

# CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS

Paulo Gabriel Franco Martins <sup>1</sup>; Andréia Azeredo Nince <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *O concreto de ultra alto desempenho - CUAD é um concreto de elevadíssima resistência mecânica, mas extremamente frágil que demanda um seletivo grupo de materiais altamente finos, submetidos a cura térmica com temperaturas superiores a 200°C, que o torna caro, insustentável, de aplicação limitada. Por esta razão, este trabalho objetivou desenvolver com a ajuda do software EMMA um CUAD mais acessível economicamente, mais sustentável, menos frágil, empregando cura convencional (câmara úmida) e cura térmica. Foram desenvolvidos 4 traços, um de referência com cimento CP V ARI, cimento usualmente empregado na confecção de um CUAD, um traço adicionando 2,5% de fibra de aço para aumentar a tração na flexão e reduzir sua peculiar fragilidade, um traço com CP III 40 (com 35 a 70% de escória) ao invés do CP V ARI e um traço substituindo 25% do CP III 40 por pó de vidro. Os resultados de tração na flexão confirmaram a eficiência da adição de fibra de aço para aumentar a tração do material e reduzir sua fragilidade, assim como demonstrou que é possível produzir um CUAD com teores de clínquer iguais a de um concreto convencional, sem prejuízo de suas resistências mecânicas.*

## Introdução

Um avanço tecnológico ocorreu nos anos 90 com o desenvolvimento do referido Concreto Pós Reativo (CPR), classificado na categoria de Concreto de Ultra Alto Desempenho - CUAD, com resistências à compressão na faixa entre 150 a 800 MPa e à flexão superior a 25 MPa. Para as referidas resistências serem obtidas este material demanda cura térmica em temperaturas acima de 200°C, relação água/aglomerantes inferior a 0,22, alto teor de materiais silicosos ou silico-aluminosos finamente moídos, um rigoroso estudo granulométrico e a eliminação de agregados graúdos, para um melhor preenchimento do espaço intergranular para que uma micro estrutura extremamente densa seja formada, como indica Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995).

Este material exige elevado teor de cimento (> 600 kg/m<sup>3</sup>), areia fina e muito fina (normalmente quartzo), adições minerais (especialmente sílica ativa e cinzas) e aditivos superplastificantes de última geração (alta eficiência na trabalhabilidade). O elevado teor de aglomerantes (cimento + adições minerais) associado a baixa relação água/aglomerantes influenciam a cinética de hidratação, acelerando o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas, de forma que com 90 dias de idade todo o processo de hidratação chegue ao fim. Entretanto, o elevado teor de finos em sua composição dificulta atingir boa trabalhabilidade, quando comparado aos concretos convencionais e de alto desempenho.

Como se pode observar, o CUAD é um concreto de custo elevado, por esta razão, vários pesquisadores direcionaram seus estudos no emprego de materiais alternativos ao cimento Portland que apresentem altos teores de sílica e calcário em sua composição para reagirem e se transformarem em silicato de cálcio hidratado – CSH, tornando este concreto mais acessível economicamente e mais sustentável, conforme A. Oner and S. Akyuz (2007).

Segundo Zhang et al (2018) vários estudos apontam que a combinação de sílica ativa com cinza volante ou com escória, ou mesmo o uso dos três simultaneamente, reduz custo e melhoram as propriedades mecânicas do CUAD. Yazici et al (2010) apud Zhang (2018) concluíram que conforme se aumenta o teor de substituição de cimento por escória de alto forno (material cimentício de reações muito lentas), menor é o calor de hidratação, menor a retração e menor é o teor de sílica e hiperplastificante a serem utilizados, além de melhorar a fluidez do CUAD.

Segundo A. Shayan and A. Xu (2004), a utilização do pó de vidro (resíduo composto por grande quantidade de sílica amorfa que apresenta larga escala nos centros urbanos) em concreto de ultra alto desempenho – CUAD se torna viável quando finamente moído, passante na peneira #200, pois não apresenta reações álcali-agregados, além de funcionar como um material pozolânico ou mesmo cimentício.

