

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AMANDA DOMAREDZKY

**INFLUÊNCIA DO USO DE SILANO E NANOSSÍLICA NA
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

AMANDA DOMAREDZKY

INFLUÊNCIA DO USO DE SILANO E NANOSSÍLICA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer
Co-orientador: Profa. Dra. Eliane Betânia C. Costa

CURITIBA
2018



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil Curso de
Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO USO DE SILANO E NANOSSÍLICA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Por

AMANDA DOMAREDZKY

Trabalho de Conclusão de Curso **apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado no segundo semestre de 2018, pela seguinte banca de avaliação:**

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Profa. Co-orientadora Eliane Betânia Carvalho Costa, Dra. UFU

Profa. Luciene Ferreira Schiavoni Wiczick, M.^a UTFPR

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 5000 - Curitiba - PR Brasil
www.utfpr.edu.br dacoc-ct@utfpr.edu.br telefone DACOC: (041) 3279-4500

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao Pai Celestial, pelas bênçãos diárias para que este momento de conclusão pudesse acontecer.

Agradeço ao meu marido pelo apoio total em qualquer que sejam os meus planos, pelo amor, refúgio e bom humor.

Agradeço aos meus pais que proporcionaram e incentivaram tanto meus estudos e minha felicidade sempre.

Agradeço minhas irmãs e irmão por estarem presentes em todos os momentos de minha vida.

Agradeço à professora Eliane por ter abraçado comigo este trabalho e ter sido um exemplo de orientadora e comprometimento, quando mesmo longe nossas reuniões e acessoria continuaram.

Agradeço ao professor Wellington por ter adotado este trabalho e me ajudado, principalmente no trabalho árduo com a betoneira!

Agradeço aos técnicos e estagiários dos laboratórios de materiais da construção civil e do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da UTFPR pela disposição em compartilhar conhecimento.

RESUMO

DOMAREDZKY, Amanda. **Influência do Uso de Silano e Nanossílica na Resistência à Compressão do Concreto**. 2018. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do silano e da nanossílica na resistência à compressão do concreto através do tratamento superficial do agregado graúdo ou da adição na água de amassamento, ambos previamente à mistura. As adições e tratamentos com nanossílica e silano têm como objetivo melhorar a zona de transição do concreto através do aprimoramento das ligações químicas entre as fases do concreto e a densificação da zona de transição. Para tanto, foi desenvolvido um estudo experimental com cinco concretos, um de referência para base comparativa e quatro tipos de tratamento: agregado dopado com nanossílica, agregado dopado com silano, nanossílica na água de amassamento e silano na água de amassamento. Todos com traços e teores de adição idênticos. Para os tratamentos e adições foram utilizados nanossílica e silano no estado coloidal, no teor de 2% em relação à massa de água. Para a avaliação das propriedades os concretos foram avaliados no estado fresco através do abatimento de tronco de cone, massa específica e teor de ar incorporado. No estado endurecido foram avaliados pela resistência à compressão e microscopia eletrônica. Os resultados mostraram que as adições de silano e nanossílica, como tratamento superficial do agregado e adição na água de amassamento reduziram o teor de ar incorporado, aumentaram a consistência, mas não alteraram a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, possivelmente devido ao baixo teor utilizado.

Palavras-chave: **agregado, nanossílica, silano, resistência à compressão, zona de transição.**

ABSTRACT

DOMAREDZKY, Amanda. **The Influence of Silane and nanossilica in the resistance of concrete**. 2018. 48 p. Final course assignment. Graduate in Civil Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This study aims to evaluate the influence of silane and nanosilica in the compressive strength of the concrete by treating the aggregate surface or adding it in the water, both prior the concrete mixture. The additions and treatments with nanosilica and silane aim to improve the transition zone of the concrete by improving the chemical bonds between concrete phases and the densification of the transition zone. For that, an experimental study was carried out with five concretes, one of reference for comparative basis and four types of treatment: aggregate doped with nanosilica, aggregate doped with silane, nanosilica in water and silane in water. For the treatments and additions, nanosilica and silane were used in the colloidal state (2% of total water's mass). For the evaluation of the properties the concretes were evaluated in the fresh state through the abatement, specific mass and incorporated air. In the hardened state they were evaluated by the compressive strength and scanning electron microscopy. The results showed that silane and nanosilica additions, such as treatment of the aggregate surface and addition in water, reduced the incorporated air, increased the consistency, but did not change the compressive strength of the concrete at 28 days, possibly due to the low amount used.

Key-words: **aggregate, nanossilica, silane, compressive strength, interfacial transition zone**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo da hidratação do cimento	14
Figura 2 – Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento Portland com 3 dias de idade mostrando os cristais de (a) hidróxido de cálcio e (b) silicato de cálcio hidratado	15
Figura 3 – Representação esquemática das fases do concreto nas idades iniciais..	15
Figura 4 - Representação esquemática da exsudação no corpo de prova de concreto	16
Figura 5 – Representação esquemática da propagação de microfissuras na zona de transição para o concreto ao longo do tempo	17
Fonte: Monteiro (1993).....	17
Figura 6 – Distribuição das partículas ao longo da zona de transição do concreto, elaborada com base em resultados de análise de imagens de concretos com relação água-cimento igual a 0,40	19
Figura 7 – Representação esquemática da reação pozolânica na matriz cimentícia	20
Figura 8 – Agregado graúdo tratado superficialmente com uma camada de sílica previamente à mistura do concreto – (a) representação esquemática e (b) micrografia – MEV	23
Figura 9 – Efetividade do silano em substratos inorgânicos	24
Figura 10 – Efeito do silano na superfície do agregado de base cimentícia	25
Figura 11 – Distribuição granulométrica agregado miúdo	28
Figura 12 – Distribuição granulométrica agregado graúdo.....	28
Figura 13 – Agregado graúdo em solução aquosa com tratamento de nanossílica ..	30
Figura 14 – Agregado graúdo secando em ambiente de laboratório após 24 horas imerso em solução aquosa.....	30
Figura 15 – Corpos de prova logo após moldagem.....	33
Figura 16 - Corpos de prova em câmara úmida aguardando a realização do ensaio	33
Figura 17 – Prensa para ensaio de resistência à compressão.....	34
Figura 18 – Resistência à compressão média em função da idade para os diferentes tipos de concreto analisados.....	37
Figura 19 – Corpo de prova do agregado tratado com silano rompido após 3 dias ..	38
Figura 20 – Corpo de prova do agregado tratado com silano rompido após 7 dias ..	38
Figura 21 – Gráfico com erros baseado na análise estatística dos rompimentos aos 28 dias.....	39
Figura 22 – Agregado graúdo sem tratamento.....	41
Figura 23 – Brita com tratamento superficial de nanossílica	41

Figura 24 – Agregado graúdo com tratamento superficial de silano	42
Figura 25 – Zona de transição concreto referência	43
Figura 26 – Zona de transição concreto com nanossílica na água de amassamento	43
Figura 27 – Concreto com adição de nanossílica na água de amassamento, com presença de silicato e etringita	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas dos agregados utilizados	28
Tabela 2 – Características físicas da sílica coloidal utilizada	29
Tabela 3 – Características físicas do silano	29
Tabela 4 – Traços utilizados para os concretos	32
Tabela 5 – Resultados obtidos para os concretos no estado fresco	36
Tabela 6 – Dados concretos aos 28 dias	39
Tabela 7 – Resultados teste de Tukey para as amostras aos 28 dias	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	OBJETIVOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	MICROESTRUTURA DO CONCRETO	14
2.2	ZONA DE TRANSIÇÃO	16
2.3	EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS NA ZONA DE TRANSIÇÃO	19
2.4	NANOSSÍLICA	21
2.5	EFEITO DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES NA ZONA DE TRANSIÇÃO	22
2.6	SILANO	23
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAIS	27
3.2	MÉTODOS	30
3.2.1	TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS GRAÚDOS.....	30
3.2.2	ADIÇÃO NA ÁGUA DE AMASSAMENTO	31
3.2.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	31
3.2.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	32
3.2.5	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	32
3.2.6	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	33
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	36
4.2	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo. Estima-se que, anualmente, sejam consumidas 19 bilhões de toneladas de concreto, um consumo médio de 2,62 toneladas por habitante/ano (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Isso acontece devido a suas notáveis características, tais como: excelente resistência à água, moldabilidade em diferentes formas e dimensões, baixo custo de fabricação e manutenção, além da grande disponibilidade de matéria prima e mão de obra.

O concreto é constituído, basicamente, de cimento Portland, agregados e água. Os agregados são materiais granulares que podem ser naturais, quando obtidos direto da natureza ou reciclados quando precisam passar por transformação antes de utilizados. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados são classificados em miúdos e graúdos. Os agregados miúdos são constituídos pelos grãos que passam pela peneira 4,75 mm enquanto que os graúdos pelos grãos compreendidos entre as peneiras de 75 mm e 4,75 mm.

As características dos agregados afetam significativamente o desempenho de concretos nos estados fresco e endurecido. Após a mistura, o contato entre os agregados e a pasta cimentícia dá origem a uma zona de transição, também denominada interface agregado-pasta. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) essa região possui propriedades e microestrutura diferentes das fases agregado e pasta cimentícia, mesmo que composta pelos mesmos elementos. A zona de transição é considerada a fase limitante da resistência do concreto, pois trata-se de uma região com maior porosidade, conseqüentemente, ocasionando uma diminuição da resistência.

De acordo com Chung (2000) uma das formas de melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade de concretos é reduzir a zona de transição. Algumas técnicas têm sido desenvolvidas com esse intuito, entre elas pode-se citar o uso de aditivos químicos e adições minerais, estudo de empacotamento de partículas, tratamentos na superfície dos agregados, dentre outros.

O uso de adições minerais em matrizes cimentícias, seja como adição ou em substituição ao cimento é amplamente difundido no meio técnico. Esses materiais atuam preenchendo os vazios intergranulares e da interface, melhorando o empacotamento da matriz e densificando a zona de transição devido ao efeito fíler. Além disso, as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do

cimento produzindo C-S-H, principal responsável pela resistência dos materiais cimentícios.

O tratamento superficial do agregado tem como objetivo criar uma ponte de aderência entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo. Essa técnica consiste em impregnar previamente a superfície do agregado (dopagem) com materiais que venham a reagir com os aglomerantes quando ocorrer a mistura diminuindo a espessura da zona de transição e aprimorando as ligações químicas entre as fases do concreto.

Os silanos são produtos hidrofóbicos, que podem reagir quimicamente com materiais à base de sílica ou alumina (MEDEIROS; GOMES; HELENE, 2006; SANTOS, 2016). Sua utilização no tratamento superficial tende a minimizar falhas através de ligações covalentes entre grupos silanois (Si-OH) e a superfície, a qual será acoplada de forma a melhorar a zona de ligação entre os materiais.

