

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS A SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Jéssica Pian (1), Alexandre Vargas (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) jeh_pian@hotmail.com, (2) avargas@unesec.net

RESUMO

Durante um incêndio, com a elevação da temperatura do concreto ocorre em sua macro e microestrutura fenômenos que alteram suas características físicas e mecânicas, mesmo sendo um material heterogêneo, composto por materiais incombustíveis, e com baixa condutividade térmica. Estes efeitos micro e macro estruturais podem ser, no caso dos macros, fissurações, lascamentos explosivos entre outros, e entre os micro estruturais pode-se citar redução do módulo de elasticidade, aumento das deformações, alteração na composição, dentre outros. A perda de resistência em uma situação de incêndio pode depender muito do tipo de resfriamento, que pode ser lento ou brusco. No resfriamento brusco o concreto tende a perder mais resistência pelo aparecimento de mais e maiores fissuras devido ao choque térmico. Acima dos 600 °C a influência do resfriamento é praticamente nula. Nesse contexto, o presente trabalho avalia experimentalmente, 3 conjuntos de vigas em 3 patamares de temperatura: 300 °C, 500 °C e 600 °C. São realizados ensaio de cisalhamento em vigas de concreto armado submetidas a situação de incêndio com resfriamento brusco e comparadas ao grupo de controle à temperatura ambiente. Com os resultados obtidos nos ensaios observou-se que no cisalhamento, o aumento de temperatura não apresentou influência na resistência, não havendo redução de carga. Nos corpos de prova extraídos das vigas e ensaiados à compressão simples houve uma redução de resistência com relação as vigas de referência, de 14,96% na temperatura de 300 °C, 19,34% e 23,54% nas temperaturas de 500 °C e 600 °C respectivamente, mostrando que o incremento da temperatura tem influência na resistência a compressão do concreto.

Palavras-Chave: Temperaturas elevadas. Situação de incêndio. Cisalhamento.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente situações de incêndio em estruturas de concreto armado, tem sido alvo de constantes discussões, pois nos últimos anos não existem dados concretos sobre o aumento do número de acidentes decorrentes desse sinistro. Cada vez mais tem-se estudado a estabilidade das estruturas após serem submetidas a temperaturas elevadas. Segundo Rosso¹(1975), “a partir da temperatura básica teórica de 300°C, começam a ocorrer prejuízos consideráveis na resistência mecânica de um

componente de concreto.” Conforme afirma a norma (NBR 15200:2012¹⁰, “O concreto ao ser submetido a altas temperaturas tende a diminuir a resistência e o módulo de elasticidade”. Os elementos estruturais por sua vez sofrem dilatação térmica e tendem a aumentar, o que pode fazer com que haja a perda de aderência entre o aço e o concreto ocorrendo o deslizamento da armadura, além da perda de cobrimento da armadura levando à ruptura. A medida que o concreto sofre aumento da temperatura e torna-se superaquecido ocorre a mudança das suas características físicas, sendo que segundo Rosso¹ (1975), “a partir de 300°C a tonalidade do concreto começa a sofrer alteração”, em torno de 600°C começa a ter a alteração dos compostos de ferro e devido a esta alteração a coloração do concreto varia entre tons róseos a vermelho pálido. Acima de 600°C a tonalidade varia de cinza claro a amarelo claro. Além das alterações de tonalidade, a observação visual das superfícies sujeitas a situações de incêndio, podem revelar informações importantes, conforme demonstra a Tabela 1. Segundo Neville, apud Morales et al³ (2011) entre 600°C e 700°C ocorre a perda total e irreversível das propriedades mecânicas do concreto. E segundo Morales et al³ (2011) “O resfriamento brusco da temperatura é responsável pelas maiores perdas de resistências”. Isso se deve ao aumento das fissuras devido ao choque térmico, conforme afirma (XIAO e KONIG, 2004 apud OLIVEIRA, 2006)¹¹:

“Até 400°C o resfriamento brusco provoca reduções de resistências maiores no concreto, devido a maior quantidade de fissuras provenientes do choque térmico ao entrar em contato com a água. Após 600°C a diferença quanto ao tipo de resfriamento não é tão relevante para a análise de perda de resistência”.

O concreto por si só é um mal condutor de calor, enquanto que o aço é um excelente condutor de calor, quando a viga de concreto armado estiver submetida a altas temperaturas e houver a presença de lascamentos e fissuração, a armadura poderá ficar exposta ao calor, e assim auxiliar no aumento da temperatura no interior da viga, devido à alta condutibilidade de calor do aço, o que pode causar maior perda de resistência. BOBROWSKI & BARDHAN-ROY⁴, 1969 entendem que:

Em altas temperaturas, o modo de ruptura por cisalhamento está associado ao deslizamento da armadura na região de ancoragem ou a à perda de aderência aço – concreto da armadura principal, notável quando há um espaço muito pequeno entre as barras.

Com isto espera-se que haja uma perda de resistência ao cisalhamento após o aumento da temperatura, porém alguns autores afirmam que não é comumente observado a perda de resistência ao cisalhamento do concreto armado

superaquecido. Para (MALHOTRA⁵, 1982; PURKISS⁶, 1996) “Colapsos estruturais por cisalhamento e torção não são comuns em elementos de concreto armado em situação de incêndio.” E conforme estabelece a (NBR 15200:2012¹⁰) “Os ensaios mostram que em situação de incêndio as peças de concreto rompem usualmente por flexão ou flexo-compressão e não por cisalhamento.” Nesse contexto, o presente trabalho objetiva avaliar experimentalmente a resistência ao cisalhamento, em vigas de concreto armado após serem submetidas à altas temperaturas e resfriadas bruscamente, para avaliar da influência da temperatura neste tipo de resistência.

Tabela 1 - Características do concreto superaquecido

Temperatura [°C]	Cor	Aspecto visual / Desempenho
<250	Cinza	Perda de resistência pequena e irregular
285-300	Cinza-Roseo	Fissuração superficial, lascamento explosivo (vapor)
300	Rosa	Início de mudança de cor
50 - 400		Redução do módulo de deformação
535-550	Roxo	Fissuração profunda – friabilidade superficial
575	Vermelho pálido	Pipocamento dos grãos de quartzo
650	Cinza esbranquiçado	Perda das propriedades mecânicas
790-800		Lascamentos do cobrimento das armaduras, com exposição até 25% da superfície das mesmas
900	Amarelo alaranjado	Superfície pulverulenta
1000	Amarelo claro	

Fonte: Neville² (1923) apud Rosso¹ (1975)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento experimental para o presente trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira corresponde a ensaios preliminares realizados com amostras de dimensões de 12x20x30 cm utilizando a mesma armadura que será utilizada nas vigas principais. Para o ensaio experimental das vigas elevadas a altas temperaturas foi utilizado forno Mufla modelo CT-095 da marca Servitech, com dimensões internas de 480x530x530 mm. (Figura 1). Este forno tem capacidade de atingir a temperatura máxima de

1200 °C, potência e 380 V, resistências metálicas espirais e isolamento térmico com fibra cerâmica.

