

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Especialização: Sustentabilidade e Gestão do
Ambiente Construído

Fabício Amorim Ferreira

DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO EXPOSTAS A ALTAS TEMPERATURAS
EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE USINAS
SIDERÚRGICAS

Belo Horizonte

2019

FABRÍCIO AMORIM FERREIRA

**DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO EXPOSTAS A ALTAS TEMPERATURAS
EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE USINAS
SIDERÚRGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: Paula Bamberg

Belo Horizonte

2019

F383d	<p>Ferreira, Fabrício Amorim. Degradação das estruturas de concreto armado expostas a altas temperaturas em ambientes de produção de usinas siderúrgicas [recurso eletrônico] / Fabrício Amorim Ferreira. – 2019. 1 recurso online (35 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Paula Bamberg.</p> <p>“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”</p> <p>Bibliografia: f. 34-35. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil. 2. Concreto armado. 3. Altas temperaturas. I. Bamberg, Paula. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691</p>
-------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: FABRICIO AMORIM FERREIRA

MATRÍCULA: 2017717694

RESULTADO

Aos 12 dias do mês de agosto de 2019 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EXPOSTAS A ALTAS TEMPERATURAS EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE USINAS SIDERÚRGICAS”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 95

CONCEITO: A

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Assinatura

Prof. Dr. Paula Bamberg

Nome

Assinatura

Prof. Dr. Adriana Guerra Gumieri

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA NA ÁREA DE "SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DO AMBIENTE CONSTRUIDO"

Belo Horizonte, 12 de agosto de 2019

Coordenador do Curso

Prof. Antonio Neves
de Carvalho Júnior
Coordenador do Curso

RESUMO

As estruturas de concreto armado sofrem degradação quando expostas a altas temperaturas e são necessários projetos de isolamento térmico para aumentar sua vida útil. Este estudo tem como objetivo analisar como as altas temperaturas degradam estruturas de concreto armado em unidades de produção de usinas siderúrgicas e dimensionar uma proteção térmica para uma parede de grande espessura e que sofre a agressão pela alta temperatura em uma de suas faces. Para atingir este objetivo foi realizada uma pesquisa exploratória bibliográfica onde foram estudadas as principais alterações na microestrutura do concreto exposto a altas temperaturas, bem como as principais alterações em suas propriedades físicas e mecânicas. Adicionalmente, foram abordadas algumas técnicas de inspeção de campo e ensaios laboratoriais para auxiliar na avaliação dos danos existentes após a exposição ao calor. Finalmente, foi apresentada metodologia para proteção térmica ou recuperação de estruturas sujeitas a altas temperaturas.

Palavras-chave: Concreto Armado. Degradação do Concreto. Altas Temperaturas. Recuperação do Concreto.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. METODOLOGIA.....	5
4. PRINCIPAIS ALTERAÇÕES NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS	6
4.1. PASTA DE CIMENTO.....	6
4.2. AGREGADOS.....	7
4.3. INTERAÇÃO PASTA DE CIMENTO E AGREGADOS.....	8
5. PRINCIPAIS ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS.....	10
5.1. ALTERAÇÕES VISUAIS DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS.....	10
5.2. ALTERAÇÕES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	11
5.3. EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE A ARMADURA.....	17
6. AVALIAÇÃO DO CONCRETO APÓS A EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS...	19
6.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CONCRETO APÓS A EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.....	19
6.2. MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA	20
6.3. ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA.....	21
7. PRÁTICA RECOMENDADA DE RECUPERAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO EXPOSTA A ALTAS TEMPERATURAS	23
7.1. CONCEITOS BÁSICOS.....	23
7.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	24
7.3. CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO	26

7.4. RECOMENDAÇÃO PRÁTICA DE TRABALHO	27
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

O processo produtivo do aço em usinas siderúrgicas ocorre a elevadas temperaturas. As elevadas temperaturas são irradiadas para as estruturas de concreto armado existentes nas adjacências dos equipamentos. As temperaturas oriundas do processo produtivo do aço atingem as superfícies das estruturas de concreto armado em valores inferiores ao do processo produtivo. O valor em que a temperatura atinge a superfície das estruturas de concreto armado varia em função da unidade produtiva local, porque cada unidade produtiva tem patamares de temperaturas diferentes e características arquitetônicas peculiares, implicando em diferentes distâncias entre as estruturas existentes e os equipamentos operacionais, bem como, condições ambientais diferentes permitindo em alguns casos ventilação natural e em outros não. Fonseca (2010), que aferiu as temperaturas nas superfícies das estruturas de concreto armado em diferentes unidades produtivas de uma usina siderúrgica, verificou valores entre 125°C até 467°C. Para este trabalho acadêmico serão consideradas como altas temperaturas, as temperaturas entre 250°C até 500°C.

Quando as altas temperaturas atingem as superfícies das estruturas de concreto armado, atuam de forma degradante diminuindo a vida útil considerada em projeto. Quanto mais alto for o valor da temperatura incidente na superfície e quanto maior o tempo de exposição às altas temperaturas, mais rapidamente a durabilidade da estrutura de concreto é reduzida. É importante, neste momento, diferenciar a situação de exposição das estruturas de concreto armado a altas temperaturas em um ambiente de produção de uma usina siderúrgica de uma situação característica de incêndio.

Em situação de incêndio, segundo Cánovas (1988), as temperaturas em alguns casos atingem valores em torno de 1.250°C. O tempo de exposição das estruturas a elevadas temperaturas são consideradas como curta duração e o resfriamento geralmente é rápido. No caso de um ambiente de produção em uma usina siderúrgica, as temperaturas são inferiores à situação de incêndio; o tempo de exposição das estruturas é prolongado durante toda a vida útil da estrutura e em ciclos, considerando a irradiação da temperatura durante um momento e o resfriamento lento durante um segundo momento.

Neste cenário, ressalta-se a importância de pesquisas que contemplem a exposição das estruturas a altas temperaturas com exposição prolongada, características não só da indústria da siderurgia, mas também da indústria de fabricação de cimento, alumínio, celulose, petróleo, nuclear etc. Estas pesquisas contribuirão para uma visão mais crítica desta agressão sobre as estruturas de concreto armado, para que, durante os processos de desenvolvimento de projetos e de manutenção corretiva, sejam especificados os materiais adequados para proteção das estruturas com o objetivo de prolongar a durabilidade.

2. OBJETIVOS

Neste capítulo serão apresentados o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos que foram organizados para alcançar resultados parciais até chegar ao objetivo principal do estudo.

2.1. OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo geral analisar como as altas temperaturas atuam na degradação de estruturas de concreto armado em unidades de produção de usinas siderúrgicas e apresentar dimensionamento de proteção térmica para uma parede de concreto armado de grande espessura nestas condições.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Descrever as alterações na microestrutura do concreto exposto ao calor, considerando as alterações na pasta de cimento, nos agregados e na interface entre a pasta de cimentos e os agregados;
- Identificar as principais alterações das propriedades físicas e mecânicas do concreto exposto ao calor, considerando a mudança de coloração, decréscimo da resistência mecânica à compressão, o módulo de elasticidade e o efeito nas armaduras;
- Identificar metodologia de avaliação das estruturas após a exposição ao calor, incluindo a visita técnica de campo e os ensaios laboratoriais mais comuns;

- Dimensionar uma proteção térmica para uma parede de concreto armado de grande espessura sujeita à agressão pelas altas temperaturas em apenas uma das faces em ambientes de produção de usinas siderúrgicas.

3. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo geral deste trabalho foi realizada pesquisa de caráter exploratório, bibliográfica, onde buscou-se o referencial teórico em livros técnicos, artigos, monografias e dissertações relacionados ao tema, encontrados em sites como o portal CAPES, associações técnico-científica como o IBRACON e bibliotecas virtuais de universidades.

