Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRANSIÇÃO SUSPENSÃO-SÓLIDO (TEMPO ZERO) EM MICROCONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO POLÍMERO SUPERABSORVENTE E NANOSSÍLICA

T. A. CUNHA E SANTOS
Engª. Civil - Aluna de mestrado PECC/UnB
Universidade de Brasília
Distrito Federal; Brasil
thyalacunha@unb.br

L. A. GIMENEZ AIDAR
Aluno de graduação ENC/UnB
Universidade de Brasília
Distrito Federal; Brasil
luis.augusto_aidar@hotmail.com

J. G. BORGES
Aluna de graduação ENC/UnB
Universidade de Brasília
Distrito Federal; Brasil
juliana.gborges@hotmail.com

P. FRANCINETE JÚNIOR
Eng. Civil MSc. - Aluno de doutorado PECC/UnB
Universidade de Brasília
Distrito Federal; Brasil
francinetejr@gmail.com

E. FONSECA DA SILVA
Engª. Civil - Professora DSc.
PECC/UnB
Universidade de Brasília
Distrito Federal; Brasil
eugenia@unb.br

RESUMO

A retração autógena é um fenômeno que ocorre devido ao surgimento de tensões de tração nos poros capilares. É inerente ao processo de hidratação, não dependendo de interferência externa. Em Concretos de Alta Resistência (CAR), a retração autógena é mais pronunciada, devido ao refinamento da microestrutura, o elevado consumo de cimento, o uso de adições minerais e baixa relação água/cimento, que dificultam o transporte da água de cura. Neste contexto, os Polímeros Superabsorventes (PSA) destacam-se pela capacidade de reduzir ou até eliminar a retração autógena, pois absorvem grandes quantidades de água, que posteriormente é liberada no interior da pasta, evitando a autodessecação e o surgimento das tensões de tração (cura interna). No entanto, o PSA pode reduzir a resistência mecânica, que pode ser compensada pela adição de nano partículas, como a nanossílica (NS). Neste trabalho, avaliou-se a interferência destas adições no tempo de transição suspensão-sólido, ou Tempo Zero (T_0). O Tempo Zero determina o momento em que o material passa a se comportar como sólido, com a formação de um esqueleto mineral suficientemente rígido para se opor às variações volumétricas que ocorrem na pasta, o que pode levar à fissuração, comprometendo a estética, durabilidade e segurança das estruturas de concreto. A determinação do T_0 foi realizada por meio de ensaio de ultrassom, onde mede-se a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica no material, e é tido como o momento em que ocorre uma mudança brusca nesta velocidade. Foram realizadas nove misturas contendo PSA e NS, onde verificou-se que a adição de PSA aumenta o valor do T_0, enquanto a NS faz com que seu valor seja reduzido.
Palavras-chave: tempo zero; concreto de alta resistência; polímero superabsorvente; nanossílica.

ABSTRACT

The autogenous shrinkage is a phenomenon that occurs due to the appearance of tensile stresses in capillary pores. Inherent in the hydration process, not depending on external interference. In High Strength Concretes (HSC), autogenous shrinkage is most pronounced, due to the refinement of the microstructure, high cement content, the use of mineral additions and low water/cement ratio, which hinder the transport of curing water. In this context, superabsorbent polymers (SAP) stand out for their ability to reduce or even eliminate the autogenous shrinkage, because they absorb large amounts of water, which is subsequently released within the paste, avoiding auto desiccation and the appearance of tensile stresses (internal curing). However, PSA can reduce the mechanical resistance, which can be compensated by adding nanoparticles such as nanosilica (NS). In this work, was evaluated the effect of these additions in suspension-solid transition time, or Setting Time (T_0). The setting time determines the time at which the material starts to behave as a solid, with the formation of a sufficiently rigid mineral skeleton to oppose the volumetric variations that happen in the paste, which can lead to cracking, compromising the esthetics, durability, and security of concrete structures. The determination of T_0 was done by the ultrasonic test, which measures the speed of propagation of an ultrasonic wave in the material, and is taken as the point in time when a sudden change in this speed. Nine blends were made containing PSA and NS, where it was verified that the addition of PSA increases the value of T_0, while the NS causes a reduction in this value.
Keywords: setting time; high strength concrete; superabsorbent polymer; nanosilica.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

INTRODUÇÃO

Na década de 1970, quando a resistência à compressão dos concretos utilizados em pilares de alguns edifícios de grande altura foi maior do que o habitual, considerou-se legítimo chamar este material de "concreto de alta resistência" (CAR). Confeccionar concretos com adequada trabalhabilidade usando baixas relações água/cimento (a/c), com o uso das chamadas superpozolanas, como sílica ativa e metacaulim, e elevados consumos de cimento é uma tarefa complexa. A razão para isto é que, com o aumento da resistência à compressão, as propriedades do concreto não são mais governadas exclusivamente pela relação a/c, parâmetro essencial para concretos usuais em virtude da porosidade da pasta de cimento hidratado [1].

Nos concretos de alta resistência, o alto consumo de cimento, a baixa relação a/c e as adições minerais altamente reativas causam um refinamento dos poros devido à maior presença de produtos de hidratação, o que densifica a microestrutura, aumentando a demanda de água e potencializando a autodessecação, o que resulta em maiores níveis de retração autógena e fissuração nestes concretos [2].

Desde o final da década de 90, têm sido estudadas técnicas e estratégias mitigadoras da retração autógena, destacando-se o uso de materiais absorventes saturados em água capazes de promover a cura interna. Estes materiais são chamados de agentes de cura interna, pois atuam fornecendo água aos capilares à medida que avança a hidratação do cimento, evitando assim o surgimento das tensões de tração responsáveis pela retração autógena. [3].

