

ESTUDO SOBRE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

Maria Fernanda Farias dos Santos (IC), Simão Priszulnik e Fabiola Rago Beltrame (Orientadores)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Em uso desde o início do século XX, o concreto está em constante desenvolvimento, visando atender às demandas da sociedade. Atualmente, não requer atender apenas as características funcionais, como durabilidade e alta resistência, mas também características estéticas, como acabamento e redução do volume estrutural. O concreto de ultra-alto desempenho, CUAD, enquadra-se nesse novo padrão. Este suporta esforços superiores à 150 MPa e enquanto tem volume estrutural reduzido quando comparado à uma peça de concreto armado. Suas características só são atingidas através de um processo produtivo minucioso, combinando distribuição granulométrica, proporção entre componentes e método de cura. O objetivo desse trabalho é por meio de diversos ensaios, desenvolver um concreto que apresente características que o classifiquem como CUAD. Nesse trabalho, foram realizadas análises em relação ao empacotamento de partículas de areia, influência de diferentes proporções de variadas granulometrias de pó de quartzo, influência de diferentes tipos de curas térmicas, porcentagens adequadas de fibras de aço, resistência após exposição à ataque de ácido sulfúrico e índice de absorção de água. Foi possível identificar que a cura térmica por submersão apresenta resultados superiores à cura em câmara úmida e a cura térmica no vapor, que a relação entre porcentagem de fibras de aço e resistência, nesse caso, foi inversamente proporcional e que mesmo sob exposição ao ácido sulfúrico, houve decréscimo da resistência no 21º dia e posterior estabilização no 28º dia. Foi possível comprovar a efetividade dos testes realizados alcançando o objetivo de desenvolver um CUAD.

Palavras-chave: CUAD, empacotamento, cura térmica.

ABSTRACT

In use since the beginning of the twentieth century, concrete is in constant development, aiming to meet the demands of society. Today, it does not only need to meet functional characteristics such as durability and high strength, but also aesthetic characteristics such as finishing and structural volume reduction. The ultra high performance concrete, UHPC, meets this new standard. It can withstand forces greater than 150 MPa and while having reduced

structural volume when compared to a reinforced concrete part. Its characteristics are only achieved through a thorough production process, combining particle size distribution, component ratio and curing method. The objective of this work is, through several tests, develop a concrete that presents characteristics that classify it as UHPC. In this work, analyzes were performed in relation to the packing of sand particles, influence of different proportions of various quartz powder granulometry, influence of different types of thermal cures, adequate percentages of steel fibers, resistance after exposure to sulfuric acid attack. and water absorption index. It was possible to identify that the submergence thermal cure presented superior results to the wet chamber cure and the steam thermal cure, that the relation between steel fiber percentage and resistance, in this case, was inversely proportional and that even under sulfuric acid exposure. , there was a decrease in resistance on day 21 and later stabilization on day 28. It was possible to prove the effectiveness of the tests performed by reaching the goal of developing a UHPC.

Keywords: UHPC, packing of particles, termal cure.

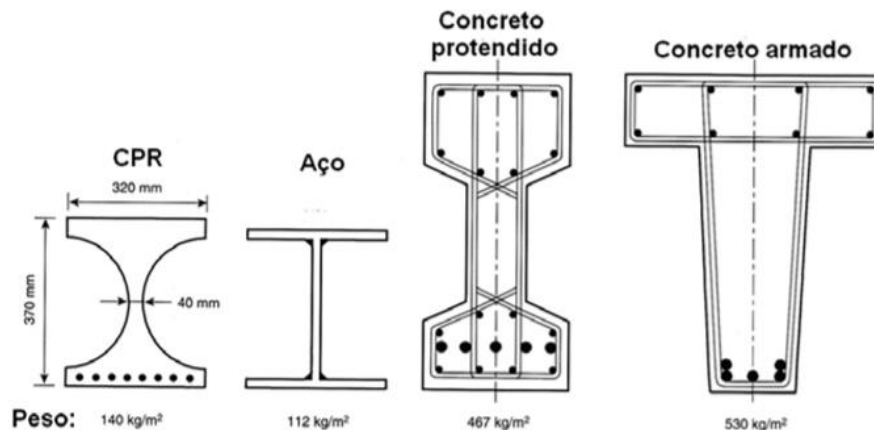
1. INTRODUÇÃO

O pensamento introdutório à pesquisa foi a possibilidade de otimização de um material já reconhecido e muito utilizado na construção civil. Com amplo uso em todo o mundo, há o concreto armado, que foi idealizado no século XIX, porém apenas no início do século XX começou a ser utilizado após a publicação de normas para projeto e construção. Desde então, esteve em evolução considerando os materiais que o compõe, os métodos de cálculo, dimensionamento e técnicas construtivas.

Em virtude do surgimento de novas demandas, se tornou necessário otimizar sua forma de produção. Intentando atender não apenas características funcionais como durabilidade, alta resistência e compacidade, mas também características estéticas como tipo de acabamento, baixa deformação e redução de volume estrutural.