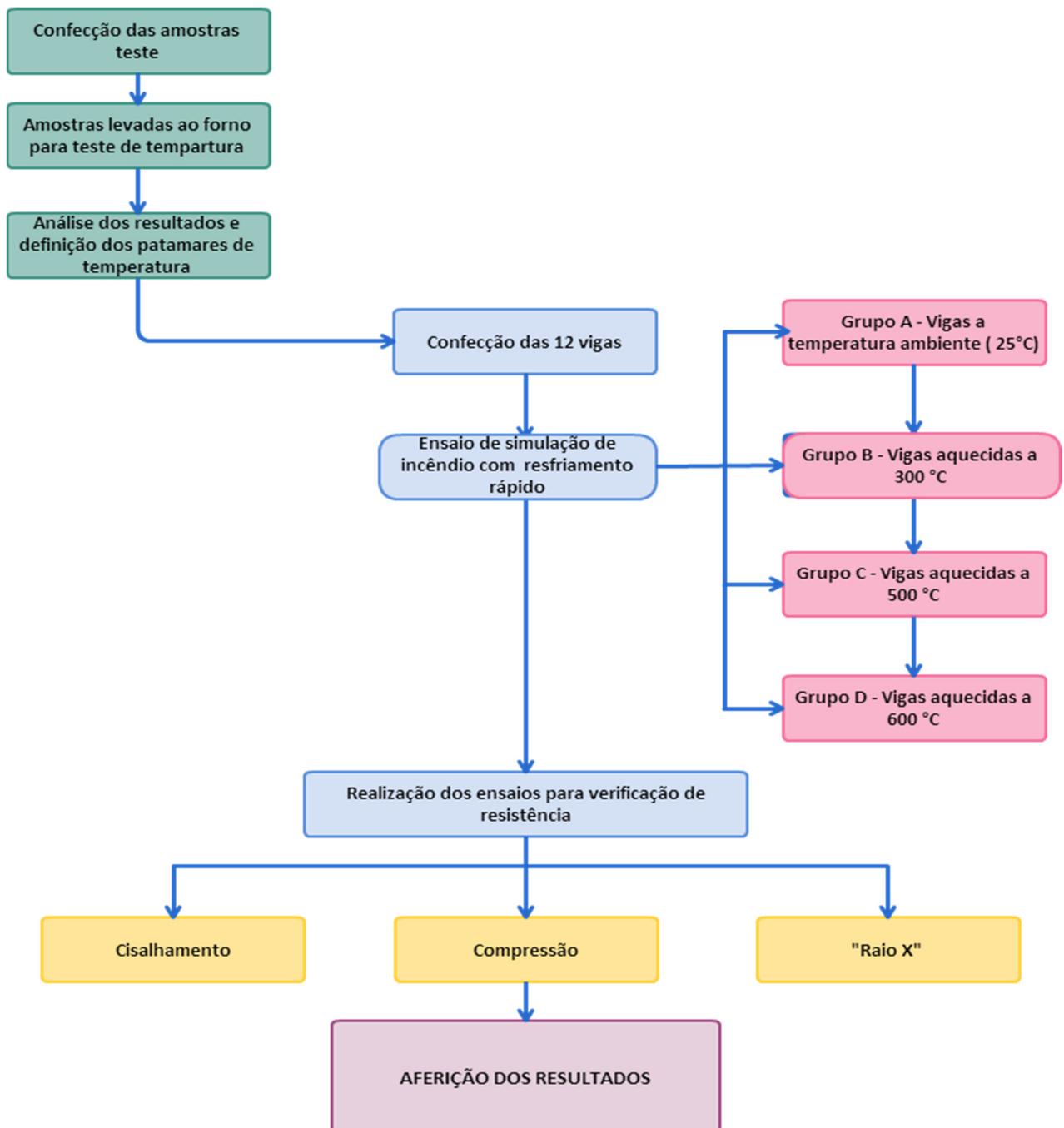
As amostras são então submetidas às temperaturas diferentes neste forno e resfriadas bruscamente, para verificação do comportamento e embasamento para definição dos patamares de temperaturas a serem utilizados nos ensaios posteriores. A segunda etapa corresponde a confecção de 12 vigas de concreto armado utilizando concreto usinado C30, com seção transversal de 12x20 cm e comprimento de 190 cm. Estas vigas são divididas em 4 grupos, compostos de 3 vigas cada. Cada conjunto é denominado por grupos A, B, C e D. O primeiro grupo (A) ficará à temperatura ambiente e os demais grupos serão submetidos à diferentes patamares de temperatura, simulando uma situação de incêndio com resfriamento rápido após atingir a temperatura desejada. Na sequência, todas as vigas são submetidas à ensaio de cisalhamento com carga aplicada a uma distância de 2,5h (h = altura da seção transversal) à partir do centro do apoio mais próximo. Os ensaios de caracterização do concreto, e resistência ao cisalhamento serão realizados no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil e LEE – Laboratório Experimental de Estruturas respectivamente ambos pertencentes à UNESC e localizado no IParque – Parque Científico e Tecnológico. No fluxograma apresentado da Figura 2, é possível visualizar as etapas do procedimento experimental.

Figura 1: Forno Mufla. a)Parte interna com a amostra sendo retirada, b)Parte externa.



Fonte: Do autor, 2014.

Figura 2: Fluxograma do procedimento experimental.



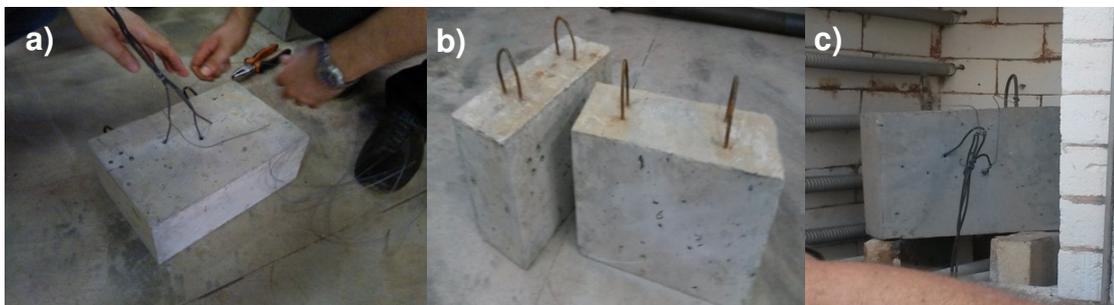
Fonte: Do autor, 2014.

