C/min; foram fixados ainda o tempo de permanência de 3 h no patamar estacionário de temperatura como representado na Figura 27.

Figura 27 – Representação esquemática do aquecimento dos corpos de prova



Fonte: O autor (2019).

Completado o processo, o forno foi desligado e os espécimes deixados em resfriamento lento dentro do forno até o dia seguinte (Figura 28).

Figura 28 – Corpos de prova no interior do forno elétrico após resfriamento lento



Fonte: O autor (2019).

3.2.4 Instrumentação dos corpos de prova

Objetivando o acompanhamento e verificação das temperaturas no interior do forno elétrico e dos concretos, a temperatura do forno foi acompanhada por termopar de haste, enquanto que termopares tipo K foram utilizados nos corpos de prova escolhidos para o controle de temperatura. As leituras de temperaturas dos espécimes foram feitas a uma frequência de 5 Hz a partir de *datalogger* vinculado a programa computacional de leitura de dados experimentais (Figura 29). A inserção dos termopares tipo K no concreto durante a moldagem foi feita de modo a localizá-lo no centro geométrico dos exemplares de modo a aferir a temperatura no seu núcleo.

Os corpos de prova de controle de temperatura não foram ensaiados à ruptura, não foram retificados, nem passaram por ensaios de absorção, densidade, passagem de pulso ultrassônico, etc. Não obstante, não houve prejuízo ao programa experimental visto que tais corpos de prova foram confeccionados além daqueles pertencentes ao programa experimental, isto é, foram exemplares de quantidade extra.

Figura 29 – Termopares e sistema de leitura de dados



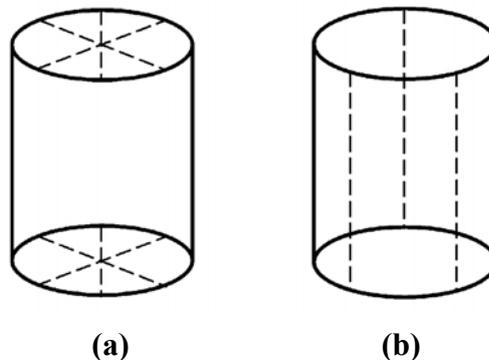
Fonte: O autor (2019).

3.2.5 Controle geométrico

Nas respectivas condições de ensaio (Referência, 200 °C, 400 °C e 600 °C) os espécimes foram submetidos ao controle geométrico dos corpos de prova fixado pela EN 12390-3 (BS, 2009). Ou seja, três medidas de diâmetro foram tomadas em cada extremidade do corpo de prova cilíndrico em posições defasadas entre si de aproximadamente 60° (Figura 30a). A altura de cada cilindro, por sua vez, foi medida em três posições defasadas entre si de aproximadamente 120° (Figura 30b).

Tendo como base as medidas de diâmetro e altura tomadas, foram adotados diâmetro médio e altura média de cada espécime, perseguindo-se valor mais realista quanto às dimensões para avaliação de propriedades físico-mecânicas como tensão na ruptura, módulo dinâmico, etc.

Figura 30 – Linhas tracejadas indicando as posições de medida tomadas dos corpos de prova cilíndricos para diâmetro (a) e altura (b)



Fonte: EN 12390 (BS, 2009).

3.2.6 Absorção, índice de vazios e massa específica

Para os ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos foram usados 24 corpos de prova de cimento Portland e 24 de escória álcali-ativada. O ensaio se deu orientado pela NBR 9778 (ABNT, 2005) e balança de precisão de 1 cg. Os exemplares

tiveram suas massas secas avaliadas (Figura 31a), sendo suas massas submersas (Figura 31b) tomadas como sendo correspondente ao valor que se apresentou constante na balança após imersão em água dos corpos de prova previamente saturados.

Figura 31 – Pesagem de massa seca (a) de corpos de prova e submersa (b)



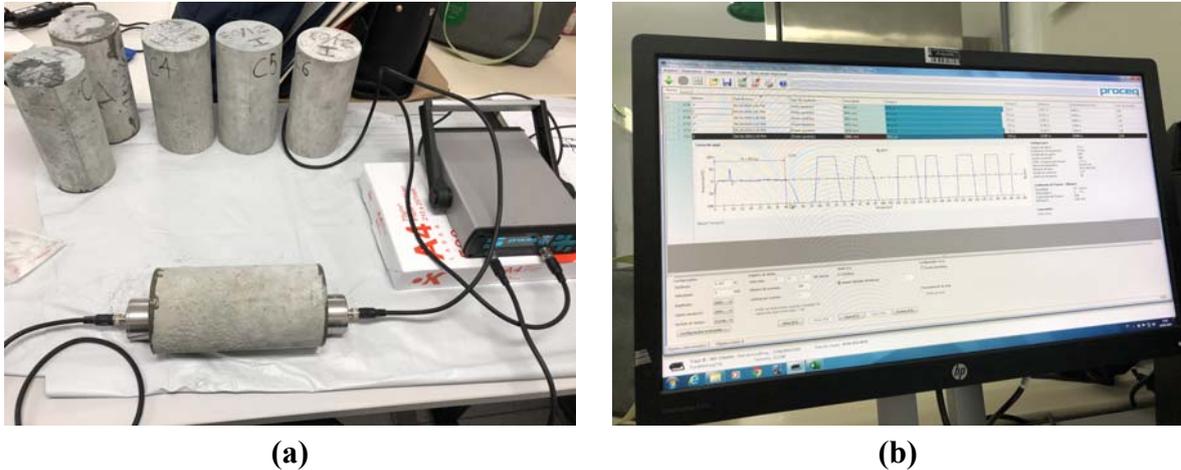
Fonte: O autor (2019).

3.2.7 Velocidade de Pulso Ultrassônico

Após a realização do controle geométrico dos corpos de prova de concreto, todos os 144 corpos de prova de concreto, foram ensaiados à passagem de onda ultrassônica no modo direto (Figura 32a). O modelo Pundit Lab da Proceq foi o equipamento utilizado nos ensaios de ultrassônico estando a ele associado programa computacional de visualização e armazenamento de leituras (Figura 32b). O equipamento foi devidamente limpo e calibrado antes de seu uso.

Como dispõe a norma britânica EN 12505-4 (BS, 2004), a velocidade do pulso será afetada pelas variáveis relativas à confecção dos espécimes, tais como cura, adensamento, teor de umidade, etc., além da relação água/ligante. Dado que todas as demais variáveis são mantidas constantes, ou seja, todos os espécimes foram submetidos ao mesmo procedimento de confecção, cura e remoção de umidade, espera-se que a velocidade do pulso seja influenciada basicamente pela relação água/ligante.

Figura 32 – Ensaio de determinação de Velocidade de Pulso Ultrassônico através do concreto (a) e registro de leituras computacional (b)



Fonte: O autor (2019).

De posse dos resultados de velocidade do pulso ultrassônico e densidade dos corpos de prova, obtido através do ensaio de absorção, foi estabelecida a relação dos módulos de elasticidade dinâmico dos concretos ensaiados através da Equação 2, disposta na antiga normativa britânica BS-1881-203 (BS, 1986).

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

E_d – Corresponde ao módulo de Elasticidade Dinâmico;

ρ – Corresponde à densidade do material;

V – Corresponde à velocidade do pulso;

ν – Corresponde ao coeficiente de Poisson dinâmico.

A única variável adotada no cálculo do módulo dinâmico foi o coeficiente de Poisson dinâmico (ν). Sabe-se que o valor de Poisson estático para concretos de cimento Portland de

modo geral está contido na faixa de 0,15 a 0,20. Para concretos de escória álcali-ativada, Thomas e Peethamparam (2015) concluem com boa reprodutibilidade que o coeficiente de Poisson (estático) para concretos de escória é cerca de dois terços do valor típico para concretos de cimento Portland, representando em termos absolutos 0,13.

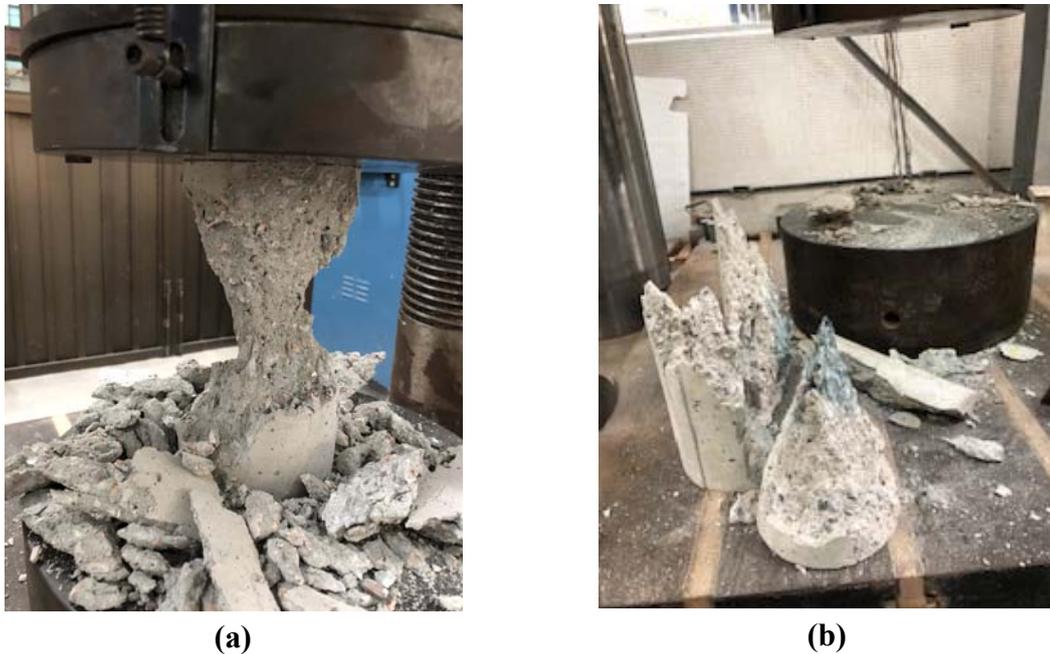
Ademais, sabe-se que o coeficiente de Poisson determinado dinamicamente é ligeiramente maior do que o obtido nos ensaios estáticos, estando entre 0,2 a 0,4. Gidrão (2015) afirma que o coeficiente de Poisson dinâmico tanto para concretos (de cimento Portland) como argamassas seria de 0,23. Sendo assim, adotou-se o valor de 0,23 para o coeficiente de Poisson dinâmico do concreto confeccionado à base de cimento Portland e 0,15 para o concreto de escória álcali-ativada, seguindo a regra apontada por Thomas e Peethamparam (2015).

