

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

LUCAS ANTONIO RIGO

**ESTUDO DA SINERGIA ENTRE NANO SÍLICA E MICRO SÍLICA EM
ARGAMASSAS PARA APLICAÇÃO EM CONCRETOS COMO
PROPOSTA DE MELHORIA DE DESEMPENHO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2016**

LUCAS ANTONIO RIGO

**ESTUDO DA SINERGIA ENTRE NANO SÍLICA E MICRO SÍLICA EM
ARGAMASSAS PARA APLICAÇÃO EM CONCRETOS COMO
PROPOSTA DE MELHORIA DE DESEMPENHO**

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

Orientador de conteúdo: Prof. Dr. Mario Arlindo Paz Irrigaray

PATO BRANCO

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA SINERGIA ENTRE NANO SÍLICA E MICRO SÍLICA EM ARGAMASSAS PARA APLICAÇÃO EM CONCRETOS COMO PROPOSTA DE MELHORIA DE DESEMPENHO

LUCAS ANTONIO RIGO

No dia 23 de junho de 2016, às 14h45min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº14-TCC/2016.

Orientador: Prof. Dr. MÁRIO ARLINDO PAZ IRRIGARAY (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^a. Msc. ELOISE APARECIDA LANGARO (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Msc. JOSÉ MIGUEL ETCHALUS (DACOC/UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao meu orientador Mário Arlindo Paz Irrigaray, pelo suporte, incentivo e compartilhamento de conhecimento.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo emocional e apoio incondicional.

E a todos os que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

RIGO, Lucas Antonio: Estudo da Sinergia entre Nano Sílica e Micro Sílica em Argamassas para Aplicação em Concretos como Proposta de Melhoria de Desempenho. 2016. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Com o aumento da construção civil e de seu porte de obras, nos dias atuais nota-se que o emprego de materiais com melhores desempenhos vem sendo cada vez mais requisitados para atender tanto a demanda pela quantidade quanto pela eficiência, aplicabilidade e viabilidade. Um dos materiais em que mais se aplicam pesquisas, devido seu grande uso na construção civil, é o concreto, o qual é constituído de vários materiais para sua concepção. Para a melhoria do desempenho dos concretos, surgiram estudos que visam a busca de características mais eficientes nos quesitos de trabalhabilidade, resistência e durabilidade. Na concepção destes produtos é comum e sensato o uso de adições minerais, sendo uma destas a nano sílica e micro sílica, ambas pozolanas reagentes com produtos de hidratação do cimento. A boa relação entre as adições e os materiais que compõem o concreto podem ser o fator mais significativo para a sua viabilidade de produção. Buscando a melhoria no desempenho dos constituintes dos concretos convencionais, o estudo deste trabalho foi realizado sobre o emprego de dois tipos de pozolanas, nano e micro sílica, comprovando o potencial de melhoria das características mecânicas e físicas em argamassas para aplicação em concretos. Além disso, através da análise dos resultados das argamassas e com embasamento na revisão teórica, verificou-se a viabilidade da aplicação de micro e nano sílica em concretos convencionais como alternativa para melhorar o desempenho, desde que feito o uso racional dos materiais componentes e adições.

Palavras-chave: Argamassa; Nano Sílica; Micro Sílica; Melhoria de Desempenho

ABSTRACT

RIGO, Lucas Antonio. Study of Synergy between Nano Silica and Silica Fume in Mortars for Application in Concrete with Proposal to Improve Performance. 2016. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Nowadays, in consequence of construction development, there is an increase in the size of the civil construction works, which the use of materials with better performances are required to meet the demand for quantity, efficiency, applicability and feasibility. One of the materials most researched, due to the extensive use in construction is the concrete, which is produced from several materials. To improve the performance of concrete has been developed several studies that aim to identify the most efficient characteristics in the categories of workability, strength and durability. In the design of these products is common to use mineral additions, including the nano silica and silica fume, both pozzolan reagents with cement hydration products. A good proportion between the mineral addition and the material composition of the concrete may be the most significant factor for its production feasibility. Seeking to improve the performance of the constituents of conventional concrete, the study of this paper has focused on the use of two types of pozzolan, nano silica and silica fume, demonstrating their potential to improve the mechanical and physical characteristics of mortars for use in concrete.

Furthermore, the analysis of the results of mortars and foundation in theoretical review verified the viability of application of nano silica and silica fume in conventional concrete as an alternative to enhance performance, since it made the rational use of components and materials additions.

Keywords: Mortar; Nano silica; Silica Fume; Performance Improvement

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 8 -- DIAGRAMA DAS ATIVIDADES	46
FIGURA 9 - GRÁFICO COMPARANDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS DE REFERÊNCIA COM AS MISTURAS COM NANO SÍLICA E COM ADITIVO CONVENCIONAL EM RELAÇÃO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	60
FIGURA 10 - GRÁFICO COMPARANDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS DE REFERÊNCIA COM AS MISTURAS COM SÍLICA ATIVA EM RELAÇÃO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	61
FIGURA 11 - GRÁFICO COMPARANDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS COM DIFERENTES RELAÇÕES ENTRE NANO E MICRO SÍLICA E AS COM APENAS ADITIVO CONVENCIONAL	62
FIGURA 12 - GRÁFICO COMPARANDO A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MISTURAS COM DIFERENTES RELAÇÕES ENTRE NANO E MICRO SÍLICA E AS COM APENAS ADITIVO CONVENCIONAL	63
FIGURA 13 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS MISTURAS ELABORADAS	64
FIGURA 14 - GRÁFICO COM O CONSUMO DE AREIA PARA CADA MISTURA NA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE 0,22	66
FIGURA 15 - GRÁFICO COM O CONSUMO DE AREIA PARA CADA MISTURA NA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE 0,28	67
FIGURA 16 - GRÁFICO COM O CONSUMO DE AREIA PARA CADA MISTURA NA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE 0,35	68
FIGURA 17- CONSUMO DE AGLOMERANTE DAS MISTURAS DE REFERÊNCIA (CPREF), APENAS COM NANO SÍLICA (CPNS) E APENAS COM MICRO SÍLICA (CPMS) NAS DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/AGLOMERANTE.....	72
FIGURA 18 - CONSUMO DE AGLOMERANTE DAS MISTURAS EMPREGANDO NANO E MICRO SÍLICA CONJUNTAMENTE (MNS).....	73
FIGURA 19 - CONSUMO DE AGLOMERANTE PARA PRODUIR 1 m ³ DE ARGAMASSA DAS MISTURAS DE REFERÊNCIA, SOMENTE COM NANO SÍLICA E SOMENTE COM MICRO SÍLICA PARA CADA MPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	74
FIGURA 20 - CONSUMO DE AGLOMERANTE PARA PRODUIR 1 m ³ DE ARGAMASSA DAS MISTURAS EMPREGANDO NANO SÍLICA E MICRO SÍLICA JUNTAMENTE PARA CADA MPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA PARA O EXPERIMENTO REALIZADO POR JO ET AL. (2006).....	41
TABELA 3 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA DO EXPERIMENTO (MPA)	42
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO CIMENTO CP VARI.....	48
TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO.....	49
TABELA 8 - CARACTERÍSTICA DA SÍLICA ATIVA UTILIZADA.....	49
TABELA 9 - CARACTERÍSTICA DA NANO SÍLICA UTILIZADA.....	50
TABELA 10 – ADIÇÕES MINERAIS E RELAÇÃO ÁGUA CIMENTO DE CADA CORPO MISTURA	53
TABELA 12 - TRAÇOS DAS ARGAMASSAS ELABORADAS	55
TABELA 13 - RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DAS ARGAMASSA ELABORADAS.....	57
TABELA 14 - RESULTADO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 7 DIAS DAS ARGAMASSAS ELABORADAS	58
TABELA 15 - DESEMPENHO DO ADITIVO DE REFERÊNCIA AOS 7 DIAS	58
TABELA 16 - CONSUMO DE AGLOMERANTE PARA CONCEPÇÃO DE 1 M ³ DE ARGAMASSA	69
TABELA 17 - CONSUMO DE AGLOMERANTE PARA 1 M ³ DE ARGAMASSA PARA CADA 1 MPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivo Específico	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	ESTRUTURA DO CONCRETO	16
2.1	PASTA ENDURECIDA	16
2.1.1	Cimento hidratado	16
2.1.2	Vazios na pasta endurecida	18
2.1.3	Água na pasta endurecida	19
2.2	FASE AGREGADO	19
2.3	ZONA DE TRANSIÇÃO	20
3	CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO	22
3.1	APLICAÇÕES	22
3.2	MATERIAIS PARA CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO	23
3.2.1	Cimento Portland	23
3.2.2	Agregados	24
3.2.3	Aditivos químicos	25
3.2.4	Aditivos minerais	25
3.3	MÉTODOS PARA DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO	26
3.4	MISTURA DE COMPONENTES	27
3.5	CURA	28
4	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO	30
4.1	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	30
4.1.1	Trabalhabilidade	30
4.1.1.1	Exsudação	31
4.1.1.2	Segregação	32
4.1.2	Propriedades no estado endurecido	32
4.1.2.1	Propriedades Mecânicas	33
4.1.2.1.1	Resistência à compressão	33
4.1.2.1.2	Resistência à tração	34
4.1.2.1.3	Módulo de elasticidade	34
4.1.2.1.4	Coeficiente de Poisson	35
4.2	DURABILIDADE	35
5	ADIÇÕES MINERAIS	36
5.1	SÍLICA ATIVA	37
5.1.1	Propriedades	37
5.1.2	Aplicação	37
5.2	NANO SÍLICA	40
5.2.1	Propriedades	40
5.2.2	Aplicação	40
6	PROGRAMA EXPERIMENTAL	44
6.1	VARIÁVEIS	44
6.1.1	Variáveis dependentes	44
6.1.2	Variáveis independentes	44
6.2	MATERIAIS	47
6.2.1	Cimento	47

6.2.2	Agregado miúdo.....	48
6.2.3	Sílica Ativa	49
6.2.4	Nano sílica	50
6.2.5	Aditivos	50
6.2.6	Água.....	51
6.3	MÉTODOS	51
6.3.1	Caracterização das argamassas com as adições	51
6.3.2	Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassa com as adições	54
6.3.3	Estudo da viabilização da produção do concreto	54
7	RESULTADOS E ANÁLISES.....	55
7.1	ANÁLISE DAS ARGAMASSAS.....	55
7.2	VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM CONCRETOS	77
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil é um dos que mais cresce devido ao atual aumento da demanda por infraestrutura e moradias. Juntamente com estes fatores, desenvolveu-se a necessidade de maior desempenho e menor custo de produção. Para conciliar estes aspectos, novos materiais têm surgido através de pesquisas que buscam potencializar o aproveitamento das tecnologias e abordar novos conceitos para o emprego racional dos recursos convencionais.

Diante deste cenário, a discussão da temática dos materiais é essencial devido a influência direta que estes possuem na qualidade, desempenho e viabilidade das construções. Dentre estes destaca-se o concreto, que é amplamente empregado na construção civil e, apesar de diversos estudos científicos de suas propriedades, ainda guarda grande potencial de pesquisa (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para que se obtenha concretos com melhores desempenhos, é comum o uso de adições em suas misturas, que são materiais que propiciam diferentes propriedades ao concretos, os quais podem alterar quimicamente através de reações com produtos da hidratação do concreto, tal como as pozolanas, e aqueles que podem simplesmente preencher os vazios que o encontram-se no concreto, tal como os fillers. Um destes materiais pozolânicos é a sílica ativa, ou micro sílica, que reage com partículas resultantes da hidratação dos componentes do cimento alterando química e fisicamente a microestrutura da pasta, melhorando a zona de transição e, conseqüentemente, a ligação entre matriz e agregado (BROOKS; NEVILLE, 2013). O aprimoramento e estudo das micro sílicas, juntamente com o desenvolvimento da nanotecnologia, resultou na descoberta de partículas menores, denominadas nano sílicas. Estas, devido as suas dimensões na ordem de 100 nm, possuem maior eficiência reativa e melhor preenchimento e ocupação de vazios quando comparadas às micro sílicas e outros componentes aglomerantes (JO *et al.*, 2007).

A adição de materiais pozolânicos no concreto influenciam principalmente as propriedades da sua matriz, o que pode ainda não ser o suficiente para obter-se um Concreto de Alto Desempenho (CAD). Como o comportamento em solidariedade de todos os materiais é o fator implicante em incrementos nas propriedades físicas

e, por vezes, em propriedades químicas, faz-se necessária a racionalização e seleção dos agregados para alcançar a melhor equalização entre o melhoramento da matriz e a eficiência destes componentes, aproximando o desempenho de ambos (NEVILLE; 1997).

Quanto às propriedades mais relevantes que os componentes atribuem ao concreto, também destaca-se o agregado graúdo. Este material é responsável principalmente pela melhoria do módulo de elasticidade, redução da retração, aumento à resistência química e corrosão, porém é o componente mais suscetível ao rompimento quando empregado em matrizes de argamassa que alcançam altas resistências, fazendo-se necessária a sua correta seleção para que se justifique o uso de tecnologias que melhorem a matriz desses concretos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A produção e concepção de um concreto composto com materiais convencionais, porém selecionados de forma adequada ao emprego, juntamente com eficientes adições de componentes pozolânicos, podem alterar as suas características e propriedades, tais como melhor durabilidade, maior resistência à compressão e à tração, diminuição de poros, podendo realçar a eficiência de cada material empregado e ainda trazer uma satisfatória relação entre custo e benefício.

Considerando-se que ainda são incipientes os estudos referentes ao desempenho mecânico da nano sílica, assim como a sua interação ou sinergia com a sílica ativa, considera-se importante o estudo do emprego de ambos materiais juntos, inicialmente aplicados à argamassa e, após o estudo e otimização dessa, fazer uma análise, baseado na teoria e nos resultados das argamassas, quanto a viabilidade de aplicação destas à concretos com proposta de melhores desempenho mecânico, físico e químico.

Além de uma proposta para o emprego mais racional das adições de nano sílica e micro sílica e estudo quanto a interação entre os materiais que compõe o concreto para que se tornem compatíveis com o projeto e uso, através de seu desempenho mecânico aplicado em argamassas, este trabalho também visa a busca pela viabilização da produção de concretos com melhores desempenhos para aplicação em projetos usuais com o melhor custo x benefício.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a sinergia entre nano sílica e micro sílica aplicadas em argamassas para a viabilização de produção de concretos com melhoria de desempenho.

1.1.2 Objetivo Específico

- Analisar o melhor desempenho mecânico entre diferentes teores de nano sílica e micro sílica aplicadas em argamassas;
- Estudar concretos com propostas de melhoria de desempenho mecânico, físico e químico;
- Verificar a viabilização das argamassas com adições de nano e micro sílica para aplicação em concretos convencionais como forma de otimização de desempenho mecânico;

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, possuindo diversas propriedades que o faz ser viável para que seja empregado nas obras, tanto pequenas quanto grandes.

Por ser um material de grande utilização deve-se atentar em algumas propriedades, mecânicas, físicas e químicas, as quais o fazem ser muito utilizado e confiável mas que também podem o transformar em um material que não se adeque a sua utilização, assim comprometendo o seu desempenho estrutural e, conseqüentemente, a segurança estrutural e comportamental necessária para seu emprego.

Com o desenvolvimento da tecnologia do concreto, vários componentes estão sendo estudados para melhorar as suas propriedades, sendo esses estudos aflorados da observação e a necessidade de melhores desempenhos, almejando a qualidade esperada e a diminuição de variáveis que nele se encontram, assim aproximando o projeto da execução.

Dentre os vários componentes utilizados alguns são totalmente inovadores, os quais são desenvolvidos a partir de materiais nunca utilizados antes, e outros que são materiais que passam por inovações, tal como um dos objetos de estudo deste trabalho, a nano sílica, proveniente da evolução dos estudos na micro sílica.