O estudo presente contextualiza a situação de exposição das estruturas de concreto armado a altas temperaturas e diferencia da situação de incêndio. Descreve os principais mecanismos de degradação da estrutura de concreto armado expostas a altas temperaturas em ambientes de produção de usina siderúrgica, considerando as alterações físicas, químicas e mecânicas. Ao longo do trabalho são relacionadas pesquisas sobre as alterações das propriedades do concreto armado e são discutidos métodos de avaliação das estruturas após a exposição ao calor como visita técnica de campo e principais ensaios laboratoriais.

Finalmente, é desenvolvida uma proposta prática de trabalho para a proteção térmica da estrutura de concreto armado, que poderá ser aplicada em trabalhos de recuperação estrutural durante processos de manutenção corretiva ou até mesmo em novos projetos de empreendimentos industriais que seja conhecida a exposição ao calor.

4. PRINCIPAIS ALTERAÇÕES NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS

Neste capítulo serão abordadas as principais alterações na microestrutura do concreto exposto ao calor, considerando as alterações na pasta de cimento, nos agregados e na interface entre a pasta de cimentos e os agregados.

4.1. PASTA DE CIMENTO

O concreto após hidratado torna-se um composto sólido possuindo água em sua constituição. Contém água capilar nos poros; água adsorvida no gel de silicatos de cálcio hidratados e água quimicamente ligada aos compostos hidratados. Quando exposto ao calor, o concreto começa a desidratar. Inicialmente, perde a água capilar, posteriormente a água adsorvida no gel, e por último a água combinada quimicamente com os compostos hidratados. Esse processo de desidratação provoca alterações físicas e químicas na estrutura do sólido, causando sua gradual degradação.

Em relação às alterações na microestrutura do concreto exposto a altas temperaturas, Hager (2013) analisou que o aumento da temperatura provoca a evaporação da água, desidratação do gel de silicatos de cálcio hidratados, decomposição do hidróxido de cálcio e aluminato de cálcio. O processo de remoção da água do sólido depende da energia que adere a água ao sólido. Por esse motivo, a evaporação da água quimicamente ligada ao cimento hidratado é o último processo a ser iniciado. Segundo a autora, a evaporação da água do gel dos silicatos de cálcio hidratados influencia fortemente às propriedades mecânicas da pasta de cimento.

Plechawski e Fic (2018) e Hager (2013) descrevem as alterações físicas e químicas que ocorrem durante o aquecimento da pasta de cimento:

- A desidratação do gel dos silicatos de cálcio hidratados é progressiva desde o início do aquecimento;
- Aproximadamente a 105°C a etringita (sulfoaluminato de cálcio hidratado) - $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}.26\text{H}_2\text{O}$ inicia sua decomposição causando uma contração da pasta de cimento;
- No intervalo de 120°C a 163°C inicia a decomposição da gipsita - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- Em torno de 180°C ocorre uma redução mais acentuada da água adsorvida do gel de silicatos de cálcio hidratados causando aumento da porosidade capilar e microfissuras no concreto;

- Entre a temperatura de 190°C a 300°C formam-se tensões internas nas camadas superficiais do concreto levando a deslocamentos devido a pressão de vapor da água nos poros capilares e o gradiente térmico entre a camada mais externa e as camadas internas devido à baixa condutividade;
- Aproximadamente a 300°C ocorre o final do processo de desidratação da etringita e a acentuada desidratação dos silicatos de cálcio hidratados;
- No intervalo de 250°C a 350°C inicia um processo mais acentuado de perda da resistência mecânica da pasta de cimento;
- Entre a temperatura de 500°C a 550°C inicia a decomposição da portlandita com redução da água quimicamente ligada e aumento do óxido de cálcio na pasta de cimento conforme a reação seguinte: $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$;
- No intervalo de 600°C a 700°C inicia a decomposição do carbonato de cálcio provocando um aumento adicional de óxido de cálcio conforme a reação seguinte: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Esse processo aumentam as fissuras do concreto diminuindo sensivelmente a resistência mecânica. Adicionalmente, acontece fissuras na interface agregados/pasta de cimento provocando o enfraquecimento da ligação;
- Entre a temperatura de 550°C a 600°C a resistência mecânica decresce para 50% do valor inicial;
- No intervalo de 350°C a 900°C ocorrem as transformações nos agregados, alteração de volume, mudança de fase e reação de decomposição química;
- Entre a temperatura de 700°C a 800°C ocorre a decomposição dos agregados de calcários;
- Aproximadamente entre 1200°C a 1350°C ocorre a fusão do concreto.

4.2. AGREGADOS

Segundo Hager (2013) os agregados ocupam um volume de 70% a 80% do volume do concreto sendo importante no comportamento do concreto exposto a altas temperaturas. O aumento da temperatura do concreto provoca a dilatação dos agregados e conforme Cánovas (1988) os agregados possuem diferentes coeficientes de dilatação térmica, sendo que os agregados que contém maior proporção de sílica apresentam maior valor do coeficiente de dilatação térmica, enquanto os agregados

calcários, valores inferiores. Dessa forma, os agregados se expandem diferentemente ocasionando tensões internas que são mais intensas entre a temperatura de 400°C a 600°C provocando a desintegração do concreto. Ainda segundo Cánovas (1988) os agregados quartzosos como o granito e o gnaisse se fissuram acima de 500°C devido a dilatação do quartzo ao mudar de estrutura. Poggiali (2009) explica o processo de transformação dos agregados.

Os agregados silicosos que contêm quartzo (granito ou arenito) podem danificar o concreto a uma temperatura de 573°C, pois, nesta temperatura, a transformação do quartzo de α para β resulta em uma expansão da ordem de 0,85%. Para rochas carbonáticas, situação idêntica ocorre acima de 700°C, resultado da reação de descarbonatação. (POGGIALI, 2009, p.28).

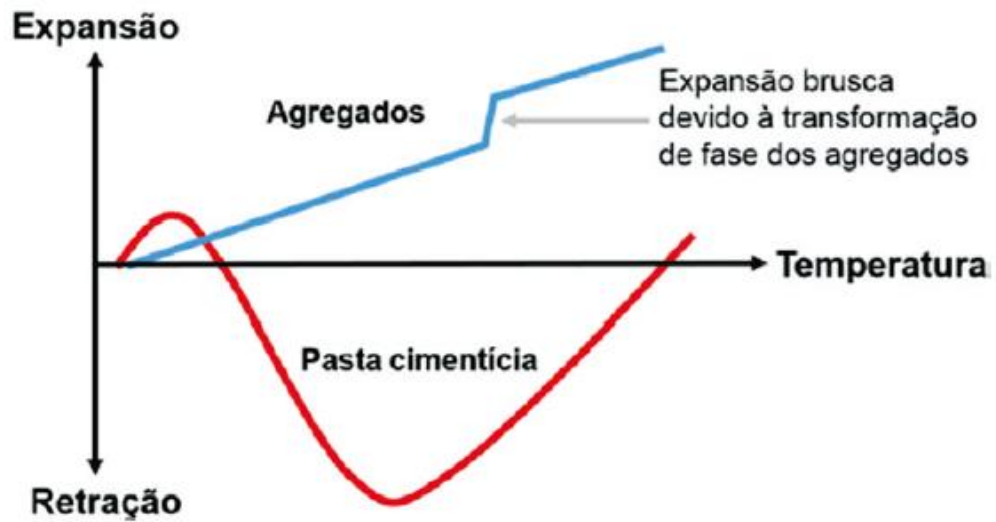
Os agregados com menor coeficiente de dilatação térmica melhoram o desempenho do concreto exposto a altas temperaturas. Segundo Neville (2016) a perda de resistência mecânica do concreto exposto às altas temperaturas é menor quando os agregados não contêm sílica.