A Figura 1 ilustra os cortes de diferentes peças estruturais que possuem a mesma resistência, comparando perfis de concreto de pós reativos (CPR), aço, concreto protendido e concreto armado.

Figura 1 - Seções de peças de CPR, aço, concreto protendido e concreto armado com mesma capacidade portante



Fonte – WALRAVEN (2000)

De acordo com essa demanda, vários tipos de concreto foram desenvolvidos até definir-se o concreto de ultra-alto desempenho, o CUAD. Em Buttignol *et al* (2017), são definidas algumas propriedades e características do CUAD, tais como: alto consumo de cimento, baixa relação água/cimento, adição de aglutinantes, agregados de pequena dimensão e resistência média superior à 150 MPa. O princípio seria utilizar apenas agregados miúdos, trabalhando com microestruturas para redução de vazios possibilitando que as tensões sejam distribuídas de forma mais uniforme, levando tanto ao aumento da resistência à compressão e à tração na flexão quanto à menor deterioração devido às influências do meio em que estiver inserido.

Porém, isso só é alcançado através da combinação entre distribuição granulométrica adequada, proporção entre os componentes, processo executivo e método de cura. Todos esses fatores tornam a produção do CUAD mais cara e mais trabalhosa, sendo assim, como desenvolver um concreto em laboratório que tenha características similares aos pré-requisitos que classificam os concretos como de ultra-alto desempenho?

O CUAD demanda minuciosidade no processo produtivo com a finalidade de alcançar maior longevidade e demandar menos recursos para manutenção. Não esquecendo da questão estética, pois é possível moldar peças mais esguias, tornando o empreendimento que usa o CUAD mais esbelto.

O objetivo do trabalho consiste em desenvolver um concreto que apresente propriedades e características suficientes para adequá-lo à categoria de CUAD. Analisando propriedades como resistência à compressão e à tração na flexão, índice de absorção de água e resistência ao ataque de agentes químicos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A princípio, como afirmam Tutikian *et al* (2011), do ponto de vista granulométrico, o CUAD é considerado argamassa e não concreto, devido à ausência de agregado graúdo. Porém, devido às propriedades e características alcançadas, ele é chamado de concreto. A retirada do agregado graúdo tem o intuito de aumentar a superfície específica, diminuindo a concentração de tensões para assim aumentar a resistência do material e postergar o surgimento de falhas.

Devido à diferentes metodologias aplicadas ao CUAD, é possível alcançar características que o classifiquem como concreto de pós-reativos (CPR), livre de macro defeitos (MDF) e densificado com partículas pequenas (DSP). Dentre esses, o CPR apresenta conceitos inovadores frente aos outros dois. Esse é derivado de pesquisas iniciadas em 1982, a partir do estudo sobre concreto de alto desempenho, feitas pelo francês Pierre Richards que, em 1990, foi considerado o criador desse tipo de concreto. O conceito expandiu devido a adição de uso de fibras metálicas e aditivos redutores de água para aumentar o desempenho do material. Este foi patenteado com o nome de DUCTAL.

Para Isaia (2011) *apud* Aïtcin (2008), o conceito de CPR é baseado em três princípios básicos. Esses são: (i) aumento da homogeneidade através da eliminação de partículas grossas, eliminação da zona de transição e melhoria das propriedades mecânicas da pasta; (ii) aumento da compacidade devido à otimização das dimensões das partículas; (iii) refinamento da microestrutura da pasta por tratamento de calor.

Dentre os materiais que constituem o CPR estão o cimento de máxima pureza, máxima finura e que contenha baixo teor de aluminato tricálcico hidratado, menos que 3% é considerado ideal para que não ocorra liberação de calor de hidratação de forma que prejudique os outros componentes; aditivos superplastificantes, que são redutores de água, e a sílica ativa, ambos possibilitam o aumento da trabalhabilidade e melhor densificação da pasta; e o quartzo, que é responsável pela compacidade. E com a finalidade de melhor distribuir as tensões, são adicionadas fibras de aço, objetivando melhorar a ductibilidade e a tenacidade, essas podem chegar a ocupar 2% do volume total do concreto. O CPR é um material extremamente compacto, essa característica dificulta que os agentes externos o penetrem, tornando-o extremamente durável.

Durante a hidratação do cimento, para conferir maior resistências às amostras, é possível fazer tratamentos térmicos e/ou aplicação de pressão. Repette (2005) afirma que o tratamento térmico entre 250 e 400°C reduz a água na pasta e forma hidratos cristalinos, levando ao aumento considerável da densidade da matriz. Este deve ser preferencialmente realizado no vapor e pode se estender por até 72 horas. Também é possível aplicar pressão durante a produção de peças pré-moldadas, chegando até 50 MPa, objetivando reduzir a quantidade de água, de ar e evitar a formação de vazios. Conclui-se que há relevância na escolha da temperatura e da pressão as quais o CPR será submetido durante seu processo de cura.