Como mencionado anteriormente, as elevadas resistências do CUAD só são atingidas com cura térmica a temperaturas acima de 200°C, o que encarece, dificulta e limita sua utilização. Por esta razão há pesquisadores focados em desenvolver um CUAD utilizando cura convencional, como por exemplo, o trabalho de Wille et al (2012) apud Zhang (2018) que desenvolveu um CUADRF com resistência à compressão acima de 190 MPa e resistência à tração acima de 37 MPa com cura convencional (câmara úmida).

Outra questão a ser melhorada no CUAD, além do custo (redução do teor de cimento e cura térmica) e da trabalhabilidade é o fato de sua fragilidade aumentar proporcionalmente ao aumento de suas resistências mecânicas. Uma forma de se melhorar a resposta do material às deformações, incrementando ductilidade, é o uso de fibras de aço (BARBOS, 2015).

Em virtude do apresentado nos parágrafos acima, o presente trabalho visa desenvolver um concreto de ultra alto desempenho - CUAD com custo reduzido, mais sustentável, com melhor trabalhabilidade e com resistência à flexão acima de 30 MPa para vencer grandes vãos em vigas. Por isto, este estudo se propôs avaliar o uso de fibra de aço, a substituição do cimento CP V ARI, normalmente utilizado na confecção dos CUAD's, pelo cimento CP III 40 (cimento com adição de escória na faixa de 35 a 70%), o uso do pó de vidro e correlacionar as resistências mecânicas com os respectivos tipos de cura (convencional e térmica), com o intuito de reduzir custos e tornar este tipo de concreto mais sustentável e acessível ao mercado.

## **Materiais e Métodos**

Os materiais empregados foram: 1) cimento ensacado CP V ARI PLUS (Blaine de 3.413 cm<sup>2</sup>/g e massa específica de 3,1 g/cm<sup>3</sup>), cimento a granel CP III 40 (Blaine de 3.271 cm<sup>2</sup>/g e massa específica de 2,93 g/cm<sup>3</sup>) ambos da Holcim; 2) sílica ativa da Elkem (massa específica de 2,11 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária de 1,055 g/cm<sup>3</sup>); 3) areia de quartzo (granulometrias #0,60, #0,30, #0,15, #0,075, #0,04 e #0,02) da Brasil Minas (massa específica de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e a massa unitária de 1,32 g/cm<sup>3</sup>); 4) fibra de aço Dramix 3D RL 45/30BN – Belgo (massa específica de 7,8 g/cm<sup>3</sup>); 5) aditivo Tec-Flow 8800 da Grace; 6) pó de vidro da Massfix (massa específica de 2,48 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária de 1,24 g/cm<sup>3</sup>), com índice de desempenho (*ic*) de 123,8%.

Todos os materiais em pó foram caracterizados no *Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Mauá de Tecnologia*, empregando as normas: segundo NBR 16605:2017, NBR 16372:2015, NBR 5752:2014.

## **Metodologia**

O estudo de dosagem foi dividido em 4 etapas: traço de referência, traço com adição de fibras de aço, traço com substituição total do cimento CP V ARI pelo CP III 40, e traço com substituição parcial de 25% do CP III 40 pelo pó de vidro. Todo o estudo de dosagem foi realizado no *Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Mauá de Tecnologia*, empregando 3% de aditivo hiperplastificante Tec-Flow 8800.

Vale a pena comentar que inicialmente o pó de vidro foi utilizado para substituir parcialmente a sílica ativa, conforme Vaitkevičius, Šerelis, e Hilbig, (2014), porém o traço não apresentou fluidez, provavelmente devido a forma irregular dos grãos do pó de vidro, por isso decidiu-se utilizá-lo em substituição parcial ao cimento ao invés da sílica.