Uma alternativa mais recente para a cura interna foi proposta por Jensen e Hansen [4], e consiste na adição de partículas poliméricas superabsorventes e finas (Polímeros Superabsorventes - PSA) ao concreto. Estes polímeros absorvem enormes quantidades de água e, posteriormente, a libera no interior da pasta de cimento, fornecendo água necessária para a matriz circundante e mitigando, ou até mesmo eliminando a autodessecação.

No entanto, diversos estudos verificaram que o PSA, durante o processo de dessorção, deixa vazios na pasta de cimento, que acabam por prejudicar a resistência mecânica destes materiais [5], [6], [7], [8], [9], [10], [3], [11]. Para promover a compensação desta perda de resistência gerada, propõe-se o uso de nano partículas de sílica, uma vez que este material é reconhecido no meio técnico devido à sua capacidade de melhoria das propriedades mecânicas.

Com o propósito de se analisar o efeito destas duas adições na retração autógena faz-se necessário que se conheça o tempo zero, idade em que ocorre a transição do estado de suspensão para o estado sólido, haja vista que a retração apenas provoca fissuração após essa transição. Para isso, dispõe-se da metodologia do pulso ultrassônico utilizada por Silva [12].

1.1 Objetivos

Determinar o tempo zero de microconcretos contendo polímeros superabsorventes (PSA) e nanossílica (NS) pela metodologia do ultrassom para balizar o início da determinação experimental da retração autógena.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2 A retração autógena

A retração autógena é a deformação autônoma de uma pasta de cimento, argamassa ou concreto, durante o endurecimento. Em concretos tradicionais, a deformação autógena é insignificante quando comparado com a retração por secagem. Já nos CARs, a baixa relação água/aglomerante (a/ag) e as adições minerais causam uma queda significativa da umidade relativa interna da pasta de cimento durante a hidratação, mesmo selado. A retração autógena um fenômeno intimamente relacionado com a mudança da umidade. Esta retração resulta no surgimento de tensões de tração na pasta de cimento, que pode resultar no aparecimento de micro ou macrofissuras, prejudicando a qualidade do concreto e o desempenho da estrutura. A retração autógena é um fenômeno conhecido desde o início do século 20, mas a sua importância prática só foi reconhecida nos últimos anos [13].

Segundo o mecanismo da depressão capilar, a retração autógena acontece quando, em um capilar não saturado completamente, a fase líquida é tracionada devido à criação de um menisco na interface líquido-gás, o que induz uma pressão negativa nas paredes dos capilares, tendendo a aproximá-la. A resposta a essa compressão é a retração macroscópica observável, denominada retração autógena [12].

1.3 Polímero superabsorvente

Os polímeros superabsorventes (PSAs) são um grupo de materiais poliméricos sintéticos que têm a capacidade de absorver uma quantidade significativa de líquido a partir do ambiente e de reter este líquido dentro da sua estrutura sem se dissolver. São utilizados principalmente para a absorção de água e soluções aquosas. Cerca de 95% da produção mundial de PSA é para uso como absorvente de urina em fraldas descartáveis. Os PSAs podem apresentar uma absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso. No entanto, em soluções salinas diluídas, a capacidade de absorção dos produtos comerciais é de aproximadamente 50 g/g [4].

Na prática da engenharia, os PSAs são, na sua maioria, poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados. Na indústria, apenas PSA baseados em ácido poliacrilato reticulado são usados. [14]. Na Figura 1 é mostrado um apartícula esférica de PSA, nos estados seco e saturado, e a representacao da estrutura molecular deste polímero.

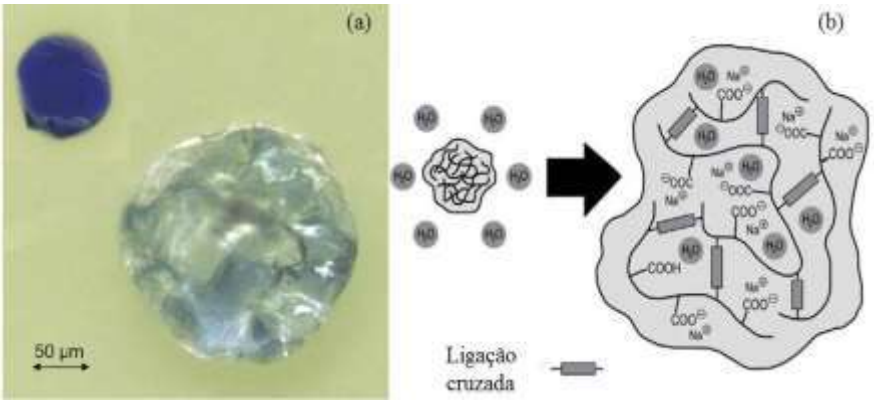

Figura 1: (a) Partícula esférica de PSA, colorida com tinta azul, nos estados seco e saturado [15]. (b) Representação de uma partícula de PSA a base de poliacrilato, nos estados seco e saturado [14].

Durante a mistura do concreto, partículas de PSA absorvem uma grande quantidade de água e formam macro-inclusões contendo água livre. Esta água livre é consumida durante a hidratação do cimento, à medida que a umidade relativa do concreto reduz (UR<100%), promovendo a cura interna. Devido ao pequeno tamanho das partículas, a sua alta absorção de água e uma boa distribuição no volume, o PSA pode ser muito eficiente na cura interna do concreto de alta resistência [16].

Resultados comprovando a eficácia do uso do polímero superabsorvente (PSA) na mitigação da retração autógena também podem ser encontrados nos estudos feitos por Igarashi e Watanabe [17], Mechtcherine [16] e Craeye e Schutter [18], dentre outros.

Em relação à resistência à compressão é sabido que o uso de partículas superabsorventes na mistura cria, em longo prazo, uma série de vazios no concreto, devido à redução do volume das mesmas (que antes estavam inchadas e, com a perda de água, voltam ao tamanho natural), sendo assim, é natural que haja uma perda na resistência final. A questão a se analisar é saber até que ponto tal perda é admissível.

