



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES RESIDUAIS DO CONCRETO DE
ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
SUBMETIDO À ELEVADAS TEMPERATURAS**

GUSTAVO ALBUQUERQUE CARDOSO BARBOSA SANTOS

RECIFE

2017

GUSTAVO ALBUQUERQUE CARDOSO BARBOSA SANTOS

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES RESIDUAIS DO CONCRETO DE
ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
SUBMETIDO À ELEVADAS TEMPERATURAS**

**Monografia apresentada à Universidade Federal de
Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção
de grau de Engenheiro Civil.**

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. José Jeferson Rêgo Silva

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- S237a Santos, Gustavo Albuquerque Cardoso Barbosa.
Análise de propriedades residuais do concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço submetidos à elevadas temperaturas / Gustavo Albuquerque Cardoso Barbosa Santos. – 2017.
67f., il., figs., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. José Jeferson Rêgo Silva.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2017.
Inclui Referências, Apêndice e Anexos.
1. Engenharia Civil. 2. Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CADRF). 3. Alta resistência. 4. Propriedades residuais. 5. Temperaturas elevadas. 6. Lascamento explosivo. I. Silva, José Jeferson Rêgo (Orientador). II. Título.

**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL**

**CANDIDATO(S): 1 – Gustavo Albuquerque Cardoso Barbosa Santos
2 –**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. José Jeferson Rêgo Silva

Examinador 1: Prof. Tibério Andrade

Examinador 2: Hélykan Monteiro

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise de propriedades
residuais do concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço submetido à
elevadas temperaturas**

LOCAL:

DATA: 20/07/2017 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 10:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 9,3 (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 20 de julho de 2017

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

Se não tem jeito, ainda não chegou ao fim.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado a vida e por ter me levantado depois de cada queda.

Aos meus pais, irmão e família em geral, por terem me dado forças nos momentos mais difíceis.

À minha companheira Eduarda do Vale, parceira nos momentos bons e ruins que não negou ajuda em nenhum momento.

Ao professor orientador Dr. Jeferson Silva, que me explicou como um pesquisador deve raciocinar, pela paciência em um trabalho tão desafiador para mim.

À Eldenes Torres, principalmente pela ajuda na etapa dosagem do concreto.

Aos amigos e colegas de faculdade Rodrigo Portela, Jonathas Fonseca, Francisco Marques e todos outros não citados que contribuíram de alguma forma para este trabalho ser realizado.

Às empresas Tecomat, Supermix, Concrecon, Archelor Mittal e Cimento Nacional pela doação de materiais e pelo suporte técnico dado ao trabalho.

Aos mestrandos Paulo, Roberta, Marina, Iago e Hélykan da UFPE pela força e ajuda na etapa experimental.

À Cecília Melo, pela atenção e paciência na etapa de formatação.

SANTOS, G.A.C.B (2017). Análise das propriedades residuais do concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço submetidos à elevadas temperaturas. Trabalho de Conclusão do Curso, graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECIV), Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife / PE.

RESUMO

O concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço (CADRF) é considerado um material extremamente poderoso por apresentar características mecânicas bem superiores ao concreto convencional. Apesar de no Brasil experimentos com esse tipo de concreto serem escassos, internacionalmente o composto é utilizado estruturalmente. Ao se tratar de dimensionamento de estruturas, a ação do fogo é um fator importante. Experimentos sobre a influência positiva da adição de fibras de aço nas propriedades residuais do material são recorrentes, porém, alterando-se o tipo de resfriamento, estudos se tornam mais raros. O traço selecionado atualmente é material de pesquisa na UFPE, e foi escolhido por apresentar uma matriz de concreto de alto desempenho. Ao traço foi adicionado fibras de aço ($l=35\text{mm}$; $l/d=65$) em diferentes teores de volume em relação ao volume de concreto (0,5 e 0,75%), baseados em pesquisas sobre o assunto. O material possui resistência à compressão axial de 119 MPa, aproximadamente. Um programa experimental foi desenvolvido, utilizando-se corpos de prova cilíndricos, com objetivo de investigar o comportamento do concreto de alto desempenho reforçado com fibra de aço submetido à elevadas temperaturas e diferentes tipos de resfriamento. Os ensaios escolhidos para o estudo foram resistência à compressão axial e tração na compressão diametral, pela simplicidade. A caracterização do comportamento mecânico das peças ocorreu após regimes de aquecimento com duas temperaturas adotadas (400 e 600 °C). O experimento foi realizado em um forno mufla, na universidade, utilizando uma taxa de aquecimento de 1°C/min até atingir a temperatura máxima. Os tipos de resfriamento foram do tipo lento e abrupto. Os ensaios aconteceram 24 horas após o início do resfriamento. Os resultados mostraram que as fibras não influenciaram na resistência à compressão do composto na temperatura ambiente e após aquecidos. Na tração por compressão diametral, as fibras se mostraram benéficas para a matriz.

Palavras-chaves: Concreto de alto desempenho reforçado com fibras (CADRF). Alta resistência. Propriedades residuais Temperaturas elevadas. Lascamento explosivo.

SANTOS, G.A.C.B. Residual properties of high performance fibre reinforced concrete after exposure to high temperature. Final Course Work, graduation in Civil Engineering, Department of Civil Engineering and Environmental (DECIV), Center of Technology and Geosciences (CTG), Federal University of Pernambuco (UFPE). Recife / PE.

ABSTRACT

High performance fibre reinforced concrete (HPFRC) is considered an extremely powerful material because its mechanical properties are much greater than conventional concrete. Even though in Brazil experiments with this type of concrete are scarce, internationally the compost is used in structures. When designing and building, fire becomes a very important condition. Studies about the positive influence of the addition of steel fibers on the material residual mechanical properties are recurrent, however, changing the cooling mode, experiments become rarer. The chosen dosage is being tested at the Federal University of Pernambuco, and it was selected for presenting a strong matrix. Steel fibers ($l=35\text{mm}$; $l/d=65$) were added to the blend in different volumes fractions (0,5 and 0,75%), based on recent researches. The mixture presented a cylindrical compressive strength of about 119 MPA. An experimental program was developed using cylindrical specimens to investigate the behavior of the high performance steel fiber reinforced concrete when exposed to high temperatures and different cooling modes. The selected experiments were compressive strength test and splitting tensile teste, the Brazilian test. The mechanical characterization was performed after thermal cycles up to two different thermal limits (400 and 600 °C). Each thermal cycle was carried out in a electric furnace, at a heating rate of 1°/min until the maximum temperature was reached. The cooling mode were slow and abrupt. The tests occurred after 24 hours after the cooling beginning. The results show that the fibers did not influenced in the compressive strength of the compost at normal and after cooling states. In tensile, the fibers performed better for the matrix. Moreover, the influence of the addition of steel fibers on fresh properties were analised.

Keywords: High performance fiber reinforced concrete (HPFRC). High strength. Residual properties. High temperatures. Spalling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sílica ativa atuando no preenchimento de vazios da mistura.....	21
Figura 2 - Atuação de fibras de diferentes comprimentos em fissuras.....	24
Figura 3 - Fator de forma ou relação de aspecto das fibras.	25
Figura 4 - Influência do teor de fibras na trabalhabilidade do concreto.	25
Figura 5 - Comportamento mecânico do concreto de acordo com o teor de fibras adicionado	27
Figura 6 - Relação entre resistência à compressão e porosidade do concreto.	29
Figura 7 - Relação entre carga e deslocamento para diferentes volumes de fibras.....	33
Figura 8 - Materiais da dosagem: cimento, sílica ativa, areia, brita, fibras de aço e aditivo superplastificante.....	37
Figura 9 - Fibras de aço Dramix RC 65/35	39
Figura 10 - Resistência à compressão axial do T02 em função da idade.....	40
Figura 11 - Espalhamento do concreto	42
Figura 12 - Moldagem dos CP's	43
Figura 13 - Evidência do fenômeno de spalling a uma taxa de 5°C/min.	43
Figura 14 - Gráfico da temperatura em função do tempo da fornada 4T0	44
Figura 15 - Regime de aquecimento até 400°	45
Figura 16 - Regime de aquecimento até 600°	45
Figura 17 - CP com fibras com base retificada.....	46
Figura 18 - Proteção contra possível comportamento explosivo.....	46
Figura 19 - Ensaio de tração na compressão diametral	47
Figura 20 - Espalhamento do concreto em função do teor de fibras adicionado.	48
Figura 21 - Gráfico Resistência Residual (%) para compressão axial – Resfriamento lento	50
Figura 22 - Gráfico Resistência Residual (%) para compressão axial – Resfriamento brusco.....	50
Figura 23 - Gráfico Resistência Residual (%) para tração na compressão diametral – Resfriamento lento.....	52
Figura 24 - Gráfico Resistência Residual (%) para tração na compressão diametral – Resfriamento brusco	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações fibras Dramix RC 65/36.....	39
Tabela 2 - Dosagens dos materiais por m³ de concreto	41
Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova ensaiados: resistência à compressão e tração na compressão diametral	42
Tabela 4 - Resistência à compressão axial (MPa) Cp1/Cp2 (Média)	49
Tabela 5 - Tração na compressão diametral MPa – Cp1/Cp2(Média).....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c: Relação água/cimento

ABECE: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural

ARI: Alta resistência inicial

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAD: Concreto de alto desempenho

CADRF: Concreto de alto desempenho reforçado com fibras

CAR: Concreto de alta resistência

CP: Corpo de prova

CRF: Concreto reforçado com fibras

CUADRF: Concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras

Kgf: Quilograma-força

fc: Resistência à compressão axial

IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto

l/d: Fator de forma comprimento/diâmetro da fibra

l: Comprimento da fibra

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	15
2.0 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
2.2 CONSTITUIÇÃO E MATERIAIS DO CADRF	17
2.2.1 Cimento	18
2.2.2 Agregados graúdos	18
2.2.3 Agregado miúdo.....	20
2.2.4 Sílica ativa	20
2.2.5 Fibras de aço	22
2.2.5.1 Interação Fibra-Matriz	22
2.2.5.2 O efeito da geometria das fibras de aço no concreto	23
2.2.5.3 O efeito do teor de fibras no concreto	26
2.2.6 Superplastificantes	28
2.2.7 Água de amassamento	28
2.3 DOSAGEM DO CADRF	29
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CADRF	31
2.4.1 Resistência à compressão	31
2.4.2 Resistência à tração	32
2.5 RESISTÊNCIA AO FOGO	34
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	36
3.1.1 Cimento	37
3.1.2 Agregado graúdo	37
3.1.3 Agregado miúdo.....	38
3.1.4 Sílica Ativa	38
3.1.5 Superplastificante	38

3.1.6 Fibras de aço	38
3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	39
3.3 PRODUÇÃO E PREPAROS DOS CORPOS DE PROVAS	41
3.4 REGIME DE AQUECIMENTO	43
3.5 ENSAIOS REALIZADOS	46
3.5.1 Resistência à compressão simples	46
3.5.2 Resistência à tração na compressão diametral	46
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 CONCRETO FRESCO.....	48
4.2 COMPRESSÃO SIMPLES	49
4.3 TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL	51
5.0 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE	62
ANEXOS	65
ANEXO 1: CPV ARI MAX – ESPECIFICAÇÕES	65
ANEXO 2: ESPECIFICAÇÃO AGREGADO GRAÚDO.....	66
ANEXO 3: ESPECIFICAÇÃO AGREGADO MIÚDO	67

1.0 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na Construção Civil em todos os continentes. Pela sua praticidade, custo e principalmente sua elevada resistência à compressão, o material se tornou um dos pilares da Engenharia Civil. O concreto evoluiu com o tempo, e a partir da década de 60, concretos de alto desempenho começaram a aparecer no cenário internacional. Apesar de todo crescimento tecnológico, ao se tratar de esforços de tração e capacidade de deformação, os concretos convencionais não desempenham tais propriedades tão bem quanto materiais alternativos como o aço e a madeira. Mas, ao se combinar o concreto com o aço, forma-se o concreto armado que supre bem as necessidades estruturais de tração.

A princípio para buscar um comportamento mais dúctil e um material mais tenaz, fibras passaram a ser incorporadas ao concreto. Prática é registrada, inclusive, nas Escrituras Sagradas quando se misturava palha à argila nas construções. Com o passar do tempo, o concreto reforçado com fibras (CRF) passou a ter seu espaço na Construção Civil. Sua aplicação depende basicamente do tamanho, teor, forma e tipo (vidro, polipropileno, aço, etc.) de fibra utilizado. Figueiredo (2011) aponta que no Brasil as obras onde o CRF é utilizado são associadas a aplicações de grande demanda social, como por exemplo obras de infraestrutura, como saneamento e transporte. Além disso, apenas 3% da utilização do concreto com fibras de aço é voltada para o mercado de pré-fabricados. Enquanto isso, na Europa, Estados Unidos e Ásia, já se utiliza e pesquisa desde os anos 2000 a incorporação de fibras de aço em matrizes de concreto de alto desempenho (CAD).

O resultado dessa combinação é um composto com características interessantíssimas, o concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço (CADRF). Ele alia as nobres propriedades mecânicas do CAD com a alta capacidade de deformação e absorção de energia do CRF. Walraven (2009) comenta a aplicação do CADRF em reparos de pontes na Holanda devido à problemas de fadiga por causa do aumento do tráfego não previsto. Cita ainda a ponte de Kassel na Alemanha, aberta ao público em 2007, onde este tipo de concreto foi utilizado. Mais recentemente, Lachance et al. (2016) publicou sobre o sucesso do desenvolvimento de tabuleiro de pontes pré-fabricados utilizando o material.

Apesar de lançado o manual de Prática Recomendada IBRACON/ABECE: Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras em 2016, Figueiredo (2014), alertava que a falta de maturidade técnica brasileira aliada a falta de controle de qualidade dos laboratórios

nacionais para o CRF, acarretam negativamente para o Brasil estar atrasado em relação aos outros países.

Com a utilização do CADRF para fins estruturais, estudar o comportamento deste tipo de material para situações de aquecimento e resfriamento é de extrema importância. Lau e Anson (2006) e Caverzan et. al (2015) já mostraram experimentalmente melhorias nas propriedades residuais do CADRF comparando-se com o mesmo concreto sem adição de fibras.

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre três traços de concreto de alto desempenho (CAD). Dois deles, reforçados com fibras de aço carbono ($l=35$ mm; $l/d=65$) em diferentes teores em relação ao volume de concreto (0,5 e 0,75%). As propriedades residuais observadas no estudo foram: resistência à compressão e resistência à tração na compressão diametral. Ambos ensaios foram realizados em temperatura ambiente e com regimes de aquecimento (400 e 600 °C), com subsequente resfriamento (abrupto e lento). Os resultados foram coletados e serão discutidos no trabalho.

1.1 Justificativa e Motivação

A grande motivação para elaboração deste trabalho é a possibilidade de contribuir de alguma forma para um tema que se encontra na fronteira do conhecimento. Avaliação do comportamento mecânico de concretos de elevada resistência após aquecidos existe na literatura, entretanto esses resultados são muitas vezes contraditórios. Além disso, situações alterando-se o tipo de resfriamento são escassas.

Outro fator que motiva a realização da pesquisa é a escassez de referências nacionais. Praticamente todos os artigos usados durante o trabalho têm origem internacional. O Brasil se encontra atrasado em relação a este tipo de material não só nas aplicações, mas também em pesquisas.