2.1 ENSAIOS INICIAIS COM AMOSTRAS REDUZIDAS

Inicialmente são confeccionadas duas amostras para verificação do comportamento quando levadas a altas e diferentes temperaturas e resfriadas bruscamente na sequência. Para a confecção das amostras foram consideradas as dimensões de

12x20x30 cm, concreto C30 e mesma armadura utilizada nas vigas principais. Foram posicionados 3 termopares em cada amostra em diferentes posições. Um termopar foi colocado na superfície lateral da amostra, outro a uma profundidade de 3,5 cm da superfície, e o último no centro da amostra. Os termopares podem ser visualizados na Figura 3 (a). Já na Figura 3 (b) e (c) pode-se visualizar as amostras prontas e no interior do forno respectivamente.

Figura 3 – Preparação das amostras teste – (a) Alocação dos termopares; (b) amostras prontas; (c) Amostras no interior do forno.



Fonte: Do autor, 2014

A primeira amostra foi levada ao forno elétrico à temperatura de 300°C na face. Retirada esta amostra, a mesma foi submetida a resfriamento brusco, por meio de imersão em um recipiente com água à temperatura ambiente. Na sequência a amostra foi retirada da água e submetida a análise visual onde pode-se constatar que não ocorreram alterações significativas, não apresentando fissuras ou outros danos superficiais. Após a análise da primeira, prosseguiu-se com a segunda amostra utilizando o mesmo procedimento, porém agora levando ao patamar de 600°C. Após o resfriamento a mesma foi submetida a análise visual, onde pode-se perceber a presença de algum danos como alteração na cor da amostra, a presença de pequenos lascamentos e fissuras na superfície. Os danos aparentes não foram significativos, considerando apenas a análise visual, porém internamente poderá acarretar na perda de resistência. À partir desse procedimento, foi possível definir dos patamares de temperatura, pois como até 300° não observou-se muitos danos, o primeiro patamar ficou definido com 300°C, o segundo à 500°C e o terceiro à 600°C, conforme Tabela 2.

Figura 4 – Preparo do ensaio preliminar para determinação dos patamares de temperatura – (a) resfriamento da amostra; (b) Amostra em análise visual; (c) Retirada dos termopares da amostra.



Fonte: Do autor, 2014

Tabela 2- Patamares de temperatura para ensaio das vigas

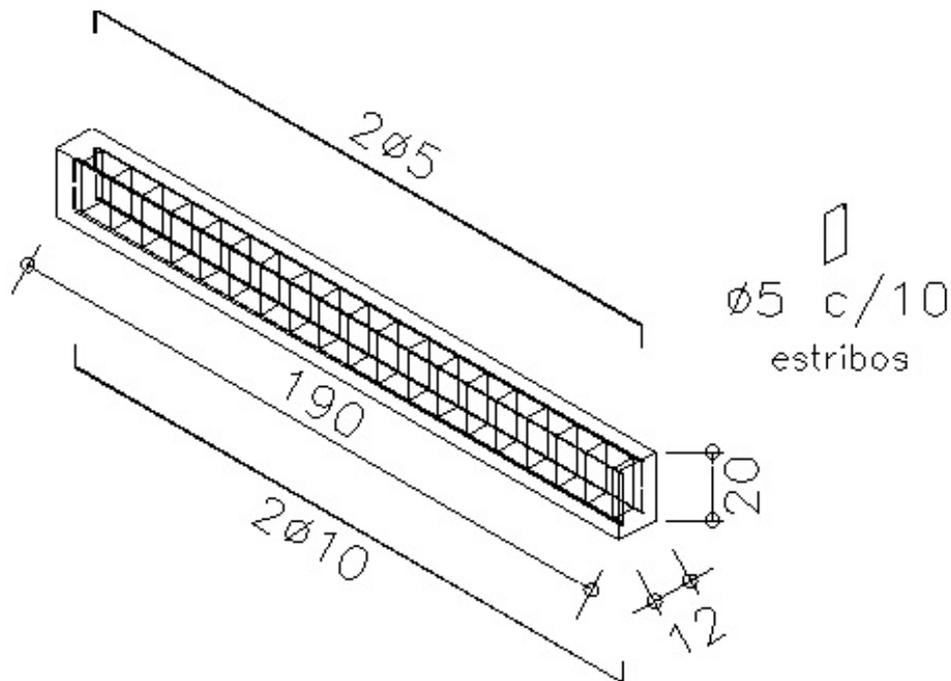
Patamares de temperatura	
Grupo das vigas	Patamar de temperatura (°C)
GRUPO A	Temperatura ambiente
GRUPO B	300
GRUPO C	500
GRUPO D	600

Fonte: Do autor, 2014

2.2 DIMENSIONAMENTO E CONFECÇÃO DAS VIGAS

As vigas foram confeccionadas com seções transversais de 12x20 cm e 190 cm de comprimento total. As armaduras foram dimensionadas segundo os critérios da NBR 6118:2014⁹, de modo a atuar no domínio de deformação 2. Considerando a resistência característica do concreto usinado utilizado de 30 MPa e aço CA-50, a armadura de combate a flexão é composta por duas barras com diâmetro de 10mm. Os estribos, formados por dois ramos verticais tem espaçamento de 10 cm e diâmetro de 5 mm, atendendo o critério de mínimo diâmetro e máximo espaçamento, estabelecido pela NBR 6118:2014⁹. Como porta estribo foram adotadas duas barras de 5,0 mm. A Figura 5 mostra o detalhamento das armações empregadas nas amostras.

Figura 5: Detalhamento das armaduras das vigas



Fonte: Do autor, 2014

Antes da concretagem, aplicou-se desmoldante nas formas. A concretagem das vigas foi realizada no pátio de obra de uma construtora que cedeu o espaço. O concreto utilizado foi o C30 dosado em central, e foi lançado através de bomba e adensado com o auxílio de vibradores de imersão. Para garantir o cobrimento da armadura foram utilizados espaçadores para classe de agressividade I – 2,5 cm. Em simultâneo a concretagem foram moldados seis corpos de prova para verificação da resistência à compressão aos 28 dias, conforme NBR 6118:2014⁹. A Figura 6 mostra a sequência da concretagem das vigas.

Figura 6: Confeção das vigas de concreto armado - (a) armadura; (b) aplicação de desmoldante; (c) colocação das armaduras (d) concretagem; (e) adensamento; (f) vigas concretadas.