Diversos autores relatam um aumento do tempo de pega devido à adição de polímero superabsorvente. Segundo eles, o atraso no tempo de pega devido ao PSA pode estar relacionado com um aumento das partículas floculadas de cimento, ao mesmo tempo em que o acréscimo de água para cura interna provoca o afastamento das partículas de cimento umas das outras [8], [19], [9], [6].

1.4 Nanossílica

Nas últimas décadas, nota-se um interesse cada vez maior na utilização de adições minerais incorporadas ao material cimentício, pois além de economizar energia e preservar recursos naturais, proporcionam vantagens técnicas ao produto final. As vantagens da utilização de adições minerais podem ser atribuídas ao aumento de propriedades tecnológicas, à

redução do consumo de clínquer, à diminuição no impacto ambiental através de menor desperdício, além da redução da emissão de CO_2 dos fornos de cimento [20], [21].

A nanossílica (NS) é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ou adição ao cimento tem acarretado melhoria da resistência dos materiais cimentícios e no aumento da resistência à penetração de água, o que influencia fortemente na durabilidade do concreto. Esse material demonstra ser mais eficiente no ganho de resistência do que a sílica ativa, ou microssílica. Além de proporcionar o efeito fíler para melhorar a microestrutura de concretos e argamassas, também funciona como um ativador para a reação pozolânica e como pontos de nucleação, contribuindo para a hidratação do cimento. Esse comportamento leva a uma melhora na microestrutura devido ao refinamento dos poros, o que melhora as propriedades mecânicas dos concretos e argamassas [22].

Segundo Sobolev e Sanchez [23], a ação benéfica das nano partículas na microestrutura e no desempenho de materiais à cimentícios pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- Quando bem dispersas, aumentam a viscosidade da fase líquida, ajudando na suspensão dos grãos de cimento e dos agregados, e melhorando assim a resistência à segregação;
- Preenchem os espaços vazios que existem entre os grãos, tornando a mistura mais densa (efeito fíller);
- A nanossílica age como centros de cristalização durante a hidratação do cimento, acelerando-a;
- Favorecem a formação de pequenos grupos uniformes de silicato de cálcio hidratado;
- Melhoram a zona de transição, fortalecendo a ligação entre agregado e pasta.

A adição de aglomerados de nanossílica leva a uma aceleração da hidratação do cimento. Tal conclusão pode ser analisada na Figura 2, a qual demonstra que as curvas do calor de hidratação para todas as pastas estudadas pelo autor apresentam estágios típicos, ou seja, a fase inicial de hidratação, a indução, o período de aceleração e a fase de desaceleração da reação de hidratação. Nota-se que as misturas contendo NS apresentam uma redução considerável no tempo necessário para atingir o pico de temperatura, que está diretamente relacionado com a velocidade de hidratação dos compostos [24].

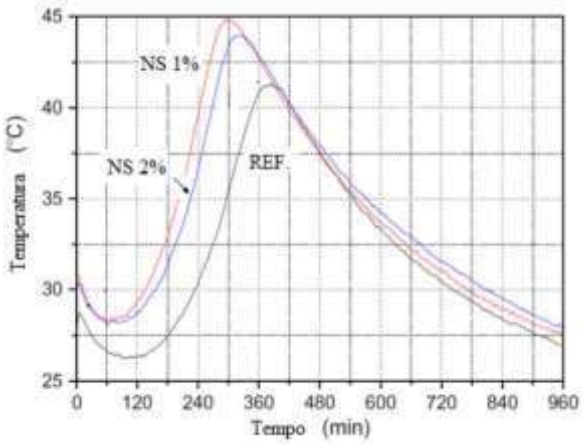

Figura 2: Resultados da calorimetria em pastas de cimento com nanossílica, a/c = 0,30 [Adaptado, 24]

1.5 Tempo zero

O Tempo zero (T_0) é o instante no qual as tensões passam a ser suportadas pelo esqueleto rígido formado no concreto, caracterizando a transição do estado de suspensão para o estado sólido. Alguns autores definem este instante como "patamar de percolação". O tempo zero é a duração entre o instante em que a água entra em contato com o cimento até o momento no qual a mistura desenvolve uma estrutura suficientemente rígida para se opor ao movimento e permitir transferência de tensões de tração através do concreto [12].

Os grãos sólidos de cimento, anteriormente isolados na fase suspensão, começam a ter contato entre si à medida que os produtos de hidratação vão sendo formados em torno desses grãos. Esses contatos são aleatórios, descontínuos no volume e vão formando subconjuntos sólidos ligados continuamente, denominados amas. O momento em que o primeiro caminho que atravessa o conjunto do material é estabelecido constitui o tempo zero, o que significa que o concreto passa a receber tensões [12]. A Figura 3 ilustra o fenômeno.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

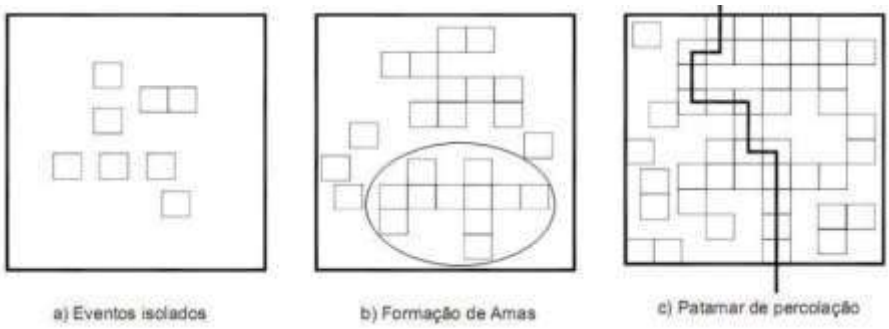

Figura 3: Esquema do conceito de patamar de percolação [adaptado, 12].