Os traços foram confeccionados com a ajuda do software EMMA (baseado no método de empacotamento de Andreassen modificado), programa desenvolvido para trabalhar a distribuição granulometria dos materiais com o objetivo de encontrar o melhor empacotamento possível da mistura.

Cada traço foi homogeneizado através de um misturador manual da marca Collomix, em duas bateladas para moldar 12 corpos de prova prismáticos de 7,5x7,5x25 cm para os ensaios de resistência à flexão (NBR 13279: 2005). A dimensão atípica dos corpos de prova empregados se deve ao comprimento da fibra de aço (30mm).

Os traços unitários são apresentados da seguinte forma: cimento: adição mineral: areia de quartzo: relação água/materiais pulverulentos – considerados como a soma do cimento, da sílica ativa, das areias de granulometria #0,075, #0,04 e #0,02 e do pó de vidro.

***Etapa 1 - Traço de Referência (1:0,25:2,55:0,189)*** – O traço de referência é uma versão mais econômica do traço de referência empregado nos estudos sobre CUAD para a competição COCAR do Simpósio do Ibracon no Instituto Mauá de Tecnologia, com consumo de cimento de 550 Kg/m<sup>3</sup> e consumo de água de 184L. Neste traço foram empregados os materiais usualmente utilizados na confecção de um concreto de ultra alto desempenho – CUAD (cimento CP V ARI, sílica ativa, areia de quartzo, água e hiperplastificante).

***Etapa 2 - Traço com adição de fibras (1:0,25:2,55:0,189)*** – Esta etapa adicionou 2,5% de fibra de aço em relação ao volume de concreto de referência, conforme Figueiredo (2000). Seu consumo de cimento foi de 550 Kg/m<sup>3</sup> e 184L de água.

***Etapa 3 - Traço com CP III 40 (1:0,25:2,55:0,189)*** – Nesta etapa o traço de referência sofreu substituição do cimento CP V ARI pelo CP III 40, mantendo o mesmo traço de referência. Como existia diferença entre as massas específicas, o consumo desse traço foi de 548 kg/m<sup>3</sup> e 183L de água.

**Etapa 4 - Traço com pó de vidro (1:0,25:0,25:2,55:0,189)** – Nesta etapa empregou-se o traço da 3ª etapa e substituiu parcialmente 25% do cimento CP III 40 por pó de vidro. Como existia diferença entre as massas específicas, o teor foi calculado conforme equação 1.

$$[(C_c \times 25\%) \times \gamma_w] / \gamma_c$$

(equação 1) sendo,

$C_c$  – consumo de cimento em Kg/m<sup>3</sup>.

$\gamma_w$  - massa específica do pó de vidro em g/cm<sup>3</sup>.

$\gamma_c$ - massa específica do cimento CP III 40 g/cm<sup>3</sup>.

O consumo de cimento não foi 75% do consumo original, mas sim a quantidade suficiente para garantir que o volume do traço se mantivesse constante ao traço da 3ª etapa. Seu consumo de cimento foi de 516 kg/m<sup>3</sup> e 173L de água.

Após homogeneização foram realizados os ensaios de consistência empregando uma adaptação da NBR 13276:2016 e o ensaio de determinação da massa específica e ar incorporado – NBR 13278:2005. Após a respectiva caracterização de cada traço no estado fresco, os corpos de prova eram moldados.

Os corpos de prova foram desmoldados 24h após sua moldagem e armazenados em câmara úmida até o dia dos respectivos ensaios (7, 28 dias). No terceiro dia de idade, conforme Halit Yazıcı, et al (2010), dos 12 prismas totais moldados em cada traço, retirava-se da câmara úmida 3 prismas para realizar cura térmica com duração de 72h em banho maria à 90°C.

É importante comentar que ao longo do estudo comprovou-se que a cura em estufa a 200°C prejudicava os resultados de tração na flexão em até 57% quando comparado à cura convencional em câmara úmida. Segundo Barbos (2015), isso ocorre devido a fragilização excessiva que as temperaturas iguais ou superiores a 200°C causam nos CUAD. A estas temperaturas a água interlamelar do C-S-H é eliminada, devido a promoção da densidade dos cristais de C-S-H metamorfizados, gerando microfissuras em sua estrutura. Por esta razão optou-se por fazer uma cura térmica e úmida, como o banho maria a 90°C.