Por esse material ser uma evolução considerada recente abre-se um caminho novo para sua utilização e estudo, fazendo com que haja um leque maior na diversidade dos concretos, os diferindo nas propriedades e assim adequando e aperfeiçoando o uso nas mais diversas finalidades.

Contudo, a utilização da nano sílica ainda possui um elevado custo, fazendo com que seu emprego deva ser racionalizado. Para haver viabilidade em sua aplicação deve-se pensar na otimização da forma de uso de cada componente do concreto, considerando o seu custo e influência.

Sendo assim, o estudo da sinergia entre os materiais que compõe os concretos pode ser uma forma de fazer a viabilização de produção de concretos com melhores desempenhos estruturais para que sejam aplicados em obras usuais, visando o menor consumo de insumos porém extraindo todo o potencial destes materiais.

Com a análise dos estudos sobre nano sílica que já foram realizados e seus princípios, os quais assemelham-se aos da micro sílica, tem-se a noção dos pontos alterados com seu uso, podendo estes serem estudados com a estrutura disponível pelo laboratório da própria universidade.

2 ESTRUTURA DO CONCRETO

O estudo da estrutura do produto concreto é muito importante para que possa modificar e obter-se um material que adeque-se à finalidade de uso. Ao observarmos a seção transversal de um concreto rompido conseguimos nitidamente identificar duas fases: os agregados, em seus variados tamanhos, e o meio ligante, visto como uma massa continua envolvendo os agregados.

Ao analisar essa mesma seção, mas agora em nível microscópico, obtém-se mais características de estruturação desse produto. À esse nível de análise conseguimos entender e interpretar melhor a interação entre os componentes empregados e assim podemos tratar de mais fases, as quais são mais minuciosas do que as vistas apenas superficialmente (MEHTA, 1994).

2.1 PASTA ENDURECIDA

As reações que ocorrem na hidratação do cimento Portland (água + cimento) tem uma natureza complexa, em função à isso existem várias pesquisas sobre o comportamento desse material durante a hidratação e normalmente dizem que o concreto é o produto de uma tecnologia simples, mas de uma ciência complexa (AÏTCIN, 1998, p.115).

2.1.1 Cimento hidratado

O cimento anidro é caracterizado normalmente com partículas angulares entre 1 e 50 μm , obtido através da moagem do clínquer e uma pequena quantidade de sulfato de cálcio (SO_3 , abreviado por \bar{S}). O clínquer é uma mistura heterogênea, produzido em alta temperatura e composto por óxido de cálcio (CaO , abreviado por C), sílica (SiO_2 , abreviado por S), alumina (Al_2O_3 , abreviado por A) e óxido de ferro (Fe_2O_3 , abreviado por F), dentre outros. Os minerais do clínquer, no cimento comum,

podem ser correspondidas quimicamente entre 40% e 65% de silicato tricálcico (Ca_3SiO_5 , abreviado por C_3S e denominado fase alita), 15% a 30% de silicato dicálcico (Ca_2SiO_4 , abreviado por C_2S e denominado fase belita), 6% a 12% de aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, abreviado por C_3A e denominado fase aluminato) e 6% a 8% de ferro-aluminato tetracálcico ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$, abreviado por C_4AF e denominado fase ferrita) (MEHTA, 1994, p.23).

A reação dos silicatos de cálcio C_3S e C_2S com a água (H_2O , abreviado por H) gera silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, abreviado por C-H), sendo que ambos precisam a mesma quantidade de água para hidratação. Contudo, o C_3S hidrata-se muito mais rápido e é o responsável pelo aumento na resistência nas primeiras semanas, produzindo mais que o dobro de C-H em relação ao C_2S , que tem hidratação mais lenta e sua contribuição para o ganho de resistência se dá com o avanço da idade do concreto.

A reação de hidratação do aluminato C_3A ocorre imediatamente em contato com a água, liberando alto calor e dando o enrijecimento e a pega da mistura. Sua presença nos cimentos normalmente é baixa, e, devido sua alta reatividade que gera enrijecimento e pega, adiciona-se sulfato de cálcio na mistura, garantindo uma reação mais lenta que retarda o enrijecimento e viabiliza a produção, transporte, lançamento e manuseio do composto. Os produtos de hidratação do sulfato de cálcio e C_3A , o sulfoaluminato insolúvel e aluminato de cálcio hidratado, contribuem praticamente em nada do desenvolvimento da resistência (somente nas primeiras idades dando o início da pega), porém sua presença facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica. Já a hidratação do C_4AF está presente e age de forma semelhante ao C_3A , porém libera menos calor de hidratação e reage com a gipsita (sulfato de cálcio hidratado, $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), formando sulfoferrito de cálcio, podendo acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE; BROOKS, 2013, p.12).

Os produtos de toda a combinação de cimento e água são fundamentais para entender a pasta endurecida e seu comportamento. Normalmente o C-S-H constitui 50% a 60% do volume total da pasta de cimento Portland completamente hidratado e é fundamental para o ganho de resistência, fazendo o seu estudo ser indispensável para o entendimento da pasta. Já o hidróxido de cálcio (C-H ou portlandita) contribui de 20% a 25% com volume de sólidos na pasta hidratada e é formado por cristais grandes e de baixa resistência, e quando em grandes quantidades é desfavorável para a resistência química às soluções ácidas, devido a

sua solubilidade maior do que a do C-S-H. Os sulfoaluminatos de cálcio, de 15% a 20% do volume dos sólidos na pasta endurecida, não possuem grande significância na estrutura-propriedade.

Na pasta endurecida, após todas as reações com os compostos, ainda pode haver grãos de clínquer não hidratados. As partículas de clínquer nos cimentos Portland tem entre 1 a 50 μm e a hidratação se dá mais facilmente nas de menores dimensões, enquanto as de maiores dimensões vão reagindo de fora para dentro, diminuindo seu tamanho. Com o espaço reduzido entre partículas, as hidratações vão se cristalizando próximas às partículas de clínquer em hidratação, formando uma espécie de revestimento ao seu redor. Essas partículas, com o avanço da idade e hidratação em meio ao revestimento, gera um produto de hidratação muito denso, que por vezes assemelha-se a uma particular de clínquer original (MEHTA, MONTEIRO, 1994, p.26).

2.1.2 Vazios na pasta endurecida

Na Pasta endurecida, além dos materiais sólidos empregados na sua mistura, esta é composta por alguns vazios, os quais tem formas irregulares e influenciam suas propriedades. Um desses vazios é causado pelo espaço interlamelar do C-S-H, contudo estes são poros de 5 a 25 Å, que por si só não afetam a resistência mecânica ou permeabilidade, mas se houver a remoção de água nesses vazios pode causar retração por secagem e contribuir para a fluência.

Outra forma de vazios são os vazios capilares, formados pelo excesso de água na mistura, e também compõe a pasta endurecida. Estes espaços podem variar entre 10 e 50 μm , em pastas com baixa relação a/c, e, nas primeiras idades de hidratação de pastas com relação a/c alta, 3 a 5 μm . Estes, quando maiores do que 50 nm, denominados macro poros, podem prejudicar à resistência e à impermeabilidade, e quando menores do que 50 nm, denominados micro poros, tendem a influenciar mais a retração por secagem e fluência.

O ar incorporado também pode ser encontrado em pastas endurecidas. Uma das causas de sua incorporação é a operação de mistura. Este é encontrado normalmente em forma de bolhas entre 50 e 200 μm , sendo muito maiores do que

vazios capilares, podendo afetar negativamente a resistência e permeabilidade (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

2.1.3 Água na pasta endurecida

A água na pasta recém endurecida é encontrada em abundância, tal em forma líquida tanto como combinada quimicamente. Essas podem ser mais ou menos suscetíveis em sair do concreto, sendo que, a pasta inicialmente saturada perde água para o meio ambiente por meio do equilíbrio com a umidade.

A água pode ser encontrada no estado de água capilar, que se encontra nos poros capilares, sendo que quando em vazios maiores do que 50 nm pode-se denominar de água livre, não causando variação de volume com sua remoção, e, quando encontrada em capilares de 5 a 50nm, denomina-se de água retida por tensão capilar, onde sua remoção pode causar retração ao sistema.

Também encontra-se água em um estado chamado de água adsorvida, quando ela está aderida em superfícies sólidas através de atração elétrica (ponte de hidrogênio) e sua saída é a principal causa de retração.

Já quanto a água que é encontrada presa entre lamina de C-S-H denomina-se como água interlamelar. Esta pode causar forte retração quando em umidades relativas inferiores à 11%.

Quando os compostos de água combinada com os silicatos e aluminatos são submetidos ao aquecimento até a decomposição, estes liberam a água e denominamos este estado de água quimicamente combinada (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

2.2 FASE AGREGADO

Esta é uma fase importante no concreto pelo fato de ser a responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Sabe-se que a aderência entre uma pasta com cimento mais hidratada e um

agregado mais áspero, com superfície limpa e com menor presença de argila aderente, tem melhor desempenho, isso devido ao intertravamento mecânico (METHA, 1994).

Podemos definir que um agregado tem boa aderência com a pasta de cimento quando o rompimento do corpo de prova possui partículas de agregados rompidos. Porém quando se há um grande número de partículas de agregado rompido também podemos concluir que o agregado possui resistência mecânica fraca (NEVILLE, 1997).

A maior influência dos agregados nas propriedades do concreto é em função de suas características físicas. Agregados oriundos de rochas, as quais são britadas para obtenção desse componente, podem possuir formas alongadas ou achatadas, o que afeta negativamente a resistência devido à maior tendência do filme de água se acumular próximo a superfície do agregado, fenômeno chamado de exsudação interna, propiciando o enfraquecimento da zona de transição, principalmente na ruptura por cisalhamento na superfície do agregado (METHA, 1994).

2.3 ZONA DE TRANSIÇÃO

Essa é uma interface de muita importância para o estudo do concreto, pois é nela que ocorre a fase mais propícia à ruptura em menores tensões em relação aos constituintes principais, normalmente sendo o elo mais fraco do composto, contendo microfissuras, e ainda sendo um fator principal pela baixa resistência à tração e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A zona de transição é a interface que se localiza entre o agregado graúdo e a pasta e tem alta porosidade. Essa zona possui uma camada sobre o agregado graúdo com média $5 \mu\text{m}$ de C-H cristalino orientado, seguido por outra camada de espessura semelhante de C-S-H, sendo essa configuração das camadas chamadas de *película duplex*. Afastando-se do agregado graúdo encontra-se uma zona de interface principal, média de $50 \mu\text{m}$, com produtos da hidratação do cimento e C-H em forma de cristais maiores, nota-se a ausência de cimento anidro nessa zona. Isso significa que na interface do agregado graúdo se concentra maior relação água/cimento e que sua porosidade é maior do que em qualquer outro ponto. O

agregado miúdo pode interferir nessa interface em função de sua mineralogia de origem calcária que pode deixá-la mais densa (NEVILLE, 1997, p.306).

Mesmo em um concreto com baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, haverá uma zona de transição mais fraca e com maiores vazios em relação a matriz de argamassa. Com o avanço da idade do concreto essa zona vai diminuindo, devido a hidratação do cimento, formando silicatos (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (C-H), esse último em quanto menor quantidade maior resistência para a zona e, conseqüentemente, para o concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Alguns fatores tem uma maior influência para uma zona de transição mais espessa, tal como o tamanho, forma e empacotamento do agregado graúdo, teor de cimento, relação água/cimento, adensamento do concreto fresco e condições de cura. Contudo, além de ter cautela na escolha do traço, produção e uso do concreto, podemos melhorar essa fase com o uso de sílica ativa (AÏTCIN, 1998).

3 CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Visando a melhoria dos concretos Neville e Brooks (2013) apontam os denominados concretos de alto desempenho – CAD, que vão além da busca apenas pela alta resistência, preocupando-se também com a durabilidade e até mesmo com o aumento do módulo de elasticidade, enquadrando-os como concretos que extraem o potencial de cada material utilizado, assemelhando-se com o objeto de estudo deste trabalho.

A composição de um concreto de alto desempenho é normalmente feita com relações água/cimento baixas, agregados de boa qualidade, cimento Portland comum, sílica ativa, aditivo superplastificante e, quando desejado, outros materiais cimentícios. A composição final de um CAD é densa e com baixa porosidade, o que faz a água ter dificuldade de percolação, fazendo com que uma boa quantidade de cimento permaneça anidro (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 408).

3.1 APLICAÇÕES

As aplicações do CAD podem ser em substituição aos concretos convencionais, sendo que esses irão melhorar o desempenho e durabilidade da estrutura. Como Neville e Brooks (2013, p.408), citam:

“A vantagem do concreto de alta resistência é a redução da seção de pilares ou a redução da quantidade de aço para uma mesma seção transversal. Em edifícios altos, existe uma vantagem econômica devido ao aumento de área do pavimento para comercialização. Em pontes, o uso da alta resistência pode reduzir o número de vigas.”

Devido a sua alta densidade, poros reduzidos e alta trabalhabilidade, pode-se empregar-lo em ambientes mais agressivos, fazendo com que o cobrimento da armadura com estes concretos atribua maior proteção, evitando ataques químicos e biológicos, e ainda obtendo um bom acabamento nas peças.

3.2 MATERIAIS PARA CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Não há um procedimento específico para dosagem de CAD devido a variabilidade de componentes que podem o compor, além do cimento, agregado miúdo, graúdo e água utilizados em concretos convencionais. Neville (1997) define alguns critérios para fixação de parâmetros iniciais de dosagem: o teor de água pode ser fixado pela relação água/cimento, material cimentício (adicionando entre 5 e 15% de sílica) na proporção de 500 a 550 kg/m³, agregado graúdo entre 0,65 (D.M.C 10mm) e 0,68 (D.M.C 12mm) em volume a granel do agregado por unidade de volume de concreto.

A seleção de materiais para um CAD é complicada devido a exigência de boa interação entre cada elemento escolhido, se destacando ainda mais importante essa etapa devido a aplicação de outros materiais, como as sílicas. Além da grande influência da reologia do cimento, as características dos agregados, graúdos e miúdos, também fornecem grande influência ao desempenho, onde uma boa escolha pode exigir menos emprego de aditivos superplastificantes. Esses fatores nos levam a uma racionalização na equalização da dosagem, que é o processo que dita a eficiência da escolha e proporção (AITCIN, 1998).

3.2.1 Cimento Portland

A maioria dos tipos de cimento Portland que existem no mercado atual podem ser empregados e obter elevadas resistências. Nos CADs podem conter cimento Portland comum (tipo I), mas, se necessário pode ser usado o tipo V para se ter altas resistências iniciais. O consumo de cimento para os CAD's é muito elevado, entre 450 kg/m³ a 550 kg/m³, o que leva a uma relação água/cimento muito baixa, que é outra característica desse tipo de concreto. A relação água/cimento é sempre menor do 0,35 e muitas vezes diminuída até 0,20. Entretanto, como o objetivo do concreto de alto desempenho não é somente a alta resistência, deve-se

levar em conta a reologia que a composição do cimento fornecerá para que se tenha uma boa mistura, trabalhabilidade e durabilidade (NEVILLE, 1997).

Como esses cimentos são feitos sem a finalidade de aplicação em especificidades, tal como aplicação em CAD's, tem-se que atentar quanto a natureza, uniformidade e dosagem, equalizando os outros compostos para que auxiliem e façam um balanceamento na correção dos fatores gerados pela escolha do tipo de cimento (AÏTCIN, 1998). Sua composição em relação à C_3A e C_4AF pode interferir diretamente com os aditivos químicos. Em relação a reologia cimento/superplastificantes, podemos definir que o cimento ideal para CAD não deve ser muito fino, (superfície específica de até $400m^2/kg$) e baixo teor de C_3A . (NEVILLE, 1997).