Este trabalho partirá da ideia de se utilizar o conceito de "tempo zero" (que também pode ser chamado, simplesmente, de T_0) para se iniciar as determinações de retração autógena. As medidas de retração somente devem ser realizadas em concretos que já demonstram, em sua estrutura, uma solidez aparente. Por não possuir rigidez suficiente para que consiga enfrentar as possíveis variações de volume, as tensões de tração no microconcreto fluido não são significativas.

É notável a existência de diferentes definições de tempo zero, o que cria dificuldade quando comparados resultados de pesquisas distintas. Alguns teóricos manifestam a necessidade de determinação do T_0 e seu emprego para que seja possível a determinação das deformações que ocorrem pela retração autógena. Outros acreditam que se possa determiná-lo partindo do tempo de pega calculado por meio da pasta normal, utilizando-se do aparelho de Vicat [9].

Apesar de não ser normatizada, a técnica da propagação da onda ultrassônica é cada vez mais usada para a determinação do tempo transicional entre estado fluido e sólido, esta técnica se configura com a mudança de velocidade destas ondas ultrassônicas com o tempo de pega e endurecimento da argamassa.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi realizado no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia (GO), para determinação do tempo zero utilizando a técnica dos pulsos ultrassônicos nos microconcretos de alta resistência estudados.

1.6 Misturas estudadas

O programa experimental é composto de nove misturas de microconcretos de alta resistência, todas com relação a/c igual a 0,30. São elas: uma mistura de referência (REF), duas misturas com teores de 0,2% e 0,3% de polímero superabsorvente (PSA02 e PSA03), duas misturas contendo teores de 1 e 2% de nanossílica (NS1 e NS2), e quatro misturas contendo a combinação destas duas adições (PSA02-NS1, PSA02-NS2, PSA03-NS1 e PSA03-NS2), conforme mostrado na Tabela 1. O teor de superplastificante (SP) de cada mistura foi determinado experimentalmente no Laboratório de ensaios de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB), de forma a conseguir um espalhamento de 190±10mm, determinado conforme a norma DIN 18555-2 [25], segundo as recomendações da RILEM [26].

Tabela 1: Misturas confeccionadas nesta pesquisa

Microconcreto	Teor PSA (%)	Teor NS (%)	Teor de SP (%)
REF	0	0	2,6
PSA02	0,2	0	3,0
PSA03	0,3	0	3,2
NS1	0	1	3,0
NS2	0	2	3,5
PSA02-NS1	0,2	1	3,2
PSA02-NS2	0,2	2	3,5
PSA03-NS1	0,3	1	3,5
PSA03-NS2	0,3	2	3,9

ISSN 2448-1459

A composição do microconcreto de referência com relação a/c = 0,30 foi sugerida pelo comitê organizador TC 225-SAP [26] para realização dos ensaios interlaboratoriais propostos pelo mesmo, e está apresentada na Tabela 2. A relação a/c estabelecida de 0,30 é usual para concretos de alta resistência.

Tabela 2: Composição do traço da mistura de referência.

Componente	Consumo (Kg/m^3)
Cimento CP V ARI	700,0
Sílica Ativa (10% em relação à massa do cimento)	70,0
Agregado miúdo – Areia lavada de rio (SSS)	1340
Água (relação a/c = 0,30)	210,0
Ar	20,0

1.7 Confecção dos microconcretos

A composição dos microconcretos estudados é mostrada na Tabela 3. A NS foi utilizada em adição ao cimento.

Tabela 3: Composição das misturas estudadas.

Traço	Materiais Secos (Kg/m³)				Nanossílica				Água (Kg/m³)			SP	
	Cimento	Sílica Ativa	Areia	PSA	Teor total (%)	Peso total (kg/m³)	Teor pura (%)	Peso pura (kg/m³)	Água	Água NS (–)	Água PSA (+)	Teor (%)	Peso (kg/m³)
REF	700	70	1340	-	-	-	-	-	210	-	-	2,6	18,2
PSA02	700	70	1340	1,4	-	-	-	-	210	-	21,0	3,0	21,0
PSA03	700	70	1340	2,1	-	-	-	-	210	-	31,5	3,2	22,4
NS1	700	70	1340	-	3,3	23,4	1	7	210	16,4	-	3,0	21,0
NS2	700	70	1340	-	6,7	46,7	2	14	210	32,7	-	3,5	24,5
PSA02-NS1	700	70	1340	1,4	3,3	23,4	1	7	210	16,4	21,0	3,2	22,4
PSA02-NS2	700	70	1340	1,4	6,7	46,7	2	14	210	32,7	21,0	3,5	24,5
PSA03-NS1	700	70	1340	2,1	3,3	23,4	1	7	210	16,4	31,5	3,5	24,5
PSA03-NS2	700	70	1340	2,1	6,7	46,7	2	14	210	32,7	31,5	3,9	27,3

1. Adotou-se o valor de 15g/g para a absorção do PSA (água adicional de cura interna);
2. A NS utilizada é uma solução coloidal com 30% de sólidos, logo foi necessário adicionar uma quantidade superior para atingir os teores desejados, bem como descontar a quantidade de água;
3. A areia foi utilizada na condição Saturada Superfície Seca (SSS), e sua umidade superficial foi determinada pelo método do Frasco de Chapman em cada mistura, fazendo as devidas correções;
4. O teor de SP foi determinado experimentalmente até se obter o espalhamento desejado.

O roteiro de mistura para a produção dos microconcretos é baseado nas recomendações do Comitê TC 225-SAP [26] para realização dos ensaios interlaboratoriais. Na Tabela 4 é apresentada a sequência de colocação dos materiais na betoneira e os tempos de mistura.

Tabela 4: Roteiro de mistura dos microconcretos.