Estudos com uso de sílica ativa, como tratamento superficial, mostraram-se satisfatórios em termos de densificação da interface agregado-matriz cimentícias e aumento de resistência à compressão (PING; BEAUDOIN *apud* KATZ, 2004). Não foram observados estudos sobre a utilização da nanossílica como tratamento superficial, sua aplicação tem sido como adição ou substituição ao cimento durante a mistura.

A impregnação da superfície do agregado com uma solução de nanossílica tem como objetivo adicionar uma fina camada de partículas sobre a superfície do agregado. Desse modo, a nanossílica, que possui atividade pozolânica, poderá reagir com o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento, formando uma camada densa na interface agregado-matriz cimentícia, o que tende a aumentar a resistência.

Dantas (2013) afirma que, com base em diversos estudos, ainda não existe um consenso sobre o percentual ideal de adições para atingir a condição ótima de desempenho de resistência da matriz cimentícia. Dessa forma, o estudo da eficiência de teores baixos para as adições e tratamentos é interessante, pois se eficiente pode ser vantajoso economicamente em comparação a teores elevados. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do efeito de silano e nanossílica, dispersos em solução aquosa, na resistência à compressão do concreto.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a influência do uso de silano e nanossílica como tratamento superficial de agregados e adição na água de amassamento na resistência à compressão do concreto.

São objetivos específicos:

- comparar a influência dos tratamentos superficiais do agregado graúdo e a adição na água de amassamento nas propriedades do concreto no estado fresco;
- verificar o efeito dos tratamentos superficiais do agregado graúdo e adição na água de amassamento na resistência à compressão do concreto em diferentes idades;
- analisar se o uso de silano e nanossílica modificam as características superficiais dos agregados e da interface agregado-matriz cimentícia por meio de análise de imagens.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICROESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto é composto, basicamente, de cimento Portland, agregado miúdo e grúdo e água. Ao entrar em contato com a água, o cimento dá origem a uma matriz cimentícia que envolve os grãos de areia e o agregado grúdo. A matriz cimentícia é constituída por diferentes tipos de compostos hidratados: a etringita que cristaliza na forma de agulhas no início das reações e, ao longo da hidratação transforma-se em monossulfoaluminato de cálcio hidratado; o hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – e o silicato de cálcio hidratado – C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



Figura 1 – Processo da hidratação do cimento
Fonte: Mehta; Monteiro (2008).

O hidróxido de cálcio ocupa cerca de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta. Sua morfologia é bem definida, formando cristais em forma de placas hexagonais (Figura 1a), sendo que o tamanho dos cristais aumenta com a disponibilidade de espaço livre para precipitação. Essa disponibilidade aumenta com o acréscimo da relação água-cimento. O hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência da pasta de cimento endurecida e, em virtude de sua baixa superfície específica confere um baixo poder de adesão, sendo facilmente carregado pela água. Aparentemente, o único aspecto positivo da presença do hidróxido de cálcio é a alcalinidade conferida ao meio, responsável pela passivação das armaduras (DAL MOLIN, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O silicato de cálcio hidratado ocupa cerca de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. Esse composto é o responsável pela resistência mecânica da pasta. A morfologia das placas varia de fibras pouco cristalinas a uma malha reticulada (Figura 1b) (DAL MOLIN, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

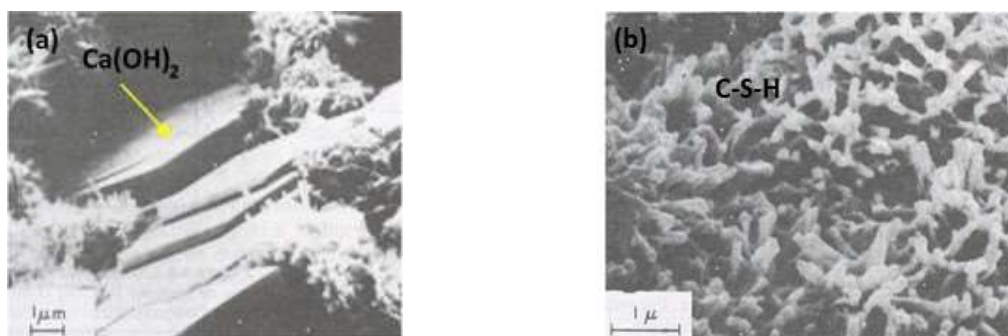


Figura 2 – Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento Portland com 3 dias de idade mostrando os cristais de (a) hidróxido de cálcio e (b) silicato de cálcio hidratado
Fonte: Mehta; Monteiro (2014).

Após o endurecimento, pode-se dividir a estrutura do concreto em três fases: agregado, zona de transição e pasta de cimento como mostrado na Figura 3. A microestrutura em torno dos agregados é diferente da fase agregado e da matriz propriamente dita. Essa região de interface, entre pasta cimentícia e agregado é conhecida como zona de transição.

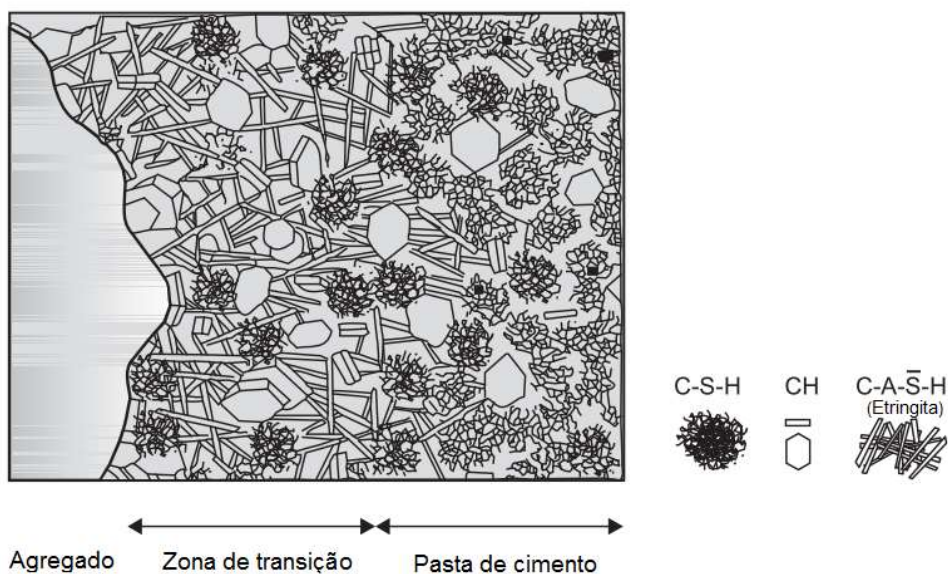


Figura 3 – Representação esquemática das fases do concreto nas idades iniciais
Fonte: Mehta; Monteiro (2014).

De acordo com Ollivier, Maso e Bourdette (1995) para explicar o comportamento do concreto, esse tem sido modelado como um material bifásico, composto de agregado e matriz cimentícia. Entretanto, ainda de acordo com os autores, esse modelo não está correto, pois a zona de transição interfere significativamente no desempenho destes materiais.

O estudo da microestrutura do concreto, considerando a zona de transição, permite que se detecte os pontos frágeis do material, abrindo caminhos para intervenções controladas que possam otimizar o seu desempenho (MONTEIRO, 1993).

2.2 ZONA DE TRANSIÇÃO

A zona de transição localiza-se na região de contato entre as partículas de agregado graúdo com a pasta de cimento. Apesar de ser constituída dos mesmos elementos da pasta de cimento, possui estrutura e propriedades diferentes, sendo mais frágil, pois é nessa fase que ocorre a ruptura do concreto. Isso ocorre devido a maior relação água-cimento nessa região, causada por exsudação interna – efeito parede (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O efeito parede consiste no acúmulo de água na superfície do agregado após o contato com a matriz cimentícia (Figura 4). De acordo com Mehta e Monteiro (2014) agregados lamelares e alongados apresentam maior tendência de acúmulo de água na sua superfície.

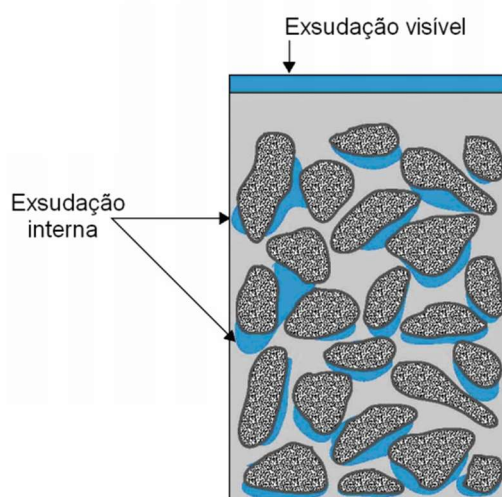


Figura 4 - Representação esquemática da exsudação no corpo de prova de concreto
Fonte: Mehta; Monteiro (2008).

Os efeitos de superfície produzidos pelo agregado resultam em uma pasta de cimento com maior relação água-cimento na zona de transição, gerando uma

morfologia cristalina diferente da matriz cimentícia. Nas primeiras idades, especialmente quando ocorreu considerável exsudação interna, o volume e tamanho dos vazios na zona de transição são maiores do que na matriz pasta de cimento ou argamassa. O tamanho dos cristais e a concentração de compostos cristalinos, como o hidróxido de cálcio e a etringita também são maiores nessa zona de transição. As fissuras são formadas facilmente. Tais efeitos contribuem para uma menor resistência na zona de transição quando comparada com a matriz da pasta de cimento no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quando o concreto é carregado nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar na zona de transição, devido aos defeitos microestruturais. A falha, momento em que o nível de deformação no concreto ultrapassa a capacidade que o mesmo tem de absorver as deformações, ocorre na própria pasta ou, mais frequentemente, na interface entre a pasta e o agregado. Se a zona de transição é fraca, a resistência do concreto também será baixa (PRICE *apud* SILVA, 2003). Ao longo do tempo, as fissuras passam a se propagar pela camada de hidróxido de cálcio presente na zona de transição entre o agregado inerte e a matriz cimentícia, como mostrado na Figura 5.