Ao término das 72h de cura térmica, os prismas eram retirados do banho maria e armazenados de volta na câmara úmida até o sétimo dia de idade, onde eram ensaiados à tração na flexão (NBR 13279: 2005).

Os ensaios de 7 dias e 28 dias com e sem cura térmica, de resistência a tração na flexão foram realizados no *Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Mauá de Tecnologia*.

Dos 6 prismas restantes em câmara úmida, após ensaios de 7 dias de idade, retirou-se 3 prismas para sofrerem cura térmica por 72h, conforme procedimento descrito anteriormente.

## **Resultados e discussões**

Nesse estudo a relação água/materiais pulverulentos (*cimento, sílica, areia #0,075, #0,04 e #0,02, pó de vidro*) e o teor de aditivo foram mantidos iguais em todos os traços, ou seja, esperava-se consistências semelhantes entre as quatro etapas.

Pela Tabela 1 observa-se que o traço com pó de vidro apresentou a menor massa específica e a menor fluidez dos quatro traços estudados, superando o traço com fibra de aço. A baixa fluidez pode ser justificada pela irregularidade dos grãos que dificulta o deslocamento dos grãos da mistura. O traço que apresentou maior fluidez foi o de referência, provavelmente devido a maior finura do cimento CP V. A finura e o formato dos grãos de cimento funcionam como um lubrificante para a mistura. É importante comentar que os traços foram confeccionados em diferentes dias, com diferentes temperaturas e umidades ambientes.

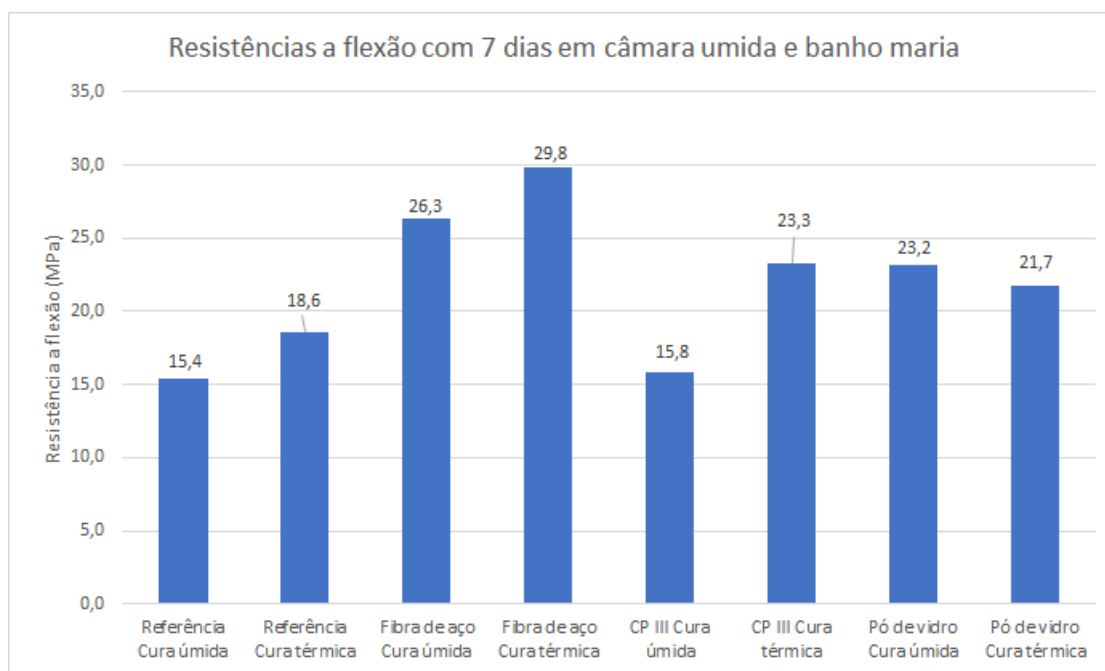
Tabela 1 – Características do concreto no estado fresco