Dentre as construções já existentes com o CUAD existem exemplos como a passarela de Sherbrooke em Quebec no Canadá construída em 1997, retratada na Figura 2, possui 60 metros de comprimento por 3 metros de largura, foi pré-moldada e montada no local e a passarela de pedestres em Seoul na Coreia do Sul inaugurada em 2002, tendo 120 metros de vão livre e um tabuleiro de 3 cm de espessura.

Figura 2 – Passarela Seonyu, Coreia do Sul



Fonte – CONSTRUÇÃO CIVIL PET (2012)

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi dividida em seis etapas que contemplam em sequência: (i) a efetividade da cura sob pressão, (ii) a efetividade do empacotamento de partículas considerando as partículas de areia, (iii) a determinação da porcentagem de fibras metálicas, (iv) resistência à compressão e à tração na flexão, (v) a resistência à compressão após submersão em solução ácida e (vi) o índice de absorção de água por capilaridade.

Os materiais selecionados para pesquisa foram:

- Cimento CP V- ARI
- Sílica ativa em pó
- Areia rosa (considerada como uma areia fina)
- Pó de quartzo (malha 200 e malha 400)
- Aditivo superplastificantes de alto desempenho
- Água gelada (em torno de 8°C)
- Fibra de aço carbono

A cura térmica (será adotado a sigla CT para designar esse tipo de tratamento) foi feita na autoclave sob pressão de 1,5 atm e água a temperatura de 127°C durante 12 horas. Após o desligamento da autoclave, a mesma permaneceu por mais 12 horas fechada para resfriamento lento do material, visando evitar choques térmicos. Dentro do equipamento há espaço para duas cestas, o que possibilitou que fossem realizados testes em corpos de prova (CPs) que fossem curados no vapor e corpos de prova que fossem curados em submersão. Para cada traço desenvolvido foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 5 cm e altura de 10cm, onde 3 foram para cura apenas na câmara úmida, 3 foram para cura térmica no vapor e 3 foram para a cura térmica em submersão. Todos os corpos de prova foram armazenados na câmara úmida após as determinadas curas térmicas onde foram mantidos até a data de rompimento.

Para moldagem dos corpos de prova foram usadas as seguintes normas:

- ABNT NBR 12821:2009 – Preparação do concreto em laboratório – Procedimento;
- ABNT NBR 15530:2007 – Fibras de aço para concreto – Especificações;
- ABNT NBR 11768:2011 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.

Para testes de resistência à compressão e à tração foram usadas as normas:

- ABNT NBR 7215: 1996 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.
- ABNT NBR 7222:2011 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Para teste de absorção de água foi usada a norma:

- ABNT NBR 9779:2012 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.

3.1 EFICIÊNCIA DA CURA TÉRMICA

Com o objetivo de avaliar a influência da cura térmica e a influência da escolha dos agregados. Na primeira moldagem, vide Quadro 1, foram moldados uma pasta de cimento e dois traços, chamados de A e B, a diferença entre eles é que o traço A teve como agregado apenas o pó de quartzo e o traço B continha areia rosa e pó de quartzo.

Quadro 1 – Traços primeira moldagem

Materiais	Pasta de cimento	Traço A	Traço B
Cimento	1	1	1
Areia rosa	-	-	1
Pó de Quartzo	-	0,15	0,15
Sílica Ativa	-	0,15	0,15
Água	0,22	0,22	0,22
Aditivo	-	0,02	0,02

3.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Para determinação das granulometrias de areia rosa foi adotado o método do empacotamento de partículas. O diâmetro máximo da areia estudada é 1,18 mm, assim foram escolhidas as peneiras 28, 48 e 100, as quais tem as aberturas de 0,600 mm, 0,300 mm e 0,150 mm respectivamente, para compor as malhas que foram usadas no estudo. Os cálculos foram feitos através do Método de Andreassen e Andersen:

$$CPFT (\%) = 100 \cdot \left(\frac{D_p}{D_l}\right)^q$$

Onde:

CPTF: porcentagem acumulada de material que tenha partículas menores que D_p

D_p : diâmetro da partícula analisada

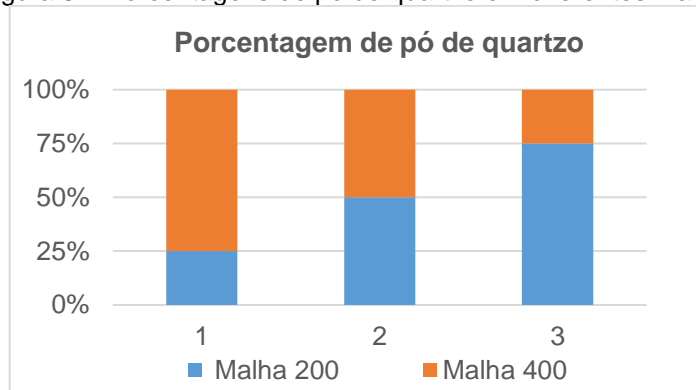
D_l : diâmetro máximo do agregado

Q: coeficiente de distribuição

O coeficiente de distribuição não é um valor definido, ele leva a resultados diferentes dependendo do material utilizado, esses valores costumam estar entre 0,3 e 0,8. Sendo assim, para empacotamento da areia rosa foram eliminados os extremos e selecionados quatro valores: 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7; esses deram as nomenclaturas C, D, E e F respectivamente aos traços rodados.