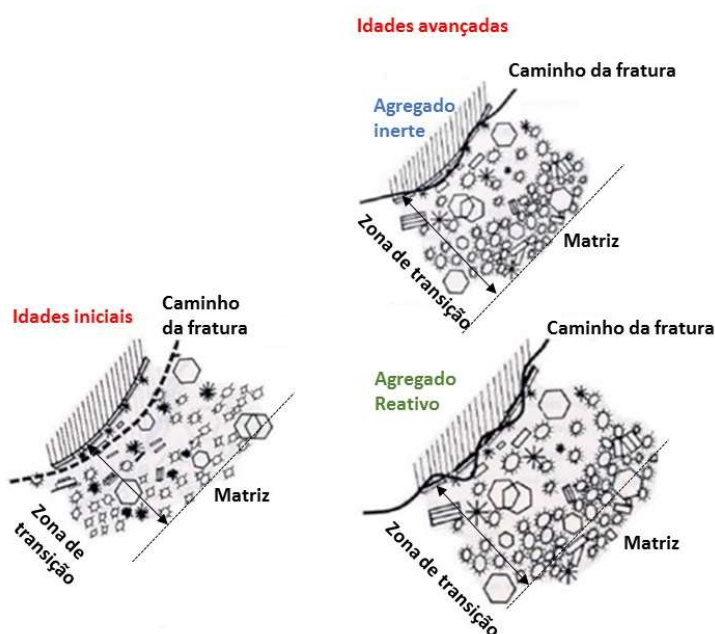


Figura 5 – Representação esquemática da propagação de microfissuras na zona de transição para o concreto ao longo do tempo
Fonte: Monteiro (1993).

As características da zona de transição podem ser afetadas por reações químicas entre o agregado e a pasta cimentícia. Na Figura 5 também pode-se observar que a reatividade do agregado interfere na resistência da zona de transição.

Devido às ligações químicas estabelecidas na interface entre o agregado reativo e a pasta cimentícia, as fissuras passam a se propagar no agregado. A zona de transição deixa de ser o elo fraco devido a maior aderência entre as fases e a diminuição da concentração de hidróxido de cálcio nessa região. Tal efeito contribui para o aumento da resistência mecânica de concretos (MONTEIRO, 1993).

Estudos indicam que a zona de transição afeta significativamente a resistência mecânica e a durabilidade do concreto devido a presença de microfissuras e maior porosidade dessa região (MONTEIRO, 1993; OLLIVER, MASO; BOURDETTE, 1995).

Segundo Ollivier, Maso e Bourdette (1995) devido ao arranjo insatisfatório dos grãos de cimento ao redor do agregado, a porosidade da região chega a ser até três vezes maior na zona de transição do que na matriz cimentícia, resultando em gradientes de microestrutura, que se prolongam cerca de 50 μm desde a interface até a pasta cimentícia, sendo essa espessura típica da zona de transição. Entretanto, as principais falhas acontecem entre 15 e 20 μm .

Segundo Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004) a porosidade e espessura da interface irá depender do tamanho mínimo das partículas presentes na matriz. A espessura da zona de transição é cerca de 40 μm para concretos com relação a/c igual a 0,40, como mostrado na Figura 6. Os primeiros 15 μm são constituídos pelos grãos menores, que se depositam próximo à interface; esta espessura coincide com o diâmetro médio da menor partícula presente na matriz. De 15 a 30 μm , há uma região com deficiência de partículas pequenas, mas que com o avanço da hidratação são preenchidos por produtos hidratados. Após 30 μm , as partículas se distribuem aleatoriamente. A redução de partículas presentes na matriz tende a contribuir para a redução da espessura e da porosidade da zona de transição.

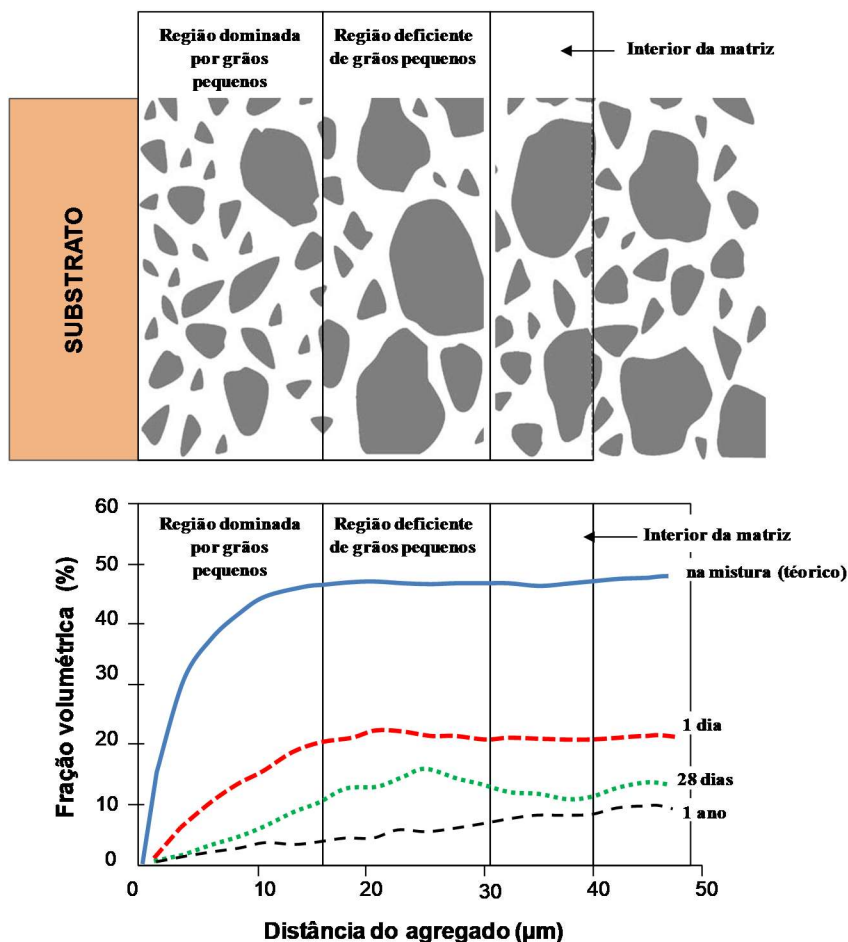


Figura 6 – Distribuição das partículas ao longo da zona de transição do concreto, elaborada com base em resultados de análise de imagens de concretos com relação água-cimento igual a 0,40
Fonte: Scrivener et al *apud* Costa (2014).

De acordo com Chung (2000) uma das formas de melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade de concretos é “engenheirar” a zona de transição utilizando técnicas que permitam reduzir a porosidade desta região. Dentre as técnicas usadas para esse aprimoramento, pode-se citar: o uso de partículas finas para melhorar o empacotamento do sistema e o tratamento superficial de agregados como meio de intensificar as ligações químicas entre agregado-matriz cimentícia.

2.3 EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS NA ZONA DE TRANSIÇÃO

Ollivier, Maso e Bourdette (1995) analisando a influência das adições minerais no desenvolvimento da microestrutura da zona de transição constataram que estas adições minerais tendem a densificar essa região, pois possuem partículas menores que os grãos de cimento, promovendo o empacotamento e, em alguns casos, se pozolônicas, modificam o processo de hidratação. Ambos efeitos podem ocorrer simultaneamente.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as pozolanas podem ser definidas como:

“material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes.”

Essa reação química, denominada pozolânica, é exemplificada na Figura 7 ao se adicionar nanossílica na pasta de cimento.

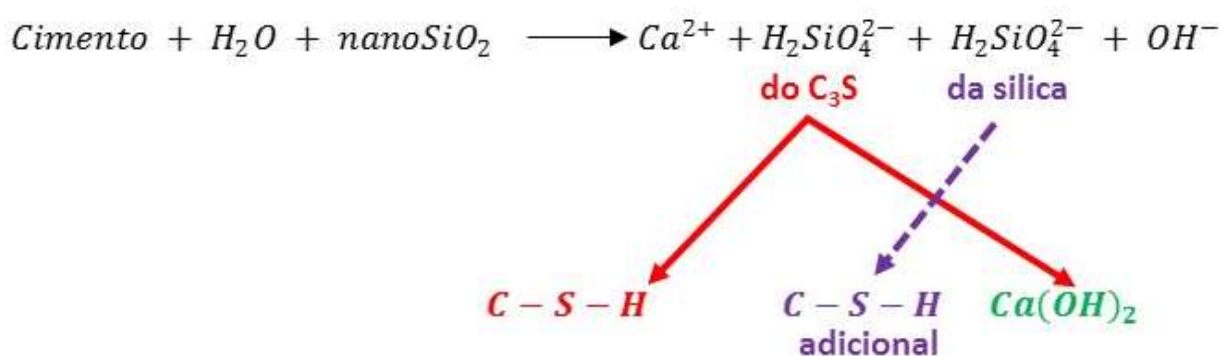


Figura 7 – Representação esquemática da reação pozolânica na matriz cimentícia
Fonte: Singh et al (2013).

As reações pozolânicas geram compostos hidratados com melhor homogeneidade e reduzem o teor de hidróxido de cálcio, ou seja, dão origem à uma pasta cimentícia mais densa e homogênea. Dessa forma, há uma redução do tamanho dos poros e uma redução da permeabilidade do material. No concreto, essa reação também diminui o efeito parede da zona de transição.

Esse efeito pode ser intensificado com o uso de nanopartículas. Essas podem preencher os espaços lamelares da estrutura C-S-H – efeito nanofiler e, adicionalmente, atuam como núcleo para formação de novas reações pozolânicas, resultando no aumento da quantidade de C-S-H e maior refinamento dos poros da matriz e da zona de transição (SEFFF, 2009; (AITCIN *apud* SILVA, 2010). Essa ação pode conferir maior resistência e durabilidade ao concreto devido a diminuição da porosidade e permeabilidade. À medida que se reduz a permeabilidade, o concreto se torna mais resistente a ambientes agressivos.

2.4 NANOSSÍLICA

Dentre os materiais pozolânicos, a sílica amorfa apresenta uma alta reatividade, sendo considerada uma superpozolana. Comercialmente, encontra-se disponível em diferentes granulometrias (sílica, microsílica e nanossílica).

Segundo Said *et al.* (2012) a nanossílica pode ser encontrada em duas possíveis formas: grãos secos compactados ou suspensão coloidal. No primeiro caso, para dispersão completa na água de amassamento durante a produção de concretos deve haver uma preparação prévia dos grãos, enquanto que a nanossílica na forma de suspensão estabilizada por um agente dispersor se encontra pronta para uso, reduzindo a ocorrência de aglomerados.

A aplicação de nanossílica em materiais cimentícios, mesmo em baixas proporções em relação ao aglomerante total, melhora de uma forma geral a microestrutura desse material (GLEIZE *apud* DANTAS, 2013). O uso da nanossílica, em teores inferiores a 5%, contribui para o aumento da resistência à compressão devido à produção de gel C-S-H e à densificação da microestrutura, reduzindo consequentemente, a porosidade das matrizes cimentícias (QUING *et al.* 2007; STEFANIDOU; PAPAYIANNI, 2012; BALAPOUR; JOSHAGHANI; ALTHOEY, 2018).

Quing *et al.* (2007) ao analisar o uso de diferentes teores de nanossílica em materiais cimentícios verificaram que houve um aumento de 17% a 41% nos valores de resistência à compressão nas primeiras idades e de 20 a 25% a partir dos 28 dias, sendo verificado melhores resultados com teor de 5% de adição de nanossílica.