Sendo assim, espera-se que este documento sirva, ao menos, para motivar outros alunos e pesquisadores, a estudarem e experimentarem mais sobre o tema.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é analisar as propriedades residuais, por meio de experimentos, de três traços de CAD, sendo dois deles com fibras de aço carbono e o terceiro sem fibra. Como objetivos específicos podemos citar:

- Obter uma curva de resistência à compressão axial de um CADRF em diferentes idades;
- Verificar a influência da adição de fibras no concreto em estado fresco;
- Observar como o teor de fibra adicionado interfere nas propriedades mecânicas do concreto endurecido;
- Analisar como o tipo de resfriamento influencia na perda de resistência do concreto ensaiado;
- Avaliar o grau da deterioração do concreto estudado após aquecimento.

2.0 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Em muitos artigos, jornais, teses e revistas os autores denominam compostos de semelhantes características como concretos de alto desempenho reforçado com fibras (CADRF). Tendo em vista a velocidade que as inovações surgem na construção civil, o conceito deste tipo de concreto se confunde com o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF), que nada mais é que uma evolução do primeiro, concreto reforçado com fibras (CRF) e o de alta resistência (CAR), o que é plausível.

Aïtcin, (1999) sugere que ao se adicionar qualquer tipo de fibra (plástico, aço, vidro, etc.) à uma matriz de concreto de alto desempenho, o novo composto pode ser denominado de CADRF. Mesmo que as fibras adicionadas não contribuam significativamente com a resistência mecânica do material. O autor ainda menciona que usualmente a adição de fibras não aumenta a resistência à compressão do CAD, contudo o torna mais dúctil. Por último, reconhece que para adições em 1,5% em volume de concreto, ganhos de carga são observados.

Contudo, Li (2011) e os autores Mehtha e Monteiro (2005) classificam o CRF de acordo com o volume de fibras de aço adicionado por volume de concreto, sem comentar a resistência à compressão da matriz. Basicamente divide a função da fibra na matriz em três opções: controle de fissuração por retração para adições <1%, melhoramento de propriedades mecânicas, incluindo módulo de ruptura, rigidez e tenacidade (adições entre 1 e 2%) e, por último, aumento da resistência do concreto e maior deformação pós carga crítica para adições de fibras maiores que 2%. Este último caso sendo chamado de CADRF. Para concretos com baixíssimas relações água/cimento (a/c) (<0,2) e volumes ainda maiores de fibras de aço, o segundo autor denomina-nos de CUADRF, enquanto o primeiro segue com a nomenclatura de CADRF.

Alunos, pesquisadores, cientistas, professores não raramente não seguem esses padrões citados acima. Yoo et al (2016) conduziu um estudo sobre o melhoramento do comportamento do concreto na flexão utilizando fibras de aço 13 até 19mm (2% em volume) e denominou o concreto de CUADRF. Já Lau e Anson (2006), em um dos poucos artigos sobre o efeito da temperatura em concretos de alto desempenho com fibras de aço, usa 1% de volume de adição em traços que variam de 45MPa até 110 MPa e os nomeia como CADRF.

Na opinião do autor, quando um concreto possui uma matriz de alto desempenho e à ela são adicionadas fibras independentemente da fração de volume, e, essas fibras contribuem de alguma forma nas propriedades do mesmo, denomina-se o compósito de CADRF.

2.2 Constituição e materiais do CADRF

O CADRF não diferentemente do concreto convencional, é estruturado em três fases distintas, que na realidade interagem entre si: pasta de cimento, agregado e zona de transição.

Em relação à pasta de cimento, cabe ressaltar a importância de produzir um compósito de baixa porosidade, mais compacto, a fim de aumentar a sua resistência. Para isso, resumidamente, basta reduzir a água e o ar aprisionado no composto. Além disso, a resistência da pasta depende do grau de maturidade da pasta, ou seja, a hidratação do composto do cimento no tempo, que depende da idade e da temperatura ambiente. Adições minerais, como a sílica ativa potencializam ainda mais o desempenho da pasta, assunto que será discutido melhor neste trabalho. (TUTIKIAN, 2011).

Para a zona de transição, chama-se atenção que esta fase é mais frágil em matrizes fortes, como as do CAD. Desta forma, o cuidado deve ser redobrado tendo em vista que a interação das fibras com a matriz pode fazer com que esta fase fique mais porosa diminuindo assim a resistência mecânica. (TUTIKIAN, 2011; BENTUR; MINDESS, 2007).

A última fase, agregados, torna-se mais importante ao se garantir a qualidade das duas primeiras fases pois o elo fraco da mistura pode tornar a ser os agregados. Portanto, selecionar os agregados com melhores qualidades mecânicas e características de petrografia é imprescindível para a dosagem do CADRF (TUTIKIAN, 2011; AİTCIN, 1999).

Logo, por se tratar de um concreto sensível quanto as qualidades e procedências de seus constituintes, a escolha do material presente em todas as fases deve ser feita de forma minuciosa dentro das possibilidades.

2.2.1 Cimento

Cimento Portland é o material obtido pela queima da mistura formada por calcário, argila e outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Nenhum material, além de gipsita, água e agentes de moagem devem ser integrados após a queima (NEVILLE, 2013). As propriedades do cimento têm contribuição direta com a resistência do mesmo, destacando módulo de finura e composição química.

Yazic et al (2007), no seu estudo sobre a influência da fração de volume e fator de forma das fibras de aço no concreto, utiliza um cimento com peso específico de 3,13 e superfície específica de 3670 cm²/g e obtém resistências acima de 50,0 MPa variando a quantidade de fibras em volumes de 0,5 a 1,5% de volume no concreto. Al-Osta et al (2017) usa o *Portland Cement Type I* (3800 cm²/g) para dosagem de CUADRF (128,0 MPa na compressão axial) no estudo do uso desse compósito para melhorar o comportamento mecânico de vigas em concreto armado.

Cimentos como o CPV-ARI (Alta resistência inicial) possuem superfície específica ainda maior, chegando até 4500 cm²/g. Aïtcin (1999) comenta que quanto maior a superfície específica, em contato com a água, o cimento é hidratado mais rapidamente. Obtendo-se assim resistência à compressão mais elevada inclusive nas primeiras idades. Contudo, grãos mais finos também faz com que o cimento produza mais etringita, sendo ruim para o concreto, nas primeiras fases por causa da alta reatividade.

Se tratando da composição química do material, Li (2011) comenta que para um cimento prover uma maior resistência inicial, este deve possuir um maior teor de C₃S, como o cimento utilizado no estudo de Al-Osta et al (2017) assim como o CP tipo III (ASTM) que possui 60% da substância, utilizado quando deseja-se obter elevadas resistências iniciais.

2.2.2 Agregados graúdos

Mendes (2002) diz que por poderem ocupar cerca de 60 a 70% do volume do concreto, os agregados graúdos exercem, logicamente, bastante influência nas propriedades do concreto.

Diversas peculiaridades dos agregados influenciam o concreto de diferentes formas. Aspectos como densidade, granulometria e textura interferem nas propriedades do concreto fresco. Além disso, a composição mineralógica do material altera características intrínsecas do

mesmo como: resistência ao esmagamento, dureza, módulo de elasticidade, que, culminam por interferir em propriedades do concreto endurecido (METHA; MONTERIO, 2006).

Com relação ao ganho de resistência pela granulometria, (AÏTCIN, 2000 apud AÏTCIN, 1988) recomenda o uso de grãos menores para matrizes de alta resistência pois, o autor recorda que aumentando o tamanho dos grãos temos uma zona de transição maior e mais heterogênea além de que para a maioria das rochas, quanto menor a partícula, maior sua resistência. Utilizar grãos entre 10 e 12mm é opção mais segura. Isso porque ao diminui-se o tamanho dos grãos, reduz-se as chances de encontrar defeitos internos do mesmo como, grandes poros, microfissuras além da presença de outros minerais.

Com a adição de fibras na matriz, a dimensão máxima do agregado recebe mais uma recomendação. Figueiredo (2011) indica que é necessária uma compatibilidade entre o tamanho da fibra e o diâmetro máximo do agregado graúdo. A fibra deve ser, cerca de, no mínimo, duas vezes maior que o agregado graúdo.

A tendência para concretos ainda mais resistentes é a não utilização de agregados graúdos, ou agregados com diâmetro máximo de 8 mm, como descrito no estudo do comportamento de concretos de alta resistência com fibras de aço na flexão, elaborado por Lappa (2007).

Fallah (2016) em seu estudo sobre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos com resistência à compressão superior à 50 MPa reforçados com fibras de polipropileno e plástico (12mm e 39mm, respectivamente) utilizou agregados de 12,5mm. Comparando os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova, a relação do tamanho das fibras com o diâmetro máximo do agregado graúdo não interferiu significativamente nos resultados, visto que as fibras não eram de aço.

Song e Hwang (2004) mesmo utilizando fibras de comprimento (35mm) não duas vezes maior que o diâmetro do agregado graúdo (19mm), obtiveram um concreto com quase 100 MPa de resistência à compressão, ao estudar propriedades como comportamento na flexão do CADRF.

2.2.3 Agregado miúdo

Para Aïtcin (1999), a escolha do agregado miúdo é uma tarefa muito difícil visto a grande variedade nas características do material e a usual pouca diversidade do material nas regiões. Contudo, aconselha a escolha de um agregado com módulo de finura entre 2,7 e 3 pois, um concreto de alto desempenho já é rico em materiais de partículas finas (adições minerais) e, com isso, não é necessária uma finura elevada para trabalhabilidade ou segregação do compósito. Ainda sobre o assunto, o autor comenta que ao utilizar esse tipo de areia, resulta em uma redução de água, favorecendo assim a resistência da pasta e consequentemente, do concreto.

Em estudos experimentais recentes, não se comenta especificamente, além da quantidade, sobre composição petrográfica e formato do agregado miúdo utilizado, a não ser que o estudo seja aprofundado no assunto.

Concluindo, Mendes (2002) recomenda que o agregado seja proveniente de rio, com quantidade mínima de finos, limpo, e livre de impurezas orgânicas, argila e silte.

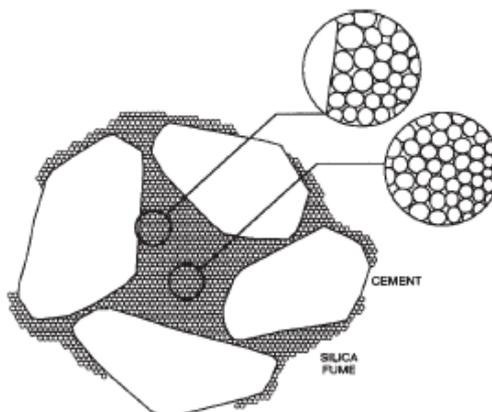
2.2.4 Sílica ativa

A sílica ativa é o resíduo da produção de silício ou ligas de ferrosilício a partir de quartzo e carvão mineral em fornos de arco submerso. A redução do quartzo para o silício em temperaturas de até 2000°C produzem SiO_2 em forma gasosa, que, em baixas temperaturas, condensa formando partículas esféricas muito pequenas de sílica não-cristalina. Finalmente o material é coletado por filtração dos gases em bolsas-filtro (LI, 2011; NEVILLE; BROOKS 2013). O material é um tipo de adição mineral que confere melhorias ao concreto tanto em aspectos físicos quanto químicos.

Se tratando do seu aspecto físico, (LI, 2011) chama atenção para a grande superfície específica da sílica, que gira em torno de 20 m²/g, bem maior que a do cimento Portland comum, 0,35 m²/g a 0,6 m²/g. Por ser um material bastante fino, a NBR 13956 comenta que essa propriedade do material melhora aspectos reológicos no estado fresco do concreto, tornando-o um material mais homogêneo, compacto, contribuindo para a retenção de água, redução da exsudação e segregação.

A norma brasileira também explica as melhorias devido às peculiaridades químicas da sílica. Ao reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) originado da hidratação do cimento, a sílica forma mais C-S-H (silicato de cálcio hidratado), produto que promove melhorias mecânicas e na durabilidade do concreto.

Figura 1 - Sílica ativa atuando no preenchimento de vazios da mistura.



Fonte: AITCIN, 1999

Por promover melhorias significativas nas propriedades mecânicas do concreto, Li (2011) assim como os autores Mehta e Monteiro (2005) concordam que atualmente a utilização da sílica na produção de matrizes de CAD, e conseqüentemente CADRF, é praticamente obrigatória. Porém, Mendes (2002) alerta a necessidade da utilização de superplastificantes com o intuito de suprir a demasiada finura da sílica que, apesar de auxiliar no empacotamento do concreto, cria a necessidade de mais água para manter as mesmas propriedades reológicas de uma pasta de cimento sem sílica ativa.

Quanto ao teor de sílica a ser incorporado, Li (2011) apenas aponta que a dosagem normal é entre 5 e 10% em massa do cimento. Já Aïtcin (1999) explica que o ideal seria uma adição de 25 a 30%, mas tal quantidade requer bastante aditivo superplastificante.

Em estudos recentes, Yoo et al (2016) mostra a influência de longas fibras de aço no melhoramento da performance à flexão em CUAD. Em todos os traços utilizados em seu experimento, a adição mineral da sílica é indispensável. O autor adota uma adição de sílica de 25% em relação ao cimento.

Arel (2016) estudou os efeitos da adição sílica, tipo de cura e comprimento da fibra em concretos com nobres características mecânicas adicionados com fibras de aço. Apesar de ter

usado sílicas com três módulos de finuras diferentes, o pesquisador manteve uma adição de 25% constante em todos os traços. Em todas situações, conseguiu concretos com resistência à compressão superior a 120,0 MPa. Concluiu que o melhor traço foi aquele utilizado com a sílica com finura de 27,6 m²/g.

2.2.5 Fibras de aço

Como discutido anteriormente, o CADRF é considerado uma evolução do CRF por apresentar uma matriz de cimento de alto desempenho. Figueiredo, (2011) considera o concreto reforçado com fibras de aço um compósito onde as fibras têm papel fundamental no controle de propagação das tensões no concreto. São elementos descontínuos com comprimento bem maior que sua seção transversal e são adicionadas uniformemente no concreto.

De acordo com o American Concrete Institute (ACI), Committee 544 (Fiber Reinforced Concrete), o concreto reforçado com fibras pode ser classificado em quatro categorias de acordo com o tipo da fibra: concreto reforçado com fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais.

Nesta seção serão discutidas não só como algumas características geométricas das fibras de aço, como comprimento e fator de forma, afetam o comportamento mecânico do CADRF, mas também como funciona a interação da fibra com a matriz de alto desempenho e como o teor de fibras adicionado pode influenciar no concreto no estado fresco e endurecido.