4.3. INTERAÇÃO PASTA DE CIMENTO E AGREGADOS

Durante o aquecimento do concreto a pasta de cimento sofre um processo de contração devido à desidratação progressiva enquanto os agregados se expandem, ocorrendo movimentações relativas entre a pasta de cimento e os agregados ocasionando tensões internas enfraquecendo a aderência entre eles e provocando deslocamentos, reduzindo a espessura da seção transversal resistente. A Figura 1 mostra a incompatibilidade térmica entre os agregados e a pasta de cimento hidratado durante a exposição ao calor.

Battagin e Silveira (2018) afirmam que o concreto exposto a altas temperaturas por longo tempo apresenta perda da aderência entre a pasta de cimento e os agregados. Segundo Hager (2013) a interface entre os agregados e a pasta de cimento é o ponto de maior vulnerabilidade devido às fissuras provocadas pelas tensões térmicas incompatíveis entre os agregados e a pasta de cimento.

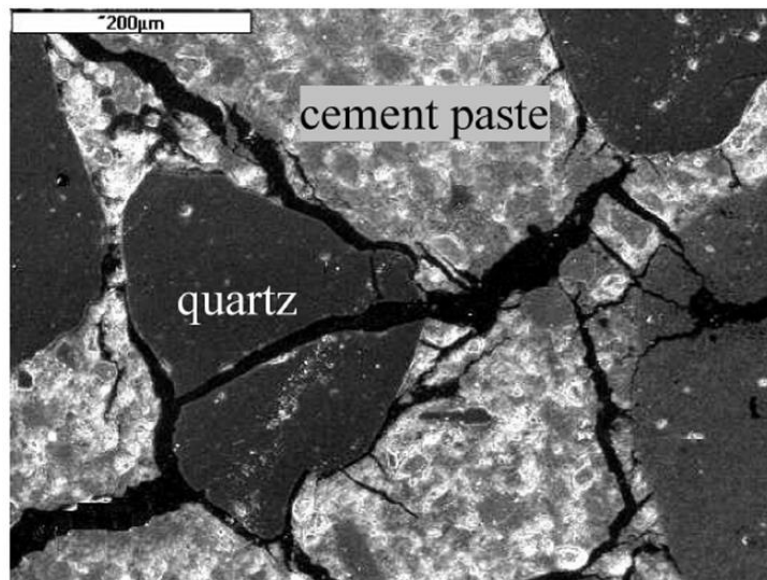
Figura 1: Incompatibilidade térmica entre agregados e pasta de cimento hidratado.



Fonte: Fernandes *et al* (2017).

A Figura 2 mostra um concreto aquecido a 600°C. As fissuras na pasta de cimento e também na interface com o agregado. O agregado está fissurado também devido à alta temperatura.

Figura 2: Microestrutura de concreto aquecido a 600°C.



Fonte: Hager (2013).

5. PRINCIPAIS ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS

Neste capítulo serão identificadas as principais alterações das propriedades físicas e mecânicas do concreto exposto ao calor, considerando a mudança de coloração, o decréscimo da resistência mecânica à compressão, o módulo de elasticidade e o efeito nas armaduras.

5.1. ALTERAÇÕES VISUAIS DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS

Durante a exposição do concreto às altas temperaturas ocorre alteração da coloração devido a remoção gradual da água e a decomposição dos compostos da pasta de cimento e dos agregados. Segundo Cánovas (1988) a alteração da coloração é permanente e pode ser observada no dia seguinte ao incêndio, como semanas ou meses após a extinção. O autor também relaciona a temperatura atingida pelo concreto com a coloração correspondente conforme Tabela 1.

Tabela 1: Alteração da coloração do concreto em função da temperatura

Temperatura	Coloração
20°C	Cinza
200°C	Cinza
300°C	Rosa
400°C	Rosa
500°C	Rosa
600°C	Vermelho
900°C	Cinza avermelhado
1000°C	Amarelo Alaranjado

Fonte: Adaptado de Cánovas (1988)

5.2. ALTERAÇÕES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Fonseca (2010) o decréscimo da resistência mecânica do concreto está relacionado com a desidratação e o conseqüente aumento da porosidade. Hager (2013) afirma que a redução na resistência mecânica do concreto exposto ao calor está relacionada ao tipo do agregado utilizado, relação água/cimento, aditivos e também a fatores como taxa de aquecimento e tempo de exposição à altas temperaturas. Conforme Battagin e Silveira (2018) o concreto exposto a altas temperaturas por longo tempo apresenta decréscimo do módulo de deformação, resistência à compressão, fissuração.

A degradação do concreto exposto a altas temperaturas tem sido bastante estudada em laboratórios e também em casos reais de incêndios em estruturas. Diferenças relacionadas aos resultados apresentados em estudos é devido principalmente aos seguintes fatores: diferentes tipos de agregados utilizados, relação de água/cimento, tipo de cimento utilizado, taxa de aquecimento e tempo de exposição ao calor. É importante conhecer como às propriedades mecânicas e físicas do concreto reagem após sofrerem a agressão de altas temperaturas. Conforme Fonseca (2010) a resistência mecânica do concreto permite uma avaliação de sua qualidade, sendo ainda uma das principais propriedades necessárias ao seu desempenho estrutural.

Souza e Moreno Jr. (2010) moldaram corpos de prova cilíndricos de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura utilizando agregado graúdo silicoso. Submeteram os corpos de prova às seguintes temperaturas 300°C, 600°C e 900°C com uma taxa de aquecimento de 15°C/minutos e mantiveram com uma exposição de 2 horas. Para cada uma das temperaturas escolhidas foram moldados 60 corpos de prova sendo 6 corpos resfriados de forma rápida e 54 corpos resfriados de maneira lenta a uma taxa de 1°C/minuto. Após esse procedimento aferiram a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade e compararam com corpos de prova de referência que não sofreram a ação de altas temperaturas. A Tabela 2 mostra os valores residuais encontrados pelos autores para a resistência à compressão e resistência à tração após a exposição às temperaturas estudadas e resfriados de maneira lenta.

Tabela 2: Propriedades mecânicas residuais após resfriamento lento

Temperatura	Resistência à compressão	Resistência à tração
Padrão	100%	100%
300°C	88%	79%
600°C	86%	60%
900°C	8%	2%

Fonte: adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010)

A Tabela 3 mostra os valores residuais encontrados pelos autores para o módulo de elasticidade dos corpos de prova após a exposição ao calor e resfriados de maneira lenta em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 3: Propriedades mecânicas residuais após resfriamento lento

Temperatura	Módulo de Elasticidade
Padrão	100%
300°C	50%
600°C	30%
900°C	3%

Fonte: adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010)

A Tabela 4 mostra os valores residuais encontrados pelos autores para a resistência à compressão e resistência à tração após a exposição as temperaturas e resfriados de maneira rápida em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 4: Propriedades mecânicas residuais após resfriamento rápido

Temperatura	Resistência à compressão	Resistência à tração
Padrão	100%	100%
300°C	81%	63%
600°C	73%	61%
900°C	0%	0%

Fonte: adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010)

A Tabela 5 mostra os valores residuais encontrados pelos autores para o módulo de elasticidade dos corpos de prova após a exposição ao calor e resfriados de maneira rápida em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 5: Propriedades mecânicas residuais após resfriamento rápido

Temperatura	Módulo de Elasticidade
Padrão	100%
300°C	41%
600°C	19%
900°C	0%

Fonte: adaptado de Souza e Moreno Jr. (2010)

Segundo os autores após a temperatura de 600°C a queda da resistência à compressão se acentua mais devido a desidratação do gel de silicatos de cálcio hidratados e tensões térmicas referente a dilatação dos agregados e contração da pasta cimento gerando um alto grau de fissuração. O resfriamento rápido provoca fissuração se acentuando mais intensamente na temperatura de 900°C fragilizando o corpos de prova, motivo pelo qual não foi possível a realização dos ensaios.