Considerando o uso do pó de quartzo, não foi adotado o mesmo modelo de distribuição que a areia rosa. Como o material já estava dividido em malhas quando adquirido, foram escolhidas três combinações de porcentagens de malha, como apresentado na Figura 3. As porcentagens foram selecionadas entre duas malhas, a 200 e a 400, as quais tem aberturas de 0,075 mm e 0,0375 mm respectivamente.

Figura 3 – Porcentagens de pó de quartzo em diferentes malhas



Assim, usando a fórmula do empacotamento para a areia rosa e as combinações para o pó de quartzo, foram elaborados 12 traços, como apresentado na Tabela 1. As letras determinam o coeficiente adotado no empacotamento de partículas de areia rosa e os números determinam qual a combinação entre as malhas de pó de quartzo foi escolhida.

Tabela 1 – Nomenclatura dos traços da segunda moldagem

Areia rosa	Pó de quartzo		
	1	2	3
C	C1	C2	C3
D	D1	D2	D3
E	E1	E2	E3
F	F1	F2	F3

Para cada um dos 12 traços, foram moldados 9 CPs, 5 x 10 cm, e a aplicados os três tipos de cura térmica. Todos os rompimentos foram realizados com a idade de 28 dias.

3.3 PORCENTAGENS DE FIBRA DE AÇO

A fibra usada na pesquisa foi da empresa TEC MACHINE, de aço carbono com fator de forma 80-A. A adição é calculada de acordo com o volume de concreto produzido. O traço de concreto é definido, tem-se o peso específico e o volume teóricos, a partir do valor do

volume é calculo qual porcentagem de fibras será adicionado à pasta. A primeira tentativa considerou os valores de 1; 2,5 e 4%, porém no momento da moldagem foi visto que quanto maior a porcentagem de fibras maior redução na trabalhabilidade do concreto, assim não foi possível moldar o valor de 4%, apenas os de 1 e 2,5%. Os CPs foram rompidos quanto à resistência à compressão, com a idade de 7 dias.

Devido aos resultados da primeira tentativa foi necessário fazer um segundo teste. Assim, foram consideradas as porcentagens de 1%, 0,5% e 0,25%. Esses CPs também foram rompidos quanto à resistência à compressão, com 7 dias.

3.4 TRAÇO FINAL

A quarta etapa determinou qual seria o traço final e quais as suas especificações. A Tabela 2 apresenta quais os materiais usados, sua quantidade, peso específico, volume e consumo.

Tabela 2 – Traço final

D1				
Materiais	Traço	Peso específico (kg/m ³)	Volume (m ³)	Consumo (kg/m ³)
Cimento	1	3.100	0,000323	1113,2
Areia rosa	0,7	2.670	0,000262	779,2
Pó de quartzo	0,15	2.600	0,000058	167,0
Sílica ativa	0,15	2.640	0,000057	167,0
Água	0,18	1.000	0,000180	200,4
Aditivo	0,02	1.050	0,000019	22,5
		2.449	0,000898	

A Tabela 3 especifica quais as porcentagens adotadas tanto na areia rosa quanto no pó de quartzo de acordo com as granulometrias

Tabela 3 – Empacotamento das partículas de areia e proporções de pó de quartzo

Em função do empacotamento:				
Material	Malha	Porcentagem (%)	Traço	Consumo (kg/m ³)
Areia rosa	28	28,69	0,201	2.230
	48	20,89	0,146	1.630
	100	50,42	0,353	3.930
Pó de quartzo	200	25	0,038	420
	400	75	0,113	1.250

A Tabela 4 especifica a porcentagem, o peso específico, o volume e o consumo das fibras metálicas. A metodologia utilizada para determinação do peso específico foi a verificação de qual a diferença de volume de um recipiente com água antes e depois da adição de determinado peso de fibras.

Tabela 4 – Porcentagem de fibras de aço

Material	Porcentagem (%)	Peso específico (kg/m ³)	Consumo (kg/m ³)
Fibra de aço	0,25%	6.250	15,625

Com esse traço foi analisado a resistência à compressão e à tração na flexão com a idade de 7 dias. Para os testes à tração na flexão foram moldados prismas com as dimensões de 4 x 4 x 16 cm que também tiveram adição de fibras e passaram por CT por submersão.