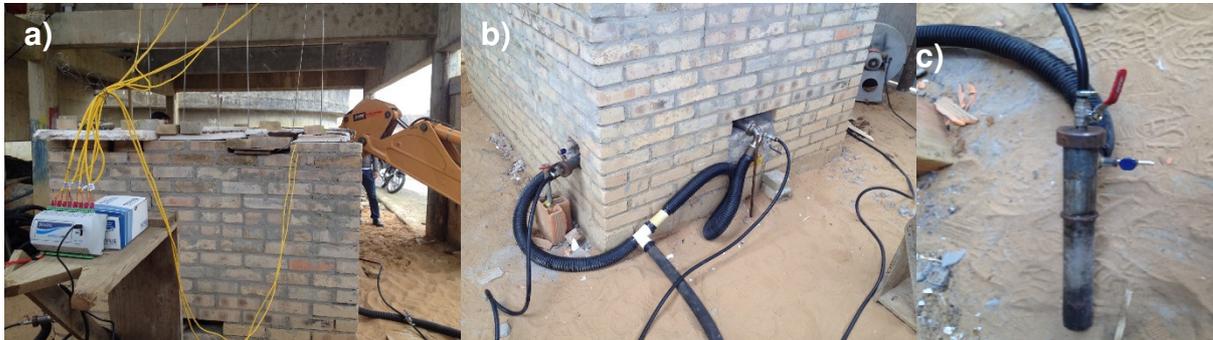
Fonte: Do autor, 2014

Para o processo de cura as vigas foram mantidas úmidas por 7 dias além da colocação de uma lona disposta sobre as mesmas. A desforma das vigas ocorreu com 28 dias após a concretagem, e foram transportadas para o pátio do IParque.

2.3 CARACTERÍSTICAS DO FORNO E QUEIMADORES

Para o ensaio de simulação de situação de incêndio foi utilizado um forno construído no IParque, com dimensões externas de 173x223 cm e 150 cm de altura composto por tijolos refratários, e um console também de tijolos refratários para apoio das vigas. Para o sistema de aquecimento foram utilizados três queimadores a gás natural e sistema de exaustão por dutos instalados nas laterais do forno. O forno localiza-se sob um dos prédios existentes no pátio do Iparque sem paredes no entorno, o que possibilita perda de calor pela presença constante de vento. Para diminuir este fator foram utilizados tapumes de madeira para proteção do forno contra o vento e na sua parte superior utilizou-se placas de lã de rocha para minimizar a dissipação do calor. Figura 6 mostra as características do forno utilizado e detalhe dos queimadores.

Figura 6: Detalhes do forno e equipamentos - (a) Forno com termopares já posicionados; (b) Posicionamento dos queimadores no forno; (b) Queimadores.



Fonte: Do Autor, 2014.

Após a preparação do forno e dos queimadores foram dispostas em cada fornada seis vigas, porém das seis vigas apenas três foram utilizadas no presente estudo. Para a fixação dos termopares nas vigas, foram realizados furos com 65 mm de diâmetro e profundidade de 10 cm, a partir da face superior para leitura da temperatura no interior das vigas. Também para o acompanhamento da elevação da temperatura interna do forno, foram locados dois termopares em seu interior, um na parte superior e outro na parte inferior. No total foram localizados 8 termopares do tipo K resistente a oxidação em temperaturas elevadas, acoplados em um sistema de aquisição de registro de dados NOVUS e monitorados pelo software FieldLogger v.1.5.1, instalado em um computador para acompanhamento da temperatura durante o ensaio. A Figura 8 mostra a localização dos termopares nas vigas e o sistema de aquisição de dados.

Figura 8: Posicionamento dos termopares - (a) Disposição das vigas; (b) Posicionamento dos termopares no interior das vigas; (b) Termopares e sistema utilizados para coleta de dados.



Fonte: Do Autor, 2014.

2.4. ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Para a realização do ensaio de simulação de incêndio, foram dispostas as vigas no forno com o auxílio de uma retroescavadeira. Após o posicionamento das vigas no forno, foram instalados os termopares identificando em qual viga e posição estavam localizados para posterior extração dos dados de temperatura atingido em cada viga. Primeiramente foram levadas ao forno o grupo B, onde a temperatura máxima atingida foi 300 °C, com duração de 100 minutos. Após esse período de tempo, as amostras foram retiradas do forno novamente com o auxílio de uma retroescavadeira e na sequência foram resfriadas bruscamente com jato de água em temperatura ambiente. O mesmo processo foi realizado para as vigas do grupo C que atingiram a temperatura máxima de 500 °C e assim permaneceram por 100 minutos e para o grupo D, que atingiu a temperatura máxima de 600°C, e ficou mantido nesta temperatura até que a temperatura interna das vigas atingisse pelo menos o dobro da temperatura interna do grupo anterior. A temperatura máxima do grupo D ficou limitada a 600°C pelas condições do forno utilizado. As Figuras 9 e 10, mostram respectivamente a sequência do ensaio e detalhe do forno, bem como os equipamentos utilizados.

Figura 9: Etapas do ensaio de simulação de incêndio - (a) Transporte das vigas; (b) Posicionamento das vigas no forno; (c) Instalação dos termopares; (d) Retirada das vigas do forno; (e) e (f) resfriamento das vigas.



Fonte: Do Autor, 2014.

Figura 10: Configuração do forno utilizado no ensaio



Fonte: Do autor, 2014.

Na Figura 11 são indicados os termopares localizados no interior do forno, onde TS, é o termopar superior e TI é o termopar inferior, além do posicionamento dos queimadores.

Figura 11: Esquema do posicionamento dos termopares e queimadores.