Morales, Campos e Faganello (2011) moldaram corpos de prova cilíndricos de argamassa de 5 centímetros de diâmetro por 10 centímetros de altura utilizando areia média silicosa, cimento CPV, traço em massa de 1:3, relação água/cimento de 0,44. Submeteram os corpos de prova às seguintes temperaturas 300°C, 350°C, 400°C, 450°C e 750°C com uma taxa de aquecimento de 20°C/minutos e mantiveram com uma exposição de 4 horas. Para cada uma das temperaturas escolhidas foram moldados 6 corpos de prova sendo considerado resfriamento de forma rápida e resfriamento de forma lenta. Após esse procedimento aferiram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade e compararam com corpos de prova de referência que não sofreram a ação de altas temperaturas. Os autores concluíram que concretos submetidos a temperaturas superiores a 300°C perdem consideravelmente a resistência mecânica e que até 300°C corpos de prova com resfriamento lento perderam 5% da resistência e corpos de prova resfriados de forma rápida perdem 28% da resistência. O módulo de elasticidade decresce mais rapidamente que a resistência à compressão. Nos corpos de prova resfriados de forma lenta houve uma

perda de 46% até 300°C e 73% a 450°C. As amostras que foram submetidas a 750°C perderam totalmente a resistência mecânica. Até 250°C os efeitos da elevação da temperatura são pequenos e tornam bastante acentuados podendo comprometer a estrutura a partir de 300°C.

Fonseca (2010) moldou corpos de prova cilíndricos com 2 resistências características sendo C30 com relação água/cimento $\leq 0,55$ e C40 com relação água/cimento $\leq 0,45$. Corpos de prova de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura utilizando cimento CPIII 40-RS. Os corpos de prova foram divididos em 4 lotes e posicionados em diferentes locais dentro de unidades produtivas de uma usina siderúrgica para ficarem expostos a mesma radiação térmica, proveniente dos processos produtivo, que as estruturas existentes. As temperaturas nos corpos de prova foram aferidas com um aparelho de leitura térmica. Após este procedimento aferiu entre outras propriedades a resistência à compressão, módulo de elasticidade e índices de vazios e comparou com corpos de prova de referência que não sofreram a ação de altas temperaturas. Na Tabela 6 são apresentados os valores residuais para o concreto C30 encontrados pelo autor para a resistência à compressão após a exposição as temperaturas em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 6: Propriedades mecânicas residuais C30

Lote	Temperatura máxima	Exposição	Resistência à compressão
	Padrão		100%
1º	430°C	165 dias	29%
2º	467°C	176 dias	7%
3º	196°C	169 dias	56%
4º	250°C	319 dias	87%

Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

A Tabela 7 mostra os valores residuais para o concreto C30 encontrado pelo autor para o módulo de deformação após a exposição as temperaturas em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 7: Propriedades mecânicas residuais C30

Lote	Temperatura máxima	Exposição	Módulo de deformação
	Padrão		100%
1º	430°C	165 dias	13%
2º	467°C	176 dias	6,6%
3º	196°C	169 dias	41%
4º	250°C	319 dias	42%

Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

A Tabela 8 mostra o percentual de índice de vazios para o concreto C30 encontrado pelo autor após a exposição as temperaturas em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 8: Propriedades física C30

Lote	Temperatura máxima	Exposição	Índice de vazios
	Padrão		7,8%
1º	430°C	165 dias	14,68%
2º	467°C	176 dias	18%
3º	196°C	169 dias	12,06%
4º	250°C	319 dias	11,70%

Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

A tabela 9 mostra os valores residuais para o concreto C40 encontrado pelo autor para a resistência à compressão após a exposição as temperaturas em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 9: Propriedades mecânicas residuais C40

Lote	Temperatura máxima	Exposição	Resistência à compressão
	Padrão		100%
1º	430°C	165 dias	15%
2º	467°C	176 dias	7%
3º	196°C	169 dias	30%
4º	250°C	319 dias	35%

Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

A Tabela 10 mostra os valores residuais para o concreto C40 encontrado pelo autor para o módulo de deformação após a exposição as temperaturas em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 10: Propriedades mecânicas residuais C40

Lote	Temperatura máxima	Exposição	Módulo de deformação
	Padrão		100%
1º	430°C	165 dias	15%
2º	467°C	176 dias	7%
3º	196°C	169 dias	30%
4º	250°C	319 dias	35%

Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

A Tabela 11 mostra o percentual de índice de vazios para o concreto C40 encontrado pelo autor após a exposição as temperaturas em relação aos corpos de prova de referência que não foram submetidos a exposição ao calor.

Tabela 11: Propriedades física C40

Lote	Temperatura máxima	Exposição	Índice de vazios
	Padrão		7,54%
1º	430°C	165 dias	14,68%
2º	467°C	176 dias	15,83%
3º	196°C	169 dias	13,54%
4º	250°C	319 dias	10,96%

Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

O autor concluiu que todos os lotes sofreram alterações de suas propriedades após expostas a altas temperaturas; e que temperaturas mais altas provocaram maior degradação nos lotes que tinham igual duração dos ciclos térmicos e igual intervalo; o concreto C40 teve menor perdas de suas propriedades que o concreto C30 e o autor sugere que sejam utilizados concreto com maior resistência e menor relação água/cimento; mesmo perdas pequenas nas propriedades do concreto são precursores em potencial para demais mecanismos de degradação da estrutura.

Lorenzon (2014) moldou corpos de prova cilíndricos com resistência característica de 25 MPa. Corpos de prova de 5 centímetros de diâmetro por 10 centímetros de altura utilizando cimento CII Z. Os corpos de prova foram divididos em 3 lotes e aquecidos a uma taxa de 5°C/minuto. Foram atingidas três diferentes temperaturas 300°C, 500°C e 800°C. O tempo de exposição em cada temperatura foram de 30 minutos, 60 minutos e 90 minutos. Os corpos de prova foram resfriados de maneira rápida e lenta. Após esse procedimento aferiu a resistência à compressão e comparou com corpos de prova de referência que não sofreram a ação de altas temperaturas. Algumas das conclusões da autora é que quanto maior a temperatura e o tempo de exposição, maior a perda de resistência à compressão. Para a temperatura de 300°C houve perda de 15% da resistência à compressão para o tempo de exposição de 30 minutos; 30% para exposição de 60 minutos e 40% para exposição de 90 minutos. A redução de resistência mais acentuada ocorre para a temperatura de 800°C onde houve uma redução de 70% para exposição de 30 minutos, 80% para exposição de 90 minutos. O resfriamento rápido causou perda adicional da resistência em relação ao resfriamento lento devido a maior fissuração provocada pelo choque térmico.

5.3. EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE A ARMADURA

O concreto armado é um material composto pelo concreto simples e pelas armaduras de aço. O aço conduz o calor mais facilmente que o concreto, sendo mais sensível a variação de temperatura. Segundo Cánovas (1988) os coeficientes de dilatação térmica dos dois materiais são muito similares, em temperatura ambiente, sendo $1,2 \times 10^{-5} \text{mm}/^\circ\text{C}$ para o aço e $1,0 \times 10^{-5} \text{mm}/^\circ\text{C}$ para o concreto não ocasionando problemas. Porém, em temperaturas altas os coeficientes se distanciam tanto que o coeficiente de dilatação térmica do aço pode chegar a 30 vezes ao do concreto produzindo tensões internas sobre os cobrimentos. Ainda segundo o autor quando o aço fica exposto, se dilata, diminuindo seu regime elástico e sua tensão de ruptura. Em estruturas industriais devido ao grande volume de concreto dos elementos estruturais, são usadas armaduras de maiores diâmetros para que se atinjam as taxas mínimas de armadura exigidas em normas aumentando os efeitos da dilatação superficial, acentuando as tensões sobre os cobrimentos.