3.2.8 Resistência à compressão

Para ruptura de corpos de prova de concreto foram utilizados 48 corpos de prova de cimento Portland e 48 de escória álcali-ativada, seguindo-se a disposição normativa da EN 12390-3 (BS, 2009). As superfícies de carregamento da prensa foram limpas, bem como das faces superior e inferior dos corpos de prova, removendo qualquer excesso de umidade ou sujidade. Os espécimes foram centrados de modo a não haver indução de tensões além da compressão.

Foi utilizada uma prensa universal para ensaios mecânicos, da marca INSTRON, modelo 5598, eletromecânica, microprocessada e com célula de carga com capacidade de 3000 KN (Figura 33a). A taxa de carregamento do ensaio se deu de forma contínua, com velocidade de carregamento de 0,6 MPa/s sendo a carga máxima resistida registrada para a ruptura (Figura 33b).

Figura 33 – Corpos de prova na prensa (a) e forma de ruptura de corpo de prova (b)



Fonte: O autor (2019).

3.2.9 Difração por Raios X (DRX)

Os ensaios de microestrutura através de Difração de Raios X (DRX) foi realizado a partir de material presente no centro dos corpos de prova de pasta (5 x 10 cm). Após a coleta das amostras do centro dos corpos de prova, estas foram identificadas e acondicionadas em situação de vácuo no intuito de preservação de sua condição desde a data da coleta até a data efetiva do ensaio. O ensaio se deu através do difratômetro D2-PHASER comercializado pela Bruker.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos monitoramentos de temperatura, umidade, nos ensaios de resistência à compressão, absorção, índice de vazios, massa específica, velocidade de pulso ultrassônico, etc, as relações existentes entre estes e o módulo de elasticidade dinâmico, DRX, bem como a discussão dos resultados, procurando o estabelecimento de correlação entre as variáveis e resultados obtidos nos ensaios e observações feitas no processo da pesquisa e na literatura.

4.1 TEOR DE UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA

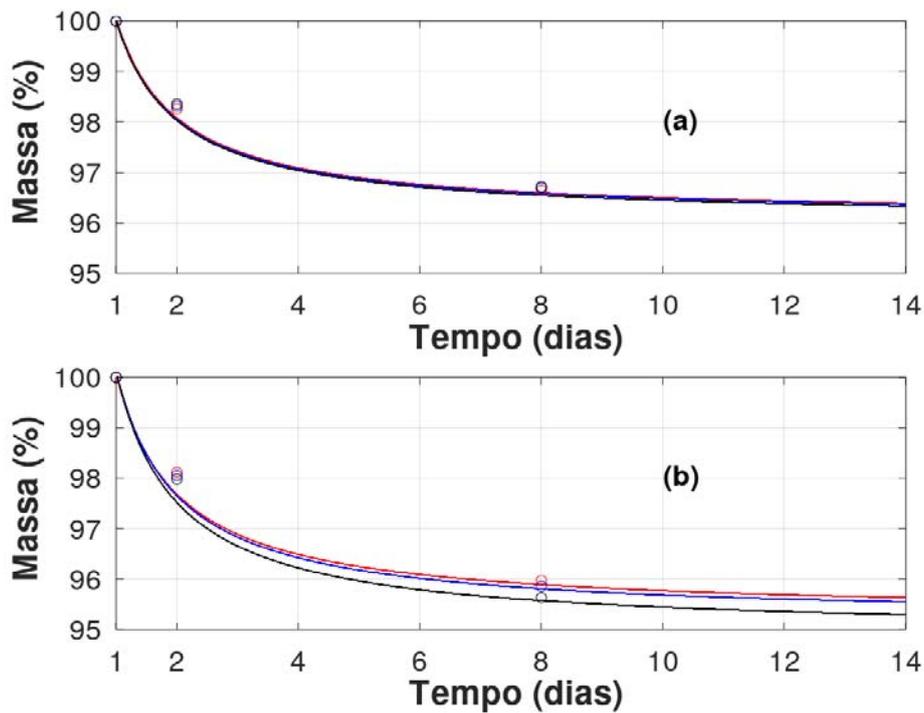
A umidade dos espécimes avaliada durante sua permanência em estufa ($105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$) por 7 dias resultou aproximadamente 4,2% e 3,3% para os concretos de cimento Portland e escória ativada, respectivamente, dado que as massas na data da saída de estufa representam 95,8% e 96,7% da massa inicial, para concretos de cimento Portland e escória ativada, respectivamente. A tendência de estabilização da massa dos 6 exemplares de concreto (3 de escória ativada e 3 de cimento Portland) pode ser visualizada na Figura 34. Seguindo a mesma tendência das curvas da Figura 34, a presença de umidade residual na data de saída da estufa, ou seja, após 7 dias em estufa, pode ser estimada como sendo 0,3%, para ambos os concretos.

Os espécimes podem ser considerados secos, mesmo porque a NBR 9778 (ABNT, 2005) considera secos corpos de prova mantidos em estufa por 72 h, enquanto que neste caso nela foram mantidos por 168 h, razão pela qual a umidade residual encontrada se mostrou baixa.

Ainda da Figura 34, tem-se expectativa de menor porosidade do concreto de escória, visto que o teor de umidade foi cerca de 22% inferior ao teor armazenado nos espécimes confeccionados com cimento Portland. O concreto moldado tendo como ligante a escória ativada apresentou menor dispersão de resultados para um mesmo procedimento de controle da produção.

A condição de refinamento dos poros promovida pela substituição total do cimento Portland pela escória ativada é nítida. Tal condição desfavoreceria a penetração agentes agressivos ao concreto, como de íons cloreto, o que sugere desempenho superior em termos de durabilidade.

Figura 34 – Massa relativa dos concretos de escória (a) e cimento Portland (b) armazenados em estufa



Fonte: O autor (2019).

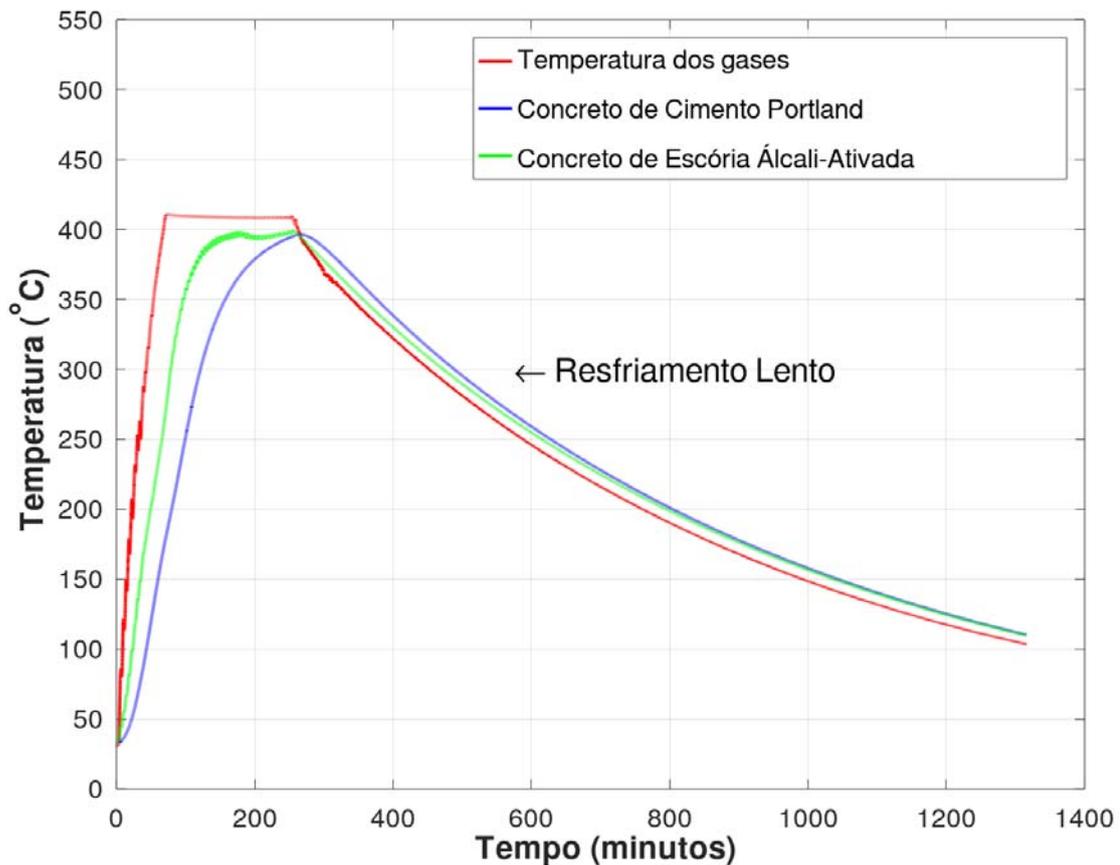
4.2 MONITORAMENTO DE TEMPERATURAS

Os dados obtidos da leitura de temperaturas dos gases no interior do forno elétrico a 400 °C, bem como os referentes às leituras de temperaturas dos corpos de prova de concreto de escória e cimento Portland utilizados para controle estão representados na Figura 35.

A taxa de aquecimento preestabelecida resultou efetivamente atingida. Constatou-se que o tempo estabelecido de permanência dentro do patamar de temperatura de ensaio foi suficiente para que o núcleo do concreto alcançasse a temperatura de ensaio na temperatura

intermediária (400 °C). Neste caso, para o concreto de cimento Portland, a condição estacionária somente foi atingida no final do patamar, enquanto que o concreto de escória álcali-ativada atingiu esta condição já na metade do tempo de permanência no patamar de temperaturas. Tal constatação pode indicar que o dano causado pelas temperaturas atingidas pelos núcleos dos corpos de prova de concreto de cimento Portland seja ligeiramente inferior ao dos espécimes de escória ativada, embora ambos espécimes tenham se submetido às mesmas condições de ensaio.

Figura 35 – Temperatura dos gases no forno elétrico e dos concretos de escória álcali-ativada e cimento Portland



Fonte: O autor (2019).