3.5 RESISTÊNCIA APÓS ATAQUE DE SOLUÇÃO ÁCIDA

Verificação do comportamento do traço ao ficar submerso em solução ácida com concentração de 3% de ácido sulfúrico. Esse ácido está presente na chuva ácida, em esgotos e em alguns tipos de indústrias, por tanto é considerada como uma substância que pode entrar em contato com o concreto em ambiente urbano, devido à isso, foi a substância selecionada para compor o estudo.

A solução foi produzida com 15 litros de água destilada e 300 ml de ácido sulfúrico com teor de 98% (NEON, referência 02629).

3.6 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Para esse ensaio foi usada a ABNT NBR 9779. Os ensaios foram iniciados quando os CPs tinham 6 dias e foram colocados na estufa para secagem completa, foram colocados em contato com a água com 7 dias e retirados com 10 dias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EFICIÊNCIA DA CURA TÉRMICA

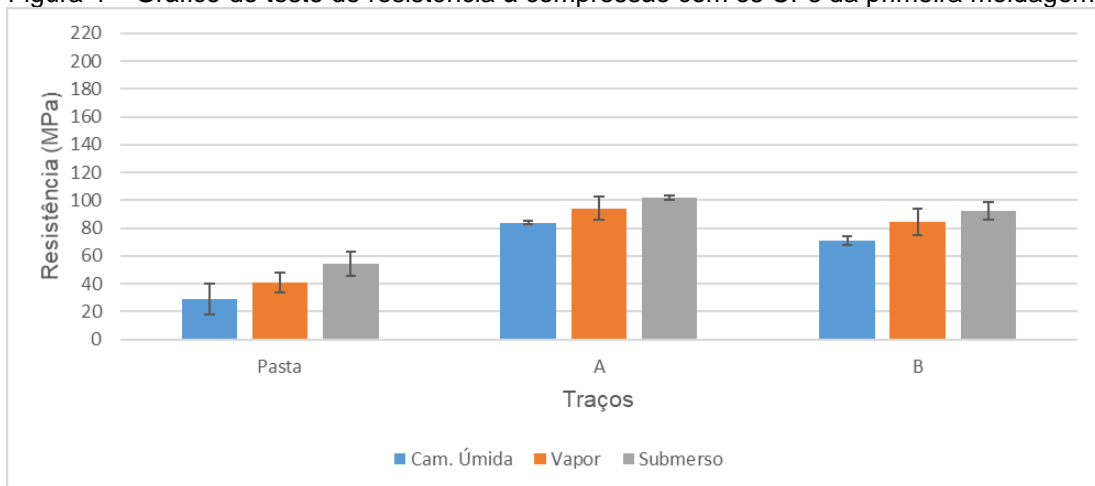
A Tabela 5 apresenta os resultados médios dos CPs envolvendo a pasta de cimento, o traço A e o Traço B, ensaiados com a idade de 28 dias.

Tabela 5 – Resultados do teste de resistência à compressão com os CPs da primeira moldagem

Traço	Cura (MPa)		
	Câmara úmida	CT no vapor	CT por submersão
Pasta	29,0	40,7	54,3
A	83,9	94,2	101,6
B	70,8	84,2	92,5

A Figura 4 apresenta os valores médios dos rompimentos de 3 CPs por coluna, a barra vertical representa o desvio padrão de cada grupo.

Figura 4 – Gráfico do teste de resistência à compressão com os CPs da primeira moldagem.



Houve proporção de crescimento semelhante dentro de cada traço, sendo os valores na câmara úmida os mais baixos, seguidos pelos valores da CT no vapor e por último os valores da CT por submersão, comprovando a efetividade da cura térmica. Também é possível observar que a resistência alcançada pelos CPs moldados apenas com pó de quartzo foi maior que os moldados com pó de quartzo e areia rosa, o que demonstra a influência do tamanho das partículas.

Porém, considerando que um saco de 20kg de areia fina lavada é vendido à R\$ 3,19 (preço encontrado em 2019) e um saco de 1kg de pó de quartzo malha 200 é vendido à R\$ 13,00 (preço encontrado em 2019) a relação custo x benefício não seria efetiva, devido à isso, foi dado continuidade aos estudos trabalhando com pó de quartzo e areia rosa como agregados.

4.2 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS DE AREIA ROSA E PORCENTAGENS DE PÓ DE QUARTZO

Os CPs que foram moldados considerando o empacotamento de partículas de areia rosa e as porcentagens variadas de diferentes malhas de pó de quartzo geraram os resultados que compõem a Tabela 6.