De acordo com Britez e Helene (2018) a partir de 500°C as propriedades mecânicas residuais do aço sofrem perdas irreversíveis e a partir de 700°C, tornam-

se mais acentuadas podendo ser superior a 30%. Ainda segundo os autores a redução da tensão de escoamento e da resistência à tração são mais fortes para barras de maiores diâmetros, principalmente, quando são resfriadas ao ar. Os efeitos do calor sobre o aço dependem da temperatura máxima atingida, tempo de exposição, taxa de armação e principalmente da espessura do revestimento. O revestimento tem uma função favorável de proteger as armaduras dos efeitos do calor. Neste sentido, é interessante aumentar os revestimentos de elementos estruturais que serão expostos a altas temperaturas.

6. AVALIAÇÃO DO CONCRETO APÓS A EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

Neste capítulo será discutido uma metodologia de avaliação das estruturas após a exposição ao calor, incluindo a visita técnica de campo e os ensaios laboratoriais mais comuns.

6.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CONCRETO APÓS A EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

Antes de recomendar qualquer tipo de terapia para as estruturas expostas a altas temperaturas, é imprescindível realizar uma avaliação minuciosa. Esta avaliação deve ser baseada em inspeção de campo e posteriormente em ensaios laboratoriais. Segundo Fernandes *et al* (2018) quanto mais técnicas empregadas na caracterização da integridade do concreto, maior a precisão do diagnóstico e mais eficiente e econômica será a terapia indicada. Para a inspeção de campo e coleta de amostras devem ser observados cuidados em relação à segurança antes e durante ao acesso do local, por exemplo, iluminação deficiente, possibilidade de deslocamentos de concreto, armaduras expostas ou até mesmo risco de ruptura de elementos estruturais.

De acordo com Cánovas (1988) deve-se realizar uma inspeção total, identificando elemento por elemento, dimensões originais, função de cada elemento no sistema estrutural, dados característicos dos materiais, resistência do concreto, tipos de agregados, aços, diâmetro e espaçamento da malha das armaduras e espessura de cobertura. Adicionalmente, evidenciar a situação atual, fazendo uso de esquemas, desenhos e fotografias.

Conforme Neville (2016) como a alteração da coloração em função da temperatura é permanente ela pode ser utilizada para se estimar a temperatura máxima ocorrida após a exposição a altas temperaturas. Também deve ser verificada a ocorrência de fissuras, deslocamentos e aplicação de testes auscultivos. Trincas nos panos das armaduras principais podem ser formadas devido ao arqueamento das barras durante a dilatação linear.

Segundo Battagin e Silveira (2018) o estudo da microestrutura do concreto é uma ferramenta importante para definir a terapia necessária. As propriedades mecânicas do concreto como resistência à compressão e módulo de elasticidade são

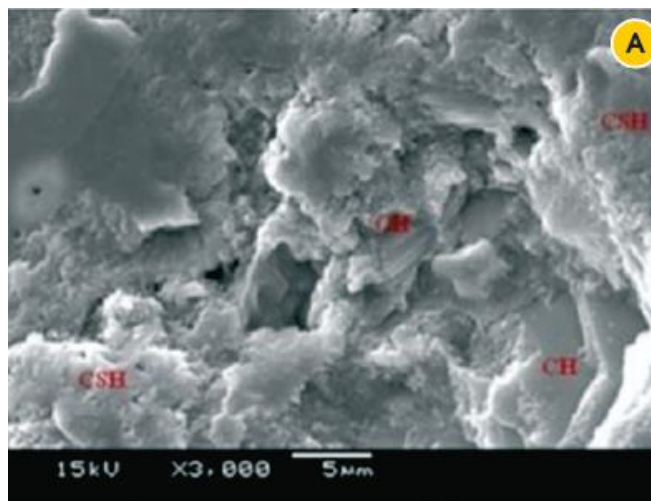
afetadas pela ação do calor. Porém, conforme relata Fernandes *et al* (2018) existe uma variação do dano ao longo da profundidade do elemento estrutural devido as características do concreto ser um mau condutor de calor. Desta forma, ensaios de resistência à compressão que são mais comumente empregados fornecem poucas informações sobre a condição residual do elemento analisado. Fernandes *et al* (2018) citam em seus estudos quatro predominantes técnicas para auxiliar na quantificação das alterações físicas, químicas e mineralógicas, bem como da temperatura alcançada no elemento estrutural: microscopia de varredura eletrônica (MEV), difração de raios X (DRX), porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e análises térmicas (DTA/TGA). Neste estudo a microscopia de varredura eletrônica e as análises térmicas serão mais detalhadas por fazer parte da metodologia adotada nos laboratórios da Associação Brasileira de cimento Portland (ABCP) (BATTAGIN; Silveira, 2018).

6.2. MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA

A microscopia de varredura eletrônica é um microscópio de alta resolução com a função de tornar visível ao olho humano o que é muito pequeno. Segundo Dedavid, Gomes e Machado (2007) alguns aparelhos podem ampliar até 300.000 vezes as imagens possibilitando informações sobre a morfologia e a identificação de compostos químicos em uma amostra sólida. De acordo com Fernandes *et al* (2018) deve-se destacar a possibilidade de uma grande profundidade de foco, formando uma imagem com aparência tridimensional, podendo combinar com uma microanálise química. A Figura 3 refere-se a uma imagem de microscopia de varredura eletrônica utilizada para ajudar na identificação de compostos químicos de uma amostra.

Battagin e Silveira (2018) utilizaram a técnica da microscopia de varredura eletrônica para auxiliar na quantificação dos danos da estrutura de um hospital da cidade de Santo André após um incêndio. Como exemplo da aplicação, os autores verificaram a morfologia de amostras colhida do local. Em algumas amostras, foi verificado a presença de cristais aciculares de etringita indicando que essa amostra não superou a temperatura de 100°C durante a exposição ao calor. Em outras, foi observado a presença de cristais fraturados de quartzo e fraturas nas suas interfaces cristalinas devido a transformações alotrópicas, sugerindo que a temperatura atingida foi superior a 570°C.

Figura 3: Imagem de microscopia de varredura eletrônica.



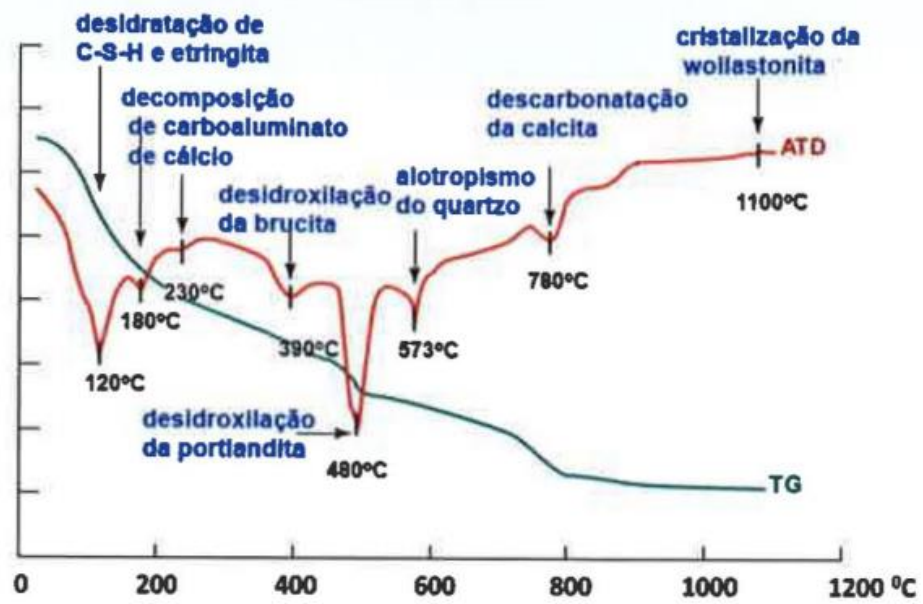
Fonte: Fernandes *et al* (2018).