Ademais disso, o concreto de escória indicou ter uma condutividade térmica maior, pois os corpos de prova atingiram o *steady-state* antes dos corpos de prova de cimento Portland. O fato de haver atingido mais rapidamente o patamar de temperatura de ensaio e ficado por mais tempo a ele submetido possivelmente conduziu o espécime a perdas mais acentuadas de resistência e módulo de elasticidade. O concreto de cimento Portland se demonstrou menos sensível às variações inerentes ao ensaio.

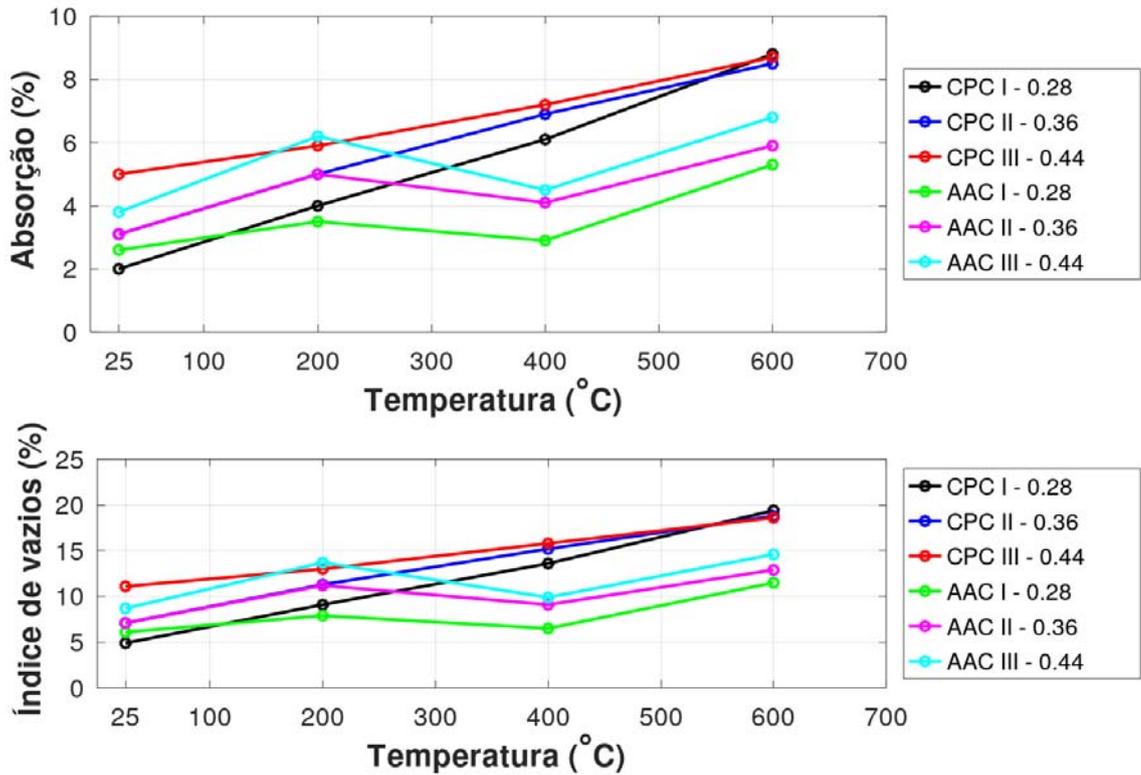
4.3 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Os resultados de absorção e índice de vazios para os concretos de cimento Portland (CPC) e escória álcali-ativada (AAC) estão dispostos na Figura 36. Os resultados obtidos indicam a convergência à medida do aumento da temperatura, em termos de absorção e porosidade, dos concretos à base de cimento Portland o que pode ser interpretado sob o prisma da degradação dos compostos hidratados da pasta, fissuramento da zona de transição, etc.

Por outro lado, a absorção do concreto de escória transparece superioridade ao passo que mantém a distinção entre traços mesmo sob elevadas temperaturas, além de apresentar alguma capacidade de rearranjo microestrutural ou ao menos ajuste da matriz porosa visto que há queda da porosidade na faixa de 200° C a 400° C. Além do quê, seja em termos absolutos, quanto em relativos, o resultado do concreto de escória para absorção e índice de vazios se mostrou mais adaptado às temperaturas elevadas.

Resultado semelhante é obtido em argamassas por Zuda et al. (2006) bem como Rovnaník e Dufka (2015), com rearranjo da matriz porosa de argamassas de escória ativadas por meio de solução de silicato de sódio.

Figura 36 – Absorção e índice de vazios nos concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC)

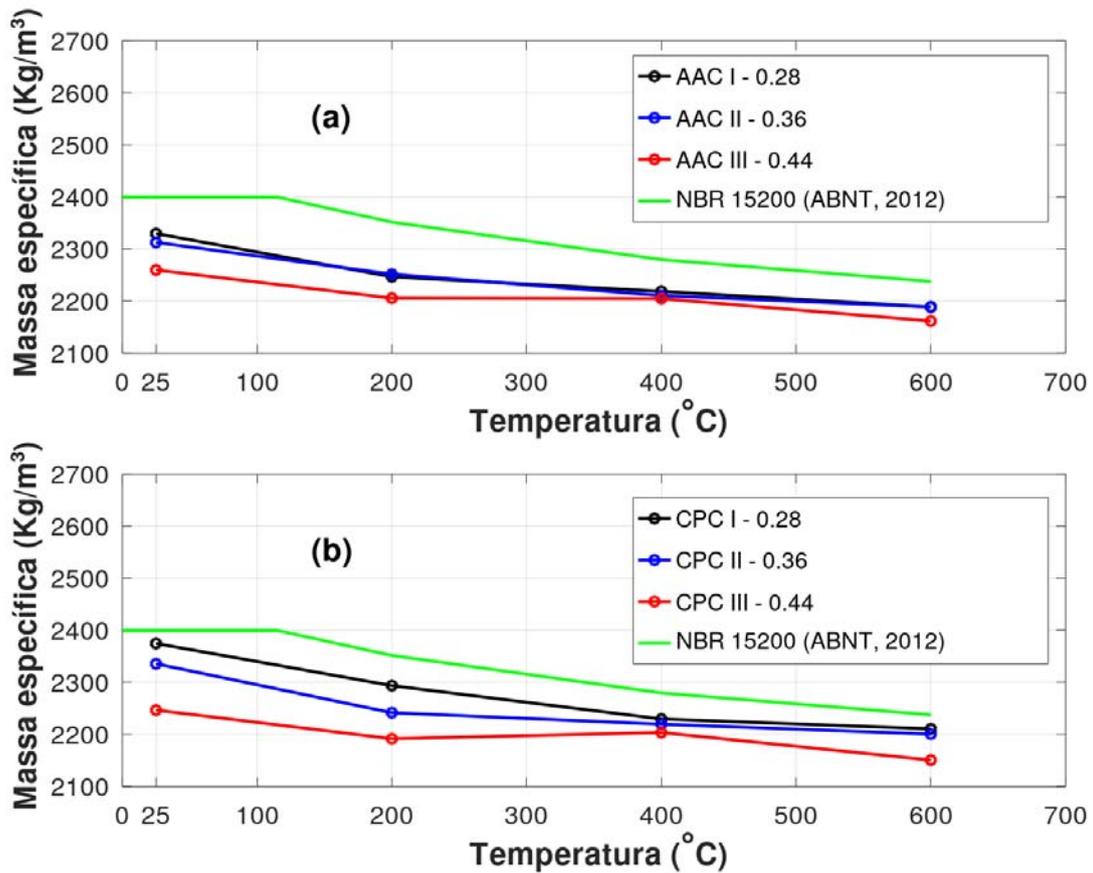


Fonte: O autor (2019).

Tal comportamento, no entanto, pouco se refletiu na massa específica dos concretos ensaiados, exceto pelo fato de que, em termos absolutos, o concreto de escória ativada se mostrou ligeiramente mais leve (cerca de 50 kg/m^3) que o de cimento Portland (Figura 37).

Todavia, em termos relativos, o comportamento dos concretos de escória e cimento verificou-se semelhante sob ação do fogo, ainda que o concreto de escória ativada foi capaz de manter razoável distinção de resultados em função dos traços, o que não se verifica com nitidez no concreto de cimento Portland.

Figura 37 – Massa específica dos concretos de escória ativada (a) e de cimento Portland (b) em função da temperatura

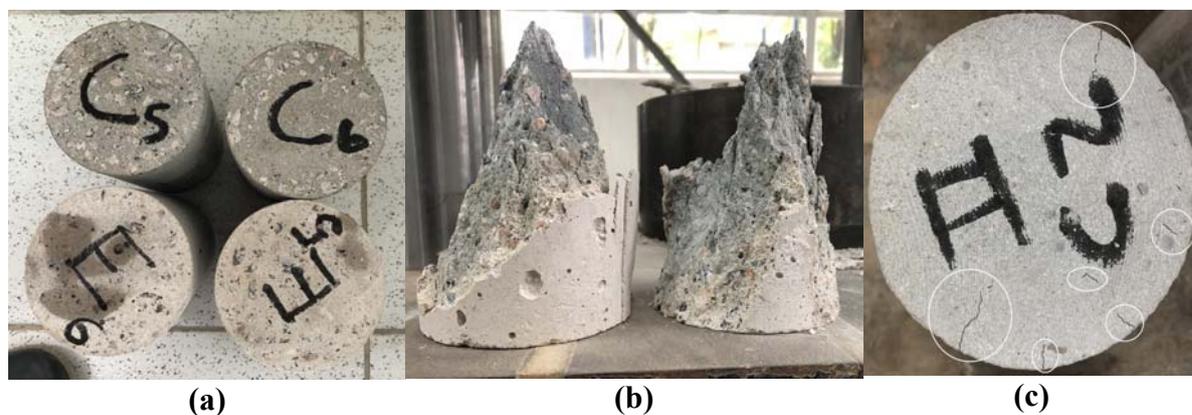


Fonte: O autor (2019).

4.4 ASPECTO VISUAL

Observou-se ligeira mudança na coloração dos espécimes à base de escória à depender das mais altas temperaturas, assumindo coloração rósea (Figura 38a) enquanto seu interior conservou cor esverdeada (Figura 38b). Ainda foi verificada sutil microfissuração superficial e radial em espécimes de cimento Portland (Figura 38c) expostos aos 600 °C.