Tempo (minutos)	Ação	Duração da etapa
-4:00 – 0:00	Homogeneização dos componentes secos (incluso o PSA)	4 min.
0:00 – 1:00	Adição de água, incluindo o SP e a NS pré-dissolvidos	1 min.
1:00 – 4:00	Mistura inicial	3 min.
4:00 – 5:00	Raspagem dos materiais presos na parede/pás do misturador	1 min.
5:00 – 8:00	Mistura final	3 min.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Os microconcretos foram misturados em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 320 litros (Figura 4), porém, devido ao pequeno volume de material utilizado (45 litros), a betoneira foi utilizada sempre próxima a sua capacidade mínima.



Figura 4: Fabricação dos microconcretos: (a) armazenagem dos materiais secos; (b) mistura dos materiais secos; (c) mistura dos materiais líquidos (NS e SP) na água; (d) adição da solução aos materiais secos; (e) mistura finalizada.

1.8 Moldagem do corpo de prova

As dimensões adotadas para o corpo de prova destinado ao ensaio de pulso ultrassônico foram tais que a seção transversal do corpo de prova fosse de 150 mm por 150 mm e seu comprimento longitudinal fosse de 300 mm. Além disso, a forma, confeccionada em chapas de compensado de madeira, apresenta um furo em cada uma de suas faces laterais de menor seção, tendo este 50 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram moldados em três camadas, adensados manualmente com 30 golpes do soquete padrão do ensaio de espalhamento. Então, os corpos de prova foram lacrados dentro da forma com filme de PVC e fita adesiva, de forma a evitar a perda de água, e então levados para sala climatizada onde foram acoplados ao equipamento para realização do ensaio.

1.9 Determinação experimental do tempo zero

Segundo Reinhardt [27], os primeiros ensaios utilizando o método do pulso ultrassônico para determinação da pega dos concretos foram propostos por Casson e Domone em 1982. Os autores usaram o método para mostrar a influência da temperatura e dos aditivos no tempo de pega. Também apresentam uma correlação razoável entre a derivada da velocidade do pulso ultrassônico (em relação ao tempo) e a máxima velocidade da reação de hidratação.

A metodologia para determinar o tempo zero utilizado nesta pesquisa foi proposta por Silva [12], sendo utilizada como referência a norma ABNT NBR 8802:2013 [28.] A finalidade do ensaio é determinar a velocidade propagação de uma onda ultrassônica através do tempo necessário para que a mesma percorra uma distância conhecida. O ensaio é realizado nas primeiras 48 horas após a moldagem, a partir do momento de adição da água. O procedimento de ensaio é descrito a seguir:

- Fabricar o concreto com ambiente e materiais constituintes na temperatura (21 ± 2 ºC);
- Aferir o equipamento usando a barra de referência que acompanha o aparelho, com tempo de trânsito conhecida;
- Colocar uma camada de gel de silicone nas faces dos transdutores, para garantir contato contínuo com o concreto;

- Acoplar o receptor e transmissor nos furos existentes nas laterais da forma, de modo a facear a forma internamente, proporcionando um arranjo com transmissão direta do pulso elétrico em onda de choque;
- Moldar o corpo de prova em forma prismática, com seção transversal de 150 mm x 150 mm e comprimento de 300 mm, adensado manualmente com soquete do cone de Abrams, em três camadas de 30 golpes cada;
- Cobrir a superfície exposta com filme plástico e fita adesiva, evitando a fuga de água;
- A aquisição dos dados de velocidade de propagação da onda longitudinal, durante as primeiras 48 horas após a moldagem. O intervalo entre as leituras é de 3 minutos;
- Traçar a curva velocidade de propagação versus idade do concreto.
- O patamar de percolação (tempo zero) é assumido como sendo a idade do concreto onde houve um aumento brusco na velocidade de propagação da onda ultrassônica.

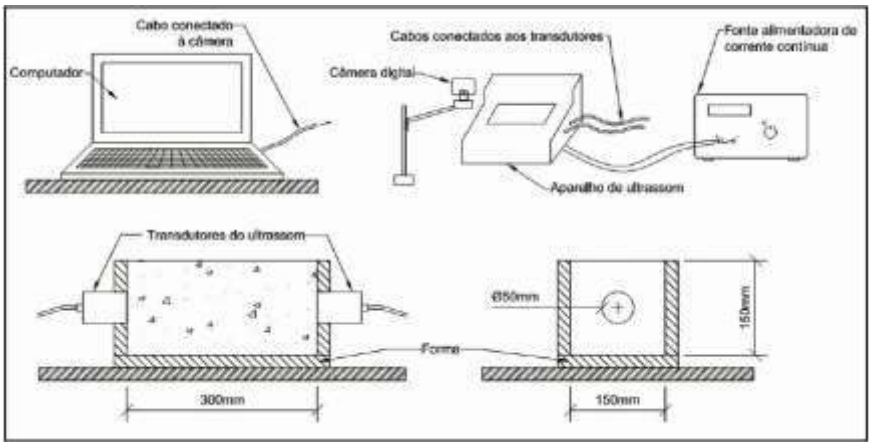

Figura 5: Esquema ensaio de determinação do Tempo Zero (T_0) pelo método do pulso ultrassônico [29]

RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado fresco e o ensaio e determinação do tempo zero das misturas estudadas. As propriedades mecânicas, bem como a retração autógena, serão apresentadas em trabalhos posteriores.

1.10Propriedades no estado fresco

Os ensaios realizados para a caracterização dos microconcretos no estado fresco foram: a determinação do espalhamento pelo método do tronco de cone segundo a norma DIN 18555-2;1982 [25] e segundo a norma ABNT NBR 13276:2005 [30], ambos sem golpes da mesa; penetração de cone, segundo a Norma ASTM C780:2014 [31]; determinação do teor de ar aprisionado pela Norma ANBT NBR NM 47:2002 [32], densidade no estado fresco de acordo com a Norma ABNT NBR 13278:2005 [33] e tempo zero. Na Tabela 5 é mostrado o resumo dos resultados dos diferentes ensaios realizados.