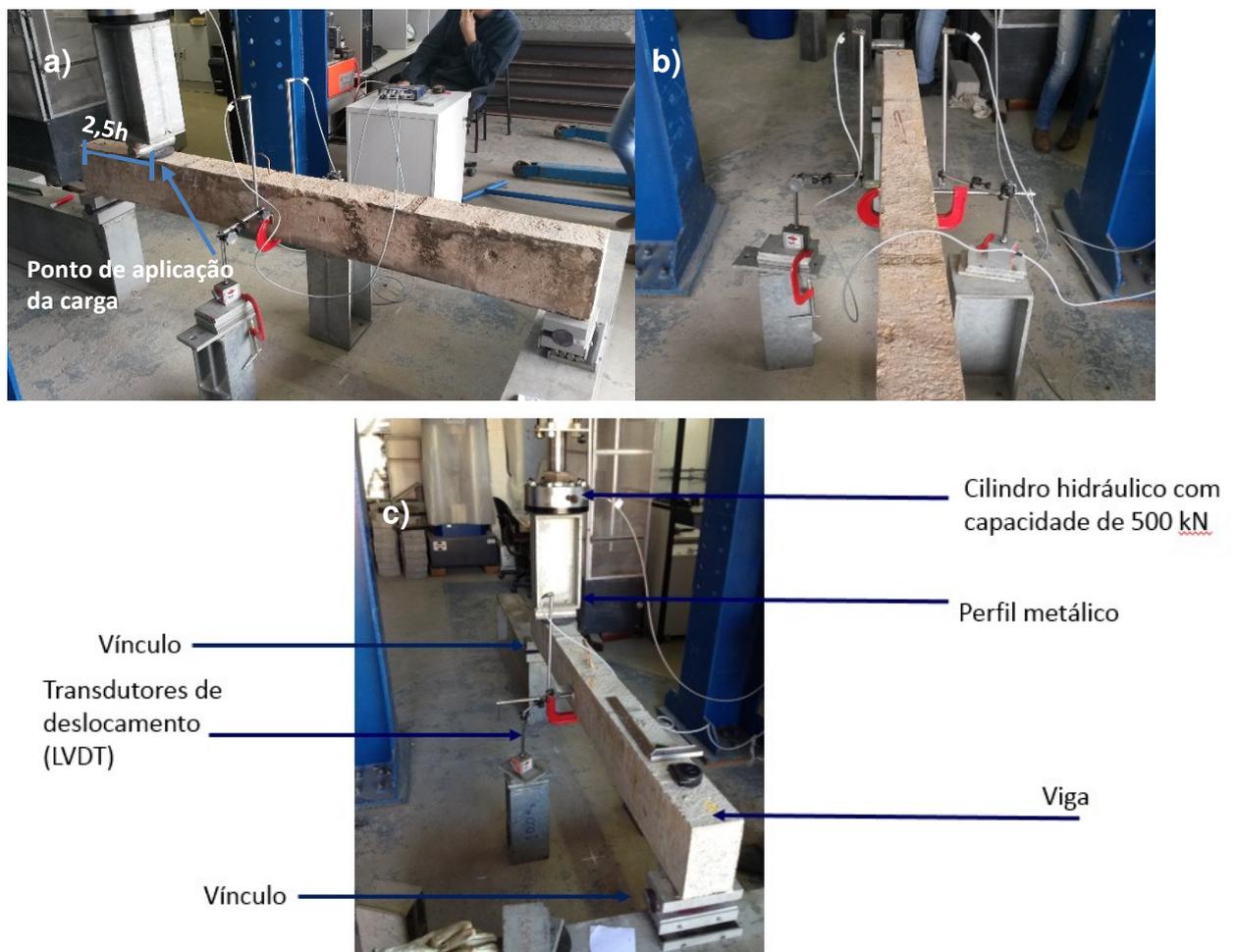


Fonte: Do autor, 2014.

2.4. ENSAIO DE CISALHAMENTO NAS VIGAS

Todo o conjunto de vigas foi submetido à ensaios de cisalhamento. Para a realização do ensaio, posicionou-se as vigas sob um pórtico de reação e aplicou-se a carga a partir de um cilindro hidráulico de controle elétrico com capacidade de 500 kN, a uma distância $2,5h$ do centro do apoio mais próximo, conforme preconizado pela norma britânica BS EN 15037-1:2008. Além do pórtico metálico e do cilindro hidráulico utilizou-se uma célula de carga na base do cilindro, ligada ao sistema de aquisição de dados Quantum X[®] que utiliza o *software* Catman Easy[®], ambos da marca HBM[®]. O aparato utilizado na execução do ensaio está ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Aparato utilizado no ensaio de cisalhamento



Fonte: Do Autor, 2014.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Realizou-se o ensaio de compressão axial aos 28 dias, dos corpos de provas moldados por ocasião da concretagem das vigas. As amostras foram mantidas em cura submersa durante 7 dias. Os resultados obtidos no ensaio foram compilados na Tabela 1, onde observa-se que todos os valores atenderam a classe do concreto adotada.

Tabela 1: Resultados da resistência à compressão axial.

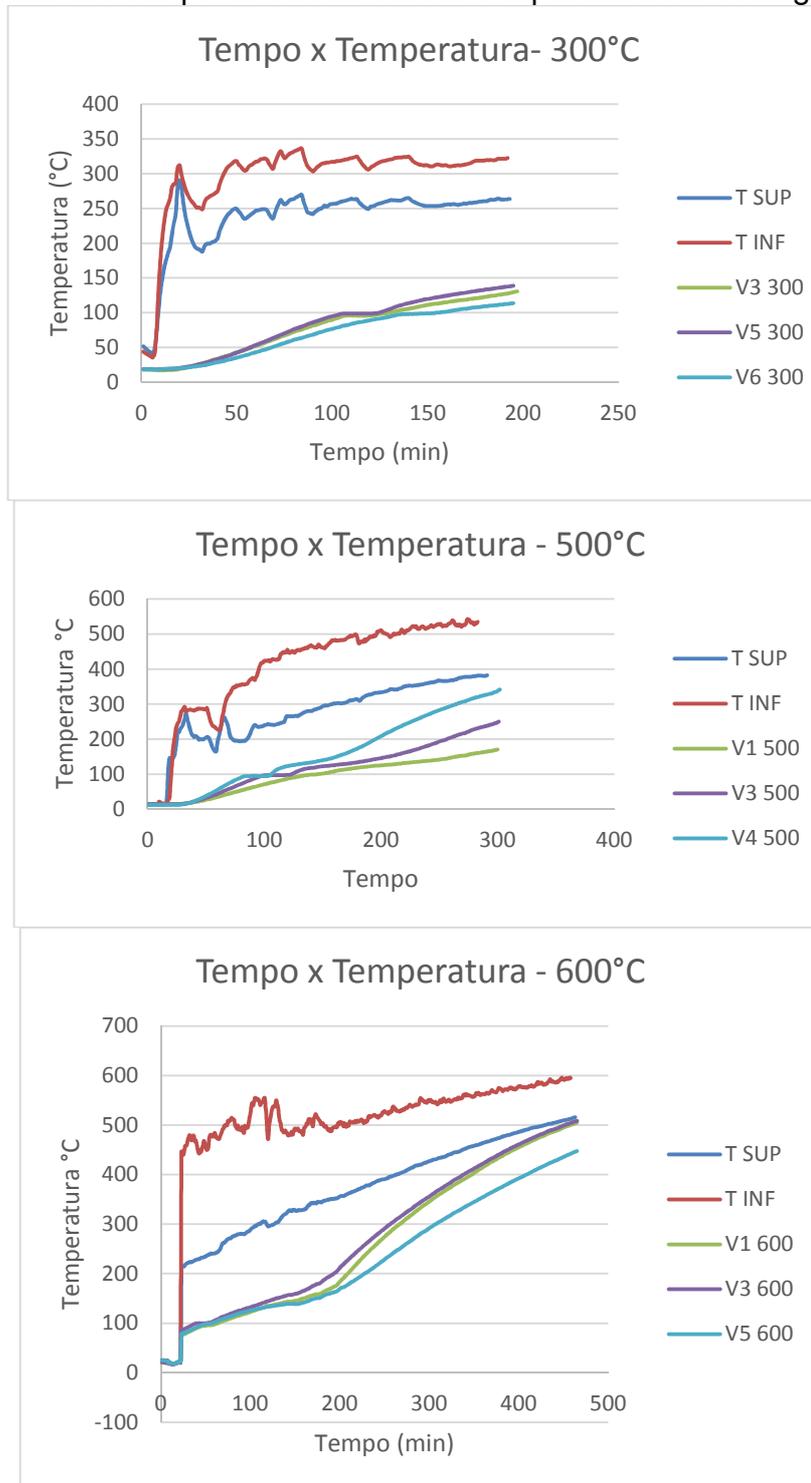
Corpos de Prova	Tensão (Mpa)
CP1	38,8
CP2	36,4
CP3	40,0
CP4	34,5
CP5	34,1
CP6	32,6
<i>Média</i>	<i>36,07</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>2,88</i>