Figura 38 – Comparação do aspecto visual externo dos concretos de escória ativada e cimento Portland (a) coloração esverdeada no núcleo do concreto de escória (b) e fissuração no espécime de cimento Portland (c)



Fonte: O autor (2019).

Chi (2012) também não registrou sinais de lascamento no concreto de escória, enquanto no concreto convencional foi constatado a partir da temperatura de 600 ° C em diante. A mudança na coloração do espécime cimentício estaria relacionada às mudanças nos estados de oxidação do ferro presente no concreto segundo Bernal et al. (2012). No concreto de escória ativada, a tonalidade rósea provavelmente guarda relação às mudanças no estado de oxidação dos compostos ferro-magnesianos presentes na escória.

Através da observação da coloração do concreto, tem-se expedita estimativa da temperatura a que o mesmo tenha suportado. Hager (2013), estudando o tema em concretos de alto desempenho confeccionados com cimento Portland, apresenta escala de cores capaz de estabelecer relação aproximada entre coloração superficial do espécime pós-fogo com a temperatura atingida.

Visto que os estudos de Hager (2013) tenham-se concentrado nos concretos à base de cimento Portland, pouca ou nenhuma aplicação seria verificável em concreto produzido à base de outro ligante (escória). O confronto das Figuras 38 e 7 permite inferir a temperatura de

queima do concreto de cimento Portland na faixa dos 500° C a 700° C. Na ausência de um espectrofotômetro, a análise visual seria razoável dado que o espécime cimentício da Figura 38c foi submetido a 600° C.

Não houve ocorrência de *spalling* neste estudo, o que pode ser explicado sob a premissa de que, após o período de 7 dias em estufa ($105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$) a presença de umidade no interior dos corpos de prova eram mínimas, de modo a resguardar os espécimes de poropressões elevadas, pretensas causadoras do fenômeno. Ademais, a adoção de taxa de aquecimento relativamente branda minimizaria eventuais gradientes de poropressão no interior do concreto.

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As resistências dos espécimes de escória ativada ensaiados tanto na condição de referência como nas condições de incêndio a 200, 400 e 600 °C, podem ser verificados na Tabela 13. De modo geral, pode-se afirmar a razoabilidade dos resultados do ponto de vista estatístico, dado que o coeficiente de variação se manteve baixo.

As resistências alcançadas são características de concretos de alta resistência, restando ainda resistência residual média de, pelo menos, 36,6 MPa a 600 °C. Os valores tachados na Tabela 13 foram descartados para fins de cálculo de resistência média e coeficiente de variação. Nota-se que os resultados obtidos para o concreto de escória ativada apresentam menor dispersão que os obtidos para o concreto de cimento portland, podendo indicar menores necessidades de controle tecnológico da produção para obtenção de altas resistências à temperatura ambiente ou elevadas.

Tabela 13 – Resistência à compressão para os concretos de escória ativada ensaiados

Temp. (°C)	Traço I				Traço II				Traço III			
	$f_{c,0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	$k_{c,0}$	CV (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	$k_{c,0}$	CV (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	$k_{c,0}$	CV (%)
REF.	92,7				82,0				65,6			
	96,2	93,1	1,0	2,7	76,2	78,8	1,0	3,2	67,3	68,1	1,0	3,2
	93,4				77,4				70,5			
	90,1				79,7				69,2			
200	72,2				70,4				61,0			
	69,5	70,9	0,8	1,6	73,7	71,2	0,9	2,4	65,1	62,3	0,9	3,7
	70,5				70,1				59,9			
	71,3				70,5				63,2			
400	62,1				58,8				51,2			
	60,9	61,0	0,7	2,6	66,4	58,3	0,7	0,9	48,1	49,6	0,7	3,1
	62,1				57,8				50,7			
	58,8				58,2				48,5			
600	43,1				41,3				36,8			
	41,8	42,4	0,5	1,4	38,0	39,1	0,5	4,0	36,3	36,6	0,5	4,9
	42,0				38,7				38,9			
	42,6				38,2				34,6			

Fonte: O autor (2019).

Os valores das resistências dos espécimes de cimento Portland ensaiados tanto na condição de referência como nas condições de incêndio a 200, 400 e 600 °C, podem ser verificados na Tabela 14. De modo geral, pode-se afirmar ainda a razoabilidade dos resultados do ponto de vista estatístico. Embora o coeficiente de variação encontrado seja superior ao registrado nos concretos de escória, ainda são aceitáveis. Os valores tachados na Tabela 14 foram descartados para fins de cálculo de resistência média e coeficiente de variação.

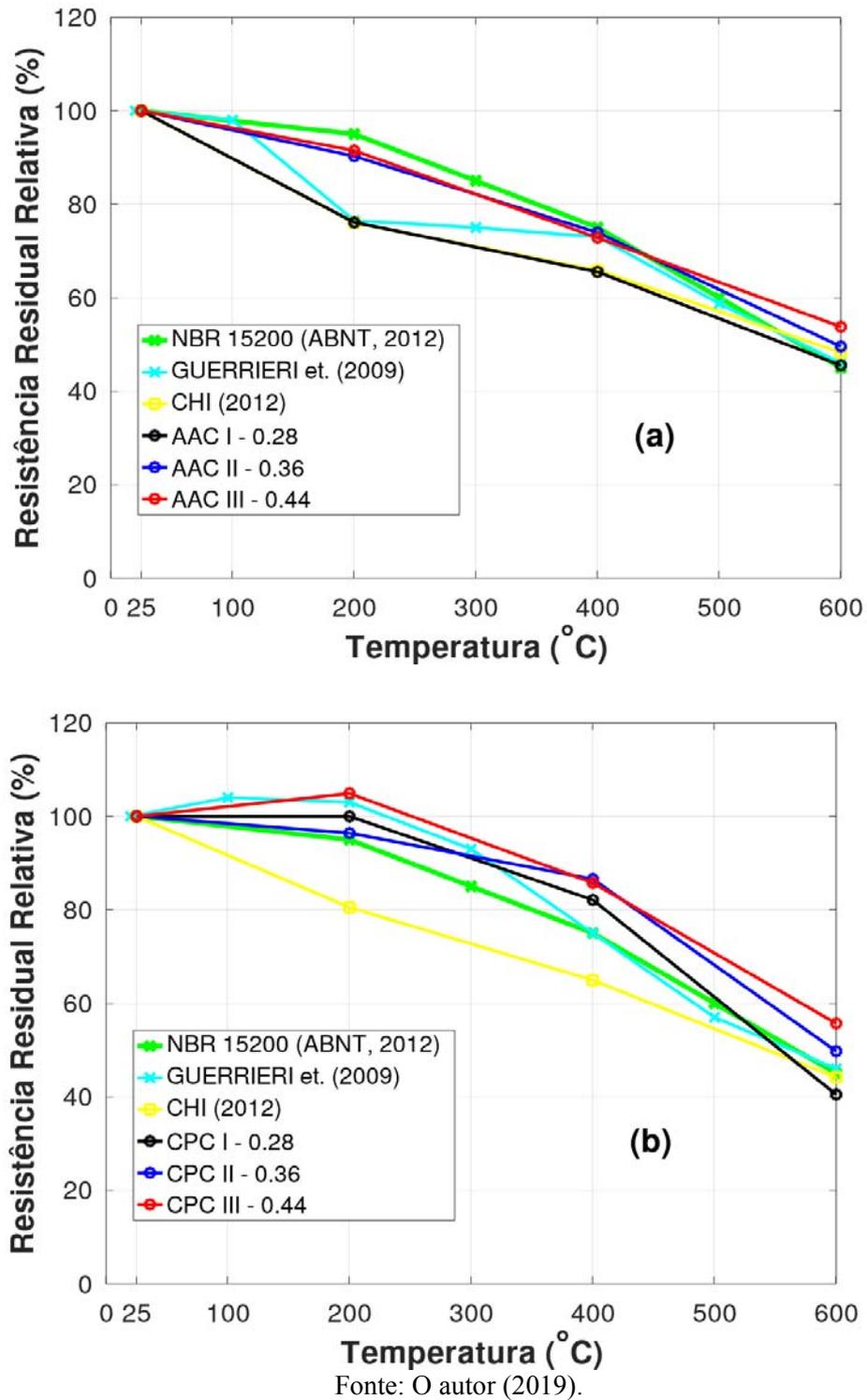
Tabela 14 – Resistência à compressão para os concretos de cimento Portland ensaiados

Temp. (°C)	Traço I				Traço II				Traço III			
	$f_{c,0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	$k_{c,0}$	CV (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	$k_{c,0}$	CV (%)	$f_{c,0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	$k_{c,0}$	CV (%)
REF.	111,2				76,4				51,1			
	100,9	103,8	1,0	5,0	71,8	75,7	1,0	4,7	55,9	52,4	1,0	5,7
	103,0				78,8				57,0			
	100,0				66,6				50,4			
200	107,5				74,3				57,4			
	105,8	103,8	1,0	3,4	69,9	72,9	1,0	2,9	55,1	55,0	1,0	3,3
	102,0				74,5				53,2			
	99,7				73,0				54,4			
400	85,2				67,8				47,2			
	88,0	85,2	0,8	2,6	63,9	65,5	0,9	2,5	42,9	50,0	0,9	4,8
	82,5				67,8				44,9			
	85,2				65,2				39,3			
600	43,8				38,8				32,5			
	42,4				38,8				30,8			
	40,2	42,0	0,4	3,6	35,2	37,6	0,5	5,5	28,5	29,2	0,6	4,7
	41,6				29,7				28,4			

Fonte: O autor (2019).

Em termos residuais, a Figura 39 demonstra a perda relativa de resistência dos concretos de cimento Portland e escória ativada em função da temperatura de exposição. Verifica-se uma maior resiliência ao fogo do concreto à base de cimento nas temperaturas ensaiadas, havendo na temperatura de 200° C ligeiro ganho de resistência para o fator água/ligante de 0,44 (traço III).

Figura 39 – Resistência residual à compressão para os concretos de escória ativada (a) e cimento Portland (b)



Destaca-se o formato parabólico descendente característico da resistência residual dos concretos de cimento, também visível na curva fornecida pela NBR 15200 (ABNT, 2012), tal comportamento contrasta com a tendência praticamente linear observável nos concretos de escória. Sendo assim, é de se esperar que para temperaturas que superem 600 °C o concreto de escória ativada apresente desempenho superior tanto em termos residuais (relativos) quanto em termos absolutos. A relação água/ligante exerceu mais influência nas resistências à compressão nos concretos de cimento Portland do que nos de escória ativada, exceto no traço I de escória (AAC I). Enquanto a variação da resistência à compressão para o concreto de cimento Portland foi de até 50 MPa nos casos de referência do traço mais pobre (III) ao mais rico (I), a variação máxima observada nas mesmas condições para o concreto de escória foi de apenas 25 MPa.