2.2.5.1 Interação Fibra-Matriz

Como o CAD se trata de uma matriz forte, o reforço do concreto deve ser executado com fibras que atendam as solicitações da pasta para que esta interaja bem com as fibras. Caso as fibras tenham uma ligação fraca com a matriz, elas vão escorregar com carregamentos pequenos e não vão combater as fissuras. Por outro lado, quando a ligação fibra-matriz é bastante intensa, ao carregar a peça, a tensão pode superar a capacidade de carga última da fibra e, conseqüentemente, causar o rompimento da mesma. Logo, a fibra parte-se antes de dissipar a energia da carga. Em relação às fibras de aço, monofibriladas, a superfície inteira das mesmas pode ficar em contato direto com a matriz, melhorando assim, a interação mecânica. (BENTUR; MINDESS, 2007; AİTCIN 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2005)

Naaman (2000) elenca algumas características que as fibras devem possuir para apresentar uma capacidade de reforço:

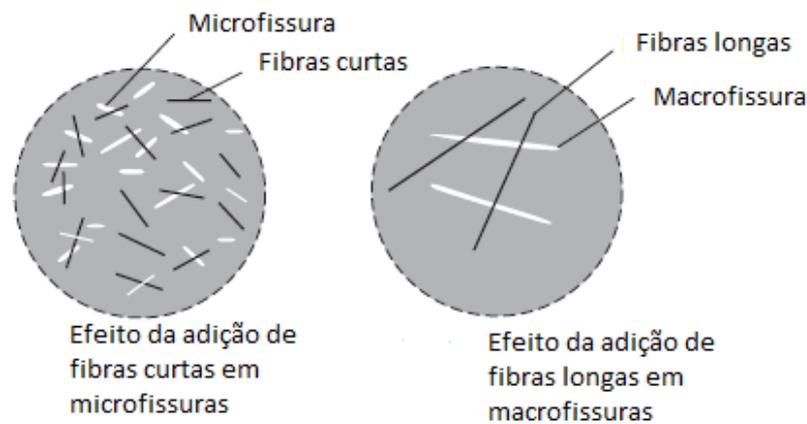
- Resistência à tração superior à da matriz (duas a três ordens de magnitude);
- Módulo de elasticidade, no mínimo, três vezes maior que a matriz;
- Energia de ligação semelhante ou maior que a resistência à tração da matriz;
- Coeficiente de Poisson da fibra deve ser semelhante ao da matriz;
- Expansão térmica da fibra deve ser equivalente à matriz.

Aïtcin (1999), comenta a dificuldade que se tinha de encontrar a fibra de aço ideal para o uma matriz de alta performance, visto que as fibras eram fabricadas para concretos usuais com relação a/c superior a 0,4. Sendo assim, as fibras não trabalhavam da melhor forma na matriz. Mas, com a otimização do fator de forma e comprimento da fibra, novas possibilidades de mistura surgiram.

2.2.5.2 O efeito da geometria das fibras de aço no concreto

Um das características físicas mais importantes das fibras de aço adicionadas ao concreto é seu comprimento (l , geralmente expresso em milímetros). Mehta e Monteiro (2005) enfatizam como o comprimento da fibra altera o comportamento mecânico do compósito. Para combater a grande quantidade de microfissuras no compósito sob ação de carga e evitar grandes tensões localizadas, é recomendada a utilização de fibras pequenas em grandes quantidades de volume (figura 2). A distribuição uniforme de fibras pequenas faz com que o compósito tenha uma maior ductilidade e homogeneidade. Por outro lado, fibras longas são necessárias para combater fissuras maiores com cargas elevadas; contudo, a fração de volume em geral é menor por efeitos de trabalhabilidade de concreto. Isso ocorre pelo fato de que o comprimento embutido da fibra na matriz é maior, dificultando assim, seu deslizamento.

Figura 2 - Atuação de fibras de diferentes comprimentos em fissuras.

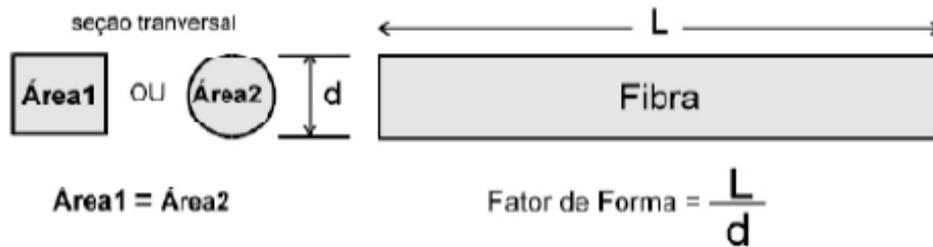


Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2005

Yoo et al (2016) em seu estudo de melhoramento do desempenho à flexão de CUADRF, testou três comprimentos diferentes de fibras longas: 13, 16,3 e 19,5mm. Todas de mesmo diâmetro, densidade e módulo de elasticidade. Na compressão, o concreto se comportou praticamente constante. Contudo, ganhos significativos na tração na flexão ou tenacidade foram observados após a fase elástica. Ratificando o que Figueiredo (2011b) comenta quando chegou à conclusão que quanto maior o comprimento da fibra, maior é seu embutimento e, conseqüentemente, maior a capacidade resistente.

Cunha et al (2011) pesquisou o comportamento de um CRF auto adensável obteve resultados semelhantes. O autor constatou um acréscimo aproximadamente linear entre o comprimento da fibra (10, 20 e 30mm) e a tensão máxima do ensaio no regime pós fissuração. Outra propriedade importante das fibras é o fator de forma, ou relação de aspecto (l/d). Esse fator surgiu como uma forma de organizar fibras por meio da sua geometria, não apenas usando seu comprimento como referência.

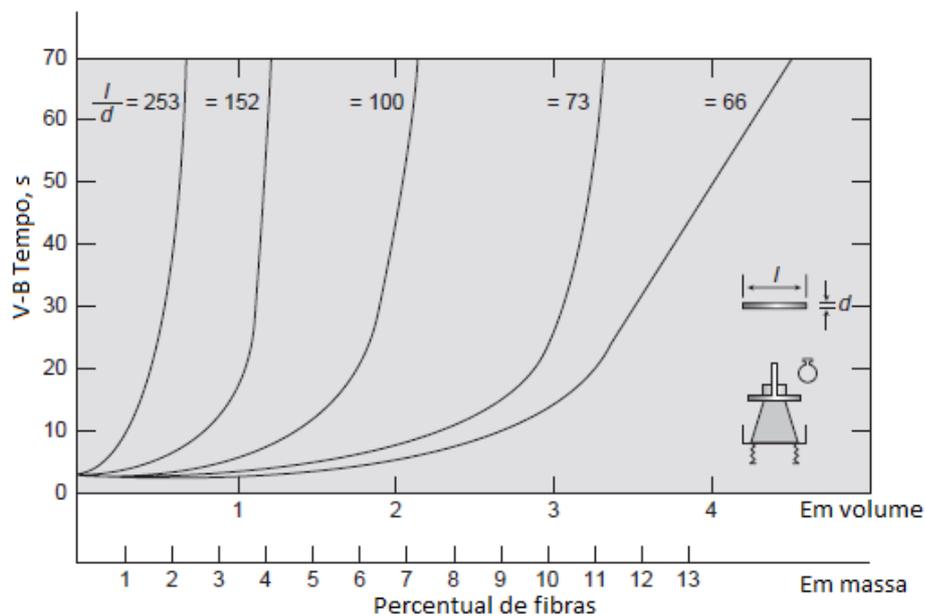
Figura 3 - Fator de forma ou relação de aspecto das fibras.



Fonte: GOIS, 2010

Mehta e Monteiro (2005) explicam que apesar de querer-se o aumento do fator de forma, conseqüentemente fibras com comprimento maior, para obter um composto mais resistente, tem-se uma menor trabalhabilidade do concreto. Logo, o autor recomenda uma limitação de 2% de fibra em relação ao volume de concreto e com uma relação de aspecto limite de no máximo 100 para evitar a formação de novelos, emaranhado de fibras, como é chamado no Brasil. Para contornar a situação da trabalhabilidade, recomenda-se alterar fatores como: tamanho do agregado graúdo, quantidade plastificantes e teor de argamassa. A figura 4 abaixo mostra como o teor e o fator de forma alteram a trabalhabilidade do concreto.

Figura 4 - Influência do teor de fibras na trabalhabilidade do concreto.



Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 2005

Ainda sobre os recentes estudos de Yoo et al (2016) e Arel, (2016), ambos autores obtiveram melhores resultados em aspectos mecânicos não só com fibras maiores, mas também com superiores fatores de forma. O primeiro pesquisador analisou fibras de aço com fator de forma de 65, 81,5 e 97,5. Chegou à conclusão que as fibras com 97,5 de relação desempenharam melhor à tração na flexão. Já o segundo, comparou fibras de aço com 45, 65 e 80 de relação de aspecto, e obteve resultados semelhantes quando incorporou tais fibras em uma matriz de alto desempenho.

2.2.5.3 O efeito do teor de fibras no concreto

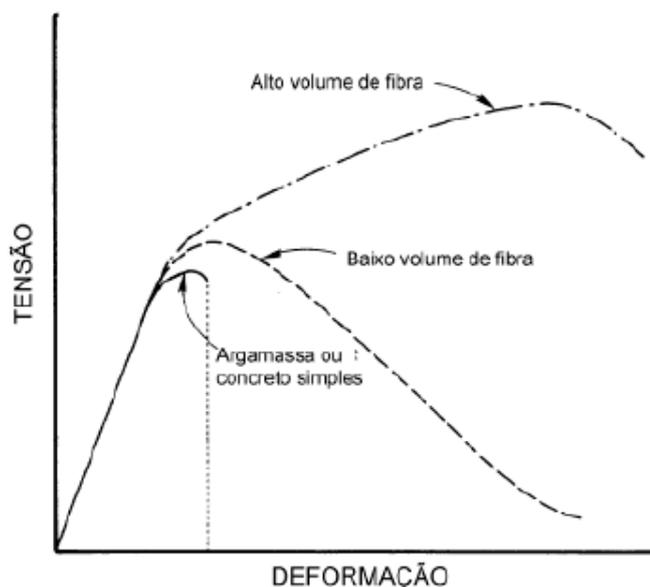
Além do comprimento e fator de forma, outra propriedade que influencia no material cimentício reforçado com fibras de aço é o percentual volumétrico incorporado na mistura. Li (2011) define como sendo a relação entre o volume de fibras adicionados e o volume total da mistura.

Ao serem incorporadas em pequenas quantidades de volume, as fibras basicamente contribuem para a capacidade de absorção de energia do elemento e combate à retração na secagem da mistura. Para pequenas adições, as aplicações se restringem a lajes e pavimentos que estão sujeitos à grande exposição da superfície. Aumentando-se a dosagem, algumas propriedades são majoradas no concreto como, por exemplo, a capacidade de deformação, resistência ao cisalhamento e absorção de energia. (METHA; MONTEIRO, 2005; LI, 2011).

A grande mudança no comportamento do compósito quando se usa um elevado teor de fibras é a capacidade de aumento de carga mesmo após a primeira fissura. Fenômeno chamado de *strain-hardening*. No Brasil, Salvador (2013) e Figueiredo (2011) chamam de capacidade portante pós-fissuração.

Após a primeira carga de fissuração, as fibras começam a absorver, em parte, as tensões internas. Desta forma, o compósito consegue deformar mesmo após sua primeira ruptura. A capacidade de aumento na resistência de carga, principalmente na flexão, após a fissuração depende do teor de fibras adicionado, como mostrado na figura 5.

Figura 5 - Comportamento mecânico do concreto de acordo com o teor de fibras adicionado



Fonte: BENTUR e MINDESS, 2007

Analisando os resultados dos experimentos de Bayramov et al (2003) e Yazic et al (2007), comparando-se traços de concreto reforçado com diferentes fibras de aço em diferentes teores de volume, nota-se que todas as propriedades mecânicas finais das peças ensaiadas aumentam com o teor de fibras. O primeiro obteve resultados com concretos com resistências maiores que 50 MPa e o segundo trabalhou com concretos com resistências menores. Porém, o comportamento do material independente da resistência da matriz, se mostrou semelhante em relação ao teor de fibras de aço adicionado.

Já Alkasy e El-Tawil, (2016), verificam o teor de fibras de aço em CUADRF. Os resultados foram ainda mais significativos. Ganhos finais de resistência à compressão de até 15% foram observados ao se comparar teores de fibras entre 0,5 e 1,5% em relação ao volume de concreto. Segundo o mesmo autor, pesquisas sobre propriedades mecânicas, como resistência a compressão e tração, são escassas para CADRF com teores de uma mesma fibra em volume inferior à 1%.

2.2.6 Superplastificantes

Os superplastificantes são redutores de água, definidos pela NBR 11678 como aditivos químicos que, sem alterar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, permite uma elevadíssima redução do relação a/c de um concreto; ou que, mantendo o mesmo volume de água, aumenta demasiadamente o abatimento e a fluidez do concreto; ou, ainda, aditivo que produz os dois efeitos simultaneamente.

Os ganhos gerados pela redução da relação a/c para o CADRF são notáveis. Pois, reduzindo-se o a/c, Collepardi et al (1999) cita que o concreto tem ganhos expressivos na resistência, durabilidade e na redução da sua porosidade.

Aitcin (1999) inclusive comenta da importância dos superplastificantes para a definição de uma matriz de concreto de alto desempenho. Segundo o autor, tal definição é bastante vaga. Pois, os termos ‘alto’ e ‘desempenho’ são relativos. Sendo assim, define uma relação a/c de 0,4 como fronteira entre os concretos considerados normais e de alto desempenho. Pois, para valores abaixo da fronteira, é praticamente impossível a produção de concretos trabalháveis ou moldáveis, com cimento Portland comum, sem a adição de superplastificantes.

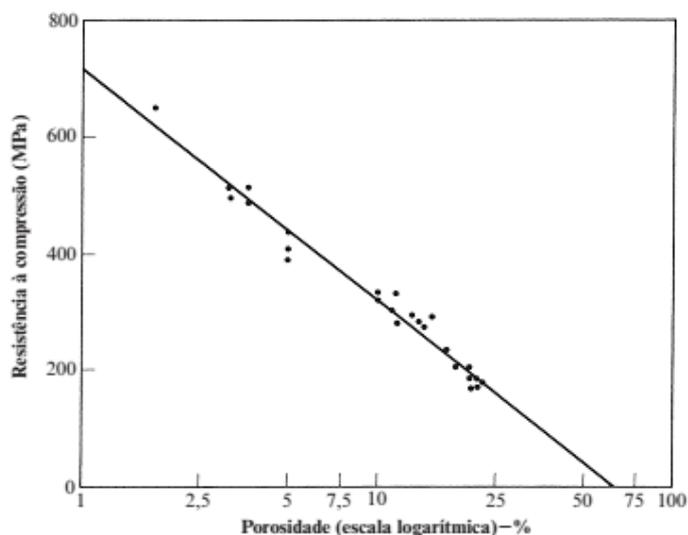
Em estudos recentes como os de Stäli et al (2008), Söylev e Özturan (2014) e Xu, et al (2016), entre outros, a utilização de superplastificantes para atingir resistências e trabalhabilidades desejadas é indispensável. As dosagens variando entre 1 a 3% em relação à massa de cimento são comuns na produção de CADRF.

2.2.7 Água de amassamento

É a água usada, em proporção racional, na preparação do concreto. Possui duas funções básicas: hidratar a mistura e prover trabalhabilidade ao composto. A NBR 15900 descreve os requisitos necessários para que essa água seja utilizável. Avalia parâmetros como pH, matéria orgânica, cloretos, sulfatos, entre outros.

Além de hidratar e influenciar diretamente a trabalhabilidade do concreto, a relação a/c também interfere diretamente em propriedades do concreto endurecido. Neville e Brooks, (2013) afirmam que a relação água/cimento é o principal fator influente na porosidade e, conseqüentemente na resistência do concreto, como pode ser visto na figura 6 abaixo.

Figura 6 - Relação entre resistência à compressão e porosidade do concreto.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2005.

Para confecção de CADRF, claramente, necessita-se de relações a/c baixíssimas para se obter um composto pouco poroso e resistente. Como visto no item anterior, Aïtcin (1999) sugere uma fronteira de 0,4 para relação a/c, que separa os concretos convencionais e os de alto desempenho. Limite que é adotado por Shang (2014) na produção de CAD com relação a/c de 0,3 para um f_c de 60 MPa. Para matrizes ainda mais fortes, caso dos CUADRF, é possível constatar relações a/c entre 0,1 a 0,25 como na nova ponte de Kaag, na Holanda (a/c 0,18 e f_c 180,0 MPa) e nos estudos de Xu et al (2016) (a/c 0,22 e f_c 194,0 MPa).