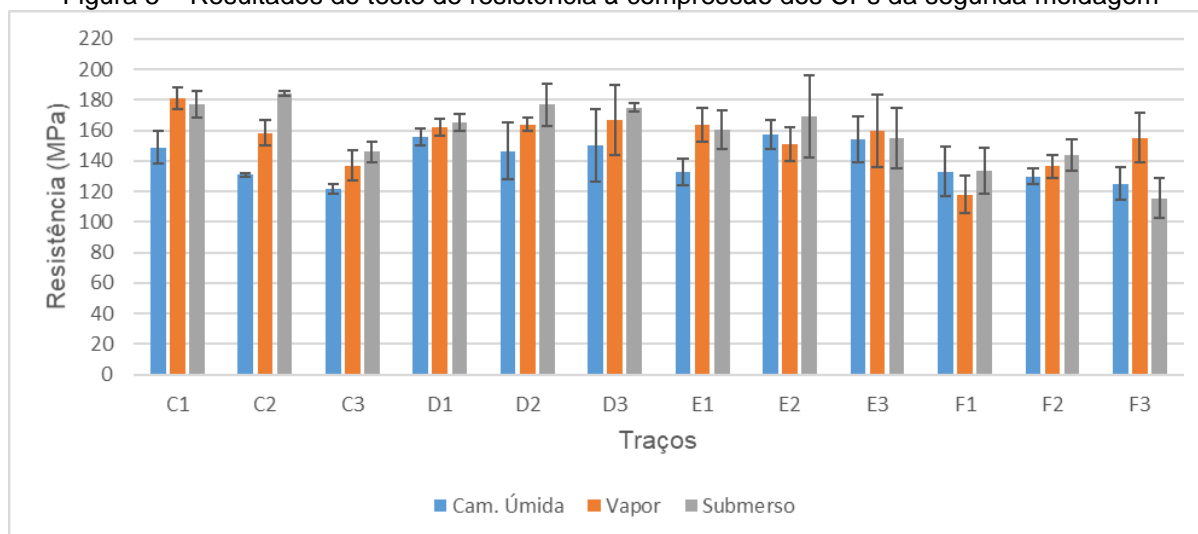
Tabela 6 – Resultados do teste de resistência à compressão com os CPs da segunda moldagem.

Traço	Cura (MPa)		
	Câmara Úmida	CT no vapor	CT por submersão
C1	148,8	180,8	177,2
C2	130,8	158,4	183,9
C3	121,71	137,0	145,8
D1	155,7	161,9	165,1
D2	146,5	164,0	176,7
D3	150,1	166,8	175,0
E1	132,9	163,5	160,3
E2	157,4	151,0	169,1

E3	154,3	160,0	155,0
F1	133,0	117,9	133,4
F2	129,9	136,4	143,9
F3	125,1	155,0	115,6

Os valores apresentados na Figura 5, representam por coluna a média de rompimento de 3 CPs do mesmo traço. Esses foram rompidos com a idade de 28 dias.

Figura 5 – Resultados do teste de resistência à compressão dos CPs da segunda moldagem



Analisando os dados da segunda etapa, não foi considerado apenas qual o resultado mais alto em apenas um tipo de cura, mas qual traço apresentou mais coerência com os resultados da primeira etapa, apresentando valores crescentes entre cura na câmara úmida, logo após por CT no vapor e posteriormente por CT por submersão. Assim, foi selecionado o traço D1 para adição de fibras. Para a etapa seguinte, mesmo sendo necessário considerar os três tipos de cura para seleção do traço, elegeu-se a cura térmica por submersão para continuação da pesquisa, pois em 8 dos 12 traços testados essa foi a cura que apresentou resultados mais altos quando comparados aos outros dois métodos.

4.3 PORCENTAGENS DE FIBRA DE AÇO

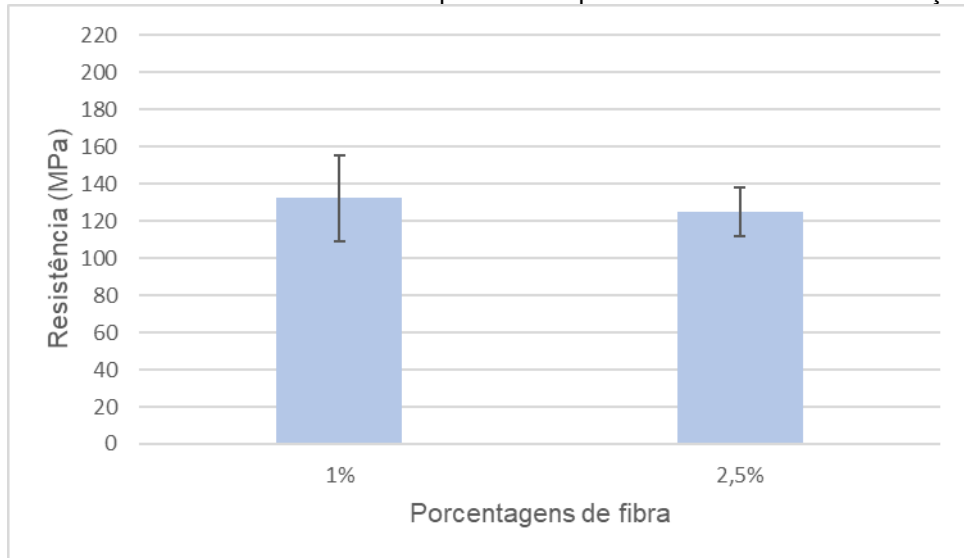
O estudo sobre a quantidade de fibras teve dois testes, o primeiro deles gerou resultados médios apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da resistência à compressão do primeiro teste com fibras de aço

Fibras	Resistência (MPa)
1,0%	132,4
2,5%	125,1

Cada coluna da Figura 6 representa a média de 3 CPs rompidos com a idade de 7 dias. O ensaio foi realizado no meio da maior dimensão do prisma 4 x 4 x 16 cm.