Fonte: Do Autor, 2014.

3.2 ENSAIO DAS VIGAS NO FORNO

À partir dos dados obtidos durante a exposição das vigas aos patamares de temperaturas elevadas, foi possível plotar os gráficos relacionando tempo e temperatura. A Figura 13 apresenta os resultados de cada grupo, onde T_{sup} e T_{inf} representam os termopares posicionados na parte superior e inferior do forno, respectivamente. As demais legendas representam o número da viga e a temperatura à que ficou exposta.

Figura 13 Resultados tempo do ensaio *versus* temperatura em cada grupo.



Fonte: Do Autor, 2014.

3.3 AVALIAÇÃO VISUAL DA MACROESTRUTURA

Após a realização do ensaio de simulação de incêndio foi possível realizar a avaliação visual dos efeitos causados pela temperatura na macro estrutura das vigas. Na Figura 14(a) observa-se o aspecto diferenciado na coloração das vigas que atingiram a temperatura de 600°C, posicionadas do lado direito da foto. Essas vigas apresentaram uma coloração vermelho pálido, além de fissuração mais profunda e lascamentos explosivos maiores, conforme pode ser observado em detalhe, na Figura 14 (b), (c) e (d). Já as vigas dos grupos B e C não apresentaram alteração de cor significativa, e as fissurações foram mais superficiais.

Figura 14 – Aspecto das vigas dos diferentes grupos, após o ensaio de simulação de incêndio.



Fonte: Do Autor, 2014.

3.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO

3.4.1 CARGA NA RUPTURA

Ao aplicar a carga até atingir a ruptura, verifica-se que os resultados não mostraram uma tendência, apresentando disparidade entre os grupos. As cargas são comparadas ao grupo de referência (grupo A) qual se manteve na temperatura

ambiente, sem incremento de temperatura. A Tabela 2 apresenta os resultados da carga de ruptura relacionada com a temperatura interna máxima atingida pelas vigas.

Tabela 2: Resultados da carga de ruptura para os diferentes patamares de temperatura.

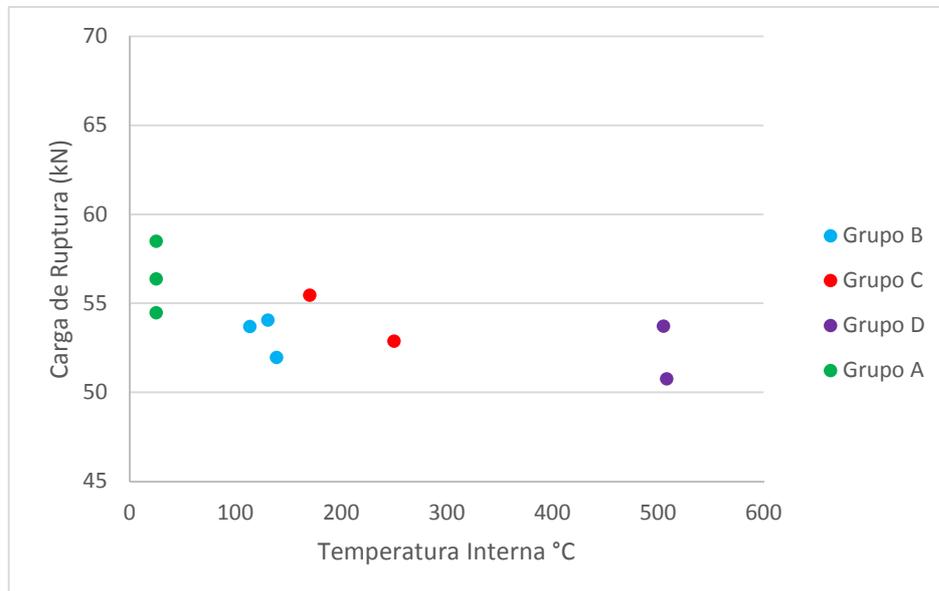
Identificação das vigas	Temperatura interna máx (°C)	Carga máxima (kN)	Média das Cargas (kN)	Desvio Padrão (kN)
V1 - REF	25	54,48		
V2 - REF	25	58,51	56,46	2,02
V3 - REF	25	56,39		
V1J - 300	130,7	54,07		
V3J - 300	138,8	51,98	53,25	1,11
V5J - 300	113,7	53,69		
V1J - 500	170,4	55,47		
V3J - 500	250	52,9	59,23	8,84
V5J - 500	343,7	69,33		
V1J - 600	505,3	53,74		
V3J - 600	508,4	50,78	56,16	6,91
V5J - 600	447,5	63,95		

Fonte: Do Autor, 2014.

Com os resultados obtidos na tabela acima foi possível observar que, comparando com o Grupo A, todos os demais grupos avaliados não reduziram a resistência ao cisalhamento, ou reduziram em valores não significativos, como é o caso o Grupo B e D que sofreram uma redução de carga de 6% e 0,5% respectivamente. O grupo C correspondente a temperatura de 500 °C sofreu um incremento de resistência de 5%, porém como o desvio padrão deste grupo apresentou um valor muito alto, 8,84, este incremento de resistência não será considerado. Observa-se ainda, que duas vigas obtiveram valores de carga aplicada, fora do intervalo das demais, prejudicando a análise destes dados.