6.3. ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA

As análises termodiferencial e termogravimétrica relacionam o comportamento de uma amostra em relação a uma referência quando submetido a um aquecimento controlado. O resultado vem em forma de um gráfico ilustrando a curva térmica diferencial e a perda de massa. Na curva térmica diferencial (DTA) a variação em relação a temperatura é registrada em ordenadas, com as reações endotérmicas voltadas para baixo e a temperatura em abcissas com valores crescentes da direita para a esquerda. A curva termogravimétrica (ATG) registra a perda de massa em ordenadas e a temperatura em abcissas de igual maneira a curva DTA. A figura 4 mostra o termograma com as curvas ATD/TG de uma amostra de concreto.

Battagin e Silveira (2018) utilizaram a técnica das análises termodiferencial e termogravimétrica para identificar os compostos químicos presentes nas amostras, colhidas em profundidades crescentes de um testemunho para quantificar a profundidade dos danos devido a exposição ao calor. Por exemplo, certificaram que a partir de 8 centímetros de profundidade foram identificados os compostos calcita, portlandita, aluminatos hidratados, escória de alto forno parcialmente anidra. Isto indica que a microestrutura está íntegra e a temperatura não chegou a 100°C nessa profundidade.

Figura 4: Termograma com as curvas ATD/TG de amostra de concreto



Fonte: Battagin e Silveira (2018).

7. PRÁTICA RECOMENDADA DE RECUPERAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO EXPOSTA A ALTAS TEMPERATURAS

Neste capítulo será dimensionada uma proteção térmica para uma parede de concreto armado com grande espessura e que sofre a agressão do calor em apenas uma das faces com o objetivo de prolongar sua vida útil.

7.1. CONCEITOS BÁSICOS

Na indústria siderúrgica existem muitas estruturas de concreto armado expostas a agressividade das altas temperaturas oriundas do processo produtivo, que demandam forte atuação do setor de manutenção civil industrial. Em alguns casos, os efeitos das altas temperaturas causam situações que podem colocar em risco a vida das pessoas por se tratar de deslocamentos das estruturas de grandes alturas em área de circulação de pessoas. Como o processo de produção é ininterrupto, a degradação das estruturas é acelerada. Em alguns lugares só é possível realizar os trabalhos de recuperação se a unidade produtiva estiver parada e os equipamentos consignados para eliminar riscos de acidentes com as equipes de execução. Por esse motivo, é interessante intervenções que objetivem aumentar o desempenho da estrutura diante da agressão da temperatura. Na Figura 5, tem-se um exemplo de exposição do concreto armado às altas temperaturas na indústria siderúrgica.

Figura 5: Estrutura de concreto exposta às altas temperaturas. Unidade produtiva do Alto Forno.



Fonte: Revista Concreto e Construções (2008).

Será desenvolvida uma proposta de recuperação de estrutura de concreto armado com o objetivo de melhorar o desempenho para situações de exposição às altas temperaturas. Para tal, serão apresentados alguns conceitos básicos.

7.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Existem três mecanismos de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A convecção depende da movimentação de massa de uma região para outra. A radiação é transferência de calor que ocorre no espaço pela radiação eletromagnética, tal como a luz solar e sem a necessidade de existir matéria, pois pode se propagar no vácuo. Um exemplo de radiação específico deste estudo é transferência de calor do processo produtivo do aço que está em elevada temperatura para as estruturas de concreto armado nas adjacências. A condução ocorre no interior de um corpo ou entre dois corpos em contato. A transferência de calor por condução em sólidos é por vibração da rede cristalina ou por elétrons livres. Pela vibração da rede cristalina é menos eficiente. O aço conduz calor por elétrons livres já o concreto pela vibração da rede cristalina, por isso, o concreto é considerado um mau condutor de calor quando comparado com o aço. Em uma usina siderúrgica, quando o calor irradiado pelo processo produtivo do aço atinge a superfície da estrutura de concreto ele é transferido para a parte interna pelo mecanismo de condução. Segundo Moreira (2014) a condução de calor é regida pela lei de Fourier na expressão abaixo.

$$Q = -K.A.\frac{\partial(T)}{\partial X} \quad (4.2.1)$$

Sendo:

Q - Fluxo de calor que atravessa a parede;

K - É o coeficiente de condutividade ou condutibilidade térmica do material da parede;

A - É a área que está recebendo o calor;

$\frac{\partial(T)}{\partial X}$ - Derivada da temperatura em função da espessura da parede.

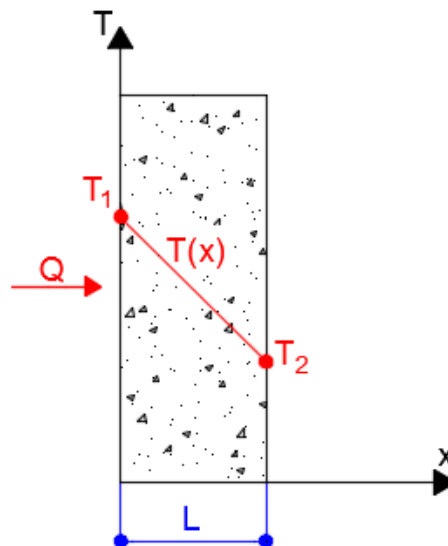
O sinal negativo na expressão é necessário, porque o fluxo de calor tem sentido da face de maior temperatura para a face de menor temperatura. Para o caso

específico de uma parede de concreto armado tem-se que analisar as condições de contorno. A condutividade térmica do material é considerada uniforme (material isotrópico) e constante (independe da temperatura). Adota-se que a condutividade é constante porque a análise será feita no final de ciclo de um processo produtivo, ou seja, a temperatura da estrutura de concreto será alta e o coeficiente de condutividade será estável. Também pode-se assumir que não há geração de calor adicional na parte interna da parede de concreto armado, somente calor que atinge uma das faces. Com essas considerações a função da temperatura em relação a espessura da parede fica conforme a expressão seguinte.

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad (4.2.2)$$

A Figura 6 exemplifica a situação de uma parede de concreto armado de uma determinada espessura L , com temperatura T_1 na superfície que recebe a irradiação de calor, chamada face quente, e temperatura T_2 na superfície oposta, chamada de face fria. Essa situação é bem típica na indústria da siderurgia, seja nos canais de corrida do Alto Forno, pilares centrais do convertedor, câmara de resfriamento dos processos de lingotamento, por isso, é objeto desse estudo.

Figura 6: Condução de calor dentro de uma parede - Lei de Fourier



As constantes C_1 e C_2 são determinadas considerando as condições de contorno.

$$x = 0 \rightarrow T(0) = T_1 \rightarrow T_1 = C_2 \quad (4.2.3)$$

$$x = L \rightarrow T(L) = T_2 \rightarrow T_2 = C_1 \cdot L + T_1 \rightarrow C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4.2.4)$$

Substituindo as expressões acima na função da temperatura em função da espessura, tem-se:

$$T_x = \frac{(T_2 - T_1) \cdot x}{L} + T_1 \quad (4.2.5)$$

$$\frac{\partial(T)}{\partial x} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4.2.6)$$

$$\text{Lei de Fourier} \quad Q = -K \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4.2.7)$$

7.3. CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO

De acordo com Neville (2016) a condutividade térmica mede a capacidade de um material de conduzir calor e é definida como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. A condutividade do concreto depende de sua composição. Ainda segundo o autor a condutividade térmica aumenta lentamente com a temperatura até um valor máximo, aproximadamente entre 50°C e 60°C. Devido a evaporação da água no interior do concreto durante o aquecimento após 60°C a condutividade térmica começa a diminuir. Em temperaturas acima de 120°C a 140°C, o valor da condutividade tende a estabilizar, sendo que o valor a 800°C chega à metade do valor a 20°C. A unidade de medida da condutividade é obtida pela equação 4.3.1.