2.3 Dosagem do CADRF

O fator essencial para obtenção de um concreto de alto desempenho, além da qualidade dos materiais, é sua dosagem racional. Cabe ressaltar que não existe um modelo obrigatório de dosagem a ser seguido, o que existe são modelos que vêm sendo otimizados com o passar do tempo. Com a adição de fibras, discute-se qual a melhor forma destas serem adicionadas ao concreto a fim de não comprometer o processo.

O objetivo da dosagem racional é obter uma proporção de materiais constituintes ótima e econômica, que possa ser utilizada como referência para futuras dosagens.

A dosagem do CADRF, não surpreendentemente, é mais esmerada que a do concreto convencional. Visto que cada etapa desde a seleção dos materiais pode comprometer o produto

final. Os métodos de dosagem convencionais não são aconselhados para a produção do CAD por causa de fatores como:

- Grande variação da relação a/c com a utilização dos superplastificantes;
- Adições de materiais cimentícios que substituem, frequentemente, quantidades significativas de cimento;
- Adições minerais como a sílica ativa que altera propriedades do concreto no estado fresco e endurecido;
- Ajuste do slump, com a utilização de superplastificantes ao invés da água, sem alterar a relação a/c . (AİTICIN, 1999)

Para o concreto de alto desempenho, métodos de dosagem mais complexos são recomendados. Os mais utilizados são: Mehta-Aİtcin (1990), Aİtcin (2000), Nawy (1996) e o método do IBRACON. O primeiro, assim como métodos mais antigos, baseia-se na otimização da peça pelo preenchimento de vazios com cimento ou pasta. Por outro lado, os métodos mais recentes se baseiam no volume absoluto. Após se determinar a quantidade de agregado graúdo, água e cimento, completa-se o metro cúbico com agregado miúdo. Com fundamento científicos, o único método experimental é o método IBRACON. (TUTIKIAN, 2011)

Aİtcin (1999) ainda sugere os métodos de Larrard e do ACI 362 Committee para confecção do CAD. Cada um deles é abordado em sua obra detalhadamente.

As fibras podem ser adicionadas ao concreto de diversos modos. Li (2011) apesar de elencar várias maneiras, explica que o método mais usual é também o mais simples, adicionar as fibras após o concreto se mostrar homogêneo e trabalhável. Em suma, a produção do CADRF é semelhante à do CAD, adicionando-se as fibras após a mistura dos outros materiais.

Apesar de existirem estudos nacionais e internacionais, comparando os diferentes métodos de dosagens propostos ao longo dos anos, autores não convergem para uma conclusão sobre qual método é o mais econômico para obtenção das propriedades desejadas. (TUTIKIAN, 2011)

2.4 Propriedades mecânicas do CADRF

As fibras atuam na transferência de tensões da matriz para a fibra por meio de interações cisalhantes e mecânicas. No momento da ruptura da matriz, o carregamento é combatido tanto pela matriz quanto pelas fibras; após a ruptura, as fibras suportam as tensões de forma total, por meio da ligação entre fissuras, até, finalmente, ser arrancada da matriz. Logo, apesar das fibras de aço influenciarem em fatores gerais da matriz do CADRF como trabalhabilidade, rigidez e retração por secagem, elas são mais eficientes no aumento da resistência à tração na flexão, esforços de cisalhamento, resistência ao impacto e fadiga. Ganhos na resistência à compressão não são tão efetivos. (BENTUR; MINDESS, 2007; LI, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2005)

As propriedades mecânicas do CADRF no estado fresco e endurecido sofrem alterações devido à diferentes fatores. Primeiramente, a qualidade e quantidade dos materiais constituintes do concreto afetam diretamente no resultado final, como visto anteriormente. Além desses fatores, tipo de cura, transporte e parâmetros de ensaio também necessitam atenção especial para não influenciar nos resultados.

Exemplos de melhorias na resistência à tração na flexão são mostrados na pesquisa de Yazic, et al (2007). O autor constatou um incrível aumento entre 8 e 80% comparando-se com um concreto sem adição de fibras. Arel (2016), Jaiswal e Jamkar (2015) relatam ganhos na resistência ao impacto diretamente proporcionais a resistência à compressão do composto.

Ainda sobre comportamento mecânico, o CADRF apresenta melhor resistência à abrasão e erosão que o concreto convencional. Quanto a durabilidade, a adição de fibras pouco afeta tal propriedade visto que a matriz cimentícia, por ser pouco porosa, é que combate ataques externos. (BENTUR; MINDESS, 2007)

Nesta seção, serão contempladas duas propriedades que são objetos de estudo deste documento: resistência à compressão e tração (com ênfase no ensaio por compressão diametral).

2.4.1 Resistência à compressão

Resistência à compressão é definida como a capacidade do material de resistir à tensão de compressão sem fissurar. Porém, o concreto apresenta pequenas fissuras antes de se romper.

Sendo assim, para o concreto, a resistência é relacionada com a tensão de ruptura do material. (MEHTA; MONTEIRO, 2005)

Essa propriedade é considerada na maioria das vezes a propriedade fundamental do concreto. Ela indica, geralmente, a qualidade do composto pois está ligada diretamente com a estrutura da pasta de cimento endurecida. Inclusive, a resistência a compressão serve como parâmetro também para outras propriedades como: peso específico, permeabilidade, durabilidade, resistência à abrasão, resistência ao impacto, resistência à tração, e várias outras, mas não à retração e não necessariamente à fluência. Concluindo, de forma geral, um concreto com boa resistência a compressão, tem propriedades mais desejáveis. (NEVILLE; BROOKS, 2013)

O CADRF possui uma elevada resistência à compressão por se tratar de uma matriz compacta e possuir uma relação a/c baixa. Porém, a adição de fibras geralmente não altera significativamente essa propriedade para as dosagens convencionais.

Góis (2010) em sua dissertação mostra vários estudos que se contradizem em relação à adição de fibras no concreto. Em sua maioria, se tratam de concretos com resistências convencionais. Porém, se tratando de estudos mais recentes, a autora mostra que para adições superiores a 1% em volume, mudanças passam a ser constatadas.

Arel (2016), produziu concreto com mais de 150,0 MPa e, com adição de fibras com comprimentos de no máximo 16 mm. Observou pequenos acréscimos, ganhos de resistência à compressão entre 1,5-2,1%. Alkaysi e El-Tawil (2016) obtiveram ganhos ainda maiores para as resistências pós fissuração. Compararam adição de fibras de aço ($l=19$ mm) entre 0,5 e 1,5% em volume no concreto e constataram um aumento de 157,0 MPa para 183 MPa, ou seja, 15% na capacidade resistiva à compressão.

No Brasil, em um concreto com resistência à compressão de 65,0 MPa, Resende (2003) obteve ganhos de 3,2% comparando com a mesma matriz sem adição de fibras.

2.4.2 Resistência à tração

É a máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado ou puxado antes de falhar ou romper. Seu valor depende de fatores como tipo de amostra, presença de defeitos na superfície, temperatura e material. Em dimensionamentos de peças estruturais, usualmente se considera tal propriedade nula para fins de cálculo e segurança. Então, ao se aumentar a

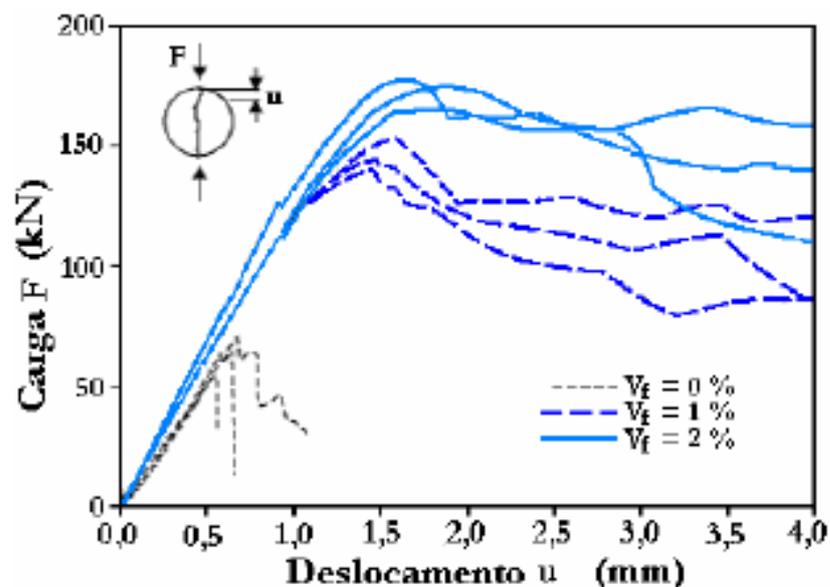
resistência a tração do concreto, pode-se substituir completamente ou parcialmente parte da armadura que seria dimensionada para resistir ao esforço. Lachance et al (2016) conseguiu uma redução de 55% da armação superior de tabuleiros de pontes em lajes utilizando CADRF e CUADRF.

A resistência à tração do CADRF é superior ao concreto convencional, principalmente após a primeira fissuração e com volume de fibras adicionada superior à 2% em volume de concreto. Há vários modos de ensaio para tal propriedade, porém, ensaios convencionais não são apropriados para se determinar a resistência após a fissuração. (ORTIZ, 2013)

Ensaio alternativo mais simples foram idealizados a fim de superar as dificuldades de realização de ensaios mais complexos como o de tração direta. O ensaio de compressão diametral, conhecido como o Ensaio Brasileiro, é um exemplo disso. Mehta e Monteiro (2005) alertam que este ensaio superestima a resistência à tração direta do concreto em 10 a 15%.

O gráfico da figura 7 apresentado por Cucchiara (2004) mostra resultados experimentais de tração na compressão diametral para diferentes volumes de fibras. Nota-se como a incorporação de fibras eleva a resistência do concreto.

Figura 7 - Relação entre carga e deslocamento para diferentes volumes de fibras.



Fonte: CUCCHIARA, 2004

Valores constatados sobre a resistência à tração na compressão diametral são mostrados em estudos recentes. Dentre eles, podem ser citados o de Bayramov et al (2004), Yazic et al (2007), Song e Hwang (2004) e Al-Osta et al (2017). Este último com uma tensão de pico de 17 MPa para um concreto com resistência à compressão de 128 MPa após o vigésimo oitavo dia.

Ainda na figura 7, pode-se perceber a propagação de microfissuras que provavelmente são estáveis sob um carregamento de longe duração. Esse desenvolvimento de microfissuras, juntamente com a fluência, contribui com a capacidade do concreto de redistribuir elevadas tensões localizadas para regiões de menores tensões. Com a adição de fibras de aço, percebe-se um aumento na capacidade de deformação. A área abaixo de toda curva tensão-deformação representa o trabalho necessário para causar ruptura ou a tenacidade à fratura.

2.5 Resistência ao fogo

A ação do fogo representa um dos grandes riscos para as estruturas de concreto pelo fato de deteriorar quimicamente e fisicamente o mesmo. O comportamento do concreto exposto ao fogo depende de diversos fatores, dentre eles: taxa de aquecimento, temperatura máxima, tempo de exposição na temperatura máxima, método de resfriamento e carregamento. Os tipos dos materiais (agregados, adições e aditivos) utilizados no concreto também influenciam no modo que ele reage ao fogo. (LAU; ANSON, 2006).

Por ser tratar de um concreto extremamente denso, o CADRF é significativamente influenciado pela taxa de aquecimento e temperatura máxima atingida. Costa (2002) alerta que lascamentos explosivos podem acontecer em concreto menos permeáveis pois a matriz compacta impede a liberação dos vapores formados durante o processo de aquecimento.

Para combater o fenômeno, o mesmo autor recomenda reduzir a taxa de aquecimento para próximo de 1°C/min a fim de diminuir a possibilidade de lascamento e de degradação imediata do material. Porém, já foi observado o fenômeno em tais condições de taxa de aquecimento nas experiências de Saad et al. (1996) apud Costa (2002). Mais recentemente, Lau e Anson (2006) e Caverzan et al. (2015) não obtiveram lascamento explosivo em seus trabalhos divulgados com CADRF. Vale salientar que o segundo utiliza uma taxa de aquecimento de

50°/hora. Apesar do sucesso do experimento, ambos alertam que o risco de spalling é real se tratando deste concreto bastante denso.

Se tratando de propriedades mecânicas residuais, Aarup (2004) reportou que de uma forma geral, o CAD se comportam melhor ao se comparar com concreto convencional devido ao elevado teor de sílica ativa. Lau e Anson (2006) concluíram que a incorporação de fibras de aço em concretos de alto desempenho acarreta em uma melhora das propriedades residuais do concreto, mas, a partir dos 600°, perdas de resistência são mais significantes, como observado também no experimento de Caverzan et al. (2015).

Por outro lado, Bentur e Mindess (2007) sugerem que fibras de ação não melhoram o comportamento de concretos de alta resistência quando submetidos à elevadas temperaturas, mas, ao combinar com fibras de polipropileno, resultados se mostram significantes.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta do presente trabalho tem objetivo de realizar a comparação das propriedades mecânicas residuais do CADRF com dois tipos diferentes de resfriamento após o aquecimento até 400 e 600 °C. Para isso, foram realizados os ensaios de resistência à compressão e tração na compressão diametral. Ambos ensaios foram escolhidos pela disponibilidade de fôrmas, laboratório e materiais.

O desenvolvimento do trabalho foi realizado em três laboratórios de apoio. Laboratório de Concreto da Supermix, na Muribeca, Jaboatão dos Guararapes-PE, na etapa de dosagem, Galpão de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco na fase de aquecimento dos corpos de prova, e por último, Laboratório de Engenharia da Tecomat para a realização dos ensaios. O programa experimental é dividido em cinco etapas: seleção dos materiais, definição dos traços, produção e preparo dos corpos de provas, regime de aquecimento e realização de ensaios para posterior avaliação das propriedades do concreto em estudo.

3.1 Seleção e caracterização dos materiais

A escolha dos materiais para a produção de uma matriz de alto desempenho deve ser criteriosa. Nesta pesquisa, os materiais foram selecionados pela disponibilidade encontrada. Com exceção do agregado graúdo, que foi lavado com intuito de redução de pó, os materiais foram utilizados da maneira que eles são disponibilizados comercialmente. A figura 8 mostra todos os materiais inclusos na mistura, exceção da água que foi proveniente do próprio sistema de abastecimento do município.

Figura 8 - Materiais da dosagem: cimento, sílica ativa, areia, brita, fibras de aço e aditivo superplastificante



3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland CPV ARI MAX (NBR 5733, 1991) da Cimento Nacional. Este cimento possui uma área específica de $4,658 \text{ cm}^2/\text{g}$ e massa específica de $3,07 \text{ g/cm}^3$. Mais informações sobre ensaios químicos, físicos e mecânicos do respectivo cimento são encontradas em anexo.

3.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi proveniente da Guarany Siderurgia e Mineração S.A. O material foi lavado antes de ser utilizado para redução do pó presente no mesmo. O módulo de finura do material utilizado, 5,47, determinado pela NBR NM 248:2003.

A escolha do diâmetro máximo para produção do CADRF em estudo seguiu a recomendação de Figueiredo (2011). Como as fibras de aço utilizadas possuem 35 mm de comprimento, o diâmetro máximo de 12,5 mm adotado é duas vezes menor.

Mais informações sobre o agregado graúdo como a sua distribuição granulométrica seguindo a norma e outras características físicas se encontram em anexo.

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no experimento foi areia fina natural, também proveniente da Guarany Siderurgia e Mineração S.A coletado na Baía de Jaboatão. O material possui módulo de finura e diâmetro máximo 1,85 e 2,36 mm respectivamente. Apesar de Aïtcin (1999) recomendar um módulo de finura um pouco menor que o adotado para produção de matrizes de alto desempenho, foi utilizado o material disponível.

Informações como teor de material pulverulento e curva granulométrica são encontradas em anexo.

3.1.4 Sílica Ativa

A adição mineral da mistura foi a sílica ativa substituindo o cimento. O material é disponibilizado comercialmente pela Tecnosil. O componente cimentício tem um elevado teor de SiO_2 , superfície específica 20 m^2/g , formato esférico e 2,220 Kg/m^3 de massa específica. Mais informações a respeito das características do material são disponibilizadas pelo fabricante.

3.1.5 Superplastificante

O aditivo químico utilizado na mistura foi o redutor de água, hiperplastificante PC 3605 do grupo Erca. Aditivo à base de policarboxilato capaz de promover significativa redução de água e elevação da resistência inicial. A densidade do material fornecida pelo fabricante é 1,070 g/cm^3 . Mais informações na ficha técnica disponibilizada pelo fabricante.

3.1.6 Fibras de aço

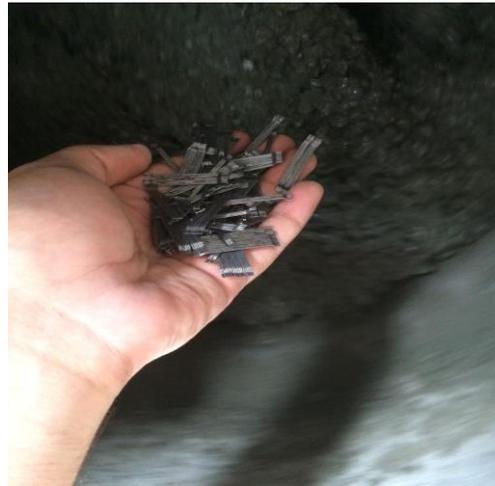
As fibras de aço carbono adicionadas ao concreto foram fornecidas pela ArcelorMittal da especificação Dramix RC 35/65 (figura 9). As especificações da fibra são resumidas na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Especificações fibras Dramix RC 65/36

	Fator de Forma	l (mm)	d (mm)	Fibras/Kg	Dosagem mínima (Kg/m ³)	d (g/cm ³)
RC 65/35	65	35	0,55	14,5	17	7,41

Nota-se uma tendência pela utilização de fibras menores para confecção de CADRF e CAURF. Isto ocorre pelo desejo de se obter um material mais dúctil pois, quanto menor a fibra, consegue-se adicionar uma maior fração de volume ao concreto.

Figura 9 - Fibras de aço Dramix RC 65/35



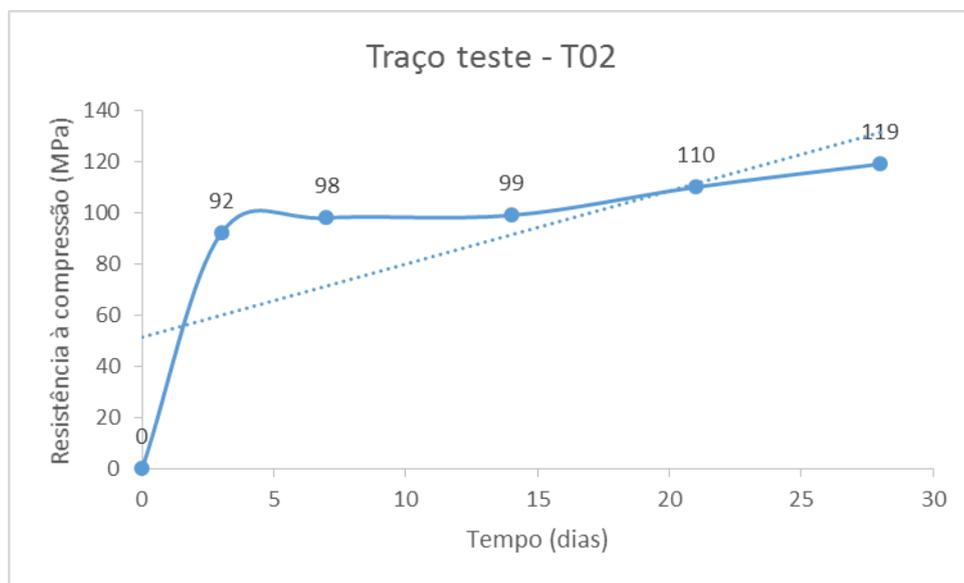
3.2 Definição dos traços

O traço da matriz de concreto utilizado está sendo, atualmente, também material de estudo da mestrandia Hélykan Monteiro na UFPPE. Em sua pesquisa, é estudado o comportamento da mesma matriz com adição de fibras de polipropileno. O traço possui um teor de argamassa de 62,45%. A representação unitária em massa, em função dos materiais cimentícios (cimento e sílica de substituição, 8,7%), encontra-se abaixo:

$$1 : 0,72 : 1,01 : 0,22 : 1,9\%$$

Para análise do traço teste, utilizou-se a dosagem mínima de fibras de aço recomendada pelo fabricante, 0,2% em volume de concreto. Foram confeccionados 10 corpos de prova 10x20 cm para serem ensaiados à compressão simples nas idades 3,7,14,21 e 28 dias. O traço teste teve objetivo de obter uma curva de resistência à compressão do CADRF em diferentes idades (figura 10), atingir o valor de 100,00 MPa após o vigésimo oitavo dia e verificar o comportamento da fibra de aço na mistura. O valor da resistência à compressão no vigésimo primeiro dia foi estimado pois ocorreram problemas durante a retificação dos corpos de prova.

Figura 10 - Resistência à compressão axial do T02 em função da idade.



Após a obtenção da curva e verificação do comportamento das fibras na matriz, foram realizadas três dosagens, T0, T05 e T075. As duas últimas, variando-se o volume de fibras de aço adicionadas em 0,5 e 0,75%, respectivamente. Para calcular o valor em massa das fibras na matriz de concreto basta multiplicar seu volume ocupado pelo seu peso específico, representado na tabela 1. A tabela 2 mostra resumidamente o consumo dos materiais por metro cúbico de concreto para cada traço estudado.

Tabela 2 - Dosagens dos materiais por m³ de concreto

Material	T0	T05	T075
Cimento CPV (kg/m³)	862,5	862,5	862,5
Sílica Ativa (kg/m³)	75	75	75
Água (kg/m³)	206,25	206,25	206,3
Superplastificante (kg/m³)	18,05	18,05	18,05
Areia (kg/m³)	671,88	671,88	671,9
Brita (kg/m³)	945,62	945,62	945,6
Fibras de aço (kg/m³)/(%)	0/0	37,05/0,5	55,78/0,75
Relação a/c (-)	0,22	0,22	0,22

3.3 Produção e Preparos dos corpos de provas

A produção do concreto no experimento foi realizada em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 120 litros e rotação de 28 rpm. Foram realizadas três betonadas. A sequência de adição dos materiais é semelhante ao concreto convencional, sendo as fibras adicionadas por último na mistura.

1. Imprimação de 100% dos agregados graúdo e miúdo
2. Misturar por meio minuto
3. Imprimação de 100% cimento e sílica
4. Misturar durante 1 minuto adicionando 50% da água
5. Adicionar aditivos aos poucos durante 5 minutos (70%, aproximadamente)
6. Pausar mistura quando o concreto se apresentar demasiadamente seco
7. Adicionar água (95%) e aditivo (100%)
8. Continuar a misturar. Após 20 minutos o concreto começa a “abrir”
9. Adição de fibras quando obter consistência plástica
10. Adicionar água restante e misturar até obter consistência desejada.

Em cada betonada foram moldados 20 corpos de prova, destinados aos ensaios de resistência à compressão axial e tração na compressão diametral. Os ensaios foram executados igualmente para os três traços em temperatura ambiente e após diferentes temperaturas de aquecimento e tipos de resfriamento, como mostrado no quadro abaixo.

Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova ensaiados: resistência à compressão e tração na compressão diametral

	Compressão axial					Tração na compressão diametral				
	Temperatura ambiente	400°		600°		Temperatura ambiente	400°		600°	
		Brusco	Lento	Brusco	Lento		Brusco	Lento	Brusco	Lento
N° de CPs	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Os CP's foram moldados de acordo com a NBR 5738/2008, em fôrmas de plástico disponibilizadas que possuem 100x200 mm de dimensão. Após a moldagem, os CP's permaneceram no laboratório por 24 horas, em temperatura ambiente e superfície horizontal rígida. Após o período, foi realizada a desforma, identificação dos CPs e posteriormente imersão no tanque de cura até o momento dos ensaios.

Figura 11 - Espalhamento do concreto



Figura 12 - Moldagem dos CP's

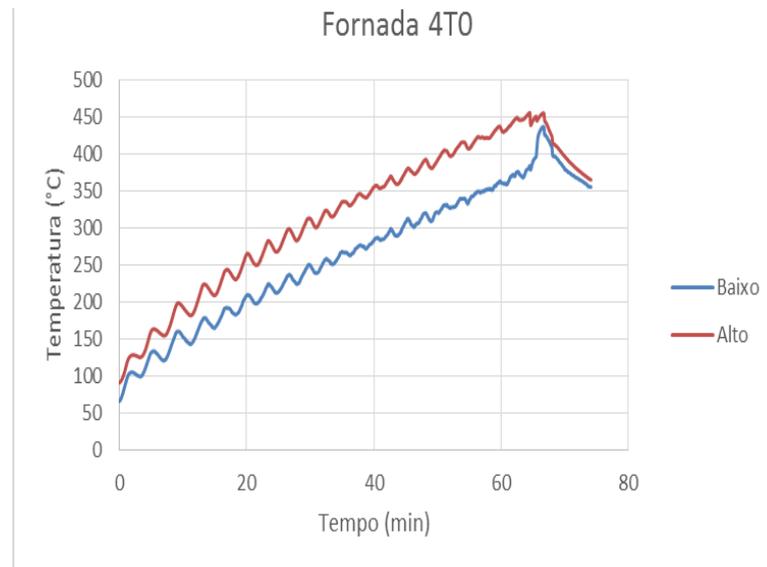


3.4 Regime de aquecimento

Após o vigésimo oitavo dia de cura, os CPs de cada traço foram então transportados para a UFPE onde foi realizado os ensaios de aquecimento. O equipamento utilizado foi o forno mufla *CERAMIC FURNACES KK260 SO 1060 WITH CC 405 CONTROLLER*. A temperatura de cada fornada foi medida com a utilização de termopar tipo K, na altura média dos CPs, conectado ao equipamento de coleta de dados QuantumX, por meio do software HBM Catman 4.5. Na primeira fornada foi adotada uma taxa de aquecimento de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, valor também usado por Lau e Anson (2006) em seus trabalhos experimentais com CADRF ($f_c = 110 \text{ MPa}$). A taxa se mostrou elevada com o concreto estudado acarretando no fenômeno de lascamento explosivo, spalling (figura 13).

Figura 13 - Evidência do fenômeno de spalling a uma taxa de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Figura 14 - Gráfico da temperatura em função do tempo da fornada 4T0



Sendo assim, se adotou uma taxa ainda mais baixa de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Valor próximo ao utilizado no experimento de Caverzan et al (2015) ($0,83^{\circ}\text{C}/\text{min}$). O critério de parada estabelecido foi o momento que a temperatura máxima fosse atingida, pois, para uma taxa tão pequena, o núcleo do concreto aquece juntamente com sua superfície.

Com a nova taxa, duas programações foram escolhidas. Partindo-se da temperatura ambiente do forno até as temperaturas máximas de 400° e 600° a uma taxa de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. O forno desempenhou bem a programação proposta com oscilações máximas de temperatura de 20°C . Após aquecimento, metade dos corpos de prova de cada fornada eram deixados para resfriar lentamente e a outra metade resfriada bruscamente em recipiente com água, similar ao experimento de Fernandes e Silva (2014) (influência dos tipos de resfriamento em concretos convencionais). Vinte e quatro horas depois, os CPs foram transportados para serem devidamente retificados e ensaiados.

Figura 15 - Regime de aquecimento até 400°

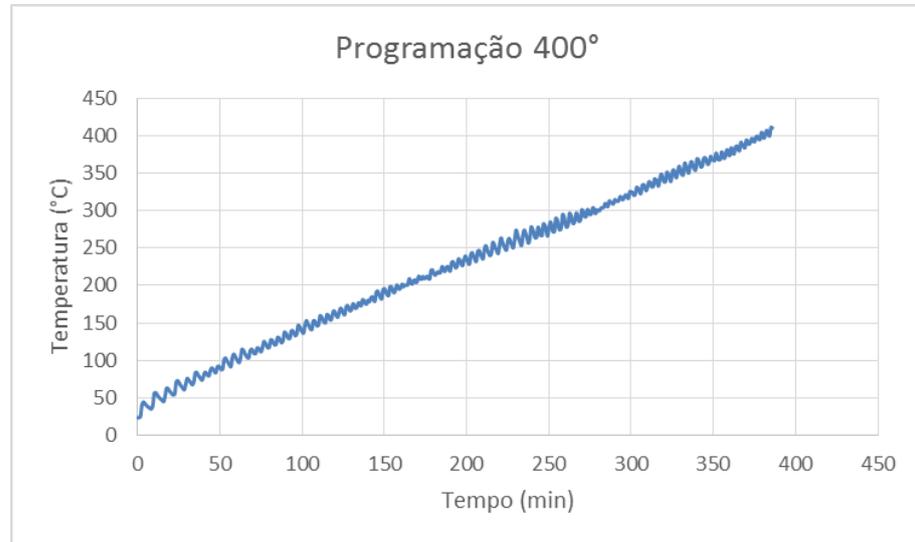
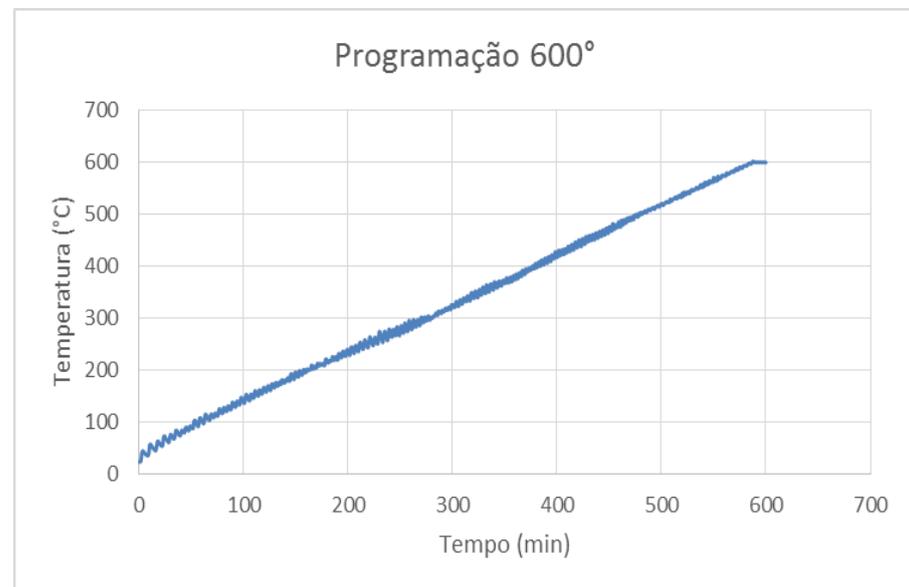


Figura 16 - Regime de aquecimento até 600°



3.5 Ensaio realizados

Os ensaios foram realizados na empresa Tecomat com equipamentos calibrados e técnicos especializados. Os CPs foram transportados com cuidado, evitando choques que pudessem interferir, de alguma forma, nos resultados.

3.5.1 Resistência à compressão simples

O ensaio foi executado seguindo às prescrições da NBR 5739/2007. Antes de serem ensaiados, todos os corpos de prova foram retificados para regularização das bases por um técnico especializado. Tarefa delicada, pois, a presença de fibras de aço nos CPs dificulta a planicidade da peça. Depois de retificados, os CPs são enrolados em papel filme por proteção, devido à resistência elevada do concreto e seu possível comportamento explosivo. Em seguida, os corpos de prova são centralizados na prensa hidráulica para realização do ensaio.

Figura 17 - CP com fibras com base retificada



Figura 18 - Proteção contra possível comportamento explosivo



3.5.2

Resistência à tração na compressão diametral

O ensaio de tração na compressão diametral (figura 19) seguiu as prescrições da NBR 7222/1994. Os CP's foram posicionados na prensa após serem devidamente retificados. As taliscas utilizadas disponíveis possuíam dimensões compatíveis com a norma para CP's 100x200 mm.

Figura 19 - Ensaio de tração na compressão diametral

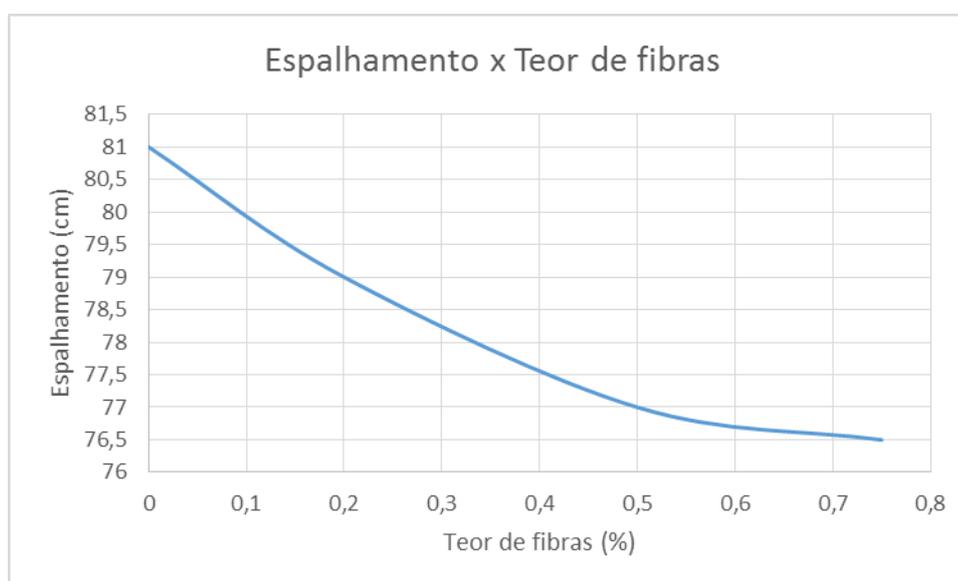


4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Concreto fresco

Por apresentar características de um concreto auto adensável, foi realizado o ensaio de espalhamento (slump-flow) de acordo com a NBR 15823. O gráfico mostra como a trabalhabilidade do concreto se comportou com diferentes teores (0, 0,2, 0,5 e 0,75%) de adição de fibras de aço ($l = 30$ mm). Por obter espalhamento superior a 76 cm e comportamento bastante fluído em todos os traços, o concreto é classificado como SF3 na classe de espalhamento e VS 1 em viscosidade plástica aparente de acordo com a norma.

Figura 20 - Espalhamento do concreto em função do teor de fibras adicionado.



Fica claro como o teor de fibras adicionados influencia diretamente na trabalhabilidade da mistura. Mesmo sendo uma adição inerte, as fibras de aço fazem com que a mistura tenda a não espalhar da mesma forma que o composto sem fibras. Analisando o gráfico, nota-se ainda uma relação praticamente linear, inversamente proporcional, entre teor de fibras e espalhamento. Söylev e Özturan (2014) chegaram a resultados parecidos estudando a durabilidade e propriedades mecânicas de CRF. Em matrizes muito mais fortes, o efeito se repete. Aghdasi et al (2016) verifica que o teor de fibra (3 e 5 %) é fator determinante na fluidez de uma matriz de ultra alto desempenho e reporta uma redução de 5% no espalhamento em seu estudo.

4.2 Compressão simples

A tabela 4 apresenta resumidamente os resultados de resistência à compressão simples dos três traços, em temperatura ambiente e após aquecidos até 400 e 600° variando-se o tipo de resfriamento. A tabela mostra entre barras os valores dos dois CP's ensaiados e entre parênteses a média. Nota-se a falta de CP's para 400° resfriados brusco e apenas um CP para resfriamento lento. Isso ocorreu devido à perda de 6 CP's por causa do lascamento explosivo da primeira fornada.

Tabela 4 - Resistência à compressão axial (MPa) Cp1/Cp2 (Média)

	T. Ambiente (MPa)	400°C		600°C	
		Brusco (MPa)	Lento (MPa)	Brusco (MPa)	Lento (MPa)
T0	119,1/119,9 (119,5)	X	97,0/0 (97)	52,5/44,3 (48,4)	61,8/58,8 (60,3)
T05	113,0/113,4 (113,2)	77,10/68,4 (72,75)	112,00/103,60 (107,8)	44,2/51,4 (47,8)	58,8/50,1 (54,45)
T075	115,0/114,8 (114,9)	81,40/83,3 (82,35)	105,7/108,1 (106,9)	52/52,7 (52,35)	58,0/55,1 (56,55)

Como esperado, analisando os três traços da tabela, assim como o traço teste, T02, que possui 0,2 % de adição de fibras, verificou-se que as fibras de aço, quando adicionadas em pequenos volumes, em temperatura ambiente, não contribuem no aumento de resistência à compressão, quando se compara os traços com fibras de aço com o T0. Inclusive é observada uma queda de resistência entre o T0 e o T05. Porém, como o número de CP's é pequeno, seria precipitado atribuir às fibras essa redução de resistência.

Resultados bem semelhante são mostrados na pesquisa de Luccioni et al (2017). Em seu experimento, o autor estuda o efeito da adição de fibras de aço em propriedades estáticas e dinâmicas do CADRF. O concreto do estudo também possui características de concreto auto adensável. Os valores da resistência à compressão são próximos para o concreto sem adições (114 MPa), com 0,5% (109 MPa) e 1% (109 MPa) de fibras de aço de 60 mm. O ensaio possuiu uma margem de erro de 4 MPa, aproximadamente. O fato que as fibras não aumentam a

resistência a compressão do concreto também é mostrado por Mehta e Monteiro (2005). Mas, vale lembrar que Yazic et al (2007) obteve ganhos de 4-19% com adição de fibras de aço (0,5-1,5%) em concretos convencionais.

Para análise das propriedades residuais, analisou-se os gráficos das figuras 21 e 22. Um mostra o comportamento residual para o resfriamento abrupto, e o outro para o resfriamento lento. O valor é expresso em porcentagem comparando-se com a temperatura ambiente.

Figura 21 - Gráfico Resistência Residual (%) para compressão axial – Resfriamento lento

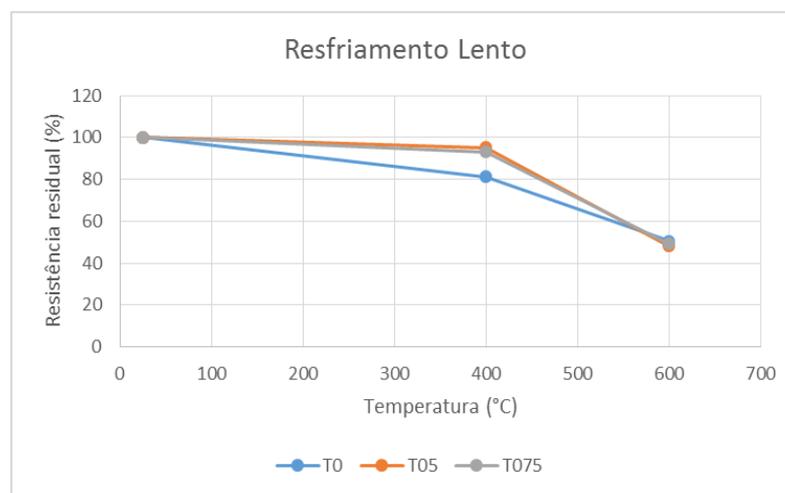
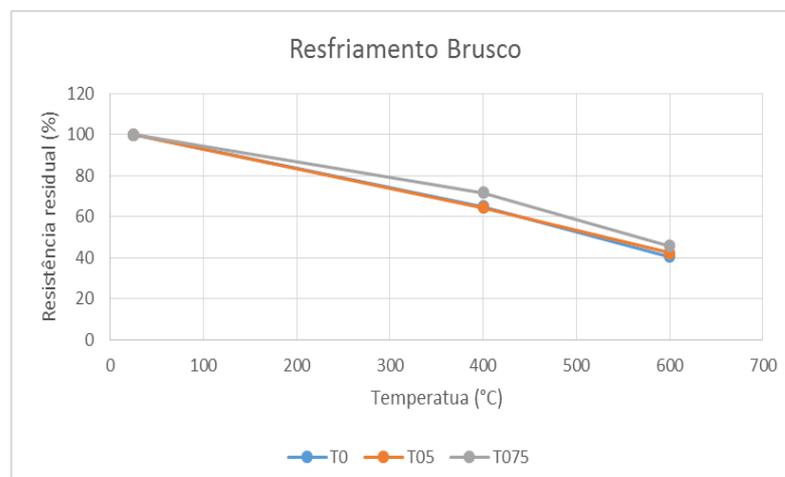


Figura 22 - Gráfico Resistência Residual (%) para compressão axial – Resfriamento brusco



Como se pode observar nos gráficos acima, ao atingir 600° C os três traços se comportam de forma semelhante, independentemente da adição de fibras e tipo de resfriamento. Cabe notar também que, o resfriamento abrupto é mais prejudicial ao concreto. Verificou-se que, após atingir os 400° C, o concreto resfriado bruscamente possui menos de 80% de sua resistência inicial para os três traços, porém, no resfriamento lento, a resistência residual é maior que 80%, no mínimo. Eide e Hisdal (2012) comentam que a resistência residual à compressão cai drasticamente com o aumento da temperatura máxima atingida. Fato também observado na pesquisa de Fernandes e Silva (2014) para concretos com resistência convencionais.

Em se tratando da influência das fibras de aço na resistência residual à compressão do concreto, observa-se um comportamento melhor dos traços com fibras incorporadas no resfriamento lento após 400°. Vale ressaltar que o T0 utilizado na comparação possuiu apenas um CP, além de que o próprio CP estava na fornada onde ocorreu o lascamento explosivo. Novamente, é difícil assegurar que as fibras de aço fizeram diferença no comportamento residual visto que os corpos de prova foram submetidos à diferentes regimes de aquecimento.

Na literatura encontra-se o estudo de Lau e Anson (2006), onde o efeito de elevadas temperaturas no CADRF é experimentado. É incorporado ao concreto 1% de fibras de aço de 25 mm de comprimento e verifica-se o comportamento do concreto em suas propriedades mecânicas. Os pesquisadores concluíram que abaixo de 1000° C o CADRF possui de maneira geral melhor comportamento após exposição à elevadas temperaturas que o concreto convencional

4.3 Tração na compressão diametral

A tabela 5 apresenta o resumo dos resultados de resistência à tração na compressão diametral. Mostra, em MPa, de forma análoga ao ensaio anterior, os resultados de cada CP ensaiado assim como a média.

Tabela 5 - Tração na compressão diametral MPa – Cp1/Cp2(Média)

	T. Ambiente (MPa)	400°C		600°C	
		Brusca (MPa)	Lenta (MPa)	Brusca (MPa)	Lenta (MPa)
T0	6,0/6,1 (6,05)	X	6,3/0 (6,3)	2,4/2,6 (2,5)	3,7/3,9 (3,8)
T05	7,6/7,6 (7,6)	6,9/7,5 (7,2)	7,9/7,7(7,8)	4,0/4,1 (4,05)	5,0/4,6 (4,8)
T075	9,4/8,4 (8,9)	5,9/5,9 (5,9)	7,6/7,6 (7,6)	3,5/3,5 (3,5)	5,2/5,2 (5,2)

De maneira geral, os traços com fibras se comportaram de forma melhor comparando-se com o traço sem fibras. Em temperatura ambiente, verificou-se um aumento gradual da resistência com o aumento do teor de fibras incorporado. Song e Hwang (2004) observaram acréscimos de 19 e 98% para teor de fibras de 0,5 a 2% ($l = 35 \text{ mm}$) ao se comparar com a mesma matriz sem a adição fibrosa. O concreto utilizado no estudo dos autores possui resistência à compressão entre 80 e 98 MPa. Valores da resistência à tração na compressão diametral foram próximos comparando com o presente trabalho, entre 5,8 e 8,7 MPa. De acordo com Eide e Hisdal (2012), esse comportamento é esperado quando as fibras não são adicionadas em tão grandes quantidades.

Da mesma forma que o ensaio anterior, foram elaborados dois gráficos para auxiliar na comparação dos traços quanto às suas resistências residuais à tração na compressão diametral.

Figura 23 - Gráfico Resistência Residual (%) para tração na compressão diametral – Resfriamento lento

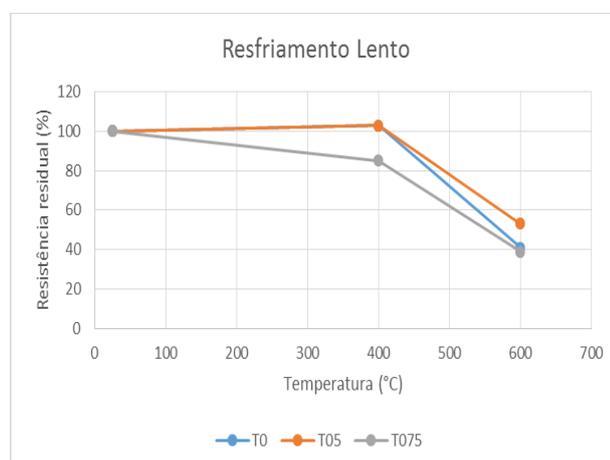
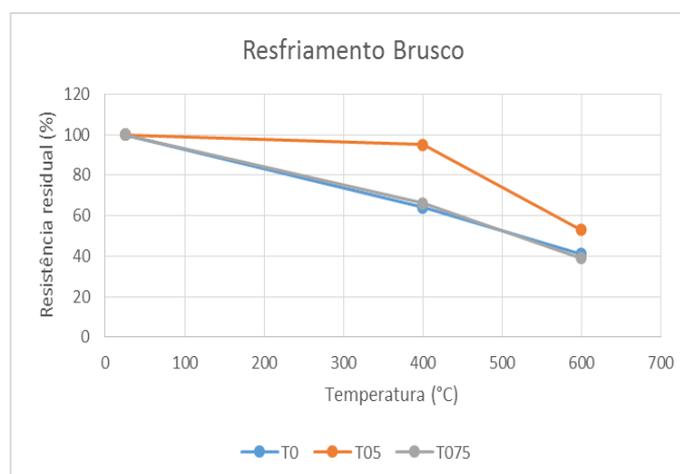


Figura 24 - Gráfico Resistência Residual (%) para tração na compressão diametral – Resfriamento brusco



Os gráficos passam a falsa impressão que o T075 resiste menos a tração que os dois primeiros traços. Na realidade, a resistência residual do terceiro traço tem uma grande queda pois sua resistência inicial foi bastante elevada, comparando-se com os outros dois. Logo, apesar de sua resistência pós resfriamento brusco e lento ser maior que o T0, por exemplo, sua resistência residual é menor devido à discrepância do resultado à temperatura ambiente.

Nota-se também pouca variação de comportamento entre os traços T05 e T075. Em se tratando das resistências finais, os traços fibrosos apresentaram melhor comportamento nos dois tipos de resfriamento, apesar do traço T075 sofrer grande perda. No resfriamento lento após 600°, por exemplo, T075 possui resistência 36% maior que o T0, porém as perdas são proporcionais. Caverzan (2015) aponta que a adição de 0,6% de fibras de aço ($l = 30 \text{ mm}$; $l/d = 45$) se mostra benéfica na resistência ao fogo, em elementos sujeitos à tração. O autor ainda menciona que o CADRF mostra uma impressionante resistência residual quando sujeitos à flexão após aquecidos até 400 °C. Porém, após 600 °C, os CP's começam a falhar devido à ruptura das fibras. Lau e Anson (2005) também constataram grandes perdas residuais ao atingir a casa dos 600°C, tanto na compressão quanto tração na flexão.

Eide e Hisdal (2012) alertam que este tipo de concreto, por ser bastante denso, é bastante sujeito ao fenômeno spalling, e que o material se comportaria seguro apenas quando combinado com fibras de polipropileno.

5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal analisar as propriedades residuais do CADRF após aquecido até 400 e 600 °. Para isso, foram estudadas duas propriedades mecânicas do concreto: resistência à compressão axial e tração na compressão. Obteve-se ainda uma curva de resistência para diferentes idades e analisou-se a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. As conclusões apresentadas aqui servem como resumo do trabalho experimental executado.

- Dentro das limitações do trabalho, concluiu-se que os resultados dos ensaios foram satisfatórios.
- As fibras de aço diminuem a trabalhabilidade do concreto quase que linearmente, como esperado.
- Em temperatura ambiente, a adição de fibras se mostrou insignificante quanto a resistência à compressão axial do composto.
- O tipo de resfriamento abrupto se mostrou o mais prejudicial para o concreto tanto na compressão quanto na tração, como esperado.
- Resfriando-se lentamente após aquecido até 400 °C, o concreto possui resistência residual bem próxima à original.
- A adição de fibras de aço carbono, em 0,5 e 0,75% em volume, de 35 mm de comprimento e 65 de relação de aspecto resultou em uma maior resistência à tração, pela compressão diametral, em todas as situações.
- Pequenas diferenças nas propriedades mecânicas residuais e originais foram constatadas entre os traços T0 e T75.
- As fibras não melhoraram o comportamento residual do concreto, quando se comparam os traços com adição de fibras com o traço sem adição.
- Taxa de aquecimento de 5 °C/min se mostrou elevada acarretando em spalling e perda de CP's. A uma taxa de 1 °C/min o concreto se comportou bem.

Espera-se que o trabalho motive outros estudantes na continuação de experimentos com o material abordado no trabalho. Ficam aqui sugestões para futuros trabalhos:

- Confecção de CP's prismáticos para ensaiar o concreto à tração flexão.

- Estudar uma adição de fibras em maior teor de volume e menor comprimento, com correção do atual traço.
- Estudar a taxa máxima de aquecimento que o concreto suporta sem ocorrência do lascamento explosivo.
- Estudar a incorporação de fibras de polipropileno para evitar o fenômeno de lascamento explosivo, criando-se assim um composto com fibras híbridas.
- Execução de cura térmica para tentar atingir resistências ainda maiores.

REFERÊNCIAS

AARUP, B. CRC – “**A Special Fibre Reinforced High Performance Concrete,**” Proceedings of the First International RILEM Symposium on Advances in Concrete Through Science and Engineering, Publication pro048, Match 21-24, 2004, Evanston, IL, Ed, Weiss, J. et al.

AITCIN, Pierre-Claude. **High Performance Concrete.** Londres: E&F N Spon, 1999.

AGHDASI, P.; HEID, A.E.; CHAO, S. **Developing Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete for Large-Scale Structural Applications.**, ACI Materials Journal, USA, Title No. 113-M50, Oct., 2016.

ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S. **Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance.** Materials and Structures 49. RILEM. USA. Pp. 4185-4200. 2016.

AL-OSTA, M.A. *et al.* **Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fibre reinforced concrete.** Construction and Building Materials, Saudi Arabia, 134, p. 279-296, 2017.

AREL, H. S. **Effect of curing type, silica fume fineness, and fiber length on the mechanical properties and impact resistance of UHPFRC.** Results in Physics, Turkey, 6, p 664-674, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aditivos para concreto de cimento Portland:** NBR RM 11678. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água para amassamento do concreto:** NBR NM 15900. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica:** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR NM 7222. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto auto-adensável:** NBR NM15823. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos:** NBR NM 5739. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova:** NBR NM 5738. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sílica ativa para uso com o cimento Portland em concreto, argamassa e pasta:** NBR NM 13956-1. Rio de Janeiro, 2012.

BAYRAMOV, F.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M.A. **Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statical response surface method.** Ciment & Concrete Composites, Turkey, 26, pp 665-675, 2004.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** Modern Concrete Technology Series. Second edition. United Kingdom, 2007.

CAVERZAN, A. *et al.* **High performance steel fibre reinforced concrete: residual behavior at high temperature.** Materials and Structures, Politecnico di Milano, Italy, 48, pp. 3317-3329.

COLLEPARDI, S. *et al.* **Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2nd. Gramado. Proceedings, Gramado, RS, 1999, p. 503-523.

COSTA, C.N.; FIGUEIREDO, A.D. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armados submetidas a incêndio – uma revisão crítica.** 44º Congresso Brasileiro – IBRACON. São Paulo, 2002.

CUCCHIARA, C.; MENDOLA, L.L.; PAPIA, M. **Effectiveness os stirrups and steel fibres as shear reinforcement.** Cement and Concrete Composites, v. 26, n.7 p. 777-786, Oct. 2004.

CUNHA, V.M.C.F; BARROS, J.A.O.; SENA-CRUZ, J.M. **An integrated approach for modelling the tensile behaviour os steel fibre reinforced self-compacting concrete.** Cemente and Concrete Research, University of Trás-os-montes. Portugal, 41, pp 64-76, 2011.

EIDE, M.B.; HISDAL, J. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art.** In: COIN Project report 44 – 2012. SINTEF Building and Infrastructure. 2012.

FALLAH, S.; NEMATZADEH, M. **Mechanical properties and durability of high-strenght concrete containing macro-polymeric and polypropilene fibers with nano-silica and sílica fume.** Construction and Building Materials, Department of Civil Engineering, University of Mazandaram. Iran, 132, pp. 170-187, 2017.

FERNANDES, H.A.D.; SILVA, J.J.R. **Estudo de Propriedades Mecânicas Residuais do Concreto Submetido a Altas Temperaturas.** XXII CONIC. XI CONITI. III ENIC. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** Tese (Livre docência) p.256 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil São Paulo. 2011.

FIGUEIREDO, A. D. **Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural.** 56° Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2014, Anais. São Paulo out. 2014

GÓIS, F.A.P; **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto.** Dissertação 157p. (Obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2010.

JAISSWAL, K.; JAMKAR, S. **A Study on Effect of Steel Fibers on Impact Resistance of High Strenght Steel Fiber Reinforced Concrete (HSFRC) Subjected to Drop Weight Test.**

In: International Journal for Scientific Research & Developmente , India, Vol.3, Issue 09, 2015, p. 839, 2015.

LACHANCE, F.; CHRRON, J.P.; MASSICOTTE. BRUNO. **Developmente of Precast Bridge Slabs in High-Performance Fiber-Reinforced Concrete and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete.** ACI Structural Journal – Technical Paper. V. N° 113-S79. EUA, out. 2016.

LAPPA E. S. **High Strength Fibre reinforced Concrete, Static and fatigue behaviour in bendig.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) p. 236 – Duitsland, 2007.

LAU, A; ANSON, M. **Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete.** Cement and Concrete research, ScienceDirect, Hong Kong, China, 36, pp 1698-1707, 2006.

LI, Z. **Advenced Concrete Technology.** EUA, J&S INC, 2011.

LUCCIONI, B. *et al.* **Effect of steel fibers on static and blast response of high strenght concrete.** In: International Journal of Impact Engineering, Argentina 107, p 23-37. Argentina, 2017.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete, microstructure, properties, and materials.** Terceira edição. EUA: McGraw-Hill, 2005.

MENDES, S.E.S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** Curitiba, 2002. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná.

NAAMAN, A.E. **Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead.** In: RILEM Proceedings, PRO 15, RILEM Publications SARL, p. 65-86, 2000.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Teologia do Concreto.** Segunda edição. Saraiva, 2013.

ORTIZ, F. **Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-art Report for the Bridge Community**. U.S. Department of Transportation. Publication N° FHWA-HRT-13-060. June 2013.

PASA, V. N. **Análise do Comportamento de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço via Método dos Elementos Finitos**. Dissertação p. 158 (Mestrado em Engenharia Civil) – programa de Pos-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

RESENDE, F. M.; **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) 109p. – Universidade Federal do rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

SALVADOR, R.P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) 178p. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

STÄLI, P.; CUSTER, R. **On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC**. In: Materials and Structures, RILEM. Switzerland, 41, p. 189-196, 2008.

SONG, P.S.; HWANG, S. **Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete**. Construction and Building Materials. China, 18, ELSEVIER. Department of Civil Engineering. Dahan Institute of Technology, pp 669-673, 2004.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G.C; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto desempenho**. Concreto: ciência e tecnologia, IBRACON (2011), capítulo 36.

SHANG, H.; YANG, S.; NIU, X. **Mechanical behaviour of different types of concrete under multiaxial tension-compression**. In: Construction and Building Materials, China, 73, p. 764-770, 2014.

SÖYLEV, T.A. ÖZTURAN, T. **Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fractions.** In: Construction and Building Materials. Turley, 73 p. 67-75, 2014.

WALRAVEN, J. **High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes.** Materials and Structures (2009). Holanda, 42. pp 1247-1260, 2009

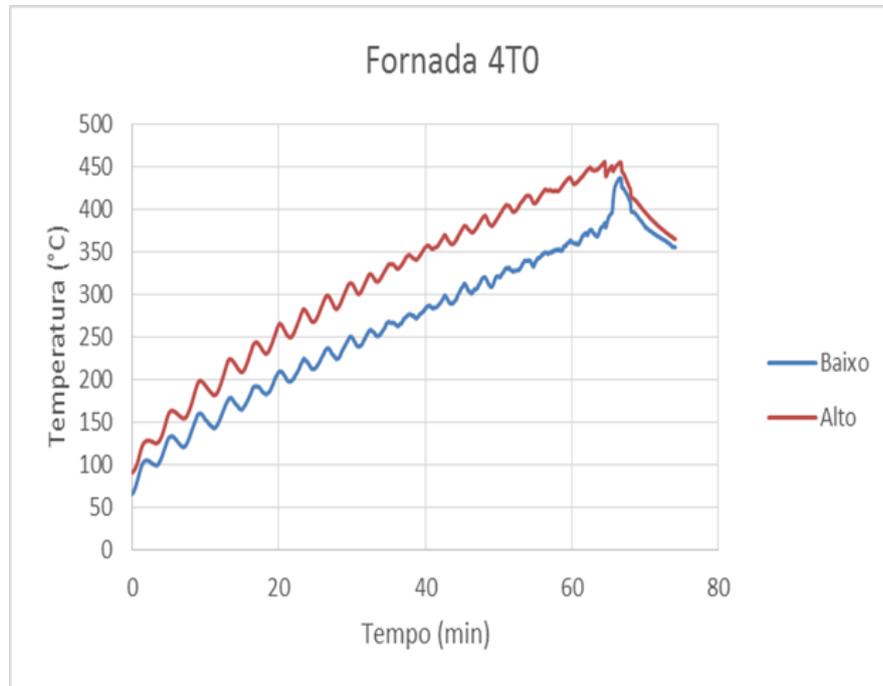
XU, M.; HALLIMAN, B.; WILLE, K. **Effect of loading rates on pullout behavior on high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete.** In: Cement and Concrete Composites. USA, University of Connecticut, 70, p. 98-109, 2016

YAZIC, S.; INAN, G., TABAK, B. **Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fibre on the mechanical properties of SFRC.** Construction and Building Materials. Turkey, 21, ELSEVIER. pp 1250-1253, 2007.

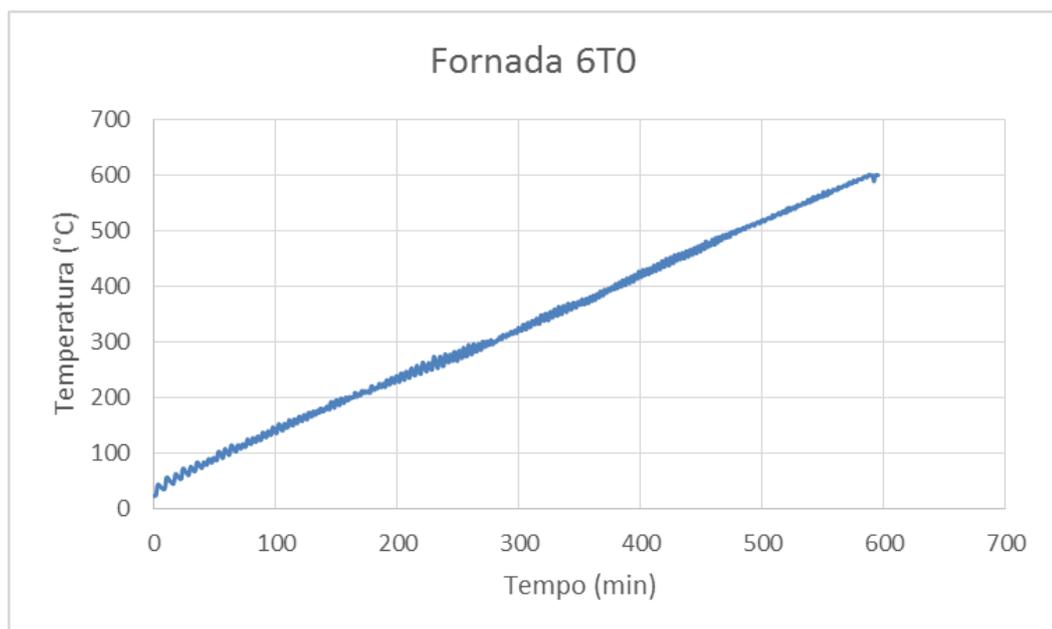
YOO, D.Y; KANG, S.T.; YOON, Y.S. **Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers.** Composite structures. Coreia do Sul, 147. pp 220-230, 2016

APÊNDICE

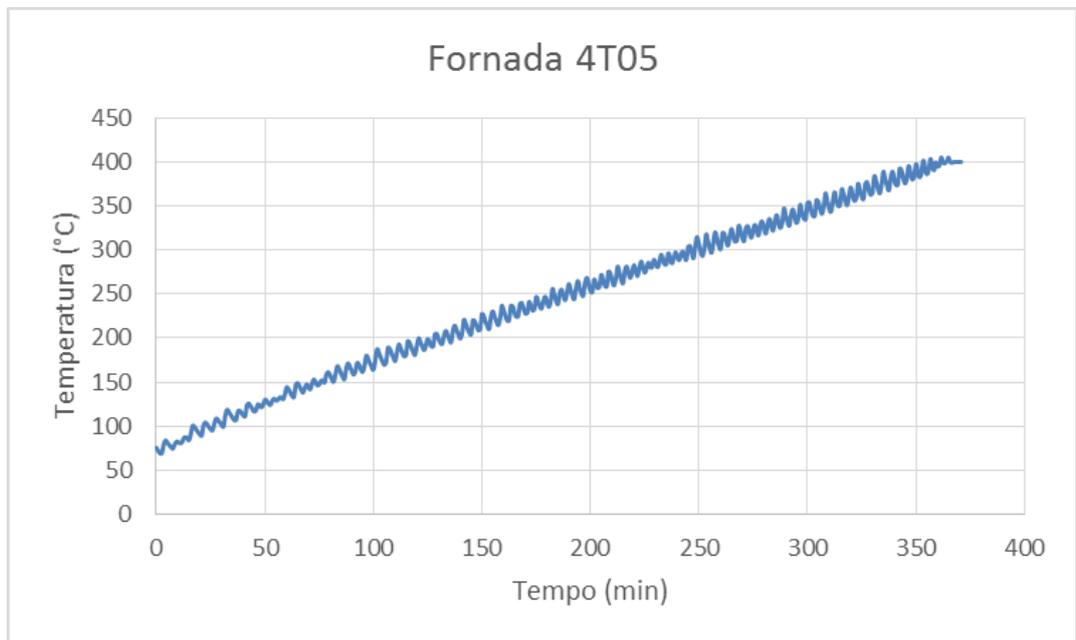
Fornada T0 até 400° C



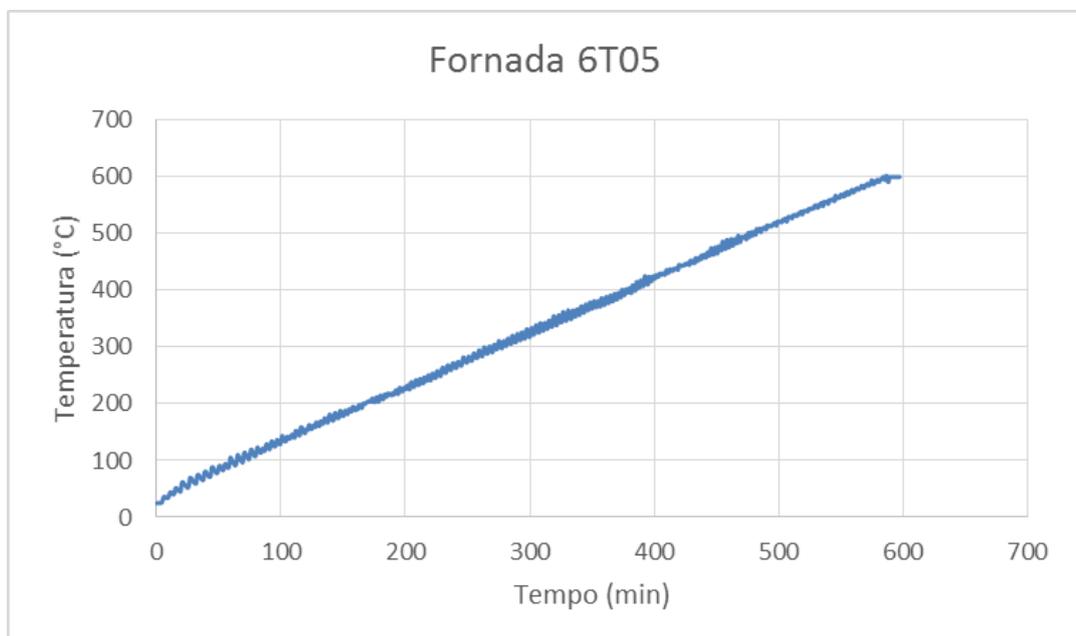
Fornada T0 até 600 °C



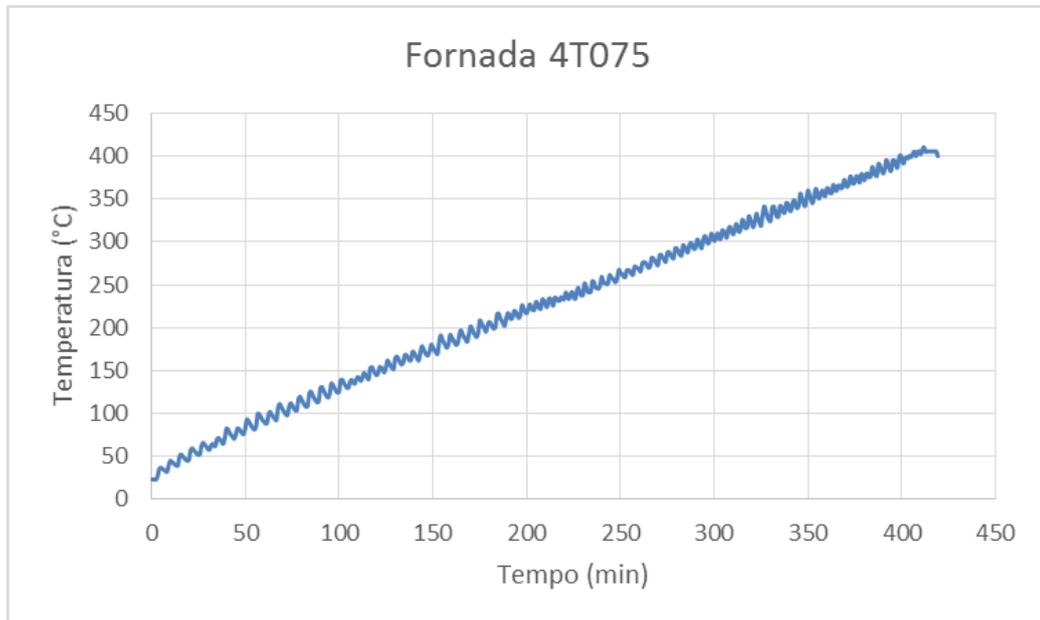
Fornada T05 até 400° C



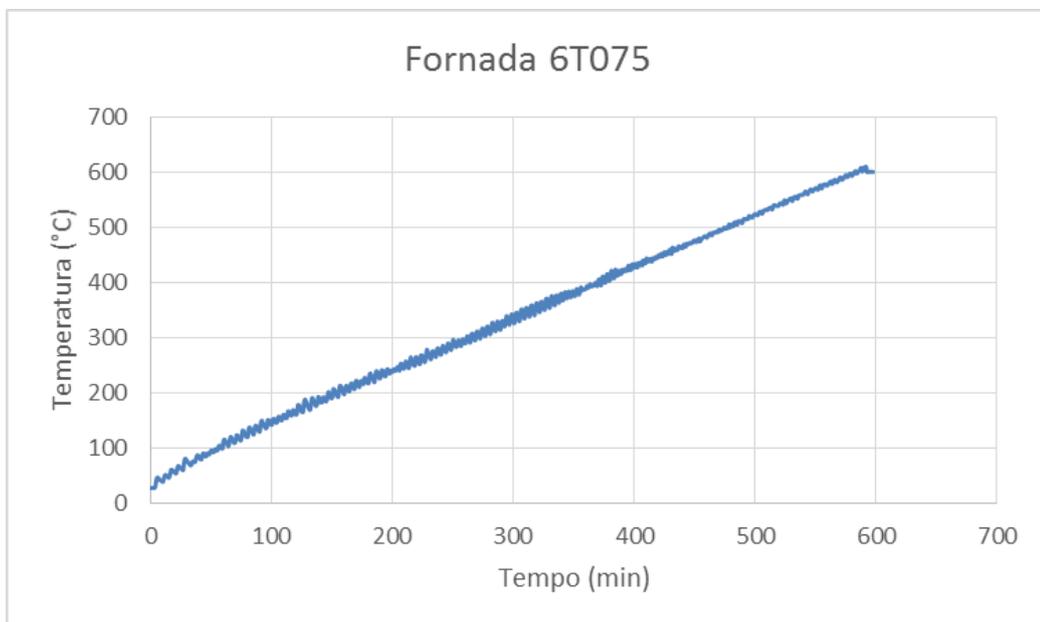
Fornada T05 até 600°C



Fornada T075 até 400°



Fornada T075 até 600°



ANEXOS

Anexo 1: CPV ARI MAX – Especificações

Ensaio Químicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,98	≤ 1,0
Perda ao Fogo - PF	ABNT NM 18/12	%	3,13	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 14/12	%	1,52	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NM 16/12	%	3,41	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,39	≤ 3,0

Ensaio Físicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4.658	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,07	não aplicável
Índice de finura - # 75 µm (nº 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,03	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,65	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	31,1	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	158	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	220	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,01	≤ 5,0

Ensaio Mecânicos

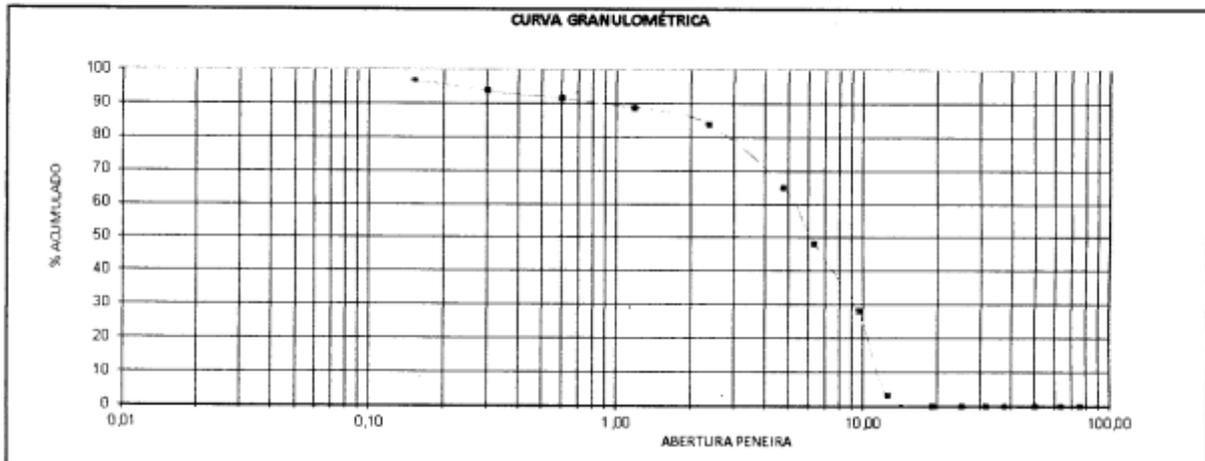
ENSAIOS - ABNT NBR 7215/96	UN.	DESvio PAD	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resistência à Compressão - 1 Dia	MPa	0,79	29,1	14,0
Resistência à Compressão - 3 Dias	MPa	1,93	42,6	24,0
Resistência à Compressão - 7 Dias	MPa	1,23	49,0	34,0
Resistência à Compressão - 28 Dias	MPa	1,65	56,0	não aplicável

Fonte: Cimento Nacional

Anexo 2: Especificação agregado graúdo

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO							
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (NBR NM 248/2003)				ENSAIOS REALIZADOS			
Abertura Peneira (mm)	Peneiramento -Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado (%)	Descrição do ensaio	Norma	Unidade	Valor
75		0,00	0	Massa específica agregado seco	NBR NM 53:2009	g/cm ³	
63		0,00	0	Massa espec. agreg. condição sss ⁽¹⁾	NBR NM 53:2009	g/cm ³	
50		0,00	0	Massa específica aparente	NBR NM 53:2009	g/cm ³	
37,5		0,00	0	Índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809:2006	-	
31,5		0,00	0				
25		0,00	0	Massa unitária agregado solto	NBR NM 45:2006	kg/m ³	
19		0,00	0				
12,5	95,00	3,17	3	Massa unitária agregado compactado	NBR NM 45:2006	kg/m ³	
9,5	745,0	24,83	28,00				
6,3	610,0	20,33	48,33	Material pulverulento	NBR NM 46:2003	%	0,70
4,75	499,60	16,65	64,99				
2,36	566,10	18,87	83,86	Módulo de finura	NBR NM 248:2003	-	5,47
1,18	145,90	4,86	88,72				
0,6	77,80	2,59	91,31	Diâmetro máximo	NBR NM 248:2003	mm	12,5
0,3	68,20	2,27	93,59				
0,15	91,90	3,06	96,65	Absorção de água	NBR NM 53/2009	%	0,20
FUNDO	100,50	3,35	100,00				
Total	3000	100,00	100,00	Argila em torrões e materiais fráveís	NBR 7218/2010	%	

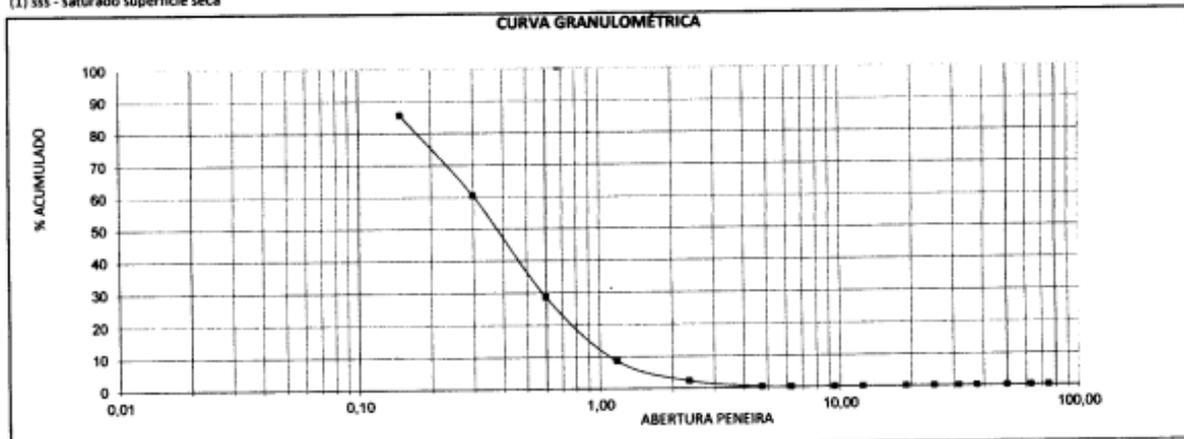
(1) sss - saturado superfície seca



Anexo 3: Especificação agregado miúdo

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO							
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (NBR NM 248/2003)				ENSAIOS REALIZADOS			
Abertura Peneira (mm)	Peneiramento - Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado (%)	Descrição do ensaio	Norma	Unidade	Valor
75		0,00	0	Massa específica agregado seco	NBR NM 52:2009	g/cm ³	
63		0,00	0	Massa espec. agreg. condição sss ⁽¹⁾	NBR NM 52:2009	g/cm ³	
50		0,00	0	Massa específica aparente	NBR NM 52:2009	g/cm ³	
37,5		0,00	0	Massa unitária agregado solto	NBR NM 45:2006	kg/m ³	
31,5		0,00	0	Impureza orgânica	NBR NM 49:2001	Índice de cor	
25		0,00	0				
19		0,00	0				
12,5		0,00	0				
9,5		0,00	0	Material Pulverulento	NBR NM 46:2003	%	1,00
6,3		0,00	0				
4,75	2,20	0,22	0,2	Módulo de Finura	NBR NM 248:2003	-	1,85
2,36	19,20	1,92	2,1	Diâmetro Máximo	NBR NM 248:2003	mm	2,36
1,18	64,10	6,41	8,6				
0,6	199,40	19,94	28,5	Absorção de Água	NBR NM 30:2001	%	
0,3	318,00	31,80	60,3				
0,15	252,10	25,21	85,5	Argila em Torrões	NBR 7218:2010	%	
FUNDO	145,00	14,50	100				
Total	1000	100,00	100				

(1) sss - saturado superfície seca



Fonte: Laboratório de Tecnologia Supermix.