Figura 6 – Resultados da resistência à compressão do primeiro teste com fibras de aço



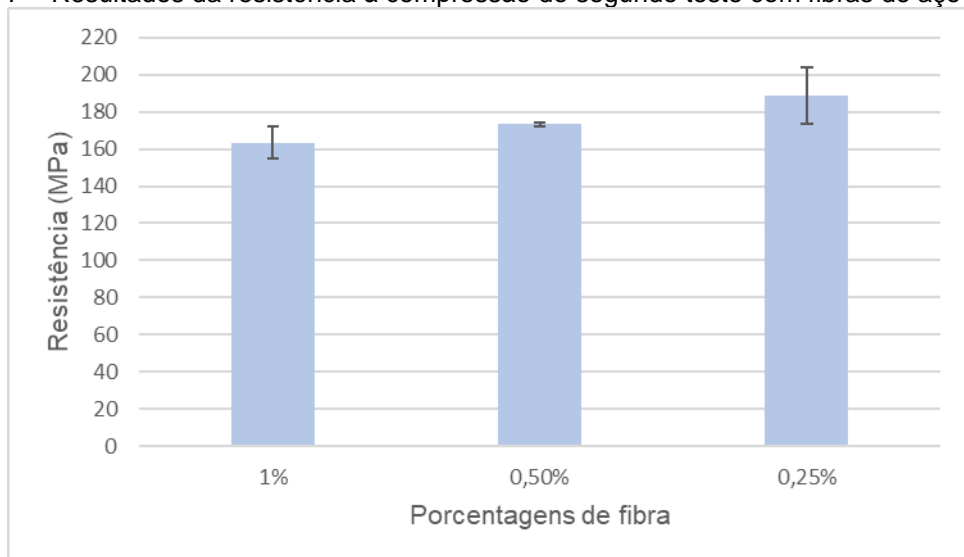
Foi observado que a resistência era maior com uma quantidade menor de fibras, o que indicou a necessidade de realizar um segundo teste, reduzindo as quantidades de fibras para 1; 0,5 e 0,25%. Os resultados do segundo teste compõem a Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da resistência à compressão do segundo teste com fibras de aço

Fibras	Resistência (MPa)
1,00%	163,3
0,50%	173,2
0,25%	188,5

Da mesma maneira que os gráficos anteriores, na Figura 7, cada coluna representa o valor médio de rompimento de 3 CPs.

Figura 7 – Resultados da resistência à compressão do segundo teste com fibras de aço



Os resultados do segundo teste confirmaram a primeira hipótese, que quanto menor a quantidade de fibras maior a resistência. Concluiu-se que teria sido necessário considerar

proporcionalidade entre o tamanho da fibra e do CP, assim uma fibra com dimensões menores poderia ser acrescentada em maiores porcentagens ao concreto produzido.

4.4 TRAÇO FINAL

O traço final, chamado inicialmente de D1, gerou os valores médios apresentados na Tabela 9 no ensaio de resistência à compressão:

Tabela 9 – Resultados da resistência à compressão do traço final

CP	Área (cm ²)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência (kgf/cm ²)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
RC1	19,6	36.400	1.855	185,5	188,5
RC2	19,6	38.800	1.981	198,2	
RC2	19,6	35.600	1.818	181,8	

Já a Tabela 10, contém os resultados médios do ensaio de resistência à tração na flexão:

Tabela 10 – Resultados da resistência à tração na flexão do traço final

Prisma	Área (cm ²)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência (kgf/cm ²)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
P1	68,4	780	11,395	1,1	1,0
P2	67,3	720	10,690	1,1	
P2	67,8	620	9,143	0,9	

4.5 RESISTÊNCIA APÓS ATAQUE DE SOLUÇÃO ÁCIDA

Os CPs tiveram a superfície deteriorada pelo ácido, o que a deixou despigmentada e com aspecto rugoso. Na Figura 8 é possível observar a sedimentação do material que constituía a superfície do CP no fundo do tanque de ensaio.

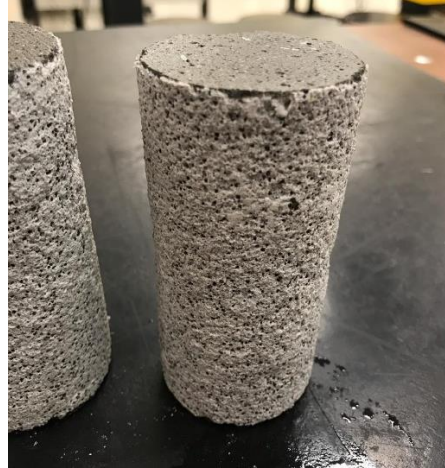
Figura 8 – Comparativo entre sedimentação de resíduos, à esquerda com 4 dias de submersão e à direita com 24 dias de submersão



Devido a isso, há redução do diâmetro do CP da base até o topo, deixando com um formato mais próximo a um cone do que a um cilindro. Após retificação da superfície circular,

é possível observar, através da Figura 9, que a matriz do CP continuava com pigmentação e aspecto semelhante aos CPs que não passaram pelo ensaio de ataque ácido.