Traço	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Ensaio – Flow Table – média (mm)		
		Flow0	Flow15	Flow30
Referência	2,296	270	290	310
Fibra de aço	2,530	260	265	290
CP III	2,285	270	290	300
Pó de vidro	2,192	250	260	265

O teor de ar incorporado dos traços estudados apresentou valores inconsistentes, por esta razão não serão apresentados.

É importante comentar que os resultados de consistência demonstraram que mesmo com relações água/materiais pulverulentos muito baixas ( $< 0,20$ ) pode-se atingir boa fluidez, o que facilita e muito sua aplicação.

Figura 1 – Resistências a tração na flexão em 7 dias

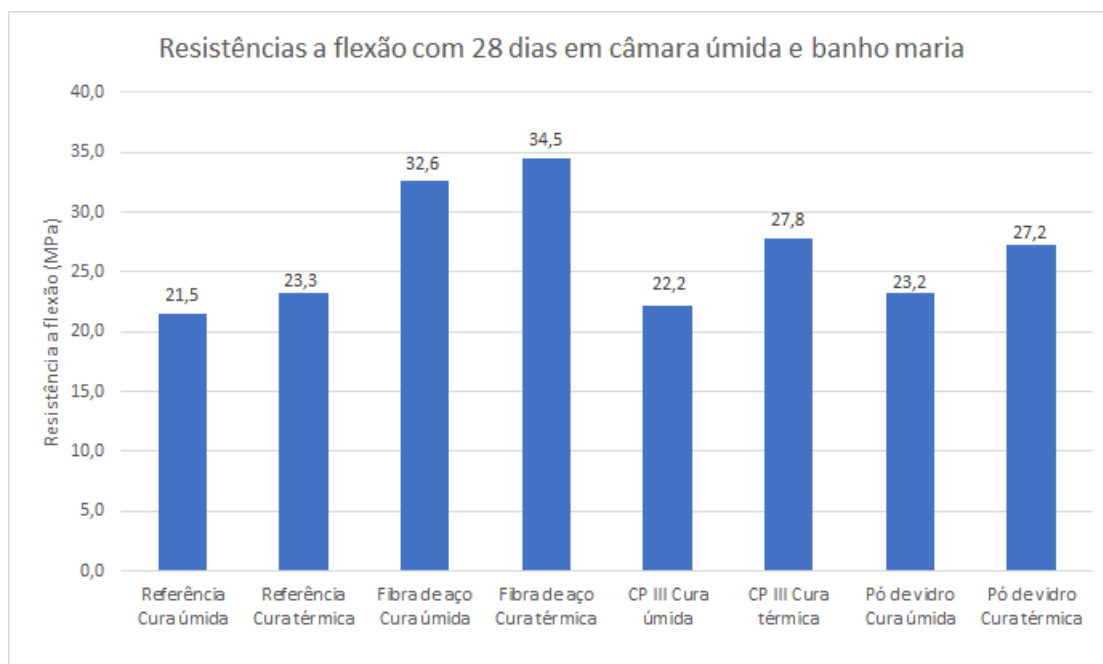


A Figura 1 apresenta os resultados do ensaio de tração na flexão aos 7 dias, onde se observa a influência da cura térmica (banho maria a 90°C) nos resultados, com exceção do traço

com pó de vidro. Nota-se que os resultados com cura térmica apresentaram um acréscimo de 20,7% para o traço de referência, 13,3% para o traço com fibras de aço e 47,4% para o traço com CP III 40 em comparação aos valores obtidos com cura convencional (câmara úmida).

É importante comentar que o baixo resultado obtido com cura úmida do traço com CP III 40 aos 7 dias de idade, provavelmente é devido a alguma falha laboratorial, pois o traço com pó de vidro também foi confeccionado com o cimento CP III 40 e não apresentou tal diferença entre os tipos de cura.