Tabela 5: Propriedades no estado fresco.

Traços	Teor adições (%)			Resultados Obtidos				
	PSA	NS	SP	Espalhamento (mm)		Penetração de Cone (mm)	Teor de ar (%)	Densidade Est. Fresco (g/ml)
				DIN	NBR			
REF	0	0	2,6	200	240	84	1,7	2,328
PSA02	0,2	0	3	185	225	83	2,4	2,251
PSA03	0,3	0	3,2	190	220	80	4,0	2,242
NS1	0	1	3	187	196	79	3,2	2,307
NS2	0	2	3,5	193	222	83	3,4	2,315
PSA02-NS1	0,2	1	3,2	188	206	78	3,3	2,27
PSA02-NS2	0,2	2	3,5	180	195	69	3,2	2,225
PSA03-NS1	0,3	1	3,5	198	210	81	3,8	2,258
PSA03-NS2	0,3	2	3,9	180	199	73	3,4	2,257

1.11 Tempo zero

O resultado do ensaio de determinação do tempo zero a partir do método do pulso ultrassônico é apresentado na Figura 6. O período total de tempo considerado para a execução do ensaio foi de 48 horas, pois após este período ocorre uma estabilização das leituras de velocidade.

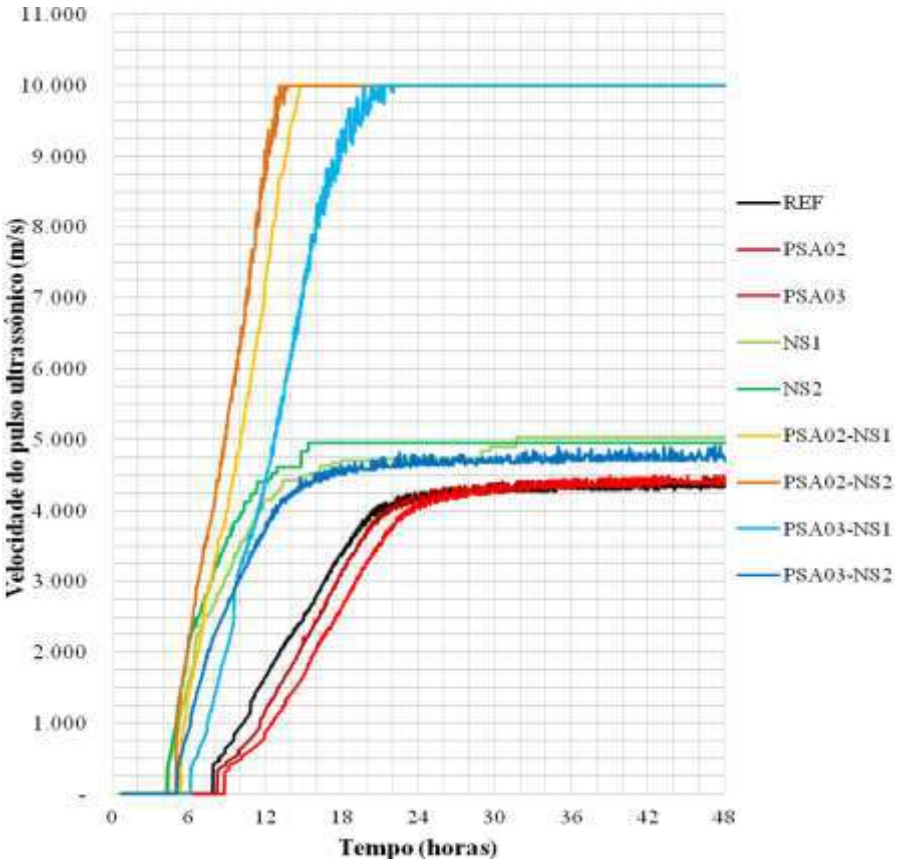

Figura 6: Curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo para os microconcretos estudados

Os gráficos obtidos no ensaio de T_0 podem ser associados com os estágios de hidratação do cimento. Imediatamente após a mistura, ocorre a Fase 1, ou pré-indução, com duração de aproximadamente 15 minutos. Na Fase 2, chamada de dormência, as leituras de velocidade começam a ser efetuadas, no entanto, são todas nulas (0 m/s). A Fase 3 se inicia no momento onde ocorre uma mudança brusca na velocidade, chamada de período de aceleração, e corresponde ao primeiro caminho contínuo de grãos mecanicamente ligados, demarcando assim o tempo zero. A Fase 4, ou período de desaceleração, é caracterizada pelo aumento dos valores de velocidade, porém com uma taxa de crescimento menor. Já na Fase 5, ou fase de estabilização, as variações são menores, e o valor da velocidade tende a se estabilizar [34]. Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos para o tempo zero dos nove microconcretos estudados.

Tabela 6: tempo zero obtido pelo ensaio de propagação do pulso ultrassônico.

Mistura	Tempo zero (T_0)	% em relação ao traço de REF
REF	7h 54 min (474 minutos)	100%
PSA02	8h 12 min (492 minutos)	104%
PSA03	8h 48 min (528 minutos)	111%
NS1	4h 16 min (256 minutos)	54%
NS2	4h 20 min (260 minutos)	55%
PSA02-NS1	5h 24 min (324 minutos)	68%
PSA02-NS2	4h 59 min (299 minutos)	63%
PSA03-NS1	6h 11 min (371 minutos)	78%
PSA03-NS2	5h 07 min (307 minutos)	65%

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Efeito da adição de PSA:

Ao observar a tabela acima, nota-se que a adição de polímero superabsorvente causa um aumento no valor do tempo zero das misturas, em 4% e 11%, para os traços PSA02 E PSA03, respectivamente. O atraso no tempo de pega devido ao PSA pode estar relacionado com um aumento das partículas floculadas de cimento, ao mesmo tempo que o acréscimo de água para cura interna provoca o afastamento das partículas de cimento umas das outras [8]. Este comportamento também foi verificado nas pesquisas de Manzano [10], Moraes e Cerqueira [19] e Suarez [3]. Dudziak e Mechtcherine [35] também constataram que a adição de PSA afetou o T_0 em concretos de ultra-alto desempenho (HPC). Eles estudaram um teor de 0,4% de determinado PSA, e relataram um aumento de 1h40min no tempo zero em relação a mistura de referência, o que representa aproximadamente 20% de aumento [35].