É notável que a utilização direta da NBR 15200 (ABNT, 2012) para avaliação da resistência residual à compressão de concretos de escória ativada conduz a superestimativa, enquanto para concretos confeccionados tendo o cimento Portland como ligante apresenta resultado satisfatório. Tal fato pode ser compreendido pela natureza dos concretos utilizados em pesquisas que culminaram na elaboração normativa – concreto de cimento Portland, bem como no fato de que a mesma trata da resistência do concreto à temperatura elevada e não de resistência residual. Os valores encontrados guardam boa relação com os expostos por Guerrieri et al. (2009) e Chi (2012) bem como mantém coerência com estudos em argamassas de escória ativadas alcalinamente desenvolvidos por Zuda et al. (2006) e Rovnaník e Dufka (2015).

Observa-se que para um mesmo fator água/ligante o concreto de escória ativada e o concreto de cimento convencional apresentaram comportamento semelhante em termos relativos apenas na temperatura de 600° C – no traço intermediário, por exemplo, a resistência residual converge para 50% de suas resistências na condição de referência. Tal condição enseja a consideração de sua aptidão mesmo em condições mais severas de incêndio, pois apresenta menor tendência de perda relativa a partir desta temperatura.

Como apontado por autores como Zuda et al. (2006), Guerrieri et al. (2009), Rovnaník e Dufka (2015) certo grau de incompatibilidade térmica existente entre a matriz formada pelas argamassas e o agregado graúdo seria a razão para as perdas de resistência, visto que a 573 °C o agregado graúdo (quartzoso) passaria da forma β para a forma α , com incremento de volume e conseqüente microfissuração e fragilização da zona de transição.

Os valores de resistência relativa residual média à compressão para ambos os concretos, em função da temperatura a que foram expostos os espécimes, pode ser visto na Tabela 15. Nela pode-se perceber que o concreto de escória ativada tende a superar em resistência residual à compressão o concreto de cimento Portland em temperaturas superiores aos 600 °C, haja vista o comportamento de ambos concretos, sobretudo pela variação expressiva entre 400 °C e 600 °C observada nos de cimento Portland.

Tabela 15 – Resistência residual relativa média à compressão dos espécimes de escória ativada e cimento Portland

Ligante	Temperaturas (°C)			
	REF	200	400	600
Escória ativada	1,0	0,8	0,7	0,5
Cimento Portland	1,0	1,0	0,9	0,5

Fonte: O autor (2019).

4.6 VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Os resultados de medição da velocidade de pulso ultrassônico através dos corpos de prova de concreto de cimento Portland e escória ativada nas diversas condições de exposição (Referência, 200 °C, 400 °C e 600 °C) constam na Tabela 16.

Destaca-se o fato de que a velocidade média teve variações relativas iguais no caso da escória ativada como ligante, independentemente do traço; semelhantemente, no caso dos concretos

de cimento Portland as variações relativas também obedeceram a um decréscimo igual, a despeito dos traços.

Além disso, o valor relativo residual de velocidade de pulso para cada ligante se aproxima do valor relativo de resistência residual à compressão, tal semelhança de comportamento pode ser visto também na Tabela 16.

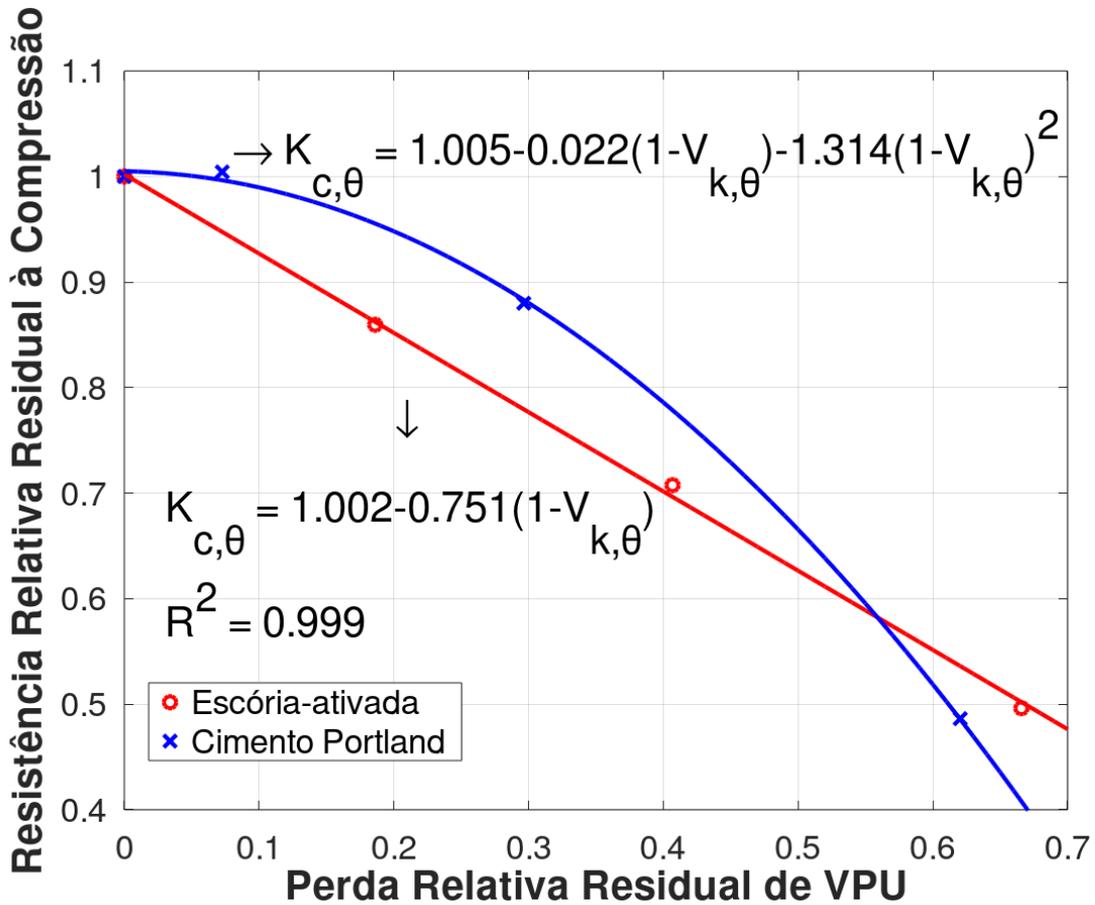
Tabela 16 – Resultados de velocidade de pulso ultrassônico para os concretos de escória ativada e cimento Portland ensaiados no modo direto

Traço	Temp. (°C)	Escória Álcali-Ativada			Cimento Portland		
		V _{média} (m/s)	V _{k,0}	CV (%)	V _{média} (m/s)	V _{k,0}	CV (%)
I	REF	3889,5	1,0	1,8	4876,2	1,0	0,6
	200	3081,2	0,8	1,9	4493,7	0,9	0,8
	400	2243,2	0,6	1,5	3328,8	0,7	0,9
	600	1304,3	0,3	1,7	1937,3	0,4	1,3
II	REF	3810,3	1,0	1,0	4622,0	1,0	0,8
	200	3094,3	0,8	1,1	4345,0	0,9	0,6
	400	2457,0	0,6	1,3	3402,8	0,7	0,8
	600	1311,3	0,3	1,8	1664,7	0,4	1,0
III	REF	3940,4	1,0	1,8	4395,3	1,0	0,4
	200	3299,2	0,8	1,4	4045,8	0,9	0,9
	400	2198,7	0,6	2,0	3040,8	0,7	1,3
	600	1273,8	0,3	1,8	1677,2	0,4	0,9

Fonte: O autor (2019).

Observando a Figura 40, tem-se que a velocidade de pulso ultrassônico apresentou boa correlação com a resistência relativa média residual obtida dos exemplares rompidos à compressão, sobretudo no caso do concreto de escória ativada.

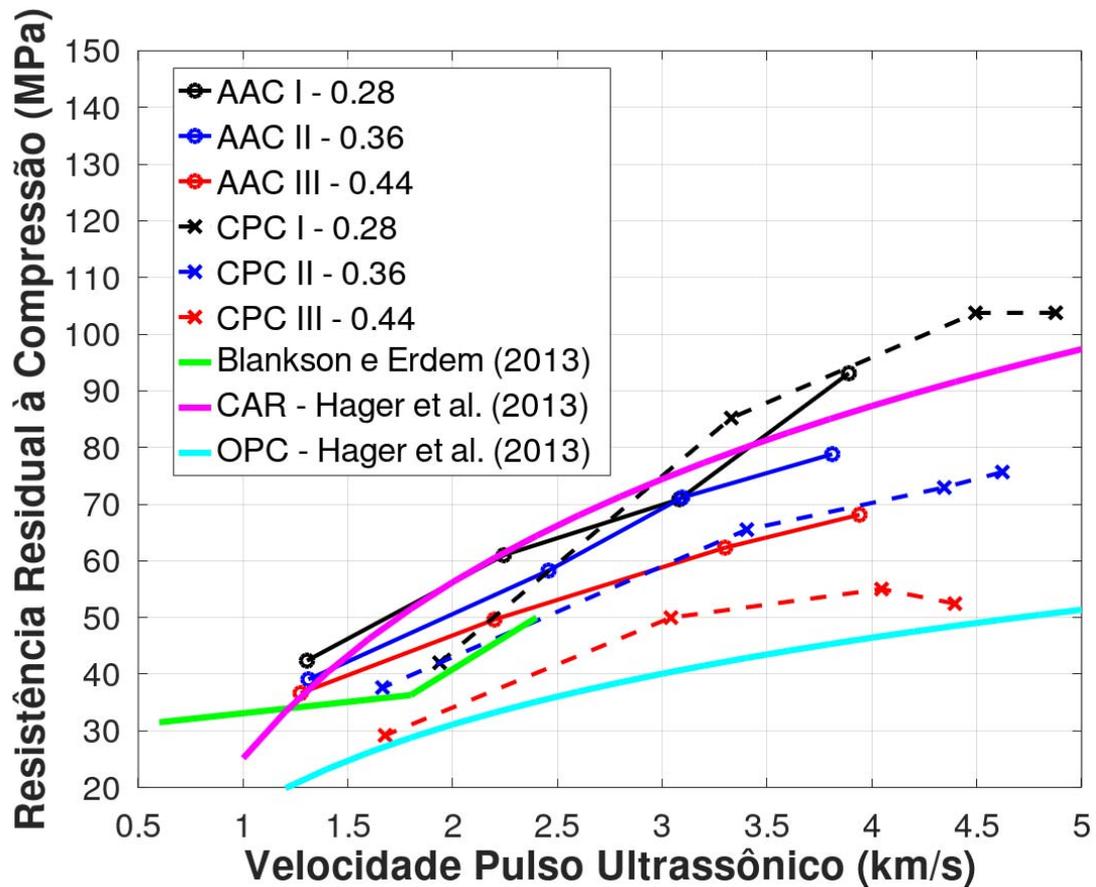
Figura 40 – Correlação entre perda relativa de resistência residual à compressão e perda relativa residual de Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU)



Fonte: O autor (2019).