Figura 2 – Resistência a tração na flexão em 28 dias



É importante salientar que o traço com pó de vidro com cura úmida aos 28 dias de idade, apresentou resistência à tração na flexão inferior ao encontrado com 7 dias, por esta razão na Figura 2 o valor adotado foi o mesmo encontrado com 7 dias, desconsiderando o menor valor encontrado aos 28 dias.

Como esperado, o maior resultado à tração na flexão foi o traço com fibra de aço em cura térmica e foi próximo ao valor mencionado por Barbos (2015), de 34,52 MPa (Figura 2).

Como se pode observar nas Figuras 1 e 2, o traço de referência foi o que apresentou os menores resultados a tração na flexão, indicando que a substituição do cimento CP V ARI pelo cimento CP III 40 é totalmente viável e preferível, pois além de aumentar as resistências, especialmente com cura térmica, ele é mais barato e mais sustentável do que o cimento CP V ARI.

Pela Figura 2 é possível afirmar que o pó de vidro pode ser utilizado sem prejuízo das resistências, pois sua resistência foi semelhante à do traço com CP III 40, no caso da cura térmica. Nada pode se concluir com os resultados da cura úmida.

## **Conclusões**

O uso de 2,5% de fibra de aço aumentou em 50% a resistência à tração na flexão, conforme literatura pesquisada.

É possível produzir CUAD com boa trabalhabilidade, de fácil manuseio e aplicação.

O uso do cimento CP III 40 e o pó de vidro em substituição ao cimento CP V ARI se mostraram totalmente viáveis e recomendável.

A substituição do cimento CP V ARI (95% de clínquer) por escória de alto forno e pó de vidro, indicou que é possível reduzir o consumo de clínquer de um CUAD para patamares inferiores aos empregados no concreto convencional, sem prejuízo de suas resistências.

Acredita-se também que é possível produzir um CUAD, empregando areia de quartzo comum utilizada em concretos convencionais e de alta resistência, sem afetar suas propriedades mecânicas, reduzindo substancialmente seu custo.

Por esta razão sugere-se novas pesquisas que foquem teores maiores de substituição do cimento CP V ARI por adições minerais alternativas e a substituição da areia de quartzo especial (com granulometria definida e separada) por areia de quartzo comum, empregada na confecção de concretos convencionais e de alto desempenho.

## **Referências Bibliográficas**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, 2017.

\_\_\_\_\_ NBR 16372: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar de cimento Portland, 2015.

\_\_\_\_\_ NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, 2014.

\_\_\_\_\_ NBR 13279: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, 2005.

\_\_\_\_\_ NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, 2016.

\_\_\_\_\_ NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, 2005.

A. Oner and S. Akyuz, An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 6, pp. 505-514, 2007.

A. Shayan and A. Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 1, pp. 81-89, 2004.

Barbos, G.-A. (2015). Long Term Bending Behavior of Ultra-High Performance Concrete (Uhcp) Beams. *Constructii*, 16(2), 45–52.

Figueiredo, A. D. (2000). Antônio Domingues de Figueiredo.

Halit Yazici, Mert Y. Yardumci, Huseyin Yigitler, Serdar Aydin, Selcuk Turkel. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 32 (2010): 639-648.

Kay Wille, Antoine E. Naaman, Sherif El-Tawil, Gustavo J. Parra-Montesinos. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, 2012.

Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995) Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, 25, 1501-1511.

Vaitkevičius, V., Šerelis, E., & Hilbig, H. (2014). The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 102–109.

Yiğiter, H., Yazıcı, H., & Aydin, S. (2007). Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete. *Building and Environment* (Vol. 42).

Zhang, P., Huang, Y., Li, Y., Zhao, J., Dong, H., & Chen, T. (2018). Influence Factors on the Properties of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Cured under the Condition of Room Temperature, 2018.