Efeito da adição de NS:

A nanossílica teve efeito reverso, uma vez que diminuiu o tempo zero para 54% e 55%, nos traços NS1 e NS2, respectivamente. Para a maioria dos trabalhos, à medida que a nanossílica é adicionada à mistura, o tempo de pega é reduzido, a taxa de liberação de calor aumenta, o CH reage com a nanossílica e as misturas se mostram mais consistentes. A NS não só se comporta como agentes para melhorar a microestrutura, mas também, como um ativador para acelerar as reações pozolânicas do compósito [36]. Também atua como pontos de nucleação, promovendo a aceleração das reações de hidratação do cimento, e como agentes de ativação das atividades pozolânicas, o que causa uma redução considerável no tempo zero. Além disso, a NS acelera o consumo de C_3S, a formação de portlandita (pequenos cristais de CH) e grupos homogêneos de C-S-H, favorecendo, assim, o surgimento do primeiro caminho sólido de grãos mecanicamente ligados [38].

Em estudo anterior, concluiu-se que o aumento do teor de nanossílica causa uma diminuição significativa no tempo de pega, de 61% e 37%, usando teores de 1 e 2% de nanossílica. Este comportamento está relacionado com a aceleração das reações de hidratação, proporcionadas pelas nano partículas altamente reativas e com elevada superfície específica. Os resultados apresentados pelos autores mostram que é possível estabelecer uma relação entre o tempo zero e o tempo para o início do período de aceleração da hidratação do cimento, pois a queda do tempo de pega está relacionada com uma diminuição proporcional no tempo necessário para atingir a máxima temperatura de hidratação [37].

Ainda não foi estabelecido se a hidratação mais rápida na presença de NS é devido à sua atividade pozolânica ou à elevada área superficial. Além disso, nota-se a maior presença de hidróxido de cálcio (CH) nas amostras com NS. O rápido crescimento dos cristais de CH ocorre no final do período de indução e sugerem que a precipitação de CH está relacionada com o início da fase de aceleração e, consequentemente, com o tempo de pega [39].

Efeito do uso combinado de PSA e NS:

As misturas contendo as duas adições também apresentaram redução no T0, sendo o efeito da NS muito mais pronunciado que o efeito do PSA. Este comportamento era esperado, uma vez que a porcentagem de redução causada pela NS (da ordem de 45%) é bem mais pronunciada que o aumento promovido pelo PSA (aproximadamente 8%, em média). No entanto, os traços contendo as duas adições obtiveram resultados maiores que as misturas contendo apenas NS (aumento de 14 e 24%, para os traços PSA02-NS1 e PSA03-NS1, quando comparados com a mistura NS1; e aumento de 8% e 10% para os traços PSA02-NS2 e PSA03-NS2, em relação à mistura NS2), o que nos leva a concluir que a adição de PSA teve, na presença de NS, aproximadamente o mesmo efeito que nos traços contendo apenas PSA. Ou seja, a adição de PSA aumenta o tempo zero mesmo nos traços contendo NS.

Efeito do aditivo superplastificante:

Tritnik e Gams [34] acrescentam que diferentes dosagens de superplastificante podem influenciar significativamente o valor do tempo zero, uma vez que é sabido que este aditivo tem capacidade de diminuir a cinética da hidratação, fazendo com que a reações ocorram mais lentamente, o que causa um incremento no tempo de pega.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto ao método de ensaio do pulso ultrassônico, conclui-se que a metodologia utilizada fornece resultados satisfatórios para determinação do tempo de pega de concretos de alta resistência, resultados estes que possuem uma

boa correlação com o tempo de desenvolvimento da curva de calor de hidratação, e estão condizentes com demais pesquisas realizadas anteriormente.

Ainda, é possível notar que: a adição de polímeros superabsorventes (PSA) causa um incremento no tempo zero do material; a adição de nano partículas tem o efeito de diminuir o tempo de pega dos microconcretos; o teor de aditivo superplastificante também causa efeito no tempo de pega do material, de forma que mascara os resultados, fazendo com que não sejam tão evidentes quanto parecem.

1.12Sugestões para futuras pesquisas

De acordo com os resultados obtidos, sugere-se que:
Seja avaliada a interferência do teor de aditivo superplastificante, por meio de ensaios na mistura de referência e variando apenas o teor de SP;
Realização de nova bateria de ensaios com teor de aditivo superplastificante constante, de forma a avaliar exclusivamente os efeitos do teor de PSA e NS, sem a interferência do teor de SP;