No gráfico da Figura 15 é possível verificar o comportamento das cargas em relação as temperaturas na íntegra.

Figura 15: Cargas na ruptura considerando as máximas temperaturas máximas internas das vigas.



Fonte: Do Autor, 2014.

3.4.2 EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DAS VIGAS ENSAIADAS

Com o intuito de confirmar os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento, foram retirados testemunhos das vigas para análise da macro e micro estrutura. A Figura 16 ilustra o procedimento de extração das amostras.

Figura 16: Procedimento de extração dos corpos de provas das vigas. a) Extração dos corpos de prova das vigas; b) Vigas após a extração dos corpos de prova; c) Corpos de prova extraídos.



Fonte: Do autor, 2014.

3.4.2.1 ENSAIO À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS DAS VIGAS

Foram extraídos oito corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro e altura igual à largura da seção transversal das vigas, contemplando as quatro faixas de temperatura estudadas. Como os corpos de prova estavam com as superfícies irregulares devido a extração, houve necessidade de retificá-los na sua altura, o que levou a não uniformidade dessa dimensão. Por este motivo, as alturas e diâmetros foram medidas com o auxílio de um paquímetro de precisão em suas extremidades adotando-se o seu tamanho através da média destas medidas. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos onde observa-se que houve uma redução na carga e ruptura significativa a medida que a temperatura é elevada, sendo que a 300 °C sofre uma redução de 14,96% em relação a temperatura ambiente, a 500 °C a redução já aumenta para 19,34% e a 600 °C é onde atinge a maior redução de carga com o valor de 23,25%, o que mostra que o aumento de temperatura tem influência na resistência a compressão do concreto.

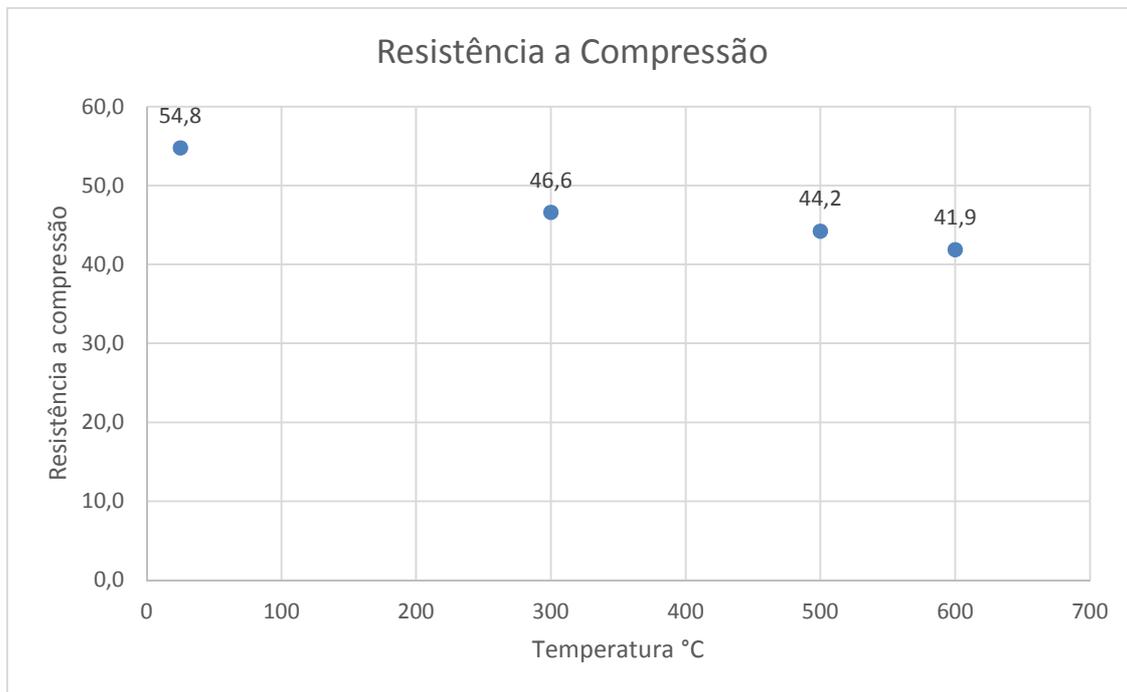
Tabela 3: Resultados da resistência a compressão axial.

Corpo de prova	Diâmetro médio (cm)	Altura média (cm)	Tensão à compressão axial (MPa)	Média das cargas (MPa)	Desvio Padrão
V1 - REF	10,058	9,235	51,8	54,8	4,2
V2 - REF	10,056	8,883	57,7		
V3J - 300	10,095	9,021	45,6	46,6	1,4
V5J -300	10,020	9,018	47,6		
V3J -500	10,043	9,915	45,6	44,2	2,0
V4J -500	10,018	10,075	42,8		
V1J -600	10,000	9,228	41,6	41,9	0,4
V5J 600	9,888	9,004	42,1		

Fonte: Do Autor, 2014.

No gráfico da Figura 17 é possível verificar o comportamento da resistência a compressão conforme aumenta-se a temperatura. Para diagnóstico destes dados foi desconsiderada a presença dos dados prejudiciais a análise.

Figura 17: Resistência a compressão considerando a elevação da temperatura



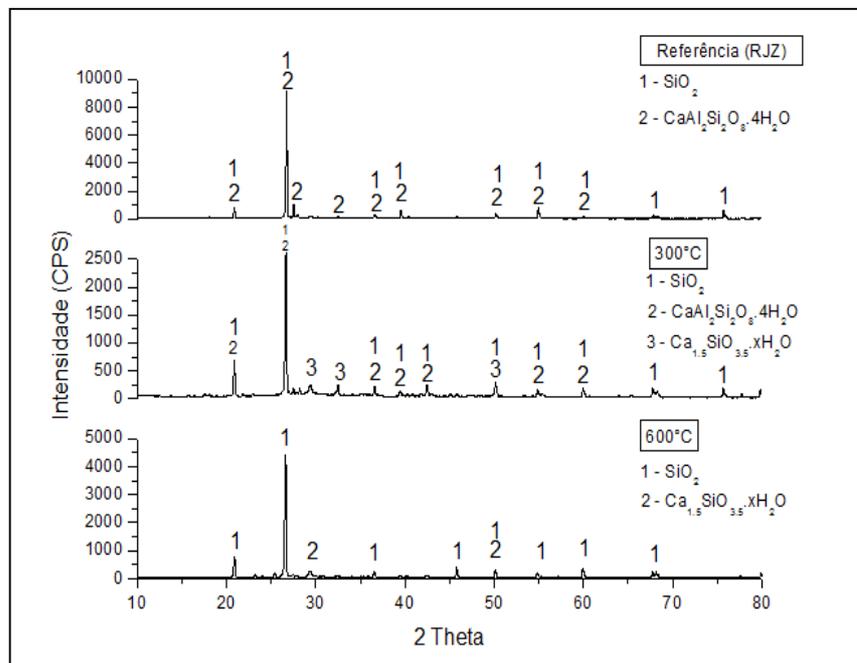
Fonte: Do Autor, 2014.

3.4.2.2 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X - DRX

Objetivando avaliar as fases mineralógicas nos diferentes patamares de temperatura, o resíduo dos corpos de prova extraídos das vigas foi submetido a ensaio de Difração de Raios X – DRX.

As Figuras 18 e 19 apresentam, respectivamente o relatório produzido pelo equipamento e os dados trabalhados a partir do relatório, onde é possível observar que até a temperatura de 600°C na parte externa da peça (447,5°C no interior), não ocorreram alterações nas fases mineralógicas do concreto.

Figura 18: Relatório do ensaio de Difração de Raio X - DRX



Fonte: Do Autor, 2014.

Figura 19: Fases Mineralógicas presentes no DRX

Amostra	Temperatura °C	Fases Presentes
Ref	25	Silicon Oxide (Quartz, syn) –JCPDS- 46-1045 -SiO ₂ Calcium Aluminum Silicate Hydrate – JCPDS - 20-0452 CaAl ₂ Si ₂ O ₈ .4H ₂ O
300 - 3	300	Silicon Oxide (Quartz, syn) –JCPDS- 46-1045 -SiO ₂ Calcium Aluminum Silicate Hydrate – JCPDS - 20-0452 - CaAl ₂ Si ₂ O ₈ .4H ₂ O Calcium Silicate Hydrate – JCPDS - 33-0306 - Ca _{1.5} SiO _{3.5} .xH ₂ O
600 - 5	600	Silicon Oxide (Quartz, syn) –JCPDS- 46-1045 -SiO ₂ Calcium Silicate Hydrate – JCPDS - 33-0306 - Ca _{1.5} SiO _{3.5} .xH ₂ O

Fonte: Do Autor, 2014.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Realizou-se a análise estatística Anova (Análise de Variância) para verificar se os grupos apresentaram resultados distintos, no que se refere:

- (a) Resistência ao cisalhamento
- (b) Resistência a compressão

Na figura 20 e 21 é possível verificar os resultados da análise estatística da resistência ao cisalhamento e resistência a compressão respectivamente.

Figura 20: Análise estatística da resistência ao cisalhamento.

Tukey HSD test; variable Carga Ruptura Cisalhamento (kN) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 32,788, df = 8,0000					
Cell No.	Grupo Viga	{1}	{2}	{3}	{4}
		56,460	53,247	59,233	56,157
1	REF		0,899200	0,931412	0,999900
2	300	0,899200		0,598705	0,922092
3	500	0,931412	0,598705		0,909886
4	600	0,999900	0,922092	0,909886	

Fonte: Do Autor, 2014.

Com esta análise foi possível verificar que estatisticamente as amostras são iguais, com 95% de confiabilidade, comprovando as afirmações anteriores, onde foi percebido que a resistência ao cisalhamento não sofre influência significativa com o aumento da temperatura.

Figura 21: Análise estatística da resistência a compressão.

Tukey HSD test; variable Compressão Axial (MPa) Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 5,8625, df = 4,0000					
Cell No.	Grupo Viga	{1}	{2}	{3}	{4}
		54,750	46,600	44,200	41,850
1	REF		0,089834	0,040184	0,020337
2	300	0,089834		0,762968	0,334038
3	500	0,040184	0,762968		0,773077
4	600	0,020337	0,334038	0,773077	

Fonte: Do Autor, 2014.

Com relação a resistência a compressão, através desta análise foi possível verificar que estatisticamente as amostras são diferentes, comprovando as afirmações

anteriores, onde foi percebido que a temperatura tem influência na redução da resistência a compressão.

5. CONCLUSÃO

- Após a conclusão dos ensaios pode-se perceber que contrariando as expectativas, porém, seguindo a tendência dos estudos realizados por outros autores, a resistência ao cisalhamento das vigas não diminui com o aumento da temperatura. Desta forma a temperatura não apresentou influência na carga de ruptura ao cisalhamento para as condições estabelecidas para esse trabalho.
- Para as amostras extraídas das vigas, ocorreu redução da carga de ruptura a compressão simples conforme aumenta-se a temperatura. Nas vigas submetidas a 300 °C houve uma redução de 14,96% em relação a temperatura ambiente; a 500 °C a redução é de 19,34% e a 600 °C o valor passa para 23,25%.
- Conclui-se que as vigas a partir de 600°C sofrem influência significativa nos aspectos visuais, em relação a sua coloração que passam de cinza para vermelho pálido e segue a tendência de continuar sofrendo modificações conforme esta temperatura é elevada. Já em relação aos lascamentos explosivos e fissurações nota-se que nas temperaturas analisadas, a temperatura de 600 °C foi o patamar em que a viga mais sofreu consequências com relação a estes fatores, e mostra que há a tendência também que com o aumento da temperatura estes efeitos tendem a agravarem.

6. RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- ❖ Ensaiar as vigas em temperaturas acima de 600 graus avaliando a influência do tipo de resfriamento: lento e brusco.
- ❖ Repetir esse estudo com temperaturas iguais e superiores a 600 °C no interior da peça.
- ❖ Ensaiar vigas em elevadas temperaturas com aplicação simultânea de carga.

- ❖ Ensaiar além das vigas, outros elementos estruturais em elevadas temperaturas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

⁹ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

¹⁰_____. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**, Rio de Janeiro, 2012.

⁸_____. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

⁷_____. **EN 1168:2005 – Precast Concrete Products – Hollow Core Slabs**. Brussels. CEN (Comité Européen de Normalisation), 2005

⁴BOBROWSKI, J.; BARDHAN-ROYT, B.K. A method of calculating the ultimate strength of reinforced and prestressed concrete beams in combined flexure and shear. **The Structural Engineer**, London, v. 47, n. 5, p. 197-209, 1969.

⁵MALHOTRA, H. L, Current thinking and developments in fire testing in Europe. **Fire and Materials**, Chichester, v.4, n. 4, p. 177-184, 1980.

³MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGARELLO, A. M. P. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto** In: Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, jan./mar. 2011

¹¹OLIVEIRA, Tiago A. de C. P. de. **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 em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006

⁶PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures**, Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.

¹ROSSO, T. **Incêndios e arquitetura**, Apostila. São Paulo: FAUUSP, 1975.