Para o concreto de cimento Portland, o comportamento parabólico é novamente percebido, enquanto que para o concreto de escória ativada, verifica-se um comportamento linear com relação à velocidade de passagem do pulso ultrassônico nas mesmas condições de moldagem, cura e temperatura a que foram submetidos os de cimento Portland (Figura 40). Os valores absolutos de resistência residual à compressão e pulso ultrassônico obtidos nos ensaios podem ser visualizados na Figura 41, para ambos os ligantes e respectivos traços.

Figura 41 – Resistência à compressão residual versus Velocidade de Pulso Ultrassônico nos concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC)



Fonte: O autor (2019).

Percebe-se desde a Figura 41, bem como da Tabela 16, que a faixa de resultados de velocidade de pulso ultrassônico para os concretos de escória ativada ensaiados limitam-se ao intervalo de 1,2 km/s a 4,0 km/s, enquanto que para os concretos de cimento Portland ensaiados o intervalo é dado entre 1,5 km/s e 5,0 km/s. Ou seja, a utilização de equações e correlações, obtidas para concretos de cimento Portland, em concretos de escória ativada podem induzir ao erro na estimativa da resistência deste, visto que os concretos trabalham em diferente faixas de velocidade de pulso ultrassônico.

Após a obtenção dos resultados de velocidade de pulso ultrassônico através dos concretos ensaiados, utilizando a Equação 2, foi possível obter os módulos de elasticidade dinâmico para os concretos de cimento Portland e escória ativada, lançando mão do coeficiente de Poisson adotado e dos resultados já disponíveis para massa específica dos concretos em função das temperaturas de ensaio, tais resultados de módulo dinâmico constam na Tabela 17.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade residual dinâmico para os concretos de escória ativada e cimento Portland

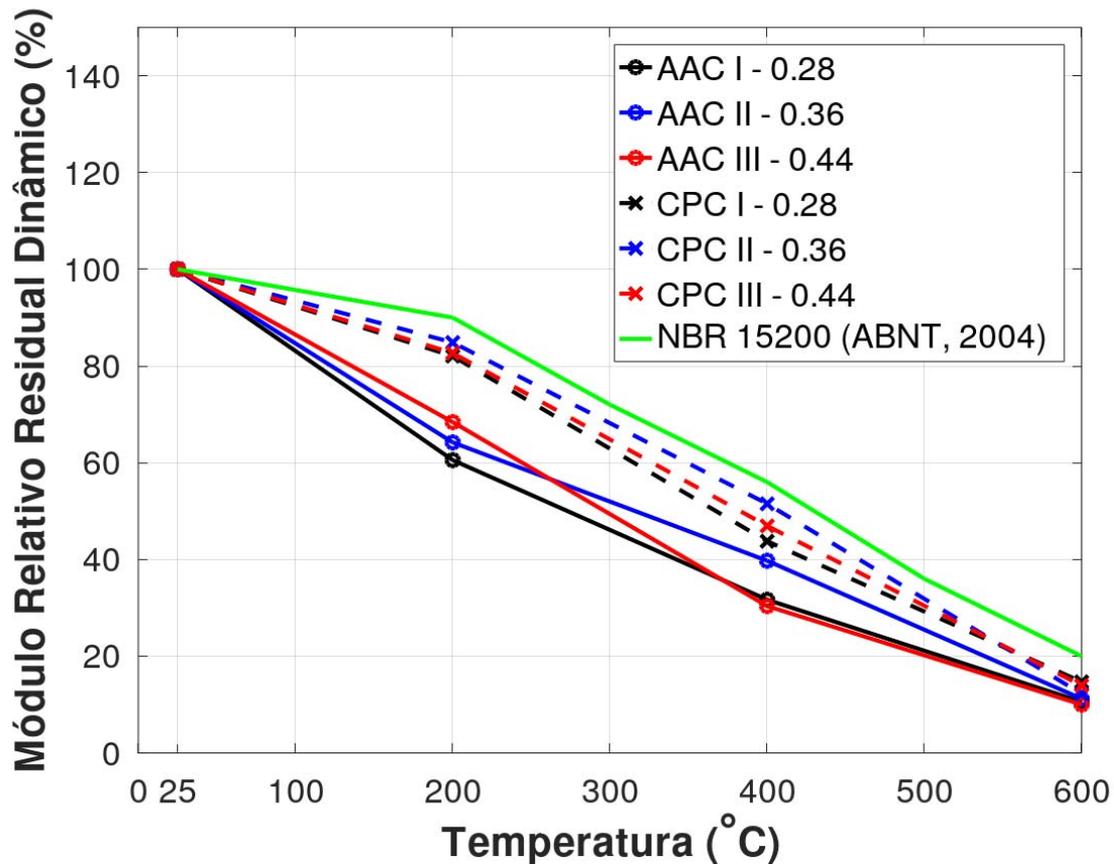
Traço	Temp. (°C)	Escória Álcali-Ativada		Cimento Portland	
		$E_{d,0}$ (GPa)	$k_{Ed,0}$	$E_{d,0}$ (GPa)	$k_{Ed,0}$
I	REF	33,3	1,0	48,7	1,0
	200	20,2	0,6	50,0	0,8
	400	10,6	0,3	21,3	0,4
	600	3,5	0,1	7,2	0,2
II	REF	31,8	1,0	43,0	1,0
	200	20,4	0,6	36,5	0,8
	400	12,6	0,4	22,2	0,5
	600	3,6	0,1	5,3	0,1
III	REF	33,2	1,0	37,4	1,0
	200	22,7	0,7	31,0	0,8
	400	10,1	0,3	17,6	0,5
	600	3,3	0,1	5,2	0,1

Fonte: O autor (2019).

Observando a mesma tendência de expressar o módulo residual em termos relativos, temos o disposto na Figura 42. Assim como na resistência residual, a segurança ficaria a desejar na hipótese do uso da NBR 15200 (ABNT, 2004) para avaliação de propriedades mecânicas residuais de concretos de escória ativada, visto que o módulo dinâmico residual estaria de 15 a 30% abaixo do previsto na mesma a depender da temperatura de ensaio. O concreto de

cimento Portland, por outro lado, apresentou boa aproximação com a curva dada pela NBR 15200 (ABNT, 2004), estando aquém dela em, no máximo, 10%.

Figura 42 – Módulo de elasticidade dinâmico residual para os concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC)



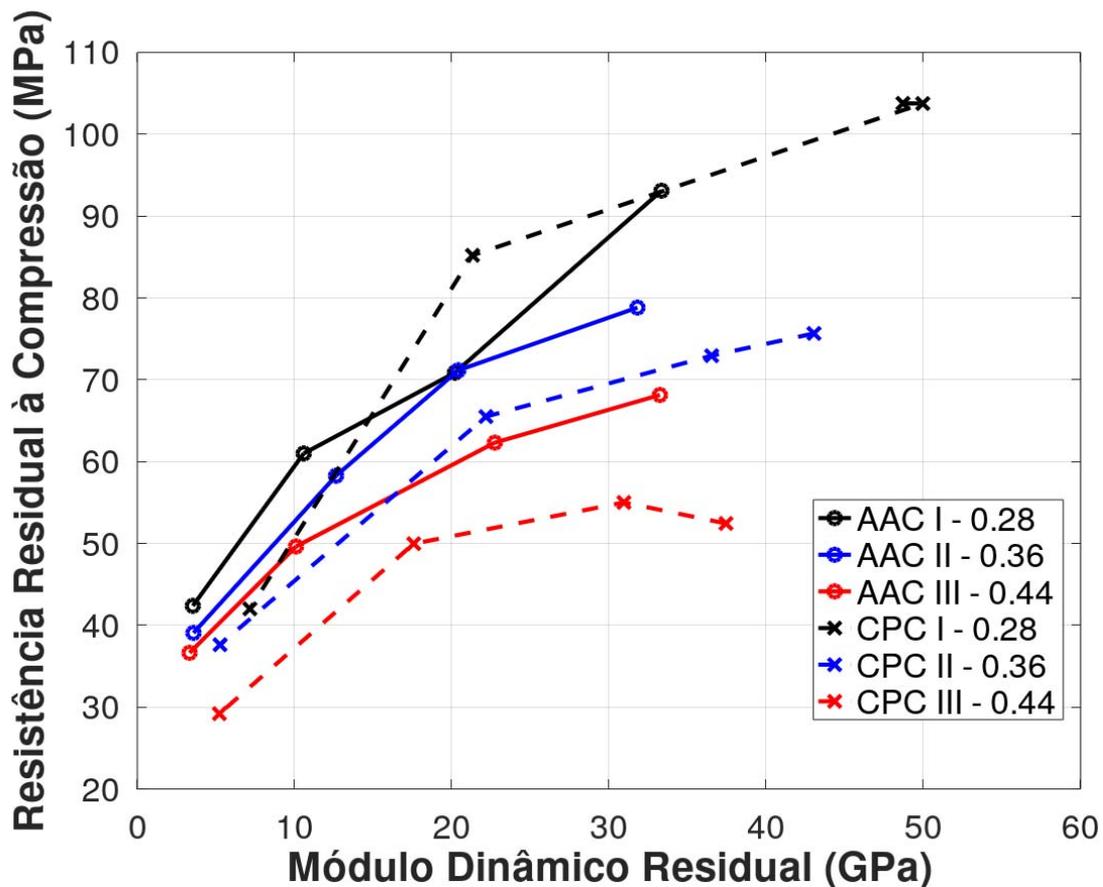
Fonte: O autor (2019).