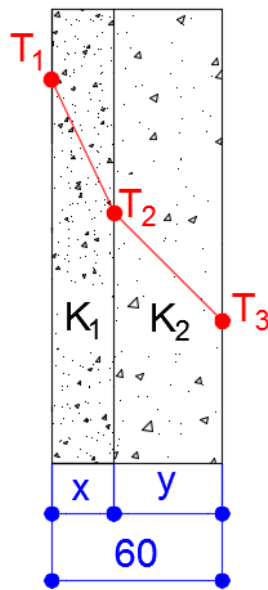
$$K = \frac{Q}{A \cdot L} \Rightarrow K = \frac{[w]}{[m^2] \cdot \frac{[K]}{[m]}} \Rightarrow K = \frac{[w]}{[m] \cdot [k]} \quad (4.3.1)$$

7.4. RECOMENDAÇÃO PRÁTICA DE TRABALHO

Para desenvolvimento de uma proposta para recuperação de uma estrutura de concreto armado exposta a ação de altas temperaturas, tem-se uma situação típica de uma parede espessa que recebe calor em uma das faces para que seja realizado um estudo de recuperação com o objetivo de melhorar o desempenho da estrutura ao calor. Assumindo que a temperatura na face quente da parede seja de 500°C, medida com aparelho de leitura térmica no final do ciclo de um processo produtivo. Para que este tipo de recomendação tenha efeito favorável é importante aferir a temperatura da superfície de concreto exposta no final ciclo de produção. Isto se justifica pela difusividade térmica do concreto. Segundo Neville (2016) a difusividade representa a velocidade de variação da temperatura no interior de uma massa, ou seja, é taxa de transferência de calor da face quente para a face fria. Aferindo a temperatura na superfície da estrutura no final do ciclo térmico tem-se uma condição estável com a estrutura saturada termicamente.

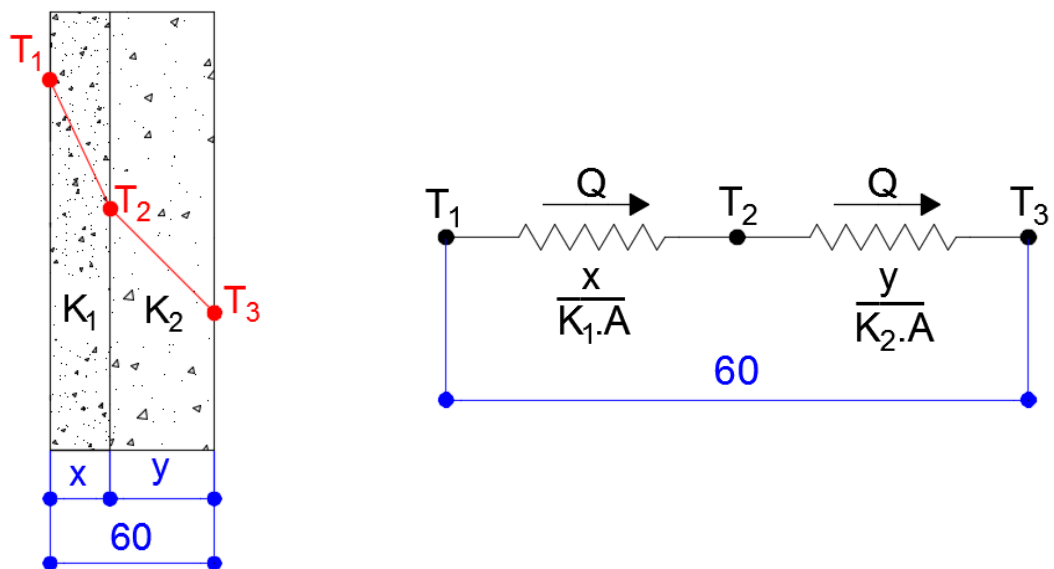
Para a espessura da parede, considera-se neste estudo 60 centímetros. Estruturas de concreto dentro de usinas siderúrgicas têm grande espessura devido aos esforços demasiadamente grandes. A proposta consiste em remover a camada seriamente degradada da estrutura de concreto convencional e substituir por uma camada de concreto que tenha melhor desempenho ao calor. Geralmente, não é possível aumentar a espessura dos elementos estruturais devido a interferências físicas existentes com os equipamentos de produção. Por este motivo, a proposta consiste em substituir a camada degradada. Consiste em um isolamento térmico do concreto convencional atentando para a temperatura que será atingida na interface entre os dois materiais, o concreto remanescente convencional e o novo concreto com melhor desempenho ao calor. Para este estudo, essa temperatura será limitada em 150°C, visto as propriedades mecânicas, físicas e químicas são pouco alteradas nesta condição. A configuração proposta será uma parede com duas camadas de materiais diferentes conforme Figura 7.

Figura 7: Parede espessa de concreto recebendo calor em uma das faces.



Para auxiliar na análise térmica da situação proposta, recorre-se a uma analogia com um pequeno circuito elétrico. Nessa analogia a diferença de temperaturas é comparada com a diferença de potencial; o fluxo de calor que atravessa a seção transversal da estrutura de concreto é comparado com a corrente elétrica que percorre no fio e a resistência térmica com a resistência elétrica. A resistência térmica é definida como a relação entre a espessura da parede pela multiplicação do coeficiente de condutibilidade térmica pela área exposta ao calor. A Figura 8 ilustra a analogia.

Figura 8: Analogia com circuito elétrico.



A análise tem como a base a lei de Fourier para a condução de calor. Adota-se conhecida a temperatura na face quente da estrutura.

$$Q = -K_1 \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4.2.7)$$

O fluxo de calor que passa pelas duas camadas é idêntico. Então, define-se o fluxo de calor para cada camada.

$$\text{Primeira camada} \quad Q_1 = -K_1 \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{x} \quad (4.4.1)$$

$$\text{Segunda camada} \quad Q_2 = -K_2 \cdot A \cdot \frac{T_3 - T_2}{y} \quad (4.4.2)$$

Iguala-se o fluxo de calor das duas camadas. É como a corrente elétrica que passa em uma resistência elétrica deve passar resistência seguinte.

$$Q_1 = Q_2 \quad (4.4.3)$$

$$-K_1 \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{x} = -K_2 \cdot A \cdot \frac{T_3 - T_2}{y} \quad (4.4.4)$$

As áreas que sofrem influência pelo calor são idênticas e podem ser canceladas assim como o sinal negativo das equações.

$$K_1 \cdot \frac{T_2 - T_1}{x} = K_2 \cdot \frac{T_3 - T_2}{y} \quad (4.4.5)$$

Organizando melhor a equação tem-se:

$$\frac{K_1}{x} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{K_2}{y} \cdot (T_3 - T_2) \quad (4.4.6)$$

A temperatura T_1 da face quente da estrutura é conhecida porque foi aferida com aparelho de leitura térmica e vale 500°C . A temperatura T_2 na interface entre as duas camadas foi limitada em 150°C para minimizar os efeitos de degradação do concreto convencional remanescente. Mas não se conhece a temperatura T_1 que é influenciada pela espessura das camadas e pelo coeficiente de condutibilidade térmica do material que será escolhido para isolamento térmico do concreto convencional. A espessura total da parede será mantida conforme original, então é possível relacionar as variáveis x e y . Logo, tem-se seis variáveis e três incógnitas. A resolução dessa situação será por iterações. Arbitrando-se valores para duas incógnitas como a temperatura T_1 e o coeficiente de condutibilidade térmica k_1 da primeira camada e assim aproximar-se de uma situação mais adequada para o caso.