Figura 9 – Detalhamento do desgaste superficial após submersão em solução ácida



Após o ataque de solução ácida, os CPs foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão que geraram os resultados médios apresentados na Tabela 11:

Tabela 11 – Resultados dos testes de resistência à compressão após submersão em solução ácida

CP	Idade (dias)	Diâmetro (mm)	Área (cm ²)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência (kgf/cm ²)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
AC1	7	49,50	19,2	28.800	1496,553	149,6	142,5
AC2	7	49,55	19,3	24.100	1249,798	125,0	
AC3	7	49,65	19,4	29.600	1528,845	152,9	
AC4	14	49,66	19,4	28.000	1445,622	144,6	153,6
AC5	14	48,59	18,5	30.400	1639,081	163,9	
AC6	14	48,55	18,5	28.200	1523,284	152,3	
AC7	21	48,35	18,4	23.000	1252,694	125,3	127,4
AC8	21	48,07	18,1	27.800	1531,816	153,2	
AC9	21	48,76	18,7	19.400	1038,926	103,9	
AC10	28	47,88	18,0	25300	1405,149	140,5	127,1
AC11	28	47,64	17,8	23900	1340,802	134,0	
AC12	28	47,73	17,9	19100	1067,482	106,7	

É possível deduzir que o concreto continua adquirindo resistência até o 14º dia estando submerso há 11 dias, porém a partir do 21º dia há redução da resistência devido à ação do ácido e a partir desse período há uma estabilização da resistência.

4.6 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O teste de absorção por capilaridade alcançou os resultados exibidos na Tabela 13:

Tabela 13 – Ensaio de absorção por capilaridade

Corpo de prova	Idade (dias)	Diâmetro (mm)	Área (cm ²)	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (g/cm ²)	Absorção média (g/cm ²)
1	10	49,620	19,338	462,53	462,88	0,018	0,014
2	10	49,900	19,556	460,34	460,56	0,011	
3	10	50,100	19,714	459,12	459,38	0,013	

Figura 10 – Interior do CP após rompimento por compressão diametral



Os resultados sobre absorção comprovaram a efetividade da combinação de técnicas para redução de vazios. Não foi possível visualizar a ascensão da água na parte interna do CP.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do desenvolvimento dessa pesquisa é possível afirmar que as técnicas estudadas se mostraram efetivas para otimização da resistência do concreto. A resistência alcançada foi maior que 150 MPa, que é a resistência mínima que caracteriza o CUAD. De acordo com os testes realizados chegou-se à conclusão de que houve diminuição de vazios comprovada pelo ensaio de absorção por capilaridade e pelo ensaio de submersão em solução ácida, onde a solução não conseguiu infiltrar a matriz dos corpos de provas, apenas a sua superfície. Isso devido à combinação entre as diferentes granulometrias considerando tanto as partículas de areia rosa quanto as partículas de pó de quartzo e dos tratamentos térmicos feitos na autoclave disponível no laboratório. O objetivo da pesquisa foi alcançado, foi possível produzir um concreto com resistência elevada através das técnicas levantadas no referencial teórico. É importante indicar que para as confirmações mais científicas e estudos futuros deve-se estudar a microestruturas dos concretos e suas propriedades.

6 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Especificações**. ABNT, 2007. Disponível em: abnt.org.br. Acesso em: 08 de março de 2018.

_____. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento**. ABNT, 2009.

_____. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. ABNT, 2011.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. ABNT, 1997.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. ABNT, 2011.

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. ABNT, 2012.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. **Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CUADRF): análise das propriedades mecânicas do material e especificações de projeto**. Rev. IBRACON Estrut. Mater. Vol 10 n.4 2017.

CONSTRUCAOCIVILPET. **Concreto de Ultra-Alto-Desempenho**. 21/11/2012. Disponível em: <https://civilizacaoengenharia.wordpress.com/2012/11/21/concreto-de-ultra-alto-desempenho/>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2018.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Volume 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Volume 2. São Paulo: IBRACON, 2011.

REPETTE, Wellington L. **Concreto de Última Geração: Presente e Futuro**. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. IBRACON, 2005, p 1509-1550.

TUTIKIAN, Bernardo F; ISAIA, Geraldo C.; HELENE, Paulo. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. IBRACON, 2011.

Contatos: mffariias@gmail.com, simao.prizskulnik@mackenzie.br e fabiola.beltrame@mackenzie.br