Nili *et al.* (2010) avaliaram concretos com nanossílica em teores de 0%, 1,5%, 3% e 4,5%, e concluíram que o uso de grandes quantidades da adição não é favorável ao aumento da resistência à compressão, uma vez que o melhor resultado foi observado no concreto com 1,5% de nanossílica em relação à massa de cimento.

Stefanidou e Papayianni (2012), estudando diferentes teores de adição de nanossílica (0%; 0,5%; 1%; 2% e 5%) em pastas cimentícias, constataram que houve um aumento médio de 25% na resistência à compressão, quando adicionados 0,5% de nanossílica em relação ao teor de cimento utilizado, quando comparado com amostras de referência. Em teores superiores, observou-se a necessidade de aumento da demanda de água ou de aditivo superplastificante para melhoria da trabalhabilidade das pastas.

Aggarwal; Singh e Aggarwall (2015), após uma ampla revisão da literatura sobre o uso de nanossílica em concretos, constatou que não há um teor ótimo de

substituição, sendo variável em função da composição e das condições de produção. No entanto, com base neste trabalho, diversos autores afirmam que teores de até 2% de substituição do cimento proporcionam melhorias significativas nas propriedades mecânicas das matrizes cimentícias quando utilizado a nanossilica.

2.5 EFEITO DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES NA ZONA DE TRANSIÇÃO

Alguns tratamentos de superfícies são consolidados e amplamente utilizados como ponte de aderência dos materiais cimentícios, dentre eles pode-se citar o uso de chapiscos, como preparo de diferentes superfícies para recebimento de argamassas de revestimento, no encunhamento entre estrutura e alvenaria e entre a base e o contrapiso e a aplicação de resinas epoxídicas para promover a aderência entre concreto novo e velho. Nessa mesma linha, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas para tratar a superfície dos agregados por meio da técnica de dopagem (TRIGO; LIBÓRIO, 2009; TRIGO; LIBÓRIO, 2014).

A técnica de dopagem de agregados consiste em impregnar previamente a superfície deste com materiais que venham a reagir com os aglomerantes quando ocorrer a mistura. Esta técnica tende a diminuir a espessura da zona de transição por meio de efeitos: químico, estabelecimento de ligações químicas entre o agregado e a matriz, e físico (TRIGO; LIBÓRIO, 2009). Em termos de efeito físico, a modificação da textura do agregado amplia a área de contato. Quanto maior o contato efetivo entre a matriz cimentícia e o agregado, maior a resistência na interface (COSTA, 2014).

A dopagem do agregado pode ser feita por meio de algumas técnicas como aspersão, gotejamento e imersão. Na técnica de imersão, o agregado graúdo é completamente mergulhado em solução aquosa, composta essencialmente de água e do promotor da aderência (SANTOS, 2016), como por exemplo, resinas a base de PVA; estireno-butadieno (SBR); silanos; sílicas com diferentes granulometrias; e misturas prévias de pastas com adições minerais.

Ping e Beaudoin (1992) avaliaram o tratamento superficial do agregado graúdo por imersão em solução composta de água e sílica, sendo a última em teores de 2% e 4% em relação à massa do agregado. Após a secagem, os agregados apresentaram uma camada superficial estável e consolidada de sílica (Figura 8). Os autores verificaram uma melhoria na zona de transição ao serem utilizados agregados revestidos com sílica devido a uma densificação da interface pela reação pozolânica.

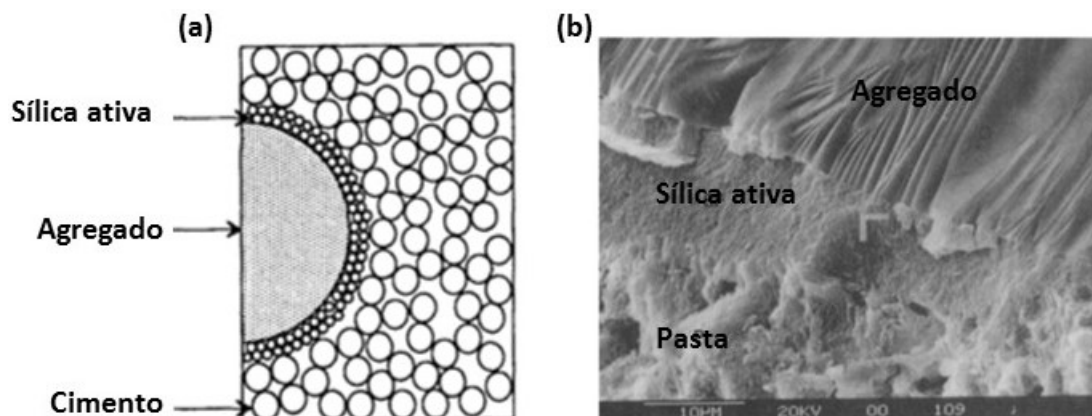


Figura 8 – Agregado graúdo tratado superficialmente com uma camada de sílica previamente à mistura do concreto – (a) representação esquemática e (b) micrografia – MEV
 Fonte: Ping; Beaudoin (1992).

Katz (2004) analisando o tratamento superficial de agregados reciclados com solução de sílica ativa numa proporção 1:10 (sílica: água) em massa antes do procedimento de mistura verificou um aumento de 30% e 15% na resistência à compressão do concreto aos 7 e 28 dias, respectivamente.

2.6 SILANO

Os silanos são produtos hidrofóbicos, ou seja, insolúveis em água. Esses materiais geralmente são utilizados para reduzir a absorção de água nas superfícies de concreto, materiais cerâmicos, dentre outros, com o objetivo de aumentar a durabilidade. No entanto, podem reagir quimicamente com materiais à base de sílica ou alumina (MEDEIROS; GOMES; HELENE, 2006; SANTOS, 2016).

A efetividade química do silano está vinculada ao substrato associado, conforme mostra a Figura 9. Observa-se que estes apresentam excelente afinidade com substratos constituídos por sílica e quartzo.

SUBSTRATOS	
EXCELENTE	Silica
	Quartzo
	Vidro
	Alumínio
	Silicatos de Alumínio (ex: Argilas)
	Silicones
BOM	Cobre
	Estanho
	Talco
	Óxidos Inorgânicos
	Aço, Ferro
FRACO	Asbestos (Amianto)
	Níquel
	Zinco
	Chumbo
	Mármore, cal
RUIM	Sulfato de Cálcio
	Baritina
	Grafite
	Negro de carbono (forma impura do carbono)

Figura 9 – Efetividade do silano em substratos inorgânicos
 Fonte: Arkles *apud* Santos (2016).

Os silanos podem ser acoplados a um substrato para atuar como agente de ligação. Quando utilizado como tratamento superficial, o silano pode promover a conexão entre zona de transição e a matriz cimentícia, minimizando as falhas da região. Chung (2000), avaliando o uso de silano como tratamento superficial de fibras, verificou que este atuou como ponte de aderência entre a superfície da fibra e a matriz cimentícia, tornando compósito mais denso e resistente.

De acordo com Pluedmman (1991) o mecanismo de acoplamento do silano pode ocorrer por meio de ligações covalentes entre os grupos silanois (Si-OH) e a superfície a qual será acoplada. No caso de materiais cimentícios, com a sílica e os silicatos oriundos da hidratação do cimento. Um diagrama esquemático do efeito do silano na superfície de um agregado cimentício é apresentado na Figura 10.

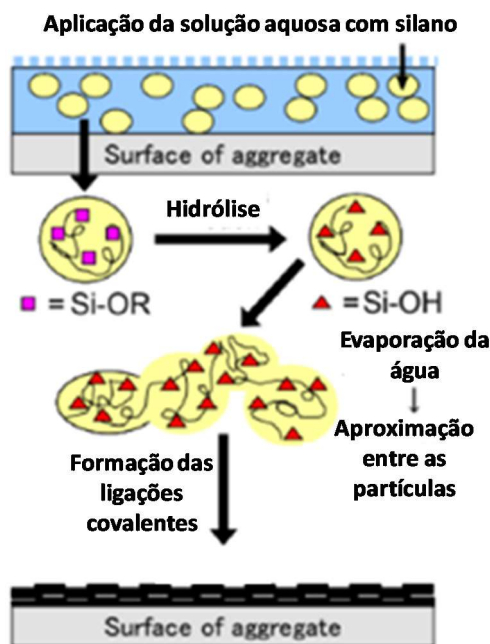


Figura 10 – Efeito do silano na superfície do agregado de base cimentícia
 Fonte: Hasegawa *apud* Tsujino et al (2007).

Observa-se que as reações químicas que ocorrem entre a superfície de agregado cimentício e silano em solução aquosa envolve quatro etapas: (1) fusão: após a evaporação da água presente na emulsão, as partículas se aproximam; (2) Dealcolização por hidrólise: o silanol é formado pela reação com o grupo alcóxila (-OR), presente no polímero, com a água; (3) ligação: o silanol reage com as hidroxilas (-OH) presentes no cimento para aderir ao substrato; (4) condensação: o silanol reage com outro silanol formando ligações covalentes no substrato, havendo a perda de água. A superfície do substrato após secagem apresenta características hidrofóbicas (TSUJINO et al., 2007).

Mansur *et al.* avaliaram a influência de alguns grupos de silanos, aplicados na superfície de azulejos, na resistência de aderência de argamassas com adição de EVA. Quase todos os silanos estudados aumentaram, significativamente, a aderência observada. Segundo os autores, esse efeito pode estar associado ao aumento da densidade das ligações por pontes de hidrogênio oriundas da reação entre o silano e os grupos hidroxil do polímero EVA contido na argamassa (COSTA, 2014).

Costa (2014) avaliando a influência da absorção do substrato na aderência de revestimentos, verificou que ao aplicar silano na superfície de substratos cimentícios este proporcionava um aumento de 47% na resistência de aderência em relação aos substratos não tratados. Parte desse acréscimo está associado a melhora

na capacidade de espalhamento da argamassa sobre o substrato, porém pode ter ocorrido ligações químicas entre o substrato tratado e a argamassa. Tal efeito não foi estudado. A eficiência de um silano utilizado para tratamentos superficiais irá depender de alguns fatores, tais como: o teor utilizado, a natureza química, a massa molar, a temperatura, a umidade e a rugosidade do substrato.

A aplicação de tratamentos superficiais de agregados graúdos para a melhoria da zona de transição pode ser vantajosa economicamente em comparação ao uso de adições minerais, visto que a quantidade necessária para tratar o agregado é bem menor do que a prescrita para adições diretamente na mistura. No entanto, carece de investigações.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do uso de silano e nanossílica na resistência à compressão do concreto. Foram avaliadas duas formas de aplicação destes produtos durante a produção do concreto, uma como tratamento prévio da superfície do agregado e outra adicionada a água de amassamento. Tais aplicações, foram adotadas, de acordo com as fontes citadas na revisão bibliográfica, visando reduzir o teor de material utilizado, geralmente superior, quando em substituição ao cimento. Para ambas aplicações os produtos, a saber: solução aquosa de silano e solução aquosa de nanossílica, foram diluídos água, num teor de 2% em relação à massa de água.