A maior aproximação dos resultados de módulo relativo residual dinâmico do concreto de cimento Portland para a disposição da NBR 15200 (ABNT, 2004) é razoável e esperada, visto que a referida norma foi elaborada tendo como pressuposição a utilização de cimento Portland como ligante do concreto e não escória. Todavia, vale ressaltar que a referida norma trata de módulo de elasticidade estático na temperatura elevada, não dinâmico. Tal fato aponta para a necessidade de atualizações normativas de modo a englobar a diversidade de produção e

concepções de concretos existentes, bem como aponta para a necessidade de maiores estudos que fundamentem regulação normativa.

Ademais disso, verificou-se comportamento interessante na correlação estabelecida entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência residual à compressão, a qual pode ser visualizada na Figura 43. Nota-se que o concreto de cimento Portland apresenta maior dependência entre as variáveis de módulo dinâmico e resistência, ou seja, a taxa com a qual a resistência é afetada mediante alguma variação no módulo de elasticidade dinâmico é maior que no concreto de escória ativada.

Figura 43 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico residual e resistência residual à compressão para os concretos de escória ativada (AAC) e cimento Portland (CPC)



Fonte: O autor (2019).

É notório também o fato de que a sensibilidade de tal correlação é mais pronunciada no caso do concreto de cimento Portland do que no de escória ativada, isto é, o comportamento dos traços I, II e III expresso na figura guardam entre si distanciamento regular e tendência praticamente invariável, a despeito das temperaturas elevadas. No concreto de escória ativada, por outro lado, as curvas apresentam menor espaçamento entre si, sendo possível notar pontos em que as mesmas praticamente se confundem.

Ainda pode-se destacar a semelhança das curvas presentes nas Figuras 41 e 43 visto que ambas compartilham a mesma origem: o ensaio de pulso ultrassônico através do concreto; sendo o módulo de elasticidade dinâmico apenas afetado por escalar função das variáveis a massa específica e coeficiente de Poisson dinâmico, como expresso na Equação 2.

4.7 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

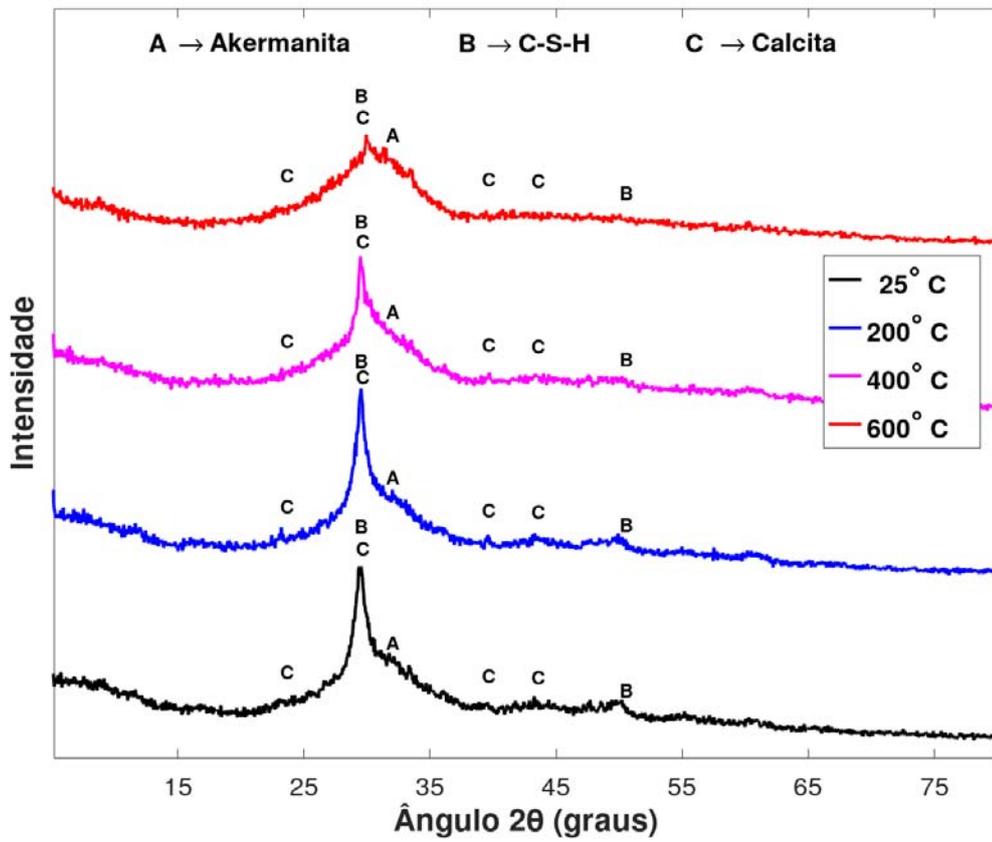
Durante os ensaios foram identificadas às temperaturas elevadas a presença do principal produto de hidratação da escória ativada, o C-S-H, bem como outras fases, tais como a calcita (CaCO_3) e Akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$). A identificação destas fases tem relatos na literatura em autores como Zuda et al. (2006), Haha et al. (2011) e Rovnaník et al. (2013).

Segundo autores como Zuda et al. (2006) e Rovnaník et al. (2013), a akermanita seria responsável pelo rearranjo microestrutural da matriz ligante da escória ativada. Tal fase cristalina parece exercer papel fundamental no desempenho deste concreto em situação de incêndio. A ligeira degradação parcial dos silicatos hidratados e da calcita, bem como o indicativo de início de cristalização da akermanita a 600 °C podem ser observados na Figura 44. Os demais traços são omitidos por apresentarem tão somente comportamento similar.

Para Rovnaník et al. (2013) trata-se da principal mudança na microestrutura da escória álcali-ativada: a desidratação da fase de silicatos hidratados e início de cristalização de novas fases, dentre as quais a akermanita seria a dominante. Zuda et al. (2006) aponta que, embora a

akermanita tenha seu pico visto no ensaio a 600 °C, aos 1200 °C é que há ganhos apreciáveis nas propriedades mecânicas.

Figura 44 – Resultados de ensaios DRX para o traço II da pasta de escória ativada em função das temperaturas de ensaio



Fonte: O autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou o comportamento residual de concretos de alta resistência, confeccionados a partir de escória ativada, para diferentes traços e temperaturas de exposição. Foram também avaliadas a resistência residual, índice de vazios, massa específica e absorção residuais, a influência das condições de ensaio sobre a microestrutura e sobre a passagem de pulso ultrassônico, etc. Pode-se apontar como conclusões que:

- Os resultados de monitoramento das temperaturas indicam maior condutividade térmica associada ao concreto produzido com escória ativada dado que os corpos de prova deste concreto atingiram o *steady-state* antes dos corpos de prova produzidos a partir de cimento Portland.
- Não foi registrada condição de *spalling* em nenhum dos concretos. Não obstante, sob o aspecto visual constatou-se ligeira mudança na coloração dos espécimes confeccionados à base de escória ativada nas temperaturas mais altas de ensaio, assumindo coloração rósea enquanto seu interior conservou cor esverdeada. Ainda foi verificada sutil microfissuração superficial e radial em espécimes de cimento Portland expostos aos 600 °C.
- A relação água/ligante exerceu mais influência nas resistências residuais à compressão nos concretos de cimento Portland do que nos de escória ativada, exceto no traço I de escória (AAC I). Havendo tendência de superação do concreto de escória sobre o de cimento Portland em temperaturas superiores a 600 °C.
- A velocidade de pulso ultrassônico através dos corpos de prova de concreto de escória ativada apresentou boa correlação linear com a resistência relativa residual à compressão, enquanto que a correlação obtida para o concreto de cimento Portland assume forma parabólica. De modo que é possível estimar a resistência relativa residual à compressão dos concretos de escória ativada a partir da velocidade relativa residual do pulso ultrassônico através deste concreto.

- A maior aproximação dos resultados de módulo relativo residual dinâmico do concreto de cimento Portland para a disposição da NBR 15200 (ABNT, 2004) é razoável e esperado, visto que a mesma foi elaborada tendo como pressuposta a utilização de cimento Portland como ligante do concreto e não escória. Neste caso, a utilização da norma para estimativa do módulo de elasticidade dinâmico residual em concretos de cimento Portland seria próximo à realidade observada nos ensaios; por outro lado, a aplicação da mesma norma no concreto de escória conduziria a certa superestimativa.
- O ensaio de DRX indica formação de fases mais resistentes às temperaturas elevadas; tais fases vão sendo formadas ao passo da degradação dos silicatos hidratados do concreto de escória. O desempenho mecânico residual do concreto de escória ativada provavelmente guarda relação com tal fenômeno.
- A perda de resistência no concreto de escória em situação de incêndio, mesmo sob a expectativa da formação de novas fases, está provavelmente associada a certo grau de incompatibilidade térmica existente entre a matriz formada pela argamassa e agregado graúdo. Este, sob situação de incêndio, sofreria incremento volumétrico por volta dos 573 °C, decorrente microfissuração na zona de transição e consequente perda de resistência.

Sugerem-se trabalhos futuros, para uma maior compreensão, não apenas do concreto de escória, mas também de seu desempenho em situação de incêndio:

- Estudos de análise numérica em peças e estruturas confeccionadas a partir deste concreto, haja vista a frequente constatação de linearidade do comportamento deste concreto, inclusive em situação de incêndio.
- Estudos sobre a influência do teor de Na_2O e do módulo de sílica (utilizados na ativação) sobre as propriedades residuais do concreto de escória.
- Estudos que correlacionem ensaios não-destrutivos e propriedades residuais físicas e mecânicas para este concreto.
- Estudos com agregados miúdos e/ou graúdos mais compatíveis com a matriz da pasta de escória ativada, o que potencializaria o uso deste concreto sob altas temperaturas.

- Estudos de durabilidade, sobretudo em ambientes de grande agressividade ambiental.
- Estudos de métodos de industrialização do concreto de escória.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M. S. Performance of Concrete Structures Exposed to Fire. **Research and Development Bulletin of Portland Cement Association**, n. RD060.01D, 1977.

AÏTCIN, Pierre-Claude. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

AL-OTAIBI, Saud. Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 2059–2067, 2008.