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília, pela oportunidade; ao Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM/UnB); à FURNAS Centrais Hidroelétricas S.A., pela parceria na realização desta e diversas outras pesquisas desta universidade; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), pelo auxílio financeiro; e aos fornecedores e parceiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Aitcin, P. C., “High-performance concrete”. 1998. 624p. London: E&FN Spon.
[2] Lopes, A. N., “Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura”. *Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 2011. 281p.
[3] Suarez, M. L., “Polímeros Super Absorventes (PSA) como agente de cura interna para previnir fissuração em concretos de alta resistência”. *Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília (PECC)*. Brasília, 2015. 82p.
[4] Jensen, O. M.; Hansen, P. F., “Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background”. *Cement and Concrete Research*. Vol. 31. 2001. 647-654p.
[5] Kumm, T. C., “Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland”. *Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina*. Florianópolis, 2009. 160p.
[6] Pereira, D. F.; Matos, V. N., “Combate à retração autógena utilizando polímeros superabsorventes”. *Monografia de Projeto Final de Curso, Universidade de Brasília (ENC)*. Brasília, 2011.
[7] Claro, G. P.; Saraiva, L. M., “Contribuição ao estudo da retração autógena em concretos de alta resistência”. *Monografia de Projeto Final de Curso, Universidade de Brasília (ENC).* Brasília, 2013.
[8] Ordoñez, S. L., “Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração*”. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília (PECC)*. Brasília, 2013. 178p.
[9] Traldi, C. L.; Aguirre, L. M., “Polímero superabsorvente (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em microconcretos de alta resistência devido à retração autógena”. *Monografia de Projeto Final de Curso, Universidade de Brasília (ENC)*. Brasília, 2013. 177p.
[10] Manzano, M. R., “Estudo experimental de microconcretos de alta resistência modificados com polímeros superabsorventes (PSA)”. *Qualificação de doutorado, Universidade de Brasília (PECC)*. Brasília, 2014. 109p.
[11] Santos, T. A. C., “Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e Nano Partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades dos Concretos de Alto Desempenho”. *Qualificação de mestrado, Universidade de Brasília (PECC)*. Brasília, 2015. 134p.
[12] Silva, E. F., “Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. *Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 2007. 358p.
[13] Lura, P., “Autogenous Deformation and internal curing of concrete”. *Doctoral Thesis, Delft University of Thecnology*. Delft, 2003.
[14] Friedrich, S. V., “Superabsorbent polymers (SAP)”. In: Mechtcherine, V. (Ed.), *State of the art report of RILEM technical committee 225-SAP*. France, 2012.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

[15] Assmann, A., "Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers". *Doktor Thesis, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart*. Stuttgart, Germany, 2013.
[16] Mechtcherine, V.; Dudziak, L.; Hempel, S., "Mitigating early age shrinkage of Ultra-High Performance Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP)". In: Tanabe, T. *et al.* (Eds.), *90 Creep, 44 Shrinkageand Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures - CONCREEP-8*. London, 2009.
[17] Igarashi, S.; Watanabe, A., "Experimental Study on Prevention of Autogenous Deformation by Internal Curing Using Super-Absorbent Polymer Particles". In: Jensen, O. M., Lura, P.; Kovler, K. (Eds), *RILEM Proc. PRO Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*. Vol. 52. France, 2006. 77-86p.
[18] Craeye, B.; De Schutter, G., "Experimental evaluation of autogenous shrinkage by means of a vertical dilatometer for concrete": In: Jensen, O. M., Lura, P.; Kovler, K. (Eds), *RILEM Proc. PRO Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*. Vol. 52. France, 2006. 21-30p.
[19] Moraes, B. J.; Cerqueira, C. M., "Determinação do tempo zero de microconcretos de alta resistência contendo polímeros superabsorventes utilizando a técnica do ultrassom". *Monografia de Projeto Final de Curso, Universidade de Brasília (ENC)*. Brasília, 2014.
[20] Neville, A. M., "Propriedades do concreto". 2ª Ed. PINI. São Paulo, 1996.
[21] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J., "Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais". 3ª Ed. IBRACON. São Paulo, 2008.
[22] Gleize, P. J., "Nanotecnologia e materiais de construção". In Isaia, G. C. (Ed.), *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais* 2ª Ed., Vol. 2. IBRACON. São Paulo, 2007. 1712p
[23] Sobolev, K.; Sanchez, F., "Nanotechnology in concrete – A review". *Construction and Building Materials*, Vol. 24. 2010. 2060–2071p.
[24] Kong, D. *et al*, "Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes". *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2013.
[25] Deutsches Institut für Normung - DIN. "Testing of mortars containing mineral binders; freshly mixed mortars containing aggregates of dense structure (heavy aggregates); determination of consistence, bulk density and air content". Germany: 1982.
[26] Mechtcherine, V.; Reinhardt, H. W., "Application of superabsorbent polymer (SAP) in concrete construction: state of the art report technical committee TC-225-SAP." Springer. London, 2007.
[27] Reinhardt, H. W.; Grobe, C.U.; Herb A. T.,"Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar – a new device", Materials and Structure, v. 33. 2000. 580-583p.
[28] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, "NBR 8522: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão". Rio de Janeiro, 2011.
[29] Silva, E. F. *et. al,* "Técnica da propagação de pulso ultrassônico para determinação do t0 de concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração". In: *Anais 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*. Maputo, Moçambique, 2011.
[30] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, "NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência". Rio de janeiro, 2005.
[31] American Society for Testing and Materials – ASTM, "C780: Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry". Philadelphia, 2014.
[32] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, "NBR NM 47: Concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressométrico". Rio de janeiro, 2002.
[33] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, "NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado". Rio de Janeiro, 2005.
[34] Trtnik, G.; Gams, M., "Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages". *Ultrassonics*, Vol. 54. 2014. 66-75p.
[35] Dudziak, L.; Mechtcherine, V., "Mitigation of volume changes of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers". *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. 2008.
[36] Scrivener, K. L.; Kirkpatrick, R., "Innovation in use and research on cementitious material". *Cement and Concrete Research (Special Issue - 12th International Congress on the Chemistry of Cement)*, Vol. 38. 2008. 128–136p.
[37] Senff, L. "Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento". *Tese de doutorado, UFSC*. Florianópolis, 2009.
[38] Aleen, S. A.; Heikal, M.; Morsi, W. M., "Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica". *Construction and Building Materials* , Vol. 59, 2014. 151-160p.
[39] Björnström, J. *et al,* "Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement". *Chemical Physics Letters* , Vol. 392, 2004. 242-248p.