A dosagem do concreto foi feita pelo método da ABCP para uma resistência característica de 30 MPa e abatimento de 90 ± 10 mm, parâmetros típicos dos concretos de maior comercialização de empresas de concretagem. Os concretos foram avaliados para determinação da consistência e da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias. Também foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura a fim de verificar as alterações da zona de transição pelos procedimentos adotados.

A seguir, serão apresentados os materiais utilizados, as etapas de produção dos concretos e os ensaios realizados.

3.1 MATERIAIS

Para a produção dos concretos, foi utilizado um cimento Portland composto (CP II F-32), selecionado por ser o de uso mais comum entre os cimentos disponíveis no mercado, cuja massa específica foi equivalente a $3,07 \text{ g/cm}^3$ determinada conforme ABNT NBR NM 23:2001.

Os agregados utilizados foram naturais, sendo uma areia quartzosa e brita de origem granítica. Estes foram caracterizados mediante ensaios de massa unitária (NBR NM 45:2006), massa específica (NBR NM 52: 2003; NBR NM 53:2003) e distribuição granulométrica (NBR NM 248:2003). Para o ensaio de granulometria foi utilizado agitador mecânico. Os resultados estão apresentados na Tabela 1 e nas Figuras 11 e 12.

Tabela 1 – Características físicas dos agregados utilizados

	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica	2,79 g/cm ³	2,71 g/cm ³
Massa unitária	1450 kg/m ³	1390 kg/m ³
Diâmetro máximo	4,8 mm	12,5 mm
Módulo de Finura	2,24	5,98

Fonte: Autora, 2018.

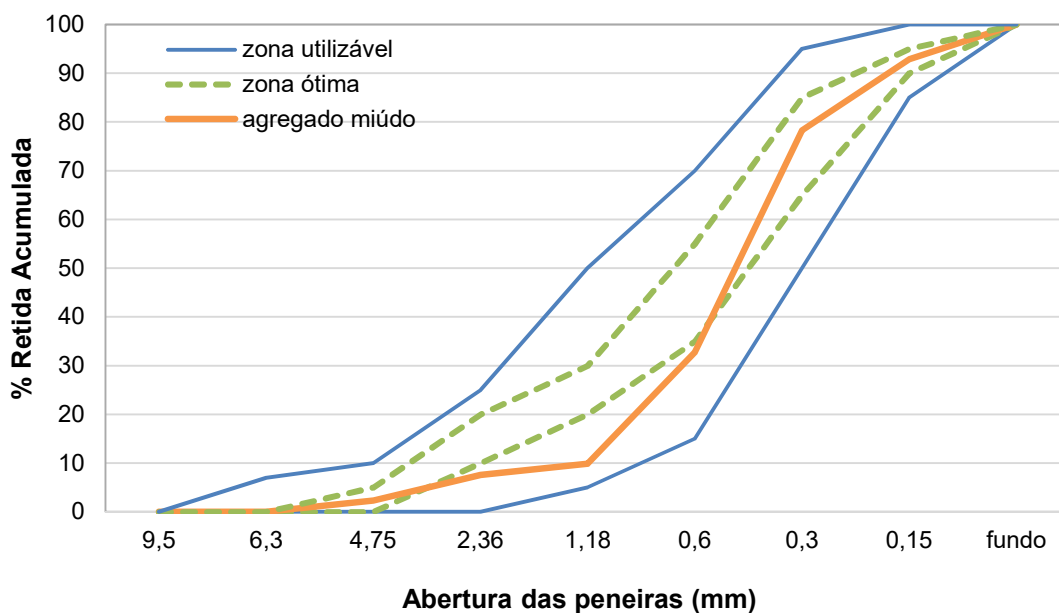


Figura 11 – Distribuição granulométrica agregado miúdo

Fonte: Autora, 2018

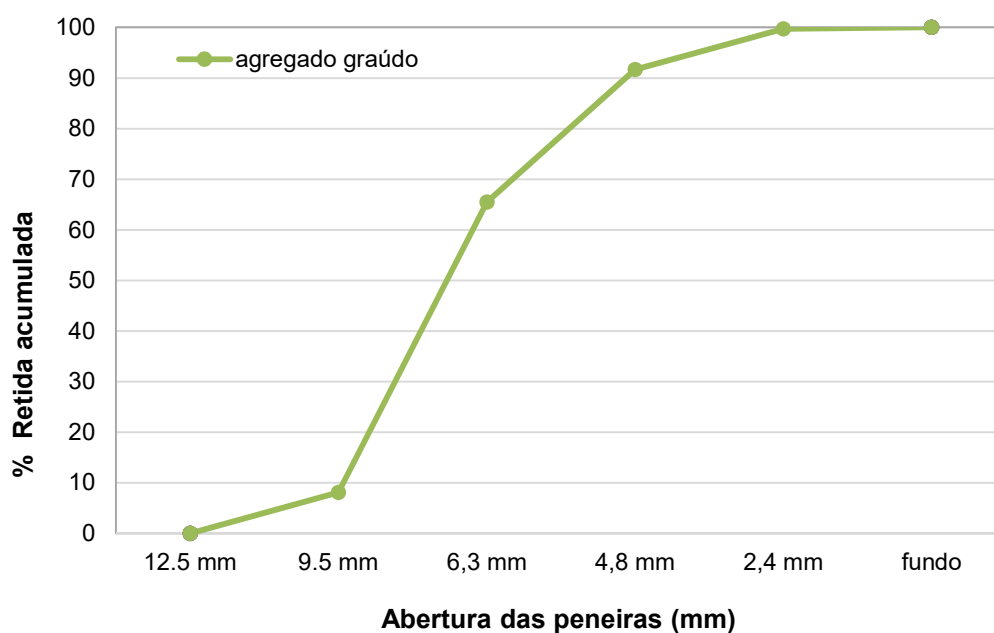


Figura 12 – Distribuição granulométrica agregado graúdo

Fonte: Autora, 2018.

A água utilizada foi a do abastecimento público de Curitiba. A massa específica da água, de acordo com Potter e Wiggert (2004), considerando temperatura entre 16 a 21°C e sob pressão atmosférica padrão, equivale a 1.000 kg/m³.

Para o tratamento superficial do agregado graúdo e adições na água de amassamento foram utilizados:

- sílica coloidal (Cembinder 75 – Acknozobel), com diâmetro médio de 3 nm, dispersa, já pelo fabricante, em solução aquosa coloidal com 15% de sólidos, com dispersão estabilizada em meio de sódio (Na₂O). As características físicas estão apresentadas na Tabela 2. Foi adotada por ser um material pozolânico, que em idades avançadas reage com os compostos hidratados do cimento formando um composto mais resistente (C-S-H); e,
- hidrofugante à base de uma emulsão de octiltriétoxissilano solúvel em água, disponível no mercado nacional para a impermeabilização de materiais porosos, tais como blocos cerâmicos e de concretos, rochas e argamassas, com pH igual a 4,93 e densidade de 1,02 g/cm³ (COSTA, 2014). Os dados obtidos pelo fabricante estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 – Características físicas da sílica coloidal utilizada

Área superficial	750 m ² /g
Tamanho médio de partículas	3 nm
pH	10,5
Viscosidade	8 cP
Densidade	1,2 g/cm ³
Aspecto	Líquido incolor

Fonte: Autora, 2018.

Tabela 3 – Características físicas do silano.

pH	4,93
Densidade	1,02 g/cm ³
Aspecto	Líquido amarelado

Fonte: Autora, 2018.

A sílica e o hidrofugante, utilizados para tratamento superficial e adição na água de amassamento, vieram de fábrica em soluções aquosas, as quais foram novamente diluídas para os tratamento e adições. A siluição se deu em um teor de 2% da solução aquosa de silano e nanossílica (do fabricante) em relação à massa total de água de amassamento e à massa total de água utilizada para imersão do agregado graúdo.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS GRAÚDOS

A superfície do agregado graúdo foi tratada previamente à mistura por meio de duas soluções, a saber:

1. Agregado dopado com nanossílica (AN) – nanossílica diluída em água, num teor de 2% em relação à massa de água, adotado conforme resultados obtidos de Ping e Beaudoin (1992).
2. Agregado dopado com silano (AS) – silano diluído em água, num teor de 2% em relação à massa de água, adotado mesmo teor da nanossílica para fins comparativos.

Os agregados permaneceram imersos, cada um na sua solução aquosa por 24 h (Figura 13) e, após esse período, foram secos ao ar em ambiente de laboratório, por pelo menos 24 h (Figura 14).



Figura 13 – Agregado graúdo em solução aquosa com tratamento de nanossílica
Fonte: Autora, 2018.



Figura 14 – Agregado graúdo secando em ambiente de laboratório após 24 horas imerso em solução aquosa
Fonte: Autora, 2018.

3.2.2 ADIÇÃO NA ÁGUA DE AMASSAMENTO

A adição de silano e nanossílica na água de amassamento aconteceu no momento da mistura de todos os materiais na betoneira, para posterior comparação, a saber:

1. Água – sem qualquer tipo de adição;
2. Nanossílica na água de amassamento num teor de 2% em relação à massa de água. Foi adotado mesmo teor utilizado no tratamento superficial para fins comparativos;
3. Silano na água de amassamento num teor de 2% em relação à massa de água, o teor foi mantido em 2% em relação à massa de água como base comparativa.

As soluções de silano e nanossílica foram diluídas na água de amassamento. Os teores foram determinados pelas pesquisas citadas na revisão bibliográfica e mantido o mesmo em todas as variações de concretos para base de comparação. Durante a mistura foram feitas as correções necessárias para ajuste da consistência nos traços descontando a massa do hidrofugante da massa da água de amassamento.

3.2.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para a realização do estudo experimental foram produzidos cinco tipos de concreto, observando os procedimentos indicados na NBR 12655 (ABNT, 2006). O concreto dosado pelo método da ABCP adotando-se um fck igual a 30 MPa e abatimento de 90 ± 10 mm, resultando o traço unitário em massa igual: 1:1,51:1,55:0,48. O traço foi mantido constante para todos os concretos produzidos, sendo esses apresentados na Tabela 5.

A mistura do concreto realizada em betoneira GMEG MB-120P, na sequência: 80% da água, silano/nanossílica (para os concretos SAA e NAA, com nanossílica e silano na água de amassamento, respectivamente), brita, cimento, areia e o restante da água, com tempo total de mistura de 5 minutos.