3.2.2 Agregados

A boa escolha de um agregado é fundamental para atender a expectativa sobre um concreto de alto desempenho, onde o emprego de agregados de boa qualidade e classificados de acordo com a finalidade de aplicação equalizarão trabalhabilidade, durabilidade, resistência e desempenho. Como deseja-se uma boa trabalhabilidade, o emprego de areias mais grossas, módulo de finura entre 2,8 e 3,2, proporciona um decréscimo no consumo de água na mistura. Estas também não devem conter impurezas que possam reagir com os compostos do concreto, serem arredondadas e com granulometria uniforme.

O agregado graúdo é o componente que mais pode afetar o concreto em termo de resistência. Sua forma pode interferir na trabalhabilidade, sendo que quanto mais lamelares, maior consumo de água de amassamento é necessária para a mistura, e assim propiciando para a formação de uma zona de transição mais densa. A origem da mineralogia do agregado graúdo também pode interferir e reagir com compósitos do cimento formando produtos não desejados e sua superfície, quando livre de argilas e finos e mais rugosa, causa uma melhor aderência entre agregado e matriz (NEVILLE, 1997).

A dimensão máxima característica (DMC) é fundamental para o fator resistência. Agregados graúdos com menores DMC, ou seja, que foram mais

britados, tem maior possibilidade de eliminação de defeitos internos. Para um bom desempenho do agregado graúdo, indica-se o uso de tamanhos máximos entre 10 e 12 mm, dimensões equidimensionais e com um bom empacotamento (AÏTCIN, 1998).

3.2.3 Aditivos químicos

Devido à baixa relação água/aglomerante e necessidade de trabalhabilidade, os CADs precisam de grandes dosagens de aditivos químicos, mais especificamente os superplastificantes (entre 5 L e 15 L por m³). Aditivos superplastificantes são aditivos redutores de água que atuam nas partículas de cimento, deixando-a carregadas negativamente e, dessa forma, ficando repelentes umas às outras. Com o emprego de superplastificantes podemos reduzir a água na mistura em até 35%. Sua melhora na trabalhabilidade tem curta duração, entre 30 e 90 minutos, sendo assim sua adição deve ser feita imediatamente antes do seu lançamento (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Também devem ser considerados nas composições de superplastificantes o comprimento da cadeia molecular, o uso de sódio ou potássio, e a presença de sulfatos residuais, isso pelo fato da reologia com os aluminatos e outros componentes do cimento, podendo reduzir a qualidade do concreto (NEVILLE, 1997).

3.2.4 Aditivos minerais

Concretos de alto desempenho normalmente utilizam de outros aditivos minerais para melhorar suas propriedades. Neville (1997) cita que é usual a adição entre 5 % e 15 % de massa em relação total de material cimentício de sílica ativa, mas cita também que outros materiais cimentícios também podem ser adicionados, como cinza volante e escória granulada de alto forno. Adições como as sílicas ativa reagem com o Ca(OH)₂, produto da hidratação do cimento que é frágil, poroso e

mais concentrado na zona de transição, transformando parte em silicato (C-S-H) e preenchendo os vazios, assim melhorando a resistência e o empacotamento. Contudo, isso gera um aumento de finos na mistura, o que altera física e quimicamente a trabalhabilidade conforme o teor de adição (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para definição em relação à adições minerais cimentícias, para Neville e Brooks (2013, p.38), “um concreto com relação água/aglomerante menor que 0,28, é considerado como um *concreto de alto desempenho*”.

3.3 MÉTODOS PARA DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Aitcin (1998) destaca a dificuldade de adotar um método específico para a dosagem de concretos de alto desempenho devido ao fato de existir várias combinações e adições que alteram a configuração de hidratação do cimento e o comportamento nos estados frescos e endurecido, fazendo assim a dosagem tradicional, que era baseada em referências convencionais, não conseguir controlar esses novos fatores, tornando-se ineficazes.

Nos métodos tradicionais de dosagem os agregados ocupam entre 60% e 80% do volume total do concreto, ficando os outros 20% do volume a serem compostos pela pasta constituída de água e aglomerantes. Quanto maior o empacotamento e menor o número de vazios deixados pelos agregados poderá melhorar alguns fatores importantes, como menor consumo de pasta, maior trabalhabilidade, maior resistência, redução de retração e deformação, menor calor de hidratação, entre outros.

O que deve-se considerar em dosagem de concretos são as características dos materiais, resistência do concreto, método de preparo, trabalhabilidade, tamanho máximo de agregado, condições de exposição da estrutura, dentre outros (GIAMMUSSO, 1992).

A ABNT NBR 12655:2006 é a norma que regulamenta o controle, preparo e recebimento do concreto no Brasil e indica que a resistência do concreto tem que ser garantida mesmo com a variabilidade devido à condição de dosagem, e para isso deve-se utilizar um desvio padrão (S_d) e atender os critérios de confiabilidade, o

que varia de acordo com o tipo de processamento do concreto. Também indica que o traço deve ser expresso em função à proporção de 1 Kg. Contudo esta norma não entra em maiores detalhes quanto ao procedimento do método para dosagem.

3.4 MISTURA DE COMPONENTES

Concretos de alto desempenho são obtidos da mesma forma que concretos convencionais, até mesmo são utilizados os mesmos aparelhos para a mistura, mas a sequência e o tempo de mistura podem variar, assim devendo ser ajustado conforme cada caso. Qualquer alteração, por menor que seja, pode comprometer o desempenho do concreto e não há uma conclusão sobre a sequência mais eficiente (AÏTCIN, 1998).

Existem três abordagens quanto à mistura e a adição do superplastificante: uma defende que a adição deve ser feita ao mesmo tempo, afirmando que diminui o tempo de mistura. Outra abordagem julga melhor adição de dois terços no começo da mistura e o resto somente próximo ao final da mistura, o que faria com que as reações do cimento com o sulfato iniciassem o quanto antes, formando estringita sem o consumo e presença de aditivo, porém isso é mais eficiente em traços com cerca de 10 minutos de mistura. Já a outra abordagem acredita que deve-se adicionar uma quantia de aditivo superplastificante até que a mistura tenha um abatimento médio de 100 mm e o restante empregado somente na entrega do concreto, ou seja, no local de lançamento (AÏTCIN, 1998).

Segundo Giammusso (1992), o objetivo da mistura é a obtenção de um material homogêneo, fazendo com que o cimento consiga hidratar-se com maior eficiência, envolver todas as partículas de agregado e excluir os vazios entre eles.

Para ter uma melhor homogeneidade existem alguns requisitos e métodos a serem seguidos. Quando utiliza-se betoneira para a mistura do concreto, tem-se que seguir alguns critérios e recomendações.

As betoneiras são descritas pelo volume de concreto após o adensamento, variando de 0,04 m³, mais utilizadas em laboratórios, até 13 m³. Caso o volume da mistura seja muito inferior à capacidade da betoneira, pode produzir uma mistura não muito homogênea e nem econômica, e, caso a capacidade exceda em média

mais do que 10% da capacidade do misturador, pode-se resultar em uma mistura deficiente, também não sendo recomendado (BROOKS; NEVILLE, 2013).

O usual para o carregamento da betoneira é iniciando com uma pequena quantidade de água, seguido do agregado graúdo, até que a superfície do agregado graúdo fique molhada, e após adicionar o resto dos sólidos e água. Porém, em pequenas betoneiras de laboratórios e misturas muito secas, a areia deve ser colocada em primeiro lugar, depois uma parte de agregado graúdo, cimento e água, e ao final o restante do agregado graúdo a fim de desmanchar nódulos de argamassa (BROOKS; NEVILLE, 2013).

Existe também um tempo mínimo para a mistura, o que depende do tipo, tamanho, velocidade e qualidade de mistura durante o carregamento da betoneira. O tempo indicado para betoneiras comuns é entre 1 minuto e 15 segundos à 2 minutos, sendo contado a partir do momento em que todos os materiais sólidos foram carregados. A água deve ser adicionada em até um quarto do tempo de mistura. Caso o tempo seja muito prolongado pode haver trituração do agregado, diminuição da trabalhabilidade e evaporação da água de amassamento (BROOKS; NEVILLE, 2013).

Neville (1997) destaca que para um bom concreto de alto desempenho é conveniente a redução do volume da betonada em um terço ou metade e também um período mais longo de mistura para que a homogeneidade consiga ser melhor alcançada, recomendando 90 segundos ou mais misturando.

3.5 CURA

Aïtcin (1998) destaca que qualquer concreto deve ter uma cura adequada, inclusive os CADs. Contudo não há problemas ou dificuldades para fazer uma boa cura para esses concretos, somente chama atenção para que esse processo seja adequado, assim não perdendo propriedades importantes.

A cura vai evitar a retração plástica nas primeiras idades, evitando a perda de qualidade por fissuras que o concreto novo poderia desenvolver. Para evitar esse tipo de comportamento indesejado é indicado a molhagem contínua das superfícies expostas, cobertura com materiais que protejam da evaporação e perda de água ou

com materiais que fiquem úmidos. Logo após o adensamento a cura já deve ser iniciada e seguir até que o concreto atinja uma resistência que suporte a fissuração (Giammusso, 1992).

Para corpos de prova cilíndricos e prismáticos, a ABNT NBR 5738:2015 normatiza que devem, após moldados os corpos de prova, ser alocado em locais planos, livres de vibrações ou outras causas perturbadoras ao concreto e deixados em local livre de intempéries e cobertos devidamente por materiais não reativos, evitando a perda de água do concreto, por 24h, no caso de corpos de prova cilíndricos, e 48h, em corpos de prova prismáticos. Após esse tempo, conforme a finalidade para que este corpo de prova foi elaborado, deve ser encaminhado para a devida cura.

4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

As propriedades de um concreto convencional levadas ao máximo aproveitamento o transformam em um concreto de alto desempenho. Com isso, deve-se atentar à todos os efeitos que cada escolha fará com a mistura, tanto quimicamente, quanto fisicamente.

Um concreto que tem ótimas propriedades químicas mas não consegue desenvolver-se fisicamente, não estaria atendendo o termo alto desempenho, como o inverso também se faz uma verdade. Em função à isso, o controle do concreto e o desempenho do concreto em seus diferentes estados tem que estarem em desenvolvimento de performance semelhantes, unindo várias propriedades e características que o darão destaque, durabilidade e boa aceitação (AİTCIN, 1998).

4.1 Propriedades no estado fresco

Um concreto de alto desempenho deve conseguir atingir três propriedades principais, que são a de uma trabalhabilidade igual ou superior ao concreto tradicional, a garantia da menor variação possível no comportamento, desde o seu projeto até sua aplicação, e alta durabilidade.

No estado fresco o Concreto de Alto Desempenho deve possuir uma boa trabalhabilidade, capacidade de reter a água necessária para sua melhor hidratação e também de manter sua mistura homogênea, sem deixar que os materiais separem-se durante o transporte, lançamento e até mesmo durante a cura, ou seja, ter uma boa coesão (AİTCIN, 1998).

4.1.1 Trabalhabilidade

O fato de o concreto ser um material moldável é o que mais o faz ser empregado. Quanto melhor sua trabalhabilidade, melhor este concreto vai conseguir

se moldar nos locais de aplicação e melhor preencherá os espaços, evitando falhas ou discontinuidades nas peças. De um ponto de vista além da tecnologia da estrutura do concreto e mais aplicado ao lançamento e adensamento do concreto, este deve ser facilmente moldável e adensável, isso sendo possível com um *slump* mais alto. A incorporação de aditivos é um grande fator que confere ao concreto essas características, mas não a única. Também a granulometria e o fator água/cimento interferem na melhoria das suas propriedades e, quando bem racionalizado, consegue-se trabalhabilidade e coesão, o que faz o concreto ter um bom adensamento (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2015).

4.1.1.1 Exsudação

A exsudação se dá quando alguns componentes da mistura do concreto não conseguem reter a água de amassamento, deixando-a subir para a superfície do concreto recém lançado, fenômeno mais propício até o início do enrijecimento do concreto (BROOKS; NEVILLE, 2013).

A água que exsuda deixa de fazer parte da hidratação, assim faz com que o fator água/cimento diminua, o que poderia aumentar a sua resistência. Por outro lado, ao aflorar, esta água encontra obstáculos, como agregados e armaduras, os quais fazem com que se concentre uma alta quantidade nas suas superfícies, deixando estas áreas mais propícias à formação de hidróxido de cálcio, a parte fraca do concreto (BROOKS; NEVILLE, 2013).

A exsudação ocorre menos em misturas mais coesas e com adições pozolânicas ou de pó de alumínio. Nota-se maior exsudação em cimentos mais finos, com alto teor de álcalis, C₃A e quando adiciona-se cloreto de cálcio. Fatores externos, como temperaturas mais elevadas, também contribuem para esta ação (BROOKS; NEVILLE, 2013).

4.1.1.2 Segregação

Pode-se definir como segregação a separação dos constituintes da mistura de concreto, deixando uma distribuição desuniforme de componentes. Nos concretos isso deve-se principalmente à granulometria dos agregados e do cimento. Esse tipo de efeito pode ser minorado com o uso de uma mistura mais coesa (BROOKS; NEVILLE, 2013).

Há duas formas para que isso aconteça, em uma as partículas maiores, que tendem a ter maior assentabilidade, deslizando em superfícies inclinadas e separando-se dos outros componentes, mais propícia em misturas pobres. Já a outra forma é mais propícia em concretos com excesso de água, onde a pasta da mistura separa-se dos outros componentes (BROOKS; NEVILLE, 2013).

Os fatores que mais influenciam essa propriedade é a granulometria e principalmente o manuseio e lançamento do concreto fresco. Quando transportado inadequadamente por grandes distâncias ou vibrado de forma errada, os agregados mais densos, com a vibração, vão descendo pela mistura. A adição de incorporadores de ar tem efeito de diminuição nesta ação. A massa específica, por sua vez, quando difere muito entre os agregados graúdo e miúdo também resulta em maior tendência de segregação (BROOKS; NEVILLE, 2013).

4.1.2 Propriedades no estado endurecido

Após a mistura, transporte, lançamento e acabamento, o concreto avança de idade e adquire algumas propriedades. O estudo nesse estado visa observar as principais características e fatores, relacionando estes com o desempenho mecânico e comportamental do concreto obtido (GIAMMUSSO, 1992).

4.1.2.1 Propriedades Mecânicas

Essas são as propriedades mais importantes nos concretos no estado endurecido, pois isso definirá o comportamento quanto as solicitações à ele feita. São vários os fatores que influenciam e diferenciam as propriedades mecânica dos concretos, como fissuras internas, aderência entre os componentes, falhas entre outros (BROOKS; NEVILLE, 2013).

4.1.2.1.1 Resistência à compressão

Essa é a principal característica do concreto. Sua resistência à compressão é sempre mais elevada em comparação às outras, e até mesmo sua dosagem se dá em função à ela (MEHTA, 1994).

Mehta (1994) indica que os testes de resistência à compressão podem ser feitos pela aplicação de compressão uniaxial em corpos de provas, normalmente cilíndricos, e medidos pela carga de ruptura, que pode não deformar o concreto visivelmente mas é notada pela perda de compressibilidade do corpo de prova, e pela área de aplicação, a qual deve ser uniforme para melhor distribuição das tensões no contato da aplicação da carga. A ABNT NBR 5739:2007 regulamenta e normatiza os testes em corpos cilíndricos no Brasil.

Maiores resistências estão normalmente relacionadas com menores relações água/cimento e maiores idades, mas outros fatores também podem influenciar. O agregado graúdo, quando possui resistência inferior à matriz do concreto, pode ditar o nível de resistência, rompendo o corpo de prova pela fissuração do agregado. Contudo, normalmente o concreto rompe na interface entre a matriz e o agregado graúdo, pois é onde é mais comum a formação de hidróxido de cálcio, que é a parte porosa e fraca do concreto. Em suma, sempre que há porosidade ou fissuras é resultado de fatores causados principalmente pela água em suas diferentes formas de mover-se durante o endurecimento do concreto e pelo empacotamento dos agregados (AÏTCIN, 1998).