ANDERBERG, Y.; FORSÉN, N. E. Fire Resistance of Concrete Structures. **Lund Institute of Technology – Division of Building Fire Safety Report**, v. 3009, 1982.

ANDERBERG, Y.; THELANDERSSON, S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures. 2. Experimental Investigation and Material Behaviour Model. **Lund Institute of Technology – Division of Building Fire Safety Report**, v. 54, n. 54, 1976.

ARAÚJO JÚNIOR, N. T. **Concreto de alta resistência produzido com escória alcali-ativada**. 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5627**: Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 1980. (CANCELADA)

_____. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. (CANCELADA)

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

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

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

BAKHAREV, T; SANJAYAN, J.; CHENG, Y. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1367-1374, 2000.

BAZANT, Z. P.; THONGUTHAI, W. Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction. **Magazine of Concrete Research**, v. 31, n. 107, p. 67-76, 1979.

BEN HABA, M.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 301-310, 2011.

BERNAL, S. A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; RUIZ, F.; QUIÑONES, H.; PROVIS, J. L. Desempeño a temperaturas altas de morteros y hormigones basados em mezclas de escoria/metacaolín activadas alcalinamente. **Materiales de Construcción**, v. 62, n. 308, p.471-488, 2012.

BERNAL, S. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; PROVIS, J. L. Performance at high temperature of alkali-activated slag pastes produced with silica fume and rice husk ash based activators. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 318, p.1-10, 2015.

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

BLANKSON, M. A.; ERDEM, S. Experimental and Statistical Analysis of the Impact Resistance, Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Normal and High Strength Concrete Exposed to Elevated Temperatures. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**. v. 2, n. 12, p.1591-1598, 2013.

BRITISH STANDARD. **BS 1881: Part 203** – Testing concrete: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, London, 1986. (CANCELADA).

BRITISH STANDARD. **EN 12390-2**: Testing hardened concrete – Making and curing specimens for strength tests. London, 2009.

_____. **EN 12390-3**: Testing hardened concrete - Compressive strength of test specimens. London, 2009.

_____. **EN 12504-4**: Testing concrete - Determination of ultrasonic pulse velocity. London, 2004.

BROUGH, A. R.; ATKINSON, A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p.865-879, 2002.

CHEN, W.; BROUWERS, H. J. H. The hydration of slag, part 1: Reaction models for alkali-activated slag. **Journal of Materials Science**, v. 42, p.428-443, 2007.

CHI, M. Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p.240-245, 2012.

CHI, M. Mechanical Strength and Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Concrete. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 24, n. 5, p.958-967, 2016.

CIMENTO MIZU S/A. **Certificado de ensaios em escória**. 2018.

CIMENTO NACIONAL. **Certificado de ensaios em cimento**. Pitimbu, 2018.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 3, p.455-458, 1999.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p.1401-1406, 2000.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Early age strength and workability of slag pastes activated by sodium silicates. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 5, p.321-326, 2001.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. **Anais....** São Paulo: EPUSP, 2003.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.12, v.1, p.345-379.

DING, Y.; DAI, J. G.; SHI, C. J. Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 165, p.310-320, 2018.

EUROCODE 2. **EN 1992-1-2:2004**. Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. CEN, 2004.

FELICETTI, R.; LO MONTE, F. Concrete spalling: Interaction between tensile behaviour and pore pressure during heating. **MATEC Web of Conferences**, v. 6, n. 3001, p.1-9, 2013.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. Structure of Calcium Silicate Hydrates Formed in Alkaline-Activated Slag: Influence of the Type of Alkaline Activator. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 86, n. 6, p. 1389-1394, 2003.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Tradução de Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; HOLZER, L.; FIGI, R.; WINNEFELD, F. Hydration of alkali-activated slag: Comparison with ordinary Portland cement. **Advances in Cement Research**, v. 18, p.119-128, 2006.

GUERRIERI, M.; SANJAYAN, J.; COLLINS, F. Residual compressive behavior of alkali-activated concrete exposed to elevated temperatures. **Fire and Materials**, v. 33, p. 51-62, 2009.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences**, v. 61, n. 1, 2013.

HAGER, I.; CARRÉ, H.; MRÓZ, K. Damage Assessment of Concrete Subjected to High Temperature by Means of the Ultrasonic Pulse Velocity – UPV Method. **Studies and Researches**, v. 32, p. 197-211, 2013.

HE, J.; CAI, J.; SUN, Z. Hydration Characteristics of Alkali-Activated Slag Cement. **Romanian Journal of Materials**, v. 48, n. 8, p.168-176, 2018.

HSU, J. H.; LIN, C. S. Residual Bearing Capabilities of Fire-Exposed Reinforced Concrete Beams. **International Journal of Applied Science and Engineering**, v. 4, n. 2, p. 151-163, 2006.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HUMPHREY, R. L. The fire-resistive properties of various building materials. **Department of The Interior United States Geological Survey Bulletin**, n. 370, 1909.

JI, Tao; GAO, Qiaoling; ZHENG, Wenyuan; LIN, Xujian; WU, Hwai-Chung. Interfacial Transition Zone of Alkali-Activated Slag Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 3, p.347-354, 2017.

JIAO, Z.; WANG, Y.; ZHENG, W.; HUANG, W. Effect of Dosage of Alkaline Activator on the Properties of Alkali-Activated Slag Pastes. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p.1-12, 2018.

KLEIN JÚNIOR, O. **Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão normal composta**. 2011. 210 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KODUR, V. K. R. Fire Performance of High-Strength Concrete Structural Members. **Construction Technology Update**, n. 31, p. 1-4, 1999.

KODUR, V. K. R. Guidelines for Fire Resistant Design of Concrete-Filled Steel HSS Columns – State-of-the-Art and Research Needs. **Steel Structures**, v. 7, p. 173-182, 2007.

LIAO, F.; HUANG, Z. H. Modeling Cracks of Reinforced Concrete Slabs under Fire Conditions. **Journal of Structural Engineering (United States)**, v. 144, n. 5, p.1-15, 2018.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MEDA, A.; GAMBAROVA, P.; BONOMI, M. High-Performance Concrete in Fire-Exposed Reinforced Concrete Sections. **ACI Structural Journal**, v. 99, n. 3, p.277-287, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 2nd ed. Berkeley: University of California, 2001.

MEHTA, P. K. **Concrete in marine environment**. New York: Elsevier Science Publishers, 2003.

MEJÍA, R.; MALDONADO, J.; GUTIÉRREZ, C. Performance of alkaline activated slag at high temperatures. **Materiales de Construcción**. v. 54, n. 276, p. 87-92, 2004.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2008. 253 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MELO NETO, A. A.; CINCOTTO, M. A.; REPETTE, W. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p.565-574, 2008.

MENDES, A.; SANJAYAN, J.; COLLINS, F. Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. **Materials and Structures**, v. 41, p.345-350, 2008.

MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. SELF-Cured Alkali Activated Slag Concrete Mixes - An Experimental Study. **World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering**, v. 8, n. 4, p.477-482, 2014.

NOVAKEM. **Certificado de análise**. Simões Filho, 2018.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, p.1305-1314, 2008.

PERNAMBUCO QUÍMICA S/A. **Certificado de análise**. Jaboatão dos Guararapes, 2018.

PIRES, T. A. C. **Gerenciamento de riscos de incêndio: avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas**. 2006. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

PIRES, T. A. C.; RODRIGUES, J. P. C.; RÊGO SILVA, J. J.; CORREIA, A. M. Pilares circulares em aço preenchidos por concreto sujeitos a incêndio. In: Congresso Ibero-Latino-americano em Segurança Contra Incêndios, 1., 2011, Natal. **Anais...** . Natal: CILASCI, 2011.

PHAN, L. T.; CARINO, N. J. Fire Performance of High Strength Concrete: Research Needs. **National Institute of Standards and Technology**, 2000.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p.40-48, 2018.

PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. **Materiales de Construcción**, v. 45, n. 239, p.53-64, 1995.

ROVNANÍK, P.; BAYER, P.; ROVNANÍKOVÁ, P. Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1479-1487, 2013.

ROVNANÍK, P.; DUFKA, Ā. Effect of the aggregate type on the properties of alkali-activated slag subjected to high temperatures. **Materiali in tehnologije**, v. 49, p.709-713, 2015.

SHARMA, U. K.; BHARGAVA, P.; SINGH, B.; SINGH, Y.; KUMAR, V.; KAMATH, P.; USMANI, A.; TORERO, J.; GILLIE, M.; PANKAJ, P.; MAY, I.; ZHANG, J. Full-scale testing of a damaged reinforced concrete frame in fire. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Journal Structures and Buildings**, v. 165, p.335-346, 2012.

SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. A influência da temperatura na hidratação dos cimentos de escória de alto-forno. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, n. 224, 1998.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em Situação de Incêndio**. 1997. 170 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2016.

THOMAS, R. J.; PEETHAMPARAN, S. Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior. **Construction and Building Materials**, v. 93, p.49-56, 2015.

TOUMI, B.; RESHEIDNAT, M.; GUEMMADI, Z.; CHABIL, H. Coupled Effect of High Temperature and Heating Time on the Residual Strength of Normal and High-Strength Concretes. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 3, n. 4, p.322-330, 2009.

TRAN, Tai Thanh; KWON, Hyug-Moon. Influence of Activator Na₂O Concentration on Residual Strengths of Alkali-Activated Slag Mortar upon Exposure to Elevated Temperatures. **Materials**, v. 11, n. 1296, p.1-19, 2018.

TÜRKER, H. T.; BALÇIKANLI, M.; DURMUŞ, İ. H.; ÖZBAY, E.; ERDEMİR, M. Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. **Construction and Building Materials**, v. 104, p.169-180, 2016.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L. Hydration Products of Alkali Activated Slag Cement. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 3, p.561-571, 1995.

WANG, S. D.; PU, X. C.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. **Advances in Cement Research**, v. 7, n. 27, p.93-102, 1995.

WANG, Y. Performance of steel-concrete composite structures in fire. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 7, p.86-102, 2005.

WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. 2006. 183 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ZUDA, L.; PAVLÍK, Z.; ROVNANÍKOVÁ, P.; BAYER, P.; ČERNÝ, R. Properties of alkali activated aluminosilicate material after thermal load. **International Journal of Thermophysics**, v. 27, n. 4, p.1250-1263, 2006.