Tabela 4 – Traços utilizados para os concretos

Tabela de traços		Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Silano	Nanossílica
Referência (REF)	Traço	1	1,512	1,552	0,48	-	-
	Massa (kg)	10	15,12	15,52	4,80	0	0
Agregado tratado com nanossílica (ATN)	Traço	1	1,512	1,552	0,48	-	-
	Massa (kg)	10	15,12	15,52	4,80	-	-
Agregado tratado com silano (ATS)	Traço	1	1,512	1,552	0,48	-	-
	Massa (kg)	10	15,12	15,52	4,80	-	-
Nanossílica na água de amassamento (NAA)	Traço	1	1,512	1,552	0,4704	-	0,0096
	Massa (kg)	10	15,12	15,52	4,704	-	0,096
Silano na água de amassamento (SAA)	Traço	1	1,512	1,552	0,4704	0,0096	-
	Massa (kg)	10	15,12	15,52	4,704	0,096	-

Fonte: Autora, 2018.

3.2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Após a mistura, os concretos foram avaliados no estado fresco pelo ensaio de abatimento de tronco de cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998) para avaliação da consistência.

Também foram realizados ensaios para a determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico conforme previsto na NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.2.5 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para cada tipo de tratamento foram moldados doze corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os moldes foram previamente untados com óleo desmoldante, adensados manualmente, com auxílio de uma haste metálica, em duas camadas, conforme procedimento da NBR 5738 (ABNT, 2003). As superfícies foram rasadas com espátula metálica.

A massa dos corpos de prova foi aferida para determinação da massa específica no estado fresco. Ainda nos moldes, os corpos de prova ficaram por 24 horas em ambiente de laboratório. Após esse período, os corpos de prova foram

desmoldados e levados para câmara úmida, onde foram armazenados até a data de realização dos ensaios no estado endurecido.

Também foi determinado o teor de ar pelo método gravimétrico conforme instruções da NBR 9833 (ABNT, 2003).



Figura 15 – Corpos de prova logo após moldagem
Fonte: Autora, 2018.



Figura 16 - Corpos de prova em câmara úmida aguardando a realização do ensaio
Fonte: Autora, 2018.

3.2.6 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais – UTFPR utilizando prensa hidráulica EMIC DI3000 (Figura 17), segundo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Foram rompidos quatro corpos de prova para cada idade. Para a realização dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, os corpos de prova foram retificados para garantir a distribuição uniforme das cargas aplicadas.



Figura 17 – Prensa para ensaio de resistência à compressão
Fonte: Autora, 2018.

Após a realização do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, as amostras fraturadas de cada tipo de concreto foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura a fim de verificar a espessura e as características morfológicas da zona de transição.

Essas imagens foram realizadas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Curitiba) utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS), marca Zeiss, modelo EVO MA15 equipado com detectores de elétrons secundários (SE), de alto vácuo (HV), de pressão variável (VP) e de elétrons retroespalhados (BSE). Para a detecção de raios-X e análise da natureza dos componentes do material foi utilizado o detector de Sistema de Energia Dispersiva (EDS) Oxford X-Mas de 20 mm²

As amostras passaram por um vaporizador de Au/C para deposição de filme condutor previamente às imagens.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi feita uma análise estatística com os resultados de resistência à compressão dos cinco concretos aos 28 dias. Foi utilizado o software PAST – Palaeontological Statistics, versão 3.2.1. (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001).

Foram aplicados dois testes estatísticos, a saber: análise de variância (ANOVA) e o teste de pareamento de Tukey adotando nível de significância de 5%. Os dois testes foram realizados com o intuito de registrar se as resistências obtidas nos diferentes tipos de concreto são iguais ou diferentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Os concretos foram caracterizados para determinação da consistência, massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico (NBR 9833:2003). Na tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos para tais propriedades.

Tabela 5 – Resultados obtidos para os concretos no estado fresco

Concreto	Abatimento (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Teor de ar
Referência (REF)	95	2279,10	3,69%
Agregado tratado com nanossílica (ATN)	75	2380,96	0,20%
Agregado tratado com silano (ATS)	35	2355,49	0,46%
Nanossílica na água de amassamento (NAA)	30	2317,30	2,08%
Silano na água de amassamento (SAA)	35	2330,03	1,54%

Fonte: Autora, 2018.

Os resultados do teste de abatimento de tronco de cone dos concretos mostraram que houve um aumento considerável na consistência do concreto. Os efeitos foram mais intensos com o uso de silano, tanto para o tratamento superficial do agregado graúdo, como na água de amassamento, e com a adição da nanossílica na água de amassamento. No caso dos silanos, essa redução da fluidez pode ter sido ocasionada por reações químicas entre o silano, a água e o cimento e no caso da nanossílica, devido a elevada área superficial (750 m²/g) desse material, mas ambos carecem de maiores investigações.

O mesmo traço foi adotado em todos os concretos, como base comparativa, e a relação água/cimento também se manteve constante, o fato demonstra que os concretos com presença de nanossílica e silano necessitam de mais água para manter a mesma trabalhabilidade. Caso a relação a/c seja mantida e queira-se manter a trabalhabilidade, aditivos redutores de água, tais como os plastificantes e superplastificantes podem ser empregados.

Em relação ao teor de ar, observa-se que os tratamentos propiciaram um menor teor de ar incorporado durante a mistura, sendo essa redução mais pronunciada para os concretos com tratamento superficial dos agregados com

nanossilica (ATN) e silano (ATS) cerca de 94% e 87%, respectivamente, em relação ao concreto de referência.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Na Figura 18 estão apresentados os resultados médios da resistência à compressão em função da idade para os diferentes tipos de concreto analisados.

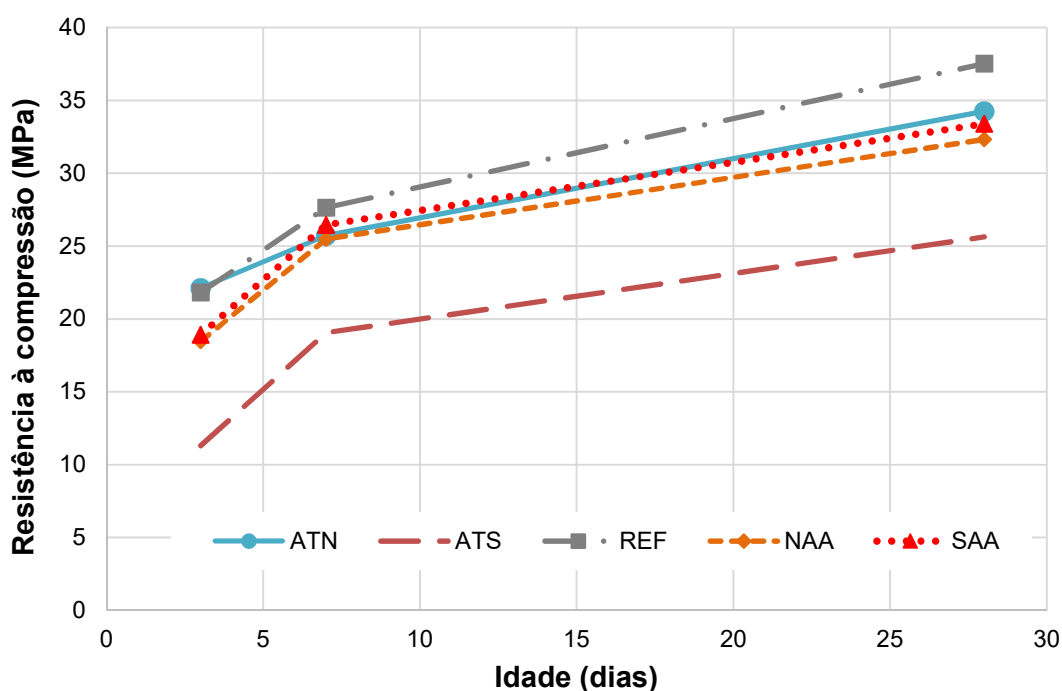


Figura 18 – Resistência à compressão média em função da idade para os diferentes tipos de concreto analisados
Fonte: Autora, 2018.

Observa-se na Figura 18 que o concreto de referência atingiu a resistência especificada na dosagem ($f_{cm} > f_{cj} = 36,6$ MPa) aos 28 dias. O concreto tratado com silano (ATS) apresentou menor resistência à compressão em relação aos concretos produzidos em todas as idades. Para o concreto com o agregado tratado com a nanossilica (ATN) teve a maior resistência inicial, a taxa de crescimento aos 7 e 28 dias foi 16% e 9% inferior ao concreto de referência (REF), respectivamente. Os concretos com silano e nanossilica adicionados a água de amassamento apresentaram comportamento semelhante em todas as idades avaliadas.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 3 e 7 dias de idade não foram retificados. Esse fato pode justificar as resistências dos

concretos tratados não terem atingido valores superiores. Tal como mostra as figuras 19 e 20. O ensaio não foi conclusivo para identificar se os corpos de prova romperam efetivamente ou apenas apresentaram uma falha devido a carga não ter sido uniformemente distribuída. Outra questão pode ser uma falha no adensamento dos corpos de prova, tendo em vista que estes concretos apresentaram maior consistência.



Figura 19 – Corpo de prova do agregado tratado com silano rompido após 3 dias
Fonte: Autora, 2018.



Figura 20 – Corpo de prova do agregado tratado com silano rompido após 7 dias
Fonte: Autora, 2018.

Na tabela 6 estão apresentados os resultados de resistência à compressão obtido aos 28 dias. Observa-se que os resultados do concreto de referência e o do agregado tratado com silano (ATS) foram similares, entretanto o ATS apresentou maior coeficiente de variação. Os concretos NAA e SSA apresentaram resultados similares, porém inferiores ao REF e ATS.

Tabela 6 – Dados concretos aos 28 dias

Concreto	Resistência mínima [MPa]	Resistência máxima [MPa]	Resistência média [MPa]	Desvio padrão [MPa]
REF	34,21	39,81	37,53	2,47
ATN	28,79	40,24	34,24	5,24
ATS	21,71	28,81	25,64	2,93
NAA	29,46	34,48	32,33	2,26
SAA	31,73	35,90	33,40	2,17

Fonte: Autora, 2018.

Para verificar se os resultados obtidos diferem estatisticamente foi feita a análise de variâncias (ANOVA) e a comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey. Utilizando-se o software Past foi testada a hipótese de que as médias dos dados de ruptura aos 28 dias são iguais. Os resultados das médias e seu respectivo padrão estão mostrados na Figura 21.