Para a condutibilidade térmica do concreto convencional (k_2), adota-se para esse estudo o valor encontrado na NBR 15220 (2005) para concretos de massa específica de 2.400 kg/m^3 , sendo a condutividade térmica o valor de $1,75 \text{ W/m.K}$. Inicialmente, será adotado para a temperatura T_3 na face fria da parede o valor de 50°C . E para a camada de isolamento, recorre-se a produtos disponíveis no mercado e que tenha boas características de projeção. Essa qualidade deve ser observada devido ao volume de material a ser recomposto. Dessa forma, o material adotado será um concreto refratário sílico aluminoso isolante disponível no mercado que possui o valor aproximado de $0,36 \text{ W/m.K}$ para a temperatura de 500°C .

As temperaturas devem ser convertidas para Kelvin.

$$T_1 \quad (500 + 273,15) = 773,15 \text{ K} \quad (4.4.7)$$

$$T_2 \quad (150 + 273,15) = 423,15 \text{ K} \quad (4.4.8)$$

$$T_3 \quad (50 + 273,15) = 323,15 \text{ K} \quad (4.4.9)$$

Prosseguimento com o desenvolvimento:

$$\frac{0,36}{x} \cdot (423,15 - 773,15) = \frac{1,75}{(0,6 - x)} \cdot (323,15 - 423,15) \quad (4.4.10)$$

$$\frac{0,36}{x} \cdot (-350) = \frac{1,75}{(0,6 - x)} \cdot (-100) \quad (4.4.11)$$

$$\frac{126}{x} = \frac{175}{(0,6 - x)} \quad (4.4.12)$$

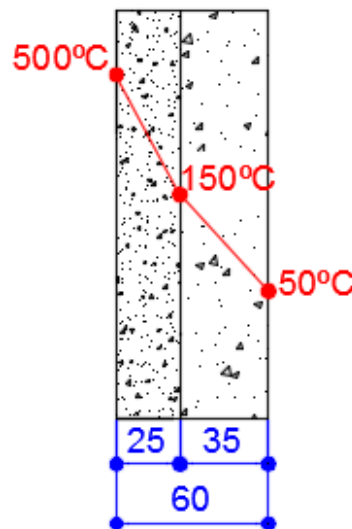
$$126 \cdot (0,6 - x) = 175 \cdot x \quad (4.4.13)$$

$$75,6 - 126 \cdot x = 175 \cdot x \quad (4.4.14)$$

$$x = 0,25 \text{ m} \quad (4.4.15)$$

Para que as temperaturas escolhidas de 150°C na interface entre os dois materiais e 50°C na face fria da parede sejam atingidas com os materiais adotados deve ter a espessura das camadas conforme Figura 9.

Figura 9: Configuração final da recuperação.



A parede de concreto que anteriormente tinha somente concreto convencional, passa a funcionar como um sistema de duas camadas. A primeira camada tem a função de proteger termicamente a segunda camada de concreto convencional, aumentando a durabilidade. Adicionalmente, a camada de isolamento térmico deve ter resistência mecânica compatível com o concreto da segunda camada.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A degradação das estruturas de concreto pela exposição ao calor em ambientes de usinas siderúrgicas é diferente da situação de incêndio e por esse motivo carece de pesquisas específicas para que sejam compreendidos os mecanismos de degradação da estrutura. Neste trabalho, foram abordados os principais mecanismos de degradação do concreto sujeito à altas temperaturas considerando a microestrutura, propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade, bem como as alterações visuais de coloração. As pesquisas apresentadas ao longo do estudo reforçam a hipótese inicial de que quanto mais alta a temperatura alcançada pela estrutura e quanto maior o tempo de exposição ao calor maior será a degradação das propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Métodos de avaliação das estruturas após a exposição ao calor foram discutidos e também ensaios para auxiliar na quantificação dos danos e serem indicadores para definição da terapia adequada. E por fim, foi abordada uma prática recomendada de isolamento térmico que poderá ser realizado no momento de uma manutenção corretiva ou até mesmos em novos empreendimentos que já seja conhecida a exposição ao calor. Sendo de conhecimento que a estrutura de concreto armado sofre degradação quando exposta ao calor e que essa degradação é conforme citada por Fonseca (2010), a porta aberta para outros mecanismos de degradação como ataque de produtos químicos nocivos ao concreto intensificando os danos ao longo do tempo, é importante que sejam protegidas através de isolamento térmico adequado para que tenham maior durabilidade.

A agressividade a altas temperaturas deve ser considerada durante o desenvolvimento dos projetos de novos equipamentos industriais pelos seguintes motivos: por reduzirem rapidamente a vida útil da estrutura de concreto; por exigirem muitos recursos de equipamentos, mão de obra e por consequência a necessidade de grandes interrupções nos processos produtivos; por expor a segurança das pessoas que trabalham nesses locais devido a principalmente deslocamentos de pedaços da estruturas e exposição das armaduras e finalmente por ser sustentável desenvolver soluções pensando no uso, operação e ciclo de vida da estrutura.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de possibilidades de proteção térmica para as estruturas de concreto que exijam menores espessuras com boa resistência a ambientes úmidos e estudos de métodos que ajudem a quantificar os danos das estruturas após a exposição ao calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico das edificações. Rio de Janeiro, 2005.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; SILVEIRA, Ana Livia Zeitone de P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. **Revista concreto e construções**, IBRACON, São Paulo, n. 89, p. 44-48, Jan-Mar. 2018.

BRITEZ, Carlos; HELENE, Paulo. Avaliação experimental do concreto armado de alta resistência submetido a elevadas temperaturas (parte complementar). **Revista Concreto e Construções**, IBRACON, São Paulo, n. 89, p. 64-70, Jan-Mar. 2018.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmen Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia de varredura eletrônica**: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FERNANDES, B., GIL, A.M., BOLINA, F.L., TUTIKIAN, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista de Estruturas e Materiais**, IBRACON, V. 10, n. 4, p. 838-863, ago.2017.

FONSECA, Renato Oliveira. **Concretos submetidos a ciclos de temperaturas elevadas**: Estudos experimentais em corpos de prova localizados em unidades de produção de uma usina siderúrgica. Dissertação (Pós-graduação em engenharia civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

GIANNINI, Fábio; GIACOMIN, Geraldo Magela. Recuperação de estrutura em condições de altas temperaturas – canal de gusa e escória na Arcelor Mittal Tubarão. **Revista concreto e construções**, IBRACON, São Paulo, n. 49, p. 62-65, Jan-Mar. 2008.

LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas**. Monografia (Curso superior de Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

HAGER, Izabela. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the polish academy of sciences**. Technical sciences, Poland, V. 61, n. 1, 2013.

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

MOREIRA, José R. Simões. **Processos de transferência de calor**. Notas de aulas (Departamento de Engenharia Mecânica) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PLECHAWSKI, Stanislaw; FIC, Stanislaw B. Diagnostics of concrete elements after the fire. **Structure and environment**, v. 10, n. 3, p. 223-236, set. 2018.

POGGIALI, Flávia Spitale Jacques. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. Monografia (Curso de especialização em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SOUZA, A.A.A de; MORENO JR, A.L. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista de Estruturas e Materiais**, IBRACON, V. 3, n. 4, p. 432-448, dez.2010.