4.1.2.1.2 Resistência à tração

A resistência à tração nos concretos é sempre menor do que a resistência à compressão, isso pelo fato de falhas e fissuras que o concreto possui, fazendo com que quando solicitado à tração a carga seja resistida por pequenos volumes de material, aumentando a tensão sobre estes e levando à ruptura. A aderência entre matriz (argamassa) e o agregado graúdos também influencia na resistência à tração (NEVILLE, 1997).

Os teste de resistência à tração é mais complicado de ser executado aplicando uma carga de tração uniaxial, portanto este teste é feito a partir de outros métodos, tais como tração na flexão (padronizado e normatizado pela ABNT NBR 12142:2010) e tração por compressão diametral (padronizado e normatizado pela ABNT NBR 7222:2011).

4.1.2.1.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é encontrado através da relação entre tensão e deformação. O agregado graúdo possui um módulo de elasticidade maior do que a pasta de cimento e a argamassa e com a combinação de ambos, agregado graúdo e argamassa, o gráfico que representa o módulo de elasticidade é obtido com uma curva intermediária entre o gráfico do módulo de elasticidade de ambas unitariamente, assim evidenciou-se que o agregado graúdo tem influência no módulo de elasticidade do concreto (NEVILLE, 1997).

O fato do concreto estar saturado de água para o ensaio aumenta o módulo de elasticidade, contudo diminui a resistência à compressão. A idade do concreto também altera o comportamento do concreto, ou fator que altera o módulo de elasticidade (BROOKS; NEVILLE, 2013).

A ABNT NBR 8522:2008 estabelece padrões e normatiza os ensaios para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto.

4.1.2.1.4 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson de é a relação entre a deformação longitudinal e a deformação transversal do resultado da aplicação de uma carga axial, sem considerar o sinal das deformações (BROOKS, NEVILLE, 2013).

4.2 Durabilidade

Nos concretos de alto desempenho a durabilidade é uma das principais propriedades. Sua estrutura mais densa, devido à baixa relação água/cimento ou água/aglomerante e também com as adições de sílicas, fazem com que fique com poros descontínuos, menores e em menor número, assim dificultando a entrada de agentes externos. Em contrapartida, quando submetido ao fogo, os CADs dificultam a saída dos vapores criados, formando tensões internas e diminuindo a resistência nesse quesito (NEVILLE, 1997).

Quanto à resistência gelo e degelo, este também se destaca positivamente. Sua estrutura com menos água para congelar faz com que não haja variações de volume por este fenômeno, assim evitado fissuras por expansão. Também o fato de possuir menos água livre, reduz a fluência por secagem. Por outro lado, os baixos níveis de ar no concreto podem prejudicar na propriedade de gelo e degelo (NEVILLE, 1997).

A boa aderência entre agregado e matriz também confere aos CADs boa resistência à abrasão, o que é complementado com a alta resistência que estes podem obter (NEVILLE, 1997).

5 ADIÇÕES MINERAIS

Normalmente são feitas adições minerais para alterar a microestrutura dos concretos ou cimentos. Essas adições, por vezes, ajudam na redução de energia para obtenção do cimento, na diminuição do tempo de enrijecimento do concreto, melhora de trabalhabilidade e também no aumento do desempenho sob carregamentos, ou seja, a resistência dos concretos com adições podem ser incrementadas, principalmente quando usa-se adições cimentícias que interferem na zona de transição, diminuindo teores de hidróxido de cálcio no concreto e aumentando a resistência da interface agregado-matriz. A redução dos poros também é melhor obtida com as adições minerais (DAL MOLIN, 2011).

As adições minerais são obtidos de variadas fontes mas em geral são escórias de produção de outros materiais e até mesmo de cinzas vulcânicas, podendo serem classificados em material pozolânico, material cimentantes e filler (DAL MOLIN; 2011).

Os materiais pozolânicos são de composição silicosa ou silico-aluminosa que não possuem atividade cimentícia até que sejam finamente moídos e entrem em contato com a umidade, assim reagindo com hidróxido de cálcio (C-H) formando produtos cimentantes, tais como silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), os quais são os responsáveis por parcela da resistência dos concretos. Quanto maior superfície especificadesses materiais (menor granulometria), mais rápida será a reação química com a umidade e hidróxido de cálcio (DAL MOLIN, 2011).

Já os materiais cimentantes tem propriedades cimentantes por si só, não necessitando da presença de hidróxido de cálcio para obter tal propriedade, mas não são eficientes ao ponto de poderem ser feitas adições com eles para fins estruturais (DAL MOLIN, 2011).

E os filler são materiais inertes, sem reações e com baixa granulometria. São utilizados apenas para fins de melhora de empacotamento e nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2011).

5.1 SÍLICA ATIVA

Material pozolânico obtido através do processo de obtenção do ferro-silício e silício metálico. Na operação de obtenção desses materiais, na temperatura em torno de 2000°C), ocorre a redução do quartzo a silício, gerando silício gasoso (SiO), o qual vai para zonas de temperaturas menos elevadas e reage com o ar, ocorrendo a oxidação, e forma o dióxido de silício (SiO₂), condensando-se em forma de partículas esféricas (DAL MOLIN, 2011).

5.1.1 Propriedades

A sílica ativa tem diâmetro médio de 0,1 μm e seu estado natural é amorfo, com superfície específica média de 20.000 m²/kg, massa específica média de 2200 kg/m³. Devido a sua grande superfície ela inicia a reação rapidamente com o hidróxido de cálcio, média de 7 dias para temperaturas a 20°C e em temperaturas mais altas o início pode ser observado em apenas 2 dias, e ainda age com efeito microfiller (diminui o espaço para a água e forma ponto de nucleação) (DAL MOLIN, 2011).

5.1.2 Aplicação

Sua aplicação em dosagens de concreto resulta em misturas coesas e mais viscosas, o que dificulta o movimento dos agregado e evita a segregação, e também, devido ao tamanho reduzido, aumenta o volume de finos da massa, reduzindo a exsudação (DAL MOLIN, 2011).

Por outro lado, devido à grande superfície, a adição de sílica ativa pode exigir mais água para uma mesma trabalhabilidade, contudo, há relatos que caso a relação de adição for entre 2% e 3% a trabalhabilidade e estabilidade poderia, além de não piorar, ser aumentada com o mesmo volume de água adicionado. O uso de

superplastificantes é uma boa escolha para manter a trabalhabilidade (DAL MOLIN, 2011).

Quanto ao calor de hidratação a adição de sílica ativa não gera muitas mudanças, mesmo que esta seja em substituição à massa de cimento, pois há um contrabalanceamento entre a redução de componentes que aumentam a redução de calor com a formação de nucleação, o que acelera as reações. A fissuração por dessecação superficial ou retração plástica em função da adição da sílica ativa devem ser combatidas com a cura, assim evitando a perda de água, principalmente por evaporação (DAL MOLIN, 2011).

No estado endurecido do concreto com adição de sílica ativa, nota-se um aumento significativo na resistência já no período inicial da hidratação de 1 a 3 dias, porém as contribuições mais significativas ocorrem até os 28 dias (DAL MOLIN, 2011).

A adição recomendada, onde observa-se melhores benefícios e ganhos, é entre 5% e 12% sobre a massa do cimento. Essa quantidade de adição altera a relação de finos do concreto, indicando o uso de superplastificantes para evitar a aglomeração desses finos e não alterar a demanda de água (DAL MOLIN, 2011).

Como a resistência à tração depende da zona de transição e porosidade e a adição sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio, reduzindo a zona de transição e diminui a porosidade, haverá um ganho nesta propriedade (DAL MOLIN, 2011).

Para o módulo de deformação a adição de sílica ativa não irá ser tão significativa, isso ficando mais à cargo do agregado graúdo. Por mais que a resistência à compressão seja significativamente aumentada, o módulo de deformação se manterá sem grande alteração pelo fato da adição de sílica ativa propiciar um concreto mais denso, ou seja, menos deformável (DAL MOLIN, 2011).

A porosidade capilar observada em concretos com adição de sílica ativa é fortemente diminuída. Quando a reação entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio ocorre há a formação de moléculas de silicatos de cálcio hidratado e sílico aluminatos, que são moléculas menores do que as de hidróxido de cálcio. Esse fato faz com que os poros causados pela orientação das moléculas de hidróxido de cálcio se reduzam, primeiro em função da redução do tamanho das moléculas, sendo que o hidróxido de cálcio tem moléculas maiores do que o silicato de cálcio hidratado, e segundo pelo preenchimento por silicato de cálcio hidratado dos poros

restantes, já que são menores e conseguem precipitar e preencher mais poros (DAL MOLIN, 2011).

Com a redução de porosidade proporcionada pelas adições de sílica ativa, há a redução do acesso e difusão de sulfatos na matriz de cimento e também a redução da quantidade hidróxido de cálcio para combinação com sulfatos, sendo que estas reações formaria estringita, material expansivo e prejudicial ao concreto. Com a alteração destes fatores a adição mineral proporciona um melhoramento quanto resistência à sulfatos (DAL MOLIN, 2011).

Ainda pelo fato da redução da permeabilidade, unido com a redução de álcalis ao substituir parte do cimento, e com a reação com parte dos álcalis ainda presentes feito pela pozolana, diminui-se a reação álcali-agregado, conferindo mais um benefício à adição da sílica ativa (DAL MOLIN, 2011).

A despassivação do aço é causada pela carbonatação, efeito de redução do pH através da formação de carbonato de cálcio pela reação entre hidróxido de sódio e gás carbônico (CO_2), e pela penetração de cloretos, mais suscetível em ambientes marinhos, deixando a armadura mais exposta e vulnerável, juntamente com fatores como presença de umidade e oxigênio, fazendo com que sofra corrosão. Todos esses fatores e reações que causam esses efeitos são nitidamente minimizados pela adição da sílica ativa. Diminuindo a porosidade e permeabilidade fica mais difícil a penetração de gás carbônico e cloretos, assim previne-se melhor toda essa cadeia de efeitos indesejáveis. Quanto à redução de hidróxido de cálcio, o que pode conferir redução do pH, não gera um problema, pois a redução não é suficiente para causar a despassivação da armadura, e a proteção que a adição confere à esta em forma de redução de permeabilidade no concreto é muito mais significativa (DAL MOLIN, 2011).

Tudo isso está ligado diretamente com a resistência do concreto e também com sua durabilidade, fazendo da adição de sílica ativa uma ótima forma de confeccionar concretos de boa qualidade, durabilidade e resistência (DAL MOLIN, 2011).

5.2 NANO SÍLICA

As nano partículas tem se mostrado com grande potencial para aplicação nos mais variados campos de pesquisa para melhorias de propriedades. Contudo, existem poucos estudo acerca das nano partículas adicionadas em misturas de concreto.

A taxa de reação das pozolanas com outros componentes são diretamente ligadas à sua superfície de contato, quando maior a superfície, melhor será a reação. Sendo assim, o emprego de nano sílica, que é um material pozolânico com diâmetro na ordem de 10^{-9} m, conferindo uma grande superfície de contato, deve ser considerado no estudo de concretos de alto desempenho (JO et al., 2006).

O uso de nano sílica ($n\text{SiO}_2$ ou nano- SiO_2), quando comparado à sílica ativa, tem um desempenho mecânico, físico e químico melhor, o que confirma a teoria que relaciona a reação pozolânica com a superfície de contato (JO et al., 2006).

A obtenção de nano materiais pode ser feita de duas maneiras, sendo a *top-down* e a *bottom-up*, onde uma é pela divisão de uma partícula maior até a obtenção de uma partícula do menor tamanho possível e a outra é a pela junção de átomo por átomo até a obtenção desejada, respectivamente (GLEIZE, 2007).

5.2.1 Propriedades

Em experimentos feitos por Jo (2006), a área específica da nano sílica analisada possuía $60 \text{ m}^2/\text{g}$, o tamanho das partículas eram em média de 40 nm e pureza de SiO_2 de 99,9%.

5.2.2 Aplicação

O emprego dessa nanotecnologia ainda é pouco conhecida, contudo na aplicação de argamassas existem alguns pesquisadores que desenvolveram alguns

estudos. Em um desses estudos Jo et al.(2006) fizeram a mistura entre cimento Portland, sílica ativa, nano sílica, superplastificante e areia (tamanho máximo de 4.76 mm, módulo de finura 2,7 e capacidade de absorção de 1,5%).

Para o experimento foi utilizado uma relação água/cimento de 0,5 e as relações de materiais em cada proporção são apresentados na tabela 01.

Tabela 1 - Composição da argamassa para o experimento realizado por Jo et al. (2006)

	Água/ cimento	Água (g)	Cimento (g)	Areia	Sílica ativa (g)	Nano sílica (g)	SP. (%)
OPC	50%	128	255	625	-	-	1.2
SF5	50%	128	242.8	625	12.2	-	1.9
SF10	50%	128	231.8	625	23.2	-	2.1
SF15	50%	128	221.7	625	33.3	-	2.2
NS3	50%	128	247.5	625	-	7.5	1.8
NS6	50%	128	240.6	625	-	14.4	2.4
NS10	50%	128	231.8	625	-	23.2	2.9
NS12	50%	128	227.7	625	-	27.3	3.3

OPC – Argamassa sem adição SF – Argamassa com adição de sílica ativa (5%, 10% e 15%)

NS – Argamassa com adição de nano sílica (3%, 6%, 10% e 12%) SP – Superplastificante

Fonte: Jo et al. (2006).

A mistura de Jo et al.(2006) iniciou com a nano sílica adicionada à água e misturada por 1 minuto a 120 rpm, depois adicionado a sílica ativa (quando usada) misturando por 30 segundos a 80 rpm e posteriormente foi adicionado gradualmente a areia. O superplastificante foi adicionado por último e misturado em alta rotação por 30 segundos, alterando a quantidade adicionada a fim de melhorar a mistura. Após a mistura feita, deixou-se descansar por 90 segundos para depois misturar por mais 1 minuto em alta velocidade.

Foram moldados corpos de prova cúbicos de 50 x 50 x 50 mm e desmoldados após 1 dia, levando-os para a cura em água a 20°C durante 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram testados sob compressão com aplicação de carga de 0,24 MPa/s.

Com as amostras analisou-se a quantidade de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) restantes na argamassa e foi estimado a taxa de liberação de calor.

A resistência à compressão nas argamassas, aos 7 e 28 dias, com adição de nano sílica, desde 3% até 12%, foram bem superiores do que as demais argamassas. Isso se deve ao fato da nano sílica possuir maior reação pozolânica, devido a sua maior superfícies, e também pelo preenchimento mais eficiente dos poros. Por outro lado, a adição de maior quantidade de nano sílica exigiu uma maior adição de superplastificante. Os resultados são apresentados na tabela 02.

	7 dias	28 dias
OPC	18.3	25.6
SF5	22.5	35.1
SF10	24.7	37.4
SF15	26.1	38
NS3	39.5	54.3
NS6	46.1	61.9
NS10	49.3	68.2
NS12	50.7	68.8

Fonte: Jo et al. (2006).

Nas análises feitas sobre a microestrutura das argamassas, notou-se que as pastas no estado endurecido com nano sílicas foram influenciadas com a reação desta e alterou a microestrutura. Na pasta endurecida da argamassa sem adição foram encontrados silicatos de cálcio hidratado mais isolados, já nas pastas com adição de nano sílica foi constatado uma densa e compacta formação de C-S-H e uma redução de cristais C-H (JO et al.,2006).

Quanto à evolução do calor de hidratação liberado pelas misturas foi observado que as argamassas com adições de nano sílica e sílica ativa tiveram um pico maior de liberação de calor, mais observado na adição de nano sílica, principalmente no início de pega e no endurecimento do cimento. Com a adição de superplastificantes pode ter retardado a reação pozolânica da sílica ativa, sendo indicado fazer um tratamento térmico para a reação pozolânica ocorrer mais cedo.

A quantidade de hidróxido de cálcio observada nos experimentos, aos 7 dias, com 10% de nano sílica (NS10), 10% de sílica ativa (SF10) e na argamassa

sem adição (OPC) foram, respectivamente, 4,06%, 6,09% e 8,89%. Os principais efeitos que a nano sílica proporciona são o aumento da resistência, poros menores e mais distribuídos.

Assim, conclui-se que a adição de nano sílica não influencia somente na melhora da resistência à compressão, mas também na microestrutura do concreto. A diminuição dos poros e de cristais de hidróxido de cálcio, além de conferir maior resistência, diminui os poros e os distribuindo mais, fazendo com que se diminua a permeabilidade (JO et al.,2006).

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

6.1 VARIÁVEIS

As variáveis propostas para a produção deste trabalho estão descritas abaixo.

6.1.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes de respostas adotadas para a produção deste trabalho foram: **melhor relação água/aglomerante e melhor relação de adições de nano e micro sílica nas argamassas** quando aplicadas em argamassas, visando o estudo da **resistência à compressão**, como fator de maior significância e **à tração na flexão**, a fim de estudo comportamental do material neste quesito. Também será obtido **o consumo de aglomerante x MPa da compressão** com os traços das argamassas, assim fornecendo indicadores de relações mais eficientes. Essas variáveis são métodos de comprovação da real eficácia das variáveis independentes.

6.1.2 Variáveis independentes

O controle foi feito sobre as seguintes variáveis:

- A relação água/aglomerante para a elaboração das argamassas foram fixadas em 0,22; 0,28 e 0,35, assim fazendo com que haja uma variação nítida dos resultados, melhorando o entendimento do comportamento;
- A substituição por micro sílica foi em um total de 6%, 9% e 12% da massa do cimento, valores no intervalo indicado em bibliografia, e a adição de nano

sílica dispersa em aditivo na proporção de 0,3, 1,0 e 2,7 % em relação ao aglomerante sem correção da relação água/aglomerante, sendo os valores das adição de nano sílica definidos através da indicação do fabricante;

- O tempo de rompimento dos corpos de prova das argamassa foi definido para os 7 dias devido a utilização de cimento de alta resistência inicial;

Observações gerais:

- a) A nano sílica empregada está dispersa em aditivo e seu teor máximo nas adições será de 2,7 % em relação ao aglomerante;
- b) A relação água/aglomerante foi escolhida propositalmente com grandes diferenças no intuito de obter-se resultados mais expressivos;
- c) As argamassas serão dosadas de uma forma com que se obtenha um *flow table* (espalhamento) de 250 mm (com 10 mm de tolerância para cima e para baixo), sendo esta regulada pela adição em maior ou menor quantidade de agregado miúdo (areia natural) e sem adição de aditivos, excetuando o que a própria nano sílica;
- d) Serão elaborados 3 corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) para cada relação utilizada para a produção das argamassas.

O organograma é apresentado na figura 8.

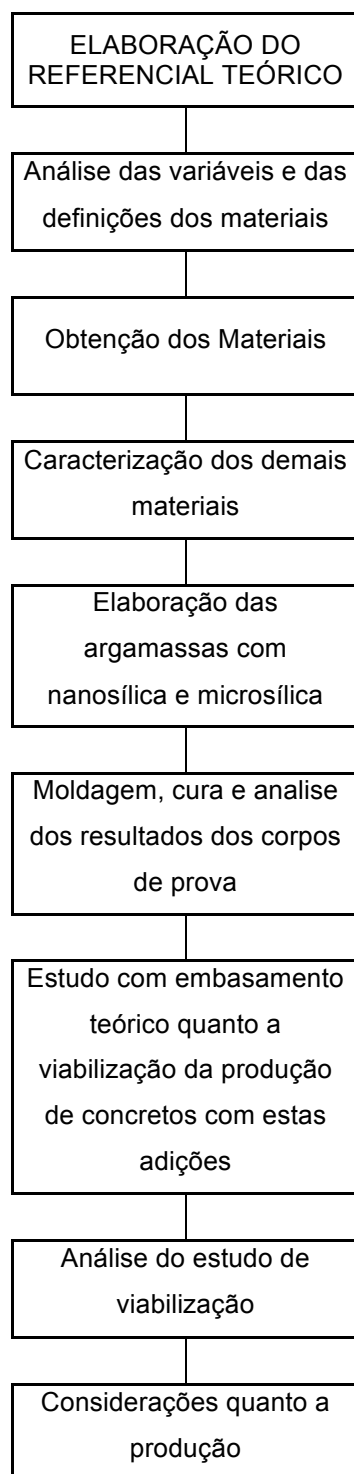


Figura 1 -- Diagrama das atividades

Fonte: Autoria própria (2015)

6.2 MATERIAIS

Os materiais para elaboração dos concretos, como visto em bibliografias, são os que mais influenciam no produto final e no seu desempenho. Portanto, para a escolha de cada componente empregado será feita a comparação entre a bibliografia e sua influência no desempenho, escolhendo aqueles que mais aproximam-se ao indicado. Serão feitos ensaios para comprovar as propriedades deles, confirmando ou não a teoria, e também para selecionar o qual melhor retorne desempenho nos testes.

6.2.1 Cimento

Conforme Neville (1997), é indicado o uso de cimentos que possuam baixo teor de C_3A (aluminato tricálcio) e C_4AF (ferro aluminato tetra cálcio) devido à possíveis reações com os aditivos superplastificantes, podendo formar sulfatos. Contudo, devido a necessidade de ganhos de resistência mais rápido e maior reologia do cimento com as sílicas, opta-se por um cimento de alta resistência inicial. Sendo assim, o cimento do tipo CP V – ARI, da marca Supremo/Secil, consegue atender estes fatores podendo ser empregado para os ensaios. Para todos os ensaios foi utilizado cimento do mesmo lote, sendo comprado de uma vez só, acondicionados, manuseados e utilizados de maneira recomendada pelo fabricante. Os dados fornecidos pelo fabricante são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Características físicas e químicas do cimento CP V ARI

Características e Propriedades	Unidade	Fabricante	Limites
		CP V ARI	
Finura (resíduo da peneira de 75 um)	%	1,5	<6,0
Tempo de início de pega	min.	160	>6,0
Tempo de fim de pega	min.	315	-
Blaine	m ² /kg	446,7	>300
Resistência à compressão	1 dia	MPa	>14,0
	3 dias	MPa	>24
	7 dias	MPa	>34
	28 dias	MPa	-

Massa específica determinada de acordo com a ABNT NM 23(2000) = 3,15 Kg/dm³

Fonte: Autoria própria (2016).

6.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo deve conter o menor teor de impurezas possível. Como as argamassas serão produzidas com baixas relações água/aglomerante, é importante que se escolha agregados miúdos mais grossos. Visando que, segundo a ABNT NBR 7211:2009, uma areia média tem um módulo de finura entre 2,20 a 2,90 na zona ótima e uma areia grossa 2,90 a 3,50 na faixa da zona utilizável superior, fixou-se uma areia média do tipo natural, encontrada na região de Pato Branco, tomada em quantidade suficiente para todos os ensaios.

A areia foi seca em estufa e pelo método da frigideira, sendo posteriormente armazenada adequadamente para que não absorvesse umidade do ambiente e encaminhada para os ensaios.

A análise granulométrica do agregado miúdo obtida seguindo a ABNT NBR NM 248:2003, a massa específica seguindo a ABNT NBR NM 52:2009 e a massa unitária seguindo a ABNT NBR NM 45:2006 são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização física do agregado miúdo

Peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
4,8	0,7%	0,7%
2,4	1,5%	2,2%
1,2	1,7%	3,9%
0,6	45,7%	49,6%
0,3	36,5%	86,1%
0,15	11,1%	97,2%
Módulo de finura		2,4
Graduação (zona)		Média
Massa específica		2,64 g/cm ³
Massa unitária		1,55 g/cm ³

Fonte: Aatoria própria (2016).

6.2.3 Sílica Ativa

A sílica ativa empregada será da empresa Tecnosil, a qual é facilmente encontrada, sendo ela já industrializada e comercializada para fins de aplicação em concretos. As características da sílica ativa, ou micro sílica, estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Característica da Sílica Ativa utilizada

Característica	Valor	Unidade de medida
SiO ₂	96	%
Umidade	0,2	%
Perda ao fogo	1,6	%
Diâmetro médio da partícula	0,20	µm
Massa específica	2200	kg/m ³
pH	7,6	
Na ₂ O	0,1	%
Fe ₂ O ₃	0,1	%
CaO	0,6	%
Al ₂ O ₃	0,3	%
Mgo	0,4	%
K ₂ O	0,8	%

Fonte: Aatoria própria (2016).

6.2.4 Nano sílica

A nano sílica encontrada para aplicação é da marca Silicon, da linha Silicon ns ad 400, e é dispersa em aditivo, tendo a finalidade específica de uso em concretos. Pelo fato deste material ser disperso em aditivo haverá a necessidade de correção e racionalização no emprego deste material, verificando as especificações de concentração de nano sílica no aditivo. Seu uso indicado pelo fabricante é de 500 ml à 2700 ml para cada 100 Kg de cimento. As características da nano sílica utilizada são mostradas na tabela 6.

Tabela 6 - Característica da Nano Sílica utilizada		
Característica	Valor	Unidade de medida
Homogeneidade	Homogêneo	
Massa específica	1,06	g/cm ³
Teor de resíduos sólidos	30,6	%
pH	2,7	
Cloretos solúveis em água	0,15	%

Fonte: Aatoria própria (2016).

6.2.5 Aditivos

O aditivo utilizado será do tipo superplastificante, assim conseguindo conferir trabalhabilidade em baixa relação água cimento. Como a nano sílica vem dispersa em aditivo superplastificante, será utilizado o próprio aditivo do material para adicionar à mistura, sendo este a base policarboxilatos. A modificação do aditivo com a nano sílica estabilizada auxilia na formação de redes de produtos similares às do cimento Portland, porém com as propriedades físico-mecânicas e químicas melhoradas.

Também será utilizado outro aditivo do tipo superplastificante, a base de policarboxilatos, para que seja feito uma comprovação da real eficiência do aditivo com nano sílica, sendo escolhido o aditivo da Rheoset, modelo Tec-Flow 7030.

6.2.6 Água

A água utilizada é do tipo potável, fornecida pela companhia de saneamento do Paraná – Sanepar – da cidade de Pato Branco, PR, fornecida pela rede de alimentação pública.

6.3 MÉTODOS

Os métodos para obtenção dos dados necessários para a execução deste trabalho foram baseados em normas específicas e em bibliografias. Os ensaios foram feitos nos laboratórios específicos disponíveis da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – no campus Pato Branco, Paraná.

Os materiais adquiridos possuindo caracterização elaborada pelo fabricante, tais como o cimento, sílica ativa, nano sílica e água, tomaram as informações fornecidas para utilização em ensaios.

6.3.1 Caracterização das argamassas com as adições

As argamassas elaboradas foram caracterizadas pelo espalhamento, sempre que possível chegando em 250 mm no ensaio da mesa de espalhamento, a qual seguiu o procedimento da ABNT NBR 13276:2002 com as devidas alterações para adequação ao tipo da mistura ensaiada. A tolerância máxima para dispersão de espalhamento foi estabelecida em 10 mm.

As misturas foram feitas na argamassadeira planetária de duas velocidades, lenta e rápida. Para ter-se homogeneidade na mistura e tempo para o aditivo superplastificante agir, a mistura foi executada adicionando o superplastificante, o qual contém a nano sílica, na água para amassamento. A mistura de cimento e sílica ativa era feita em um recipiente separado anteriormente à mistura à solução de água e aditivo. Posteriormente a solução líquida foi adicionada na bacia da

argamassadeira e montada no equipamento. A argamassadeira era ligada em velocidade baixa e em 30 segundos a mistura de cimento e sílica ativa eram adicionadas à bacia e, continuamente e na mesma velocidade, ainda ficavam por 30 segundos em mistura. Após 1 minuto decorrido (entre adição do cimento e sílica ativa), era desligada a argamassadeira e com uma espátula era revolvida a mistura na própria bacia da argamassadeira, levando um tempo máximo de 1 minuto para esta atividade. Após a mistura revolvida ela tornava a ser misturada pela bateadeira em velocidade rápida por 5 minutos. Com a mistura ainda batendo, depois dos 5 minutos, adicionava-se areia até a quantidade suficiente para que se chegasse em um espalhamento próximo aos 250 mm, sendo a quantidade de areia adicionada obtida pela diferença da massa de areia inicial no recipiente com a massa restante no recipiente, sendo ele pesado antes da adição da areia e posterior a sua adição. Quando a consistência aproximada era alcançada, a argamassadeira era desligada e a argamassa levada para ensaio na mesa de consistência. Quando as misturas não eram compostas por sílica ativa, aditivo (nano sílica) ou ambos em conjunto, o processo de mistura foi o mesmo.

O tempo de 5 minutos estipulado para a mistura foi obtido através de ensaios, onde observou-se o tempo que a mistura levava para a reação com o aditivo em diversas proporções de aglomerantes, chegando a esse valor como o mais adequado para o experimento.

Os materiais utilizados eram armazenados em recipientes dispostos próximos aos equipamentos para facilitar o manuseio e pesados em balança com precisão de 0,05 g para atender as especificações de dosagem. A areia utilizada foi seca em estufa e pelo método da frigideira e peneirada com a peneira da série normal ABNT de 2,4 mm.

O ensaio de consistência foi executado para cada mistura, sendo feito na mesa de espalhamento e seu resultado era tomado a partir da média de três medidas tomadas da argamassa espalhada na mesa seguindo a NBR 13276:2002. As argamassas com espalhamento superiores ou inferiores à 250 mm e que utilizavam areia em sua mistura eram refeitos, ajustando as composições até que se chegasse ao valor estabelecido, sendo executado o teste cada vez que alterava-se a composição, parando somente quando atingia-se o valor especificado.

As misturas que não atingem o espalhamento mínimo de 250 mm, quando ainda não adicionado areia, foram moldadas sem emprego de artifícios que a

fizessem atingir o valor especificado de espalhamento, ou seja, sem aditivos, sendo anotado o valor obtido naturalmente.

Foram elaborados 6 corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, conforme a NBR 13279:2005, para cada composição de argamassa apresentadas na tabela 7, e mais 6 traços, utilizando um aditivo superplastificante convencional a base de policarboxilatos, sem adições minerais e no teor de 0,3%, 1,0% e 2,7% para cada relação água/aglomerante.

Após a moldagem e decorrido o período de 24 horas desta, os corpos de prova prismáticos eram desmoldados das fôrmas e levados para a câmara com temperatura controlada e dispostas submersas em recipientes com solução de 3g de cal hidratada para cada litro de água. Os corpos de prova permaneceram por um período de 7 dias nessa solução, assim obedecendo a prescrição do fabricante do cimento quanto à resistência no tempo indicado para o cimento (CP V – ARI). Após este procedimento, os corpos de prova foram ensaiados quanto à tração na flexão e compressão.

Tabela 7 – Adições minerais e relação água cimento de cada corpo mistura						
*Nome dos corpos de prova	Adições sobre massa de cimento (%)		Relação água/aglomerante			
	Nano sílica (%)	Micro sílica (%)				
CPREF	-	-	0,22	0,28	0,35	
CPNS3	0,3		0,22	0,28	0,35	
CPNS10	1,0	-	0,22	0,28	0,35	
CPNS27	2,7		0,22	0,28	0,35	
CPMS6		6	0,22	0,28	0,35	
CPMS9	-	9	0,22	0,28	0,35	
CPMS12		12	0,22	0,28	0,35	
MN63		6	0,22	0,28	0,35	
MN93	3	9	0,22	0,28	0,35	
MN123		12	0,22	0,28	0,35	
MN610		6	0,22	0,28	0,35	
MN910	10	9	0,22	0,28	0,35	
MN1210		12	0,22	0,28	0,35	
MNS627		6	0,22	0,28	0,35	
MNS927	27	9	0,22	0,28	0,35	
MNS1227		12	0,22	0,28	0,35	

*CPREF – Corpo de prova de referência (sem adições) CPNS – Corpo de prova com nano sílica CPMS – Corpo de prova com sílica ativa MNS – Corpo de prova com micro sílica e nano sílica

Fonte: Autoria própria (2015)

6.3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassa com as adições

A determinação da resistência à compressão das argamassas feitas com adições de nano sílica e sílica ativa foram baseadas sobre a ABNT NBR 13279:2005, sendo feito o ensaio para cada relação apresentada na tabela 04. O ensaio foi realizado através da prensa hidráulica EMIC DL 30000, disponível no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Pato Branco.

6.3.3 Estudo da viabilização da produção do concreto

Para obter as informações que indiquem a viabilização da produção do concreto, será feito a análise mecânica e de dosagem das diferentes misturas das argamassas, onde as que mais se destacarem em resistência à compressão e no menor consumo de aglomerante para a obtenção de cada MPa atingido serão verificadas considerando a bibliografia para sua aplicação em concretos, assim obtendo parâmetros para possível obtenção de concretos com propriedades que obtenham melhores desempenhos comparados aos convencionais.

7 RESULTADOS E ANÁLISES

7.1 ANÁLISE DAS ARGAMASSAS

Os traços das argamassas em função à 1 Kg de cimento são apresentados na tabela 8, sendo estes feitos a partir da fixação de 250 mm de espalhamento seguindo o ensaio da mesa de consistência, com variação de 10 mm para mais ou para menos.

Foram obtidas misturas onde não foi possível a adição de agregado miúdo devido ao não emprego de aditivos, tal como definido nos métodos do trabalho, assim caracterizando-as como pastas (aglomerante + água) e não argamassas (aglomerante + água + agregado miúdo), porém estas também são apresentadas na tabela 8 e foram analisadas, fazendo as considerações devidas. Estas podem

Tabela 8 - Traços das argamassas elaboradas					
Traço em relação à 1 Kg de cimento					
NOME*	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (L)	Micro sílica (g)	Aditivo com nano sílica (ml)
22CPREF	1	0,00	0,22	0	0
28CPREF	1	0,00	0,28	0	0
35CPREF	1	1,13	0,35	0	0
22CPNS3	1	0,00	0,22	0	3
22CPNS10	1	0,54	0,22	0	10
22CPNS27	1	1,42	0,22	0	27
28CPNS3	1	0,00	0,28	0	3
28CPNS10	1	1,19	0,28	0	10
28CPNS27	1	2,04	0,28	0	27
35CPNS3	1	1,16	0,35	0	3
35CPNS10	1	1,78	0,35	0	10
35CPNS27	1	2,52	0,35	0	27
22CPMS6	1	0,00	0,22	60	0
22CPMS9	1	0,00	0,22	90	0
22CPMS12	1	0,00	0,22	120	0
28CPMS6	1	0,00	0,28	60	0
28CPMS9	1	0,00	0,28	90	0

28CPMS12	1	0,00	0,28	120	0
35CPMS6	1	0,88	0,35	60	0
35CPMS9	1	0,47	0,35	90	0
35CPMS12	1	0,33	0,35	120	0
22MNS63	1	0,00	0,22	60	3
22MNS93	1	0,00	0,22	90	3
22MNS123	1	0,00	0,22	120	3
28MNS63	1	0,24	0,28	60	3
28MNS93	1	0,21	0,28	90	3
28MNS123	1	0,00	0,28	120	3
35MNS63	1	0,67	0,35	60	3
35MNS93	1	1,42	0,35	90	3
35MNS123	1	0,51	0,35	120	3
22MNS610	1	0,00	0,22	60	10
22MNS910	1	0,46	0,22	90	10
22MNS1210	1	0,00	0,22	120	10
28MNS610	1	1,80	0,28	60	10
28MNS910	1	1,20	0,28	90	10
28MNS1210	1	0,00	0,28	120	10
35MNS610	1	2,72	0,35	60	10
35MNS910	1	2,60	0,35	90	10
35MNS1210	1	2,38	0,35	120	10
22MNS627	1	1,96	0,22	60	27
22MNS927	1	2,05	0,22	90	27
22MNS1227	1	1,88	0,22	120	27
28MNS627	1	2,28	0,28	60	27
28MNS927	1	2,36	0,28	90	27
28MNS1227	1	2,47	0,28	120	27
35MNS627	1	2,88	0,35	60	27
35MNS927	1	3,28	0,35	90	27
35MNS1227	1	3,00	0,35	120	27

*CPREF – Corpo de prova de referência (sem adições) CPNS – Corpo de prova com nano sílica CPMS – Corpo de prova com sílica ativa MNS – Corpo de prova com micro sílica e nano sílica

Fonte: Autoria própria. (2016).

Com os valores da tabela 8 evidencia-se que o aditivo superplastificante contido na nano sílica fornece aumento na trabalhabilidade e espalhamento das argamassas, enquanto o emprego da sílica ativa, na grande maioria dos traços, diminui o espalhamento, diminuindo a adição de areia na mistura.

Os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm aos 7 dias das argamassas e pastas elaboradas foram anotados ao longo dos ensaios e são apresentados na tabela 9, e os resultados da resistência à tração na flexão apresentados na tabela 10. Também são mostrados na tabela 11 os valores obtidos com os traços que empregaram apenas o aditivo superplastificante à base de policarboxilatos convencional, sem adições. Todos resultados de resistência à compressão e à tração foram tratados conforme a estatística apresentada na ABNT NBR 13279:2005, assim tendo a representatividade garantida dentro de um universo de valores.

Tabela 9 - Resultados da resistência à compressão aos 7 dias das argamassa elaboradas					
Nome da mistura*	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA (Mpa)				
	Adições sobre massa de cimento (%)		Relação água/aglomerante		
	Nano sílica (%)	Micro sílica (%)	0,22	0,28	0,35
CPREF	-	-	61,40	65,3	51,8
CPNS3	0,3	-	91,9	88,2	57,1
CPNS10	1,0	-	81,9	79,2	62,2
CPNS27	2,7	-	95	77,8	63,4
CPMS6	-	6	77,4	72,8	65,4
CPMS9	-	9	59,1	58,6	57,2
CPMS12	-	12	21,7	54,8	50,6
MNS63	-	6	73,1	64,8	58,7
MNS93	0,3	9	71,8	65	54,3
MNS123	-	12	65,7	59,9	55,8
MNS610	-	6	80,6	65	56,3
MNS910	1,0	9	82,1	74,3	55,9
MNS1210	-	12	24,7	62,3	53,5
MNSS627	-	6	81,5	72,1	49,9
MNSS927	2,7	9	80,4	66	49,4
MNS1227	-	12	84,5	61,6	57,4

*CPREF – Corpo de prova de referência (sem adições) CPNS – Corpo de prova com nano sílica CPMS – Corpo de prova com sílica ativa MNS – Corpo de prova com micro sílica e nano sílica

Fonte: Autoria própria (2016).

Tabela 10 - Resultado da resistência à tração na flexão aos 7 dias das argamassas elaboradas

Nome da mistura*	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA (Mpa)				
	Adições sobre massa de cimento (%)		Relação água/aglomerante		
	Nano sílica (%)	Micro sílica (%)	0,22	0,28	0,35
CPREF	-	-	11,5	12,6	9,6
CPNS3	0,3	-	14,7	14,1	13,4
CPNS10	1,0	-	16,1	16,1	12,7
CPNS27	2,7	-	17,5	13,7	11,3
CPMS6	-	6	3,2	2,9	11,6
CPMS9	-	9	4,8	9,4	11,0
CPMS12	-	12	4,0	9,5	10,2
MNS63	-	6	7,4	12,8	12,0
MNS93	0,3	9	6,4	13,5	12,0
MNS123	-	12	12,5	12,8	10,7
MNS610	-	6	3,0	13,9	10,6
MNS910	1,0	9	8,7	17,1	10,5
MNS1210	-	12	4,6	11,2	11,8
MNS627	-	6	17,1	13,9	10,7
MNS927	2,7	9	17,4	13,5	9,7
MNS1227	-	12	16,0	13,2	11,3

*CPREF – Corpo de prova de referência (sem adições) *CPNS – Corpo de prova com nano sílica *CPMS – Corpo de prova com sílica ativa *MN – Corpo de prova com micro sílica e nano sílica

Fonte: Autoria própria (2016)

Tabela 11 - Desempenho do aditivo de referência aos 7 dias

NOME*	Compressão	Tração
22CPAD3	65,6	16,4
22CPAD10	81,1	20,4
22CPAD27	73,5	18,3
28CPAD3	62,2	15,9
28CPAD10	61,1	14,3
28CPAD27	59,5	14,5
35CPAD3	52,3	12,6
35CPAD10	50,6	12
35CPAD27	47,5	10,8

*CPAD – Corpo de prova com aditivo, sendo os dois primeiros dígitos a relação água/cimento e os últimos a quantidade de aditivo em ml para cada 1 Kg de cimento.

Fonte: Autoria própria (2016).

Comparando a resistência à compressão das misturas de referência (CPREF), com as que foram empregado nano sílica (CPNS) e com as que foram empregado apenas aditivo convencional (CPAD), percebe-se que na relação água/aglomerante de 0,22 houve a melhora na resistência à compressão tanto com a nano sílica quanto com o aditivo convencional, porém com o emprego da nano sílica obteve-se melhores resultados. Contudo, quando a adição de nano sílica é de 1,0%, na reação água/aglomerante 0,22, a resistência à compressão fica próxima à resistência à compressão da mistura com a mesma quantidade de aditivo convencional, mostrando que nessa relação não houve grande diferenciação na eficiência. Na figura 9 essas constatações podem ser melhor visualizadas.

Ainda com a figura 9, com a comparação da resistência à compressão das mesmas misturas anteriores, porém na relação água/aglomerante 0,28, ainda nota-se o aumento da resistência quando empregado a nano sílica, onde até mesmo há uma proximidade de resultado com a mistura de relação água/aglomerante de 0,22 com adição de 0,3 e 1,0% (CPNS3 e CPNS10). Nesta mesma relação água/aglomerante (0,28) verifica-se que há uma relação decrescente na resistência à compressão conforme aumenta-se a adição de nano sílica (misturas CPNS3, CPNS10 e CPNS27).

Quando a comparação estende-se para a relação água/aglomerante de 0,35 (visualizada com figura 9, na linha em verde), ainda verifica-se os melhores valores de resistência à compressão das misturas com emprego de nano sílica (misturas CPNS3, CPNS10 e CPNS27), sendo que em quanto maior quantidade de adição de nano sílica, melhores resultados foram obtidos, diferente do comportamento das misturas que utilizaram apenas aditivo convencional, os quais obtiveram resistência à compressão diminuído conforme o aumento de adição deste aditivo (misturas CPAD3, CPAD10 e CPAD27).

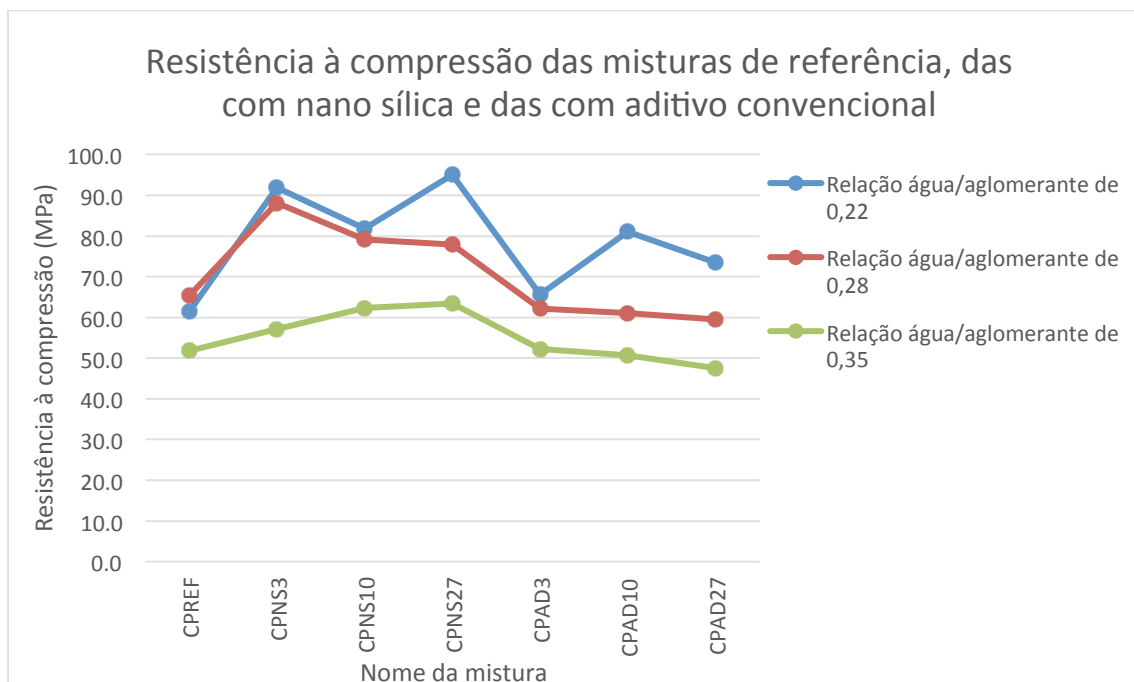


Figura 2 - Gráfico comparando a resistência à compressão das misturas de referência com as misturas com nano sílica e com aditivo convencional em relação a resistência à compressão
 Fonte: Autoria própria (2016).

Na figura 10, onde há a comparação entre as misturas de referência (CPREF) com as misturas com adição de somente micro sílica (CPMS6, CPMS9 e CPMS12), ambas com as relações água/aglomerante de 0,22; 0,28 e 0,35, nota-se que a resistência à compressão tem melhores resultados quando o emprego de micro sílica é em menor proporção (CPMS6), sendo resistências maiores em comparação ao traço de referência (CPREF), contudo esta resistência decresce bruscamente conforme há maior adição de micro sílica e menor relação água/aglomerante. Quando o teor de 9% de micro sílica é adicionado à mistura, a resistência à compressão nas três relações água/aglomerante ficam muito próximas. Percebe-se com esses resultados que a adição de micro sílica tem maior eficiência em relações água/aglomerante mais altas, sendo necessária sua racionalização para a aplicação.

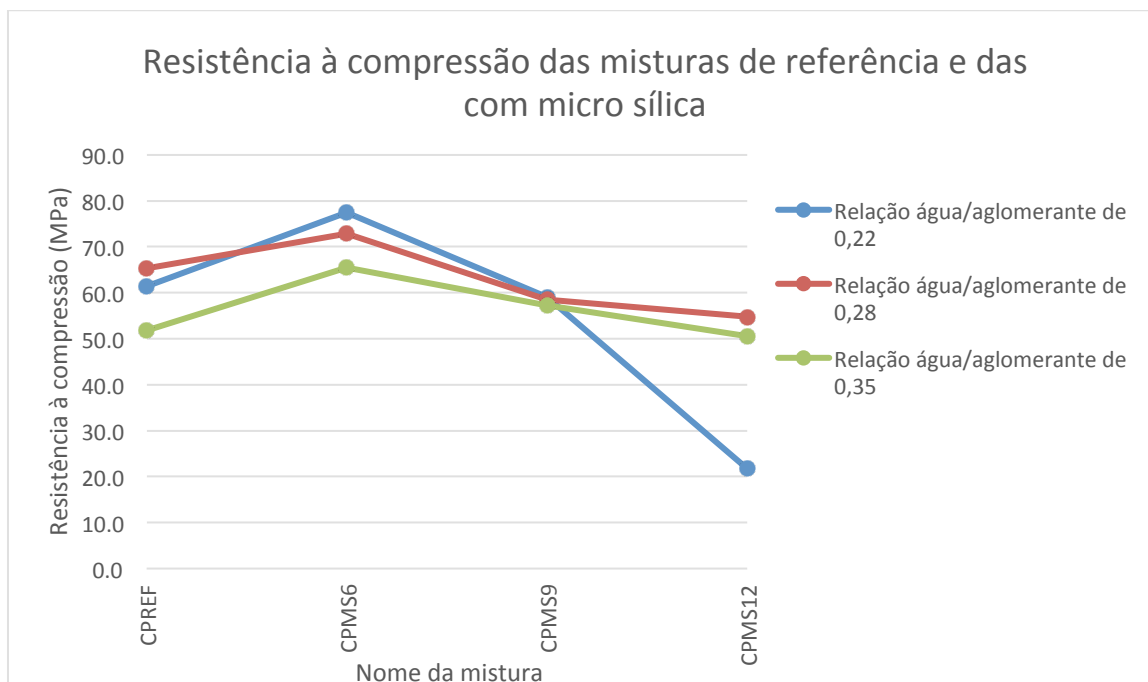


Figura 3 - Gráfico comparando a resistência à compressão das misturas de referência com as misturas com sílica ativa em relação a resistência à compressão

Fonte: Autoria própria (2016).

Na figura 11, onde há o gráfico com a comparação da resistência à compressão das misturas com nano e micro sílica (MNS) e também das misturas apenas com aditivo convencional (CPAD), quando observado o comportamento das misturas com relação água/aglomerante de 0,35 (linha em verde), nota-se que o aumento da micro sílica nas misturas com nano sílica e micro sílica implica na queda da resistência à compressão da misturas, comportamento este semelhante ao das misturas na mesma relação água/aglomerante com apenas aditivo convencional. Por outro lado, nota-se que o aumento da adição de nano sílica faz com que as misturas consigam aumentar a resistência ou manterem-se próximas às com menores adições de micro sílica, sendo que no caso da adição de 12% de micro sílica e 2,7% de nano sílica obteve-se um salto positivo na resistência à compressão se comparado com os anteriores que possuem a mesma quantidade de adição de nano sílica, assim mostrando que o aumento de micro sílica deve ser acompanhado com o aumento na adição de aditivo com nano sílica.

Quando compara-se as misturas com relação água/aglomerante de 0,28 da figura 11, percebe-se que há pontos onde esta relação de água/aglomerante é mais eficiente, sendo que as melhores relações entre micro sílica e nano sílica foram as

de 9% e 1,0% (micro sílica e nano sílica, respectivamente) e 6% e 2,7% (micro sílica e nano sílica, respectivamente), onde os resultados foram semelhantes nessa relação água/aglomerante, notando que pode ser feita uma racionalização no consumo de nano ou micro sílica e obter resultados de resistência à compressão próximos.

Na relação água/aglomerante de 0,22, ainda nas misturas representadas na figura 11, nota-se que são os resultados com os maiores valores de resistência à compressão na grande maioria dos casos, sendo o maior a mistura com adição de 12% de micro sílica e 2,7% de nano sílica (MNS1227), porém está também mostra o valor mais baixo (MN1210), o qual teve uma queda significativa comparado ao com o mesmo teor de aditivo com nano sílica porém com menor adição de micro sílica. Com isso percebe-se que o aumento de adição de micro sílica implica no aumento da adição de nano sílica para obter-se melhores resistências à compressão e, por vezes, o aumento não garante esse ganho, se fazendo mais uma vez necessária a racionalização entre as proporções de cada adição. Já comparando estes resultado com as misturas com apenas aditivo convencional, nota-se que as com aditivo convencional alcançaram maiores resistências em algumas misturas.

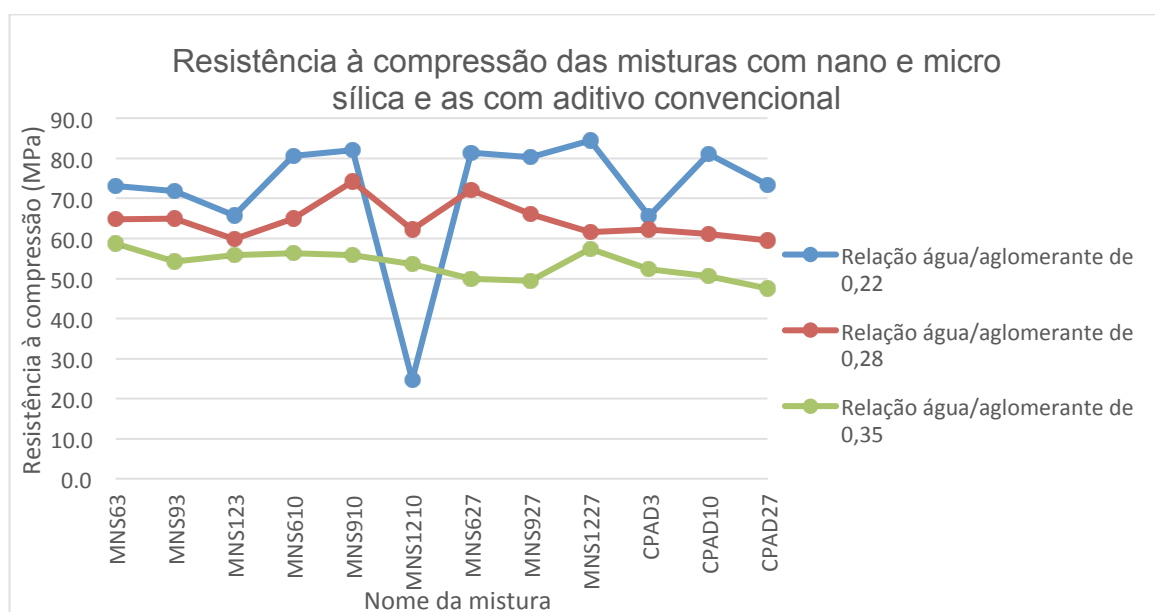


Figura 4 - Gráfico comparando a resistência à compressão das misturas com diferentes relações entre nano e micro sílica e as com apenas aditivo convencional
Fonte: Autoria própria (2016).

Quando a resistência à compressão é analisada comparando entre todas as misturas elaboradas (figura 12), percebe-se que nas misturas apenas com nano sílica (CPNS) a resistência à compressão alcançada é superior comparada às outras misturas, sendo maiores e mais elevadas conforme a relação água/aglomerante diminui. As adições de micro sílica (CPMS) em maiores teores fazem com que a resistência à compressão diminua, chegando em valores até mais baixos do que as misturas sem adições, contudo, quando adicionadas junto à nano sílica (MNS) obtém resistências à compressão mais elevadas, conforme aumenta-se o teor da nano sílica na mistura, porém estes ainda não alcançam os valores de compressão das misturas apenas com nano sílica. Estas também, em algumas misturas, mostram-se menos resistentes do que as misturas com apenas aditivo convencional (CPAD).

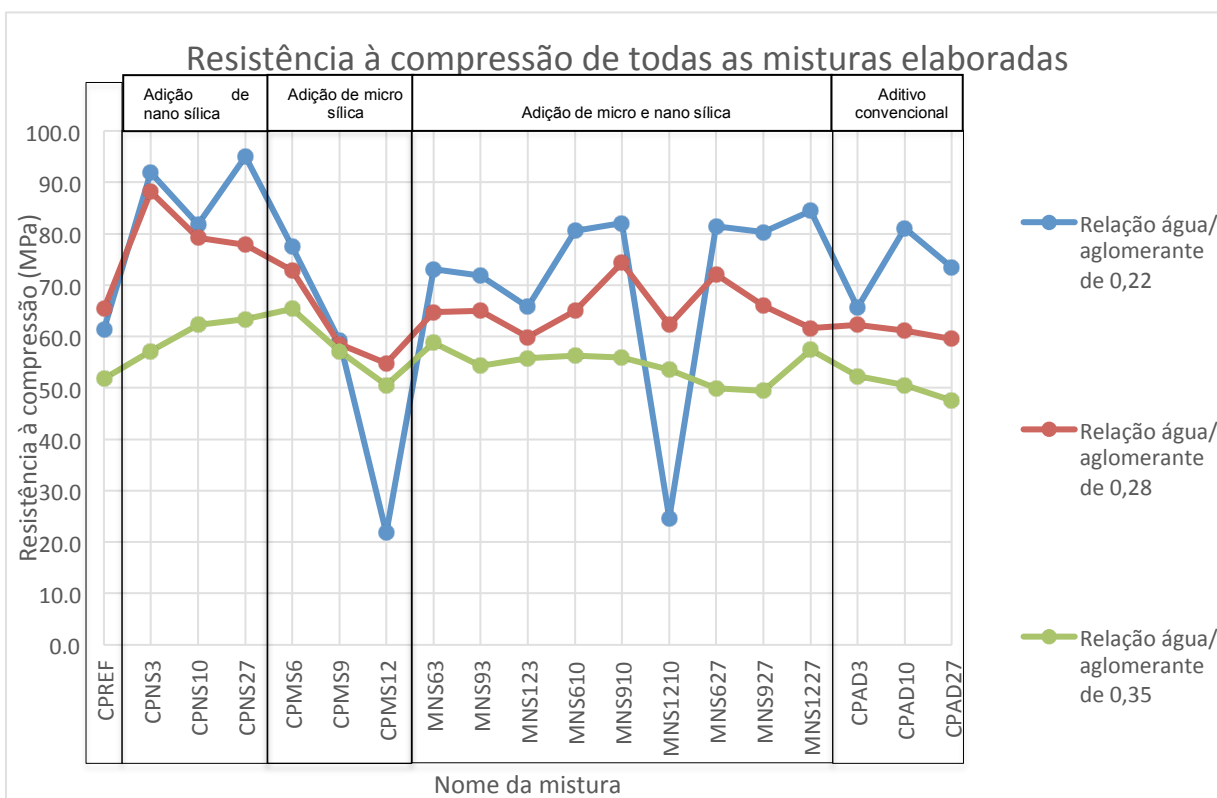


Figura 5 - Gráfico comparando a resistência à compressão das misturas com diferentes relações entre nano e micro sílica e as com apenas aditivo convencional
 Fonte: Autoria própria (2016).

A resistência à tração na flexão das misturas, comparadas entre todas elaboradas, mostrou-se maior nas com apenas aditivo convencional (CPAD), sendo que as adições de nano e micro sílica não se mostraram tão eficientes nesse desempenho mecânico. Nas misturas com a combinação de nano e micro sílica (MNS) houve aumento da resistência à tração na flexão nas relações água/aglomerante 0,22 e 0,28, enquanto na relação água/aglomerante de 0,35 não houve grande diferenciação. Nota-se que a adição de micro sílica diminui a resistência à tração na flexão das misturas, porém a adição de nano sílica, em algumas proporções, faz com que este valor seja aumentado. Essas observações podem ser comprovadas através da figura 13.

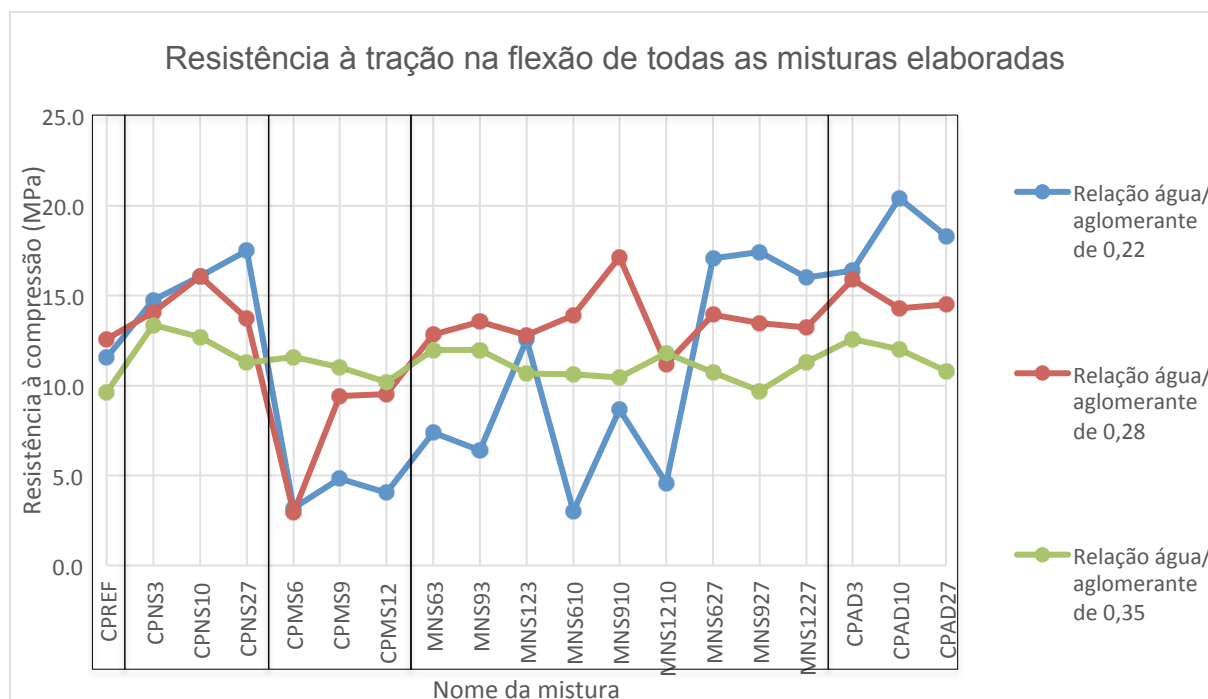


Figura 6 - Resistência à tração na flexão das misturas elaboradas

Fonte: Autoria própria

Nas figuras 14, 15 e 16, onde é mostrada a resistência de cada misturas em função do consumo de areia, podemos observar que nas misturas que não levaram adição de agregado miúdo, caracterizando-as assim como pastas, mas continham adição de nano sílica ou micro sílica obtiveram resistências à compressão mais elevadas, por outro lado as que continham micro sílica em alto teor tiveram

resistência menos elevadas, até mesmo ficando muito abaixo das demais. As misturas com nano sílica com o aumento da adição de agregado miúdo foram decrescendo sua resistência à compressão, contudo esse decréscimo é acompanhado pelo aumento da relação água/aglomerante, ficando assim uma tendência normal de queda.

Ainda analisando essas misturas através do consumo de areia e resistência à compressão, percebe-se que a mistura com adição de micro sílica e agregado miúdo obtém melhores resultados quando em maiores teores e relação água/aglomerante, onde a perda de resistência conforme o aumento da relação água/aglomerante não foi tão alta.

Já as misturas com nano sílica em variadas proporções e com micro sílica obtiveram resistências à compressão semelhantes conforme os diferentes teores de areia adicionados, notando menores diferenças conforme o aumento da relação água/aglomerante.

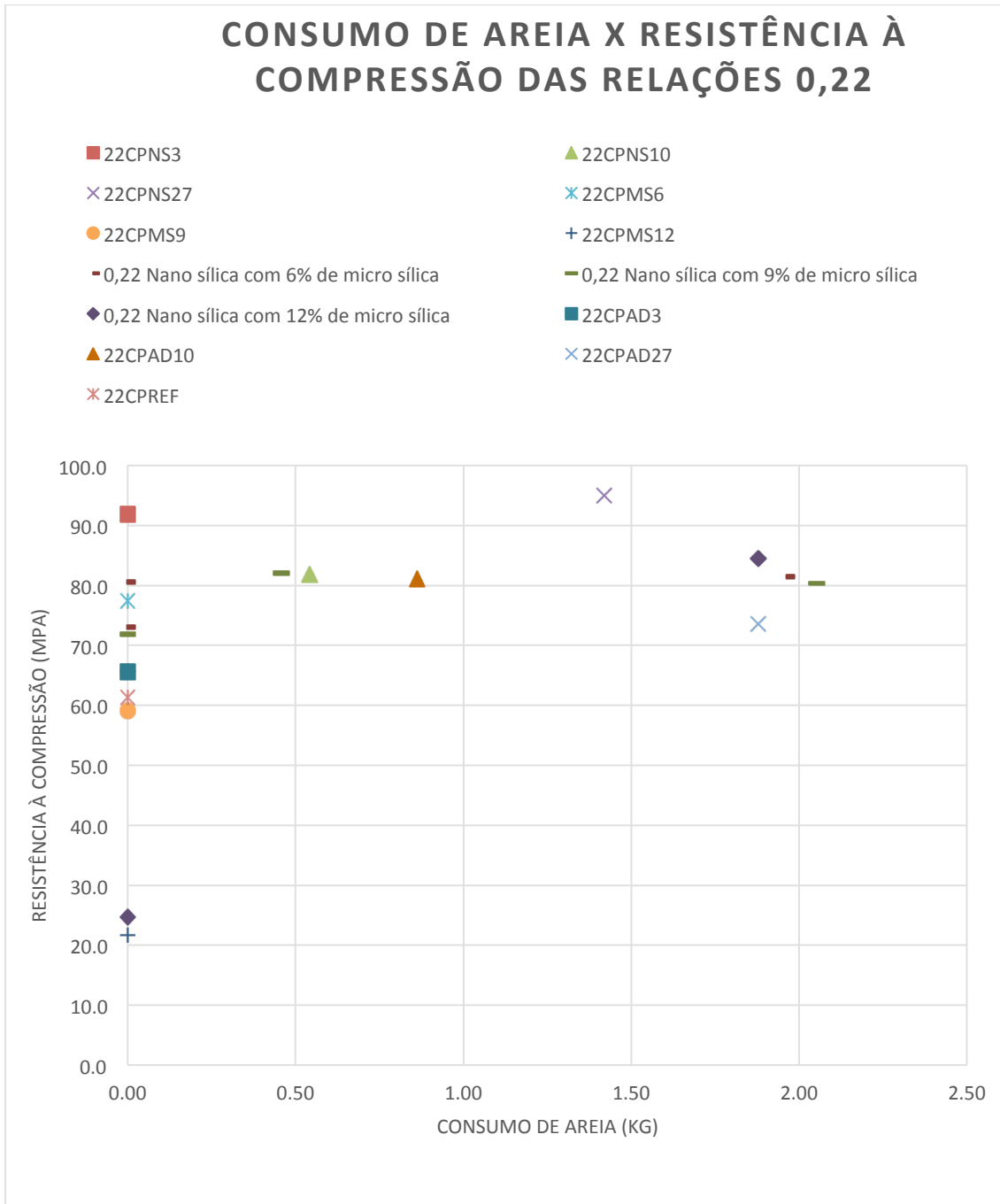


Figura 7 - Gráfico com o consumo de areia para cada mistura na relação água/aglomerante 0,22

Fonte: Autoria própria (2016).

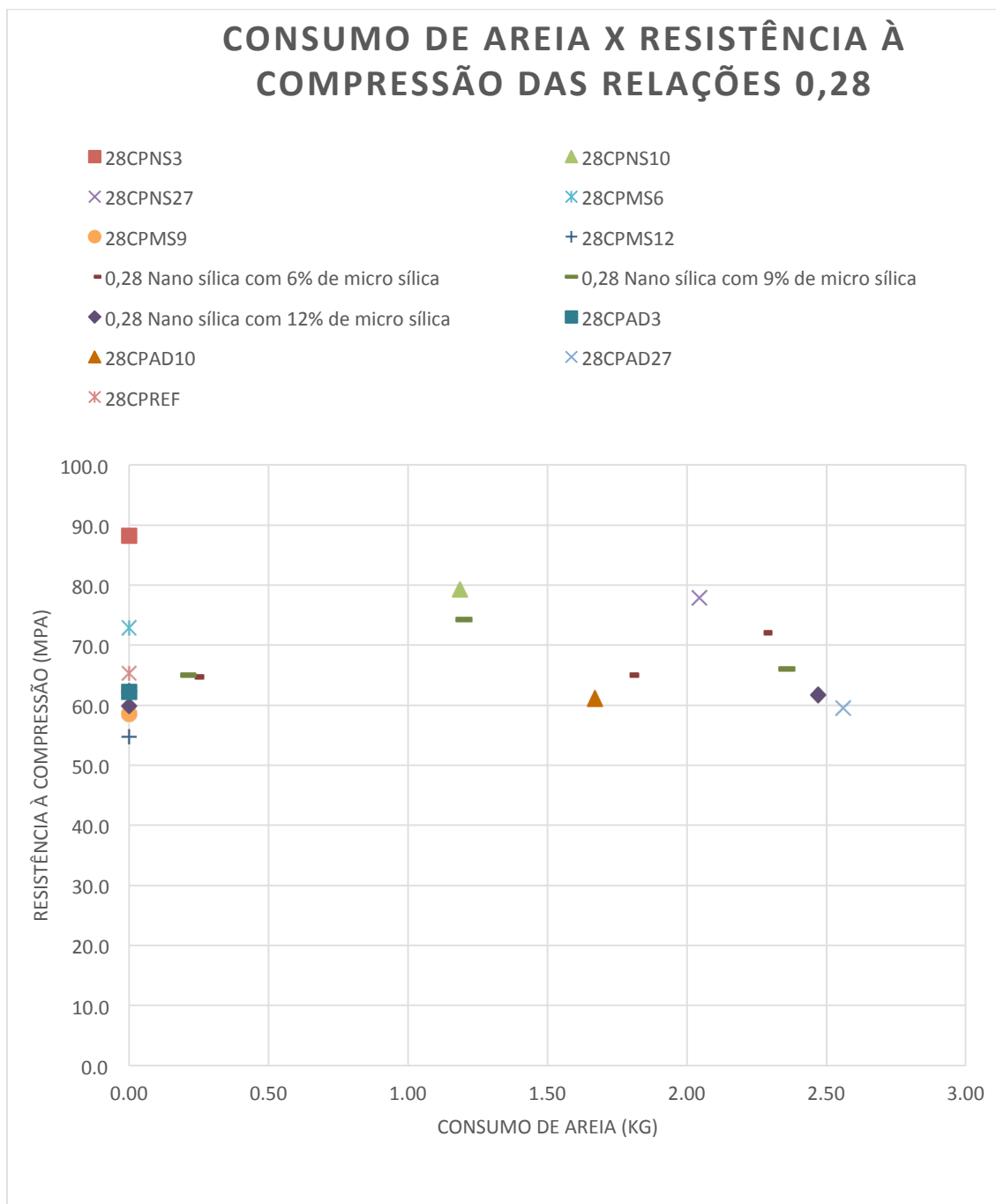


Figura 8 - Gráfico com o consumo de areia para cada mistura na relação água/aglomerante 0,28

Fonte: Autoria própria (2016).

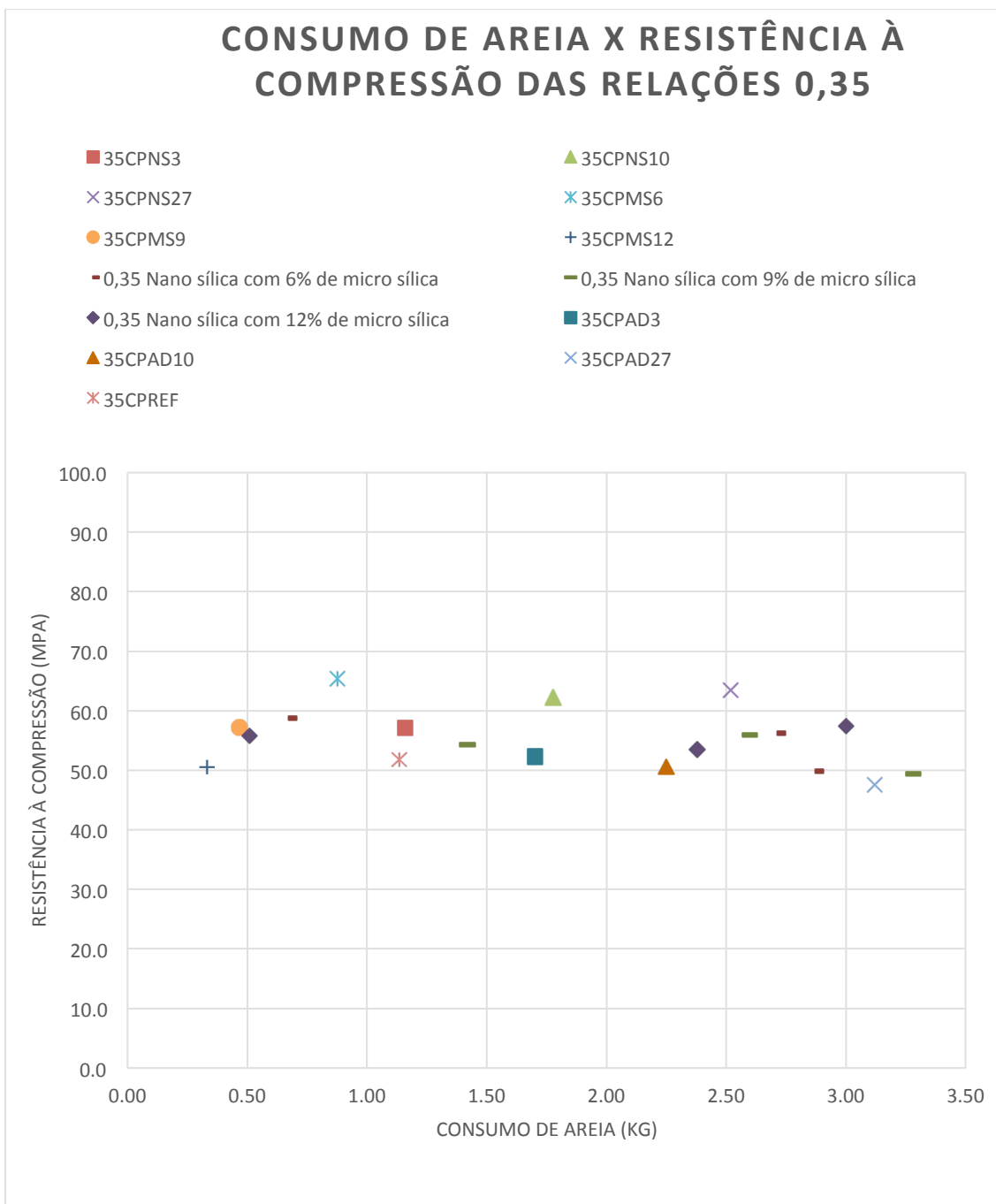


Figura 9 - Gráfico com o consumo de areia para cada mistura na relação água/aglomerante 0,35

Fonte: Autoria própria (2016).

O consumo de aglomerante (cimento + micro sílica) de cada traço das argamassas, ou pastas, elaborado é fundamental para que se observe a viabilidade da produção do concreto e este é mostrado na tabela 12, onde contém o consumo de aglomerante para 1 m³ de argamassa produzida de acordo com cada traço.

Tabela 12 - Consumo de aglomerante para concepção de 1 m³ de argamassa

TRAÇO*	Kg de aglomerante por m ³ de argamassa
22CPREF	1860,6
28CPREF	1673,8
35CPREF	911,8
22CPNS3	1860,6
22CPNS10	1346,8
22CPNS27	930,3
28CPNS3	1673,8
28CPNS10	955,4
28CPNS27	729,2
35CPNS3	903,5
35CPNS10	745,8
35CPNS27	616,8
22CPMS6	1877,8
22CPMS9	1885,8
22CPMS12	1893,4
28CPMS6	1697,4
28CPMS9	1708,5
28CPMS12	1719,1
35CPMS6	1032,6
35CPMS9	1231,8
35CPMS12	1321,3
22MNS63	1877,8
22MNS93	1885,8
22MNS123	1893,4
28MNS63	1483,4
28MNS93	1517,3
28MNS123	1719,1
35MNS63	1116,1
35MNS93	874,9
35MNS123	1224,8
22MNS610	1877,8
22MNS910	1450,6
22MNS1210	1893,4
28MNS610	811,4
28MNS910	997,7
28MNS1210	1719,1
35MNS610	615,2
35MNS910	643,9
35MNS1210	690,4
22MNS627	810,6

22MNS927	804,3
22MNS1227	859,4
28MNS627	712,5
28MNS927	711,6
28MNS1227	705,5
35MNS627	594,3
35MNS927	558,7
35MNS1227	602,8

*CPREF – Corpo de prova de referência (sem adições) CPNS – Corpo de prova com nano sílica CPMS – Corpo de prova com sílica ativa MNS – Corpo de prova com micro sílica e nano sílica

Fonte: Autoria própria (2016)

Para traduzir os valores obtidos no traço das argamassas relacionando com o seu desempenho mecânico de maior importância, a resistência à compressão, estimou-se o consumo de aglomerante para 1 m³ de argamassa para obter-se 1 MPa de resistência à compressão, assim mostrando a influência do emprego das adições de micro sílica e nano sílica no produto final. Os valores são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Consumo de aglomerante para 1 m³ de argamassa para cada 1 MPa de resistência à compressão

TRAÇO	Kg de aglomerante por metro cúbico por Mpa
22CPREF	30,3
28CPREF	25,6
35CPREF	17,6
22CPNS3	20,2
22CPNS10	16,4
22CPNS27	9,8
28CPNS3	19,0
28CPNS10	12,1
28CPNS27	9,4
35CPNS3	15,8
35CPNS10	12,0
35CPNS27	9,7
22CPMS6	24,3
22CPMS9	31,9
22CPMS12	87,1
28CPMS6	23,3
28CPMS9	29,2

28CPMS12	31,4
35CPMS6	15,8
35CPMS9	21,5
35CPMS12	26,1
22MNS63	25,7
22MNS93	26,3
22MNS123	28,8
28MNS63	22,9
28MNS93	23,3
28MNS123	28,7
35MNS63	19,0
35MNS93	16,1
35MNS123	21,9
22MNS610	23,3
22MNS910	17,7
22MNS1210	76,7
28MNS610	12,5
28MNS910	13,4
28MNS1210	27,6
35MNS610	10,9
35MNS910	11,5
35MNS1210	12,9
22MNS627	9,9
22MNS927	10,0
22MNS1227	10,2
28MNS627	9,9
28MNS927	10,8
28MNS1227	11,5
35MNS627	11,9
35MNS927	11,3
35MNS1227	10,5

*CPREF – Corpo de prova de referência (sem adições) CPNS – Corpo de prova com nano sílica CPMS – Corpo de prova com sílica ativa MNS – Corpo de prova com micro sílica e nano sílica

Fonte: Autoria própria (2016)

No consumo de aglomerante para a elaboração de 1 m³ de argamassa, nota-se que a nano sílica, por vir dispersa em aditivo superplastificante, proporciona uma diminuição de aglomerante, o que faz empregar mais agregado miúdo à mistura, porém com 0,3% de nano sílica (CPNS3) não há grande incremento nos resultados, contudo, ao aumentar seu teor a variação toma proporções maiores.

Este é um fator previsível, tendo em vista que adicionando nano sílica emprega-se, por consequência, aditivo supeplastificante. Por outro lado, ao adicionar micro sílica tem-se o aumento no consumo, entretanto também não há grande diferença no consumo de aglomerante, quando comparado com as misturas de referência (CPREF) nas relações água/aglomerante 0,22 e 0,28. Já na adição de micro sílica com relação água/aglomerante de 0,35 o consumo de aglomerante fica mais notório, sendo maior conforme o teor da adição aumenta. A figura 17 representa esses valores proporcionando uma comparação mais visível.