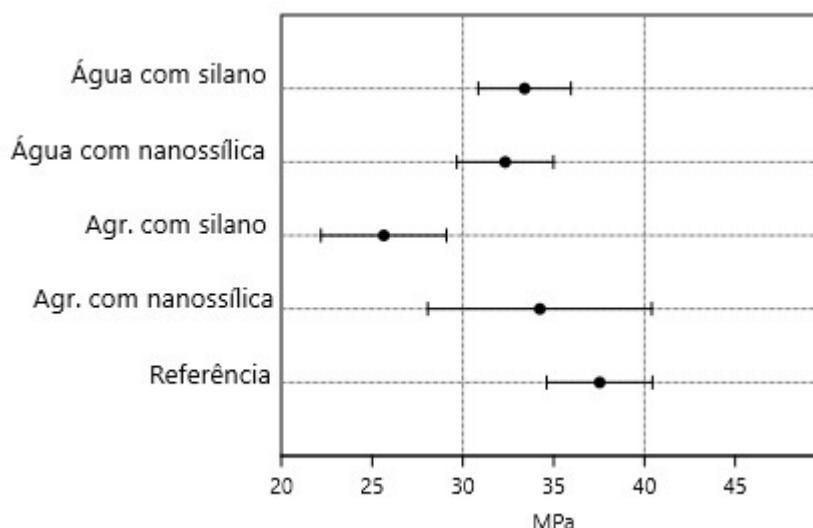


Figura 21 – Gráfico com erros baseado na análise estatística dos rompimentos aos 28 dias.

Fonte: Autora, 2018

O teste de Tukey foi realizado também pelo software Past e a tabela 7 mostra os resultados. O teste de Tukey analisa os valores acima da diagonal principal e identifica as diferenças. Sendo assim, de acordo com o teste de Tukey o concreto ATS é diferente do REF e do ATN e o SAA é diferente do ATS.

Tabela 7 – Resultados teste de Tukey para as amostras aos 28 dias

Amostra	Concretos				
	REF	ATN	ATS	NAA	SAA
A		0,6115	0,000854	0,2046	0,4018
B	2,041		0,01361	0,9146	0,9955
C	7,372	5,331		0,06667	0,02778
D	3,225	1,185	4,147		0,9892
E	2,565	0,5241	4,807	0,6606	

Com base na análise estatística e nas comparações de médias por intermédio do teste Tukey, pode-se dizer que os concretos: REF; ATN; NAA; SAA são estatisticamente iguais. Sendo assim, não foi possível observar diferenças em termos de melhoria nessa propriedade quando as adições e tratamentos são feitos. Para os materiais, métodos e traço utilizados, os tratamentos empregados não foram satisfatórios, sendo economicamente inviáveis, tendo em vista o custo do silano e nanossílica e nenhum ganho em termos de resistência mecânica.

Algumas hipóteses podem justificar tais resultados:

- (a) O teor de silano utilizado na solução para o tratamento dos agregados, embora lhe garantissem a hidrofugação da superfície, pode não ter sido suficiente para promover as ligações entre o silano e a matriz cimentícia na interface. Isso pode ser verificado nas Figuras 22, 23 e 24 da superfície dos agregados. Na brita referência a superfície apresenta-se mais lisa, enquanto que na brita tratada com silano e nanossílica vemos o material na superfície do agregado, mas a superfície não está toda recoberta, indicando que o teor pode não ter sido adequado.

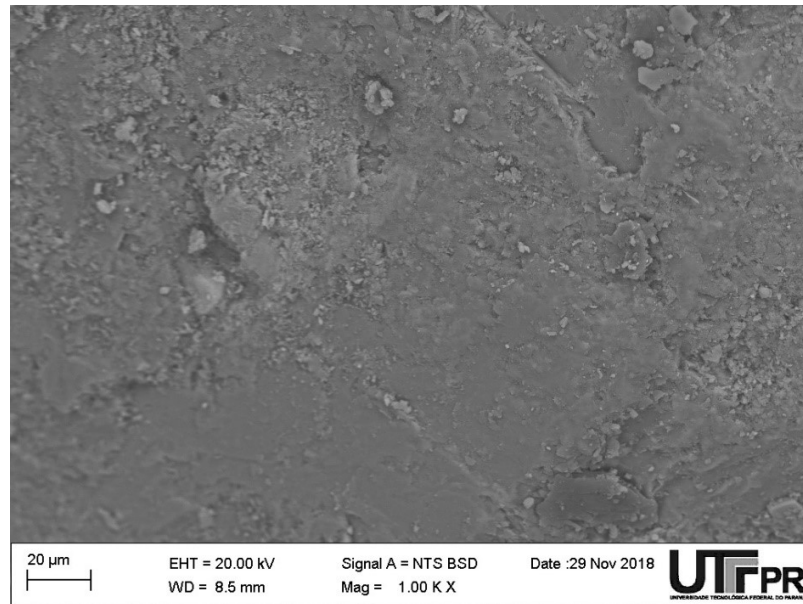


Figura 22 – Agregado graúdo sem tratamento
Fonte: Autora, 2018.

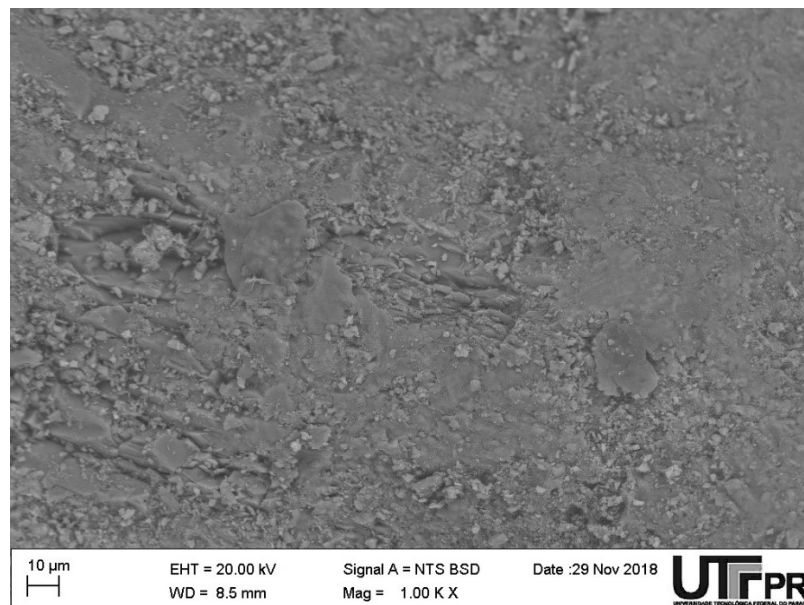


Figura 23 – Brita com tratamento superficial de nanossílica
Fonte: Autora, 2018.

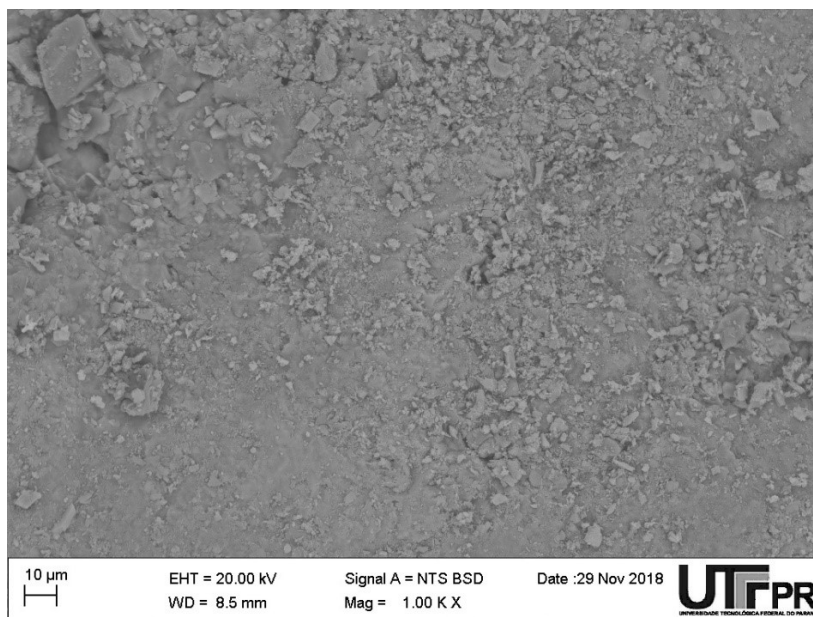


Figura 24 – Agregado graúdo com tratamento superficial de silano
Fonte: Autora, 2018.

- (b) De maneira correlata, o teor de nanossílica, tanto como tratamento superficial ou como adição na água de amassamento também foi insuficiente para estabelecer reações pozolânicas, estudos com teores mais elevados de nanossílica e em idades mais avançadas carecem de investigação;
- (c) As ligações na interface ocorrem predominantemente pelas forças de Van der Waals que dependem exclusivamente do contato entre as fases, os tratamentos superficiais podem propiciar um aumento da aderência nessa região. Porém, não necessariamente, irão aumentar a resistência à compressão. A diferença de contato agregado-matriz pode ser percebida nas Figuras 25 e 26, nas quais é possível perceber uma densificação na zona de transição dos concretos que receberam nanossílica em relação ao concreto de referência.

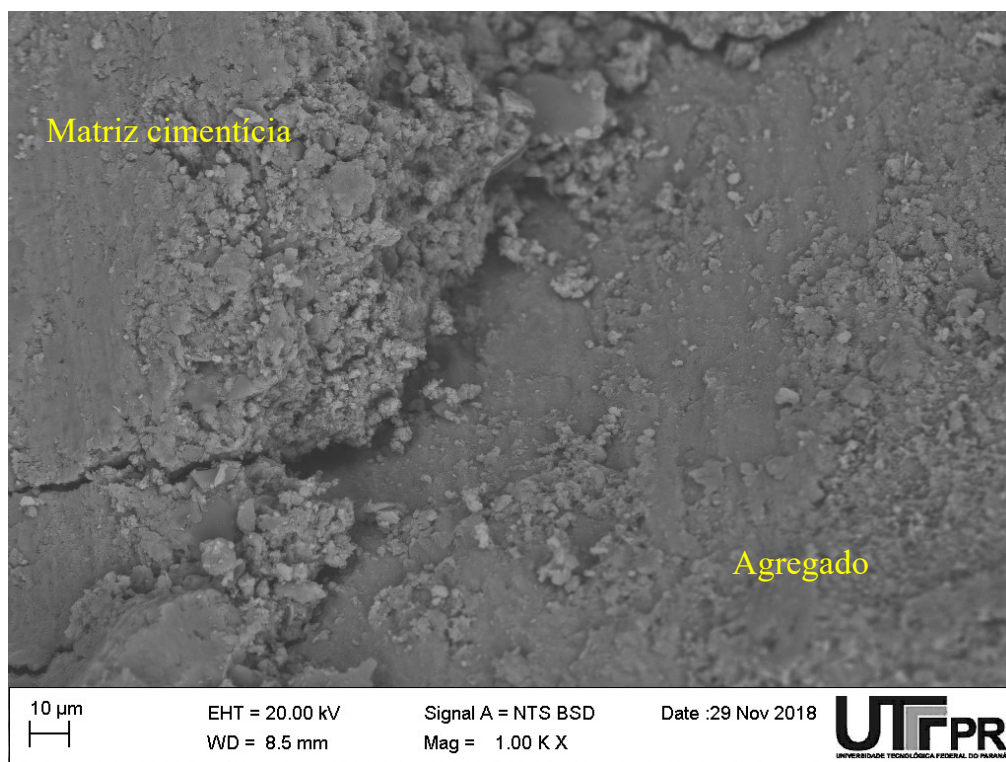


Figura 25 – Zona de transição concreto referência
Fonte: Autora, 2018.

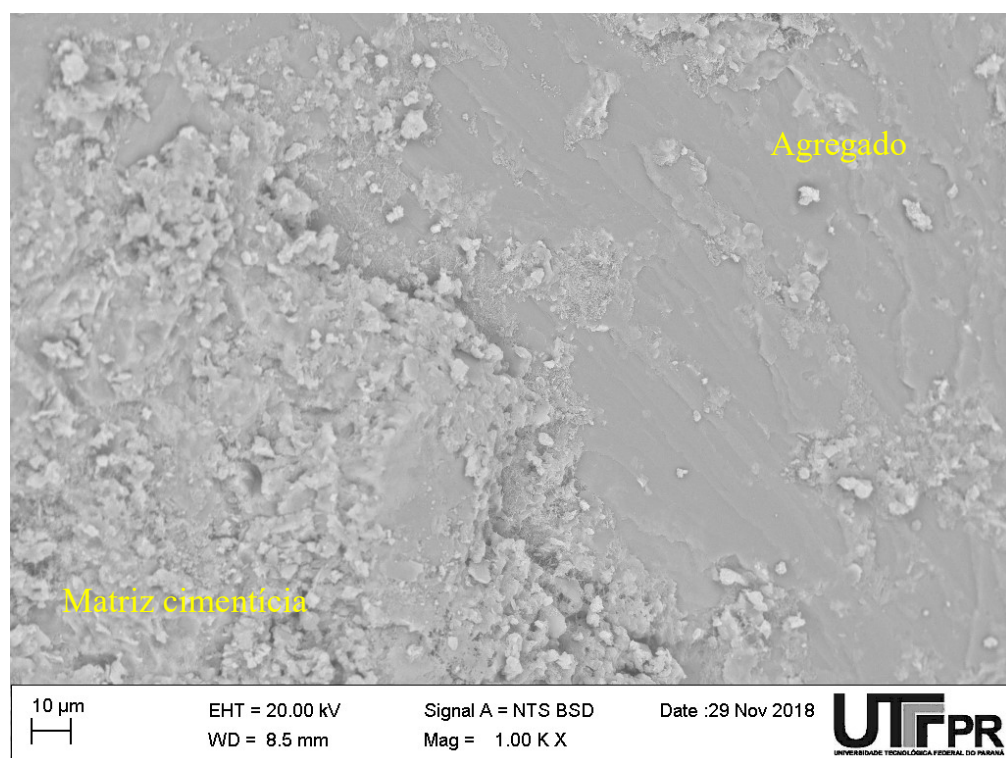


Figura 26 – Zona de transição concreto com nanossílica na água de amassamento
Fonte: Autora, 2018.

Essa densificação não é conclusiva, pois é preciso a investigação em maior número de imagens. Entretanto, essa diferença também poderia ser aumentada em idades avançadas visto que a nanossílica pode apresentar reação pozolânica. Ensaio de microscopia e resistência à compressão dos concretos com uso de nanossílica em idades superiores a 28 dias carecem de investigação.

No concreto, com nanossílica na água de amassamento, foi possível perceber alguns produtos de hidratação, um pouco de silicato, ainda em quantidade pequena, e uma grande quantidade etringita conforme Figura 27.

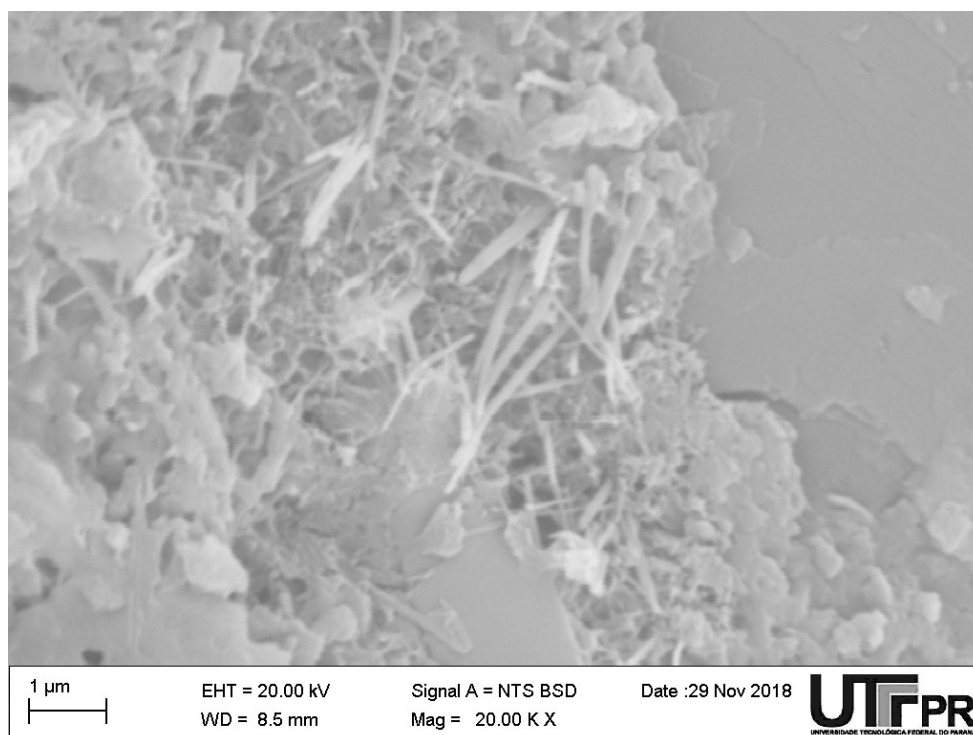


Figura 27 – Concreto com adição de nanossílica na água de amassamento, com presença de silicato e etringita

Fonte: Autora, 2018.

- (d) Como aumentou muito a consistência dos concretos com a adição de nanossílica e silano, tanto na água de amassamento quanto no tratamento superficial do agregado, dificultou a moldagem do corpo de prova, então pode ser mais eficiente a utilização de aditivo para dispersar essas partículas

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do uso de silano e nanossílica na resistência do concreto, seja como tratamento superficial do agregado graúdo ou como adição à água de amassamento, ambos previamente à mistura. Para ambos os casos, foi utilizada uma solução aquosa com teor de silano ou nanossílica de 2% em relação à massa de água. Com base nos resultados obtidos nesse estudo, é possível concluir que:

- O uso de silano e nanossílica como tratamento superficial ou como adição na água de amassamento aumenta a consistência do concreto e reduz o teor de ar incorporado durante a mistura;
- O uso de silano como tratamento superficial do agregado reduziu significativamente a resistência à compressão do concreto;
- A resistência à compressão do concreto aos 28 dias não foi melhorada com o uso de silano e nanossílica em adição na água de amassamento e para o tratamento superficial do agregado graúdo com a nanossílica. Dessa forma, não haveria razão para utilizar um concreto com adições, visto que seu custo não compensaria; e
- As imagens da microscopia eletrônica de varredura identificaram a presença de nanossílica e silano na superfície do agregado, no entanto, o teor utilizado não foi suficiente para promover o recobrimento da superfície.

Como sugestão para trabalhos futuros e ampliação dos estudos nos tratamentos de agregados e adições na água de amassamento das substâncias silano e nanossílica, aponta-se:

- Investigar a influência de diferentes teores de nanossílica e tipo de silano como tratamento superficial de agregados;
- Avaliar o efeito dos tratamentos superficiais com essas soluções para diferentes agregados, incluindo os agregados reciclados;
- Analisar diferentes métodos de ensaio para avaliação da interface agregado-matriz cimentícia.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P.; SINGH, R. P.; AGGARWAL, Y. Use of nano-silica in cement based materials – A review. **Cogent Engineering**, 2, 2015. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- CHUNG, D. D. L. Interface engineering for cement-matrix composites. **Composite Interfaces**, v. 8, p. 67-81, 2000.

COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. 2014. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

DANTAS, M. H. O.; **Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland**. Dissertação (Programa de Pós Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013

HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., RYAN, P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica** **4(1)**. 2001. 9p.

KATZ, A. Treatments for improvement of recycled aggregate. **Journal of materials in civil engineering** 16 (6). 2004. 7p.

MEDEIROS, M. H. F.; GOMES, T. S.; HELENE, P. Hidrofugantes de superfície: estudo da capacidade de barrar o ingresso de água no concreto. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.8, p. 21-28, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2ª Edição, São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 3ª Edição, São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTEIRO, P. J. M. **Controle da Microestrutura para o Desenvolvimento de Concretos de Alto Desempenho**: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1993. Disponível em <http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00086.pdf>. Acesso em 11 mai. 2017.

NILI, M.; EHSANI, A.; SHABANI, K. **Influence of nano-SiO₂ and microsilica on concrete performance**. In: Seco International Conference on Sustainable Construction Materials and Technology, 2010. Ancona, Italy. 2010.

OLLIVIER, J. P; MASO, J. C; BOURDETTE, B. **Interfacial Transition Zone in Concrete**. In: Elsevier Science Inc, 2. P 30-38. USA, 1995.

PING, X; BEAUDOIN, J. J. Modification of transition zone microstructure - silica fume coating of aggregate surfaces. **Cement and Concrete Research**, 22. P 597-604. USA, 1992.

PLUEDDEMANN, E. P.; Adhesion Trough Silane Coupling Agents. *Journal of Adhesion Science and Technology - J ADHES SCI TECHNOL*. 5. P 831-842. USA, 1991

QING, Y.; ZENAN, Z.; DEYU, K.; RONGSHEN, C. **Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume**. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 3, p. 539-545, 2007.

SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 36, n. 1, p. 838-844, 2012

SANTOS, W. F. **Tratamento superficial dos agregados reciclados de RCD com hidrofugantes**. 2016. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESEN, P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. **Interface Science**, n.12, p. 411- 421, 2004.

SILVA, R. N. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho**. 2010. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2010.

SINGH, L. P; KARADE, S. R; BHATTACHARYYA, S. K; YOUSUF, M. M; AHALAWAT, S. Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. **Construction and Building Materials**, n. 47, 2013.

STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. **Show more Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes**. Composites Part B: Engineering, v.43, p. 2706-2710, 2012.

TRIGO, A. P. M.; LIBÓRIO, J. B. L. Estudo da técnica de dopagem de agregados em concretos de alto desempenho. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 53, p. 111-115, 2009.

TSUJINO, M.; NOGUCHI, T.; TAMURA, M.; KANEMATSU, M; MARUYAMA, I. **Application of Conventionally Recycled Coarse Aggregate to Concrete Structure by Syrface Modification Treatment**. In Journal of Advanced Concrete Technology, v. 5, n. 1, p. 13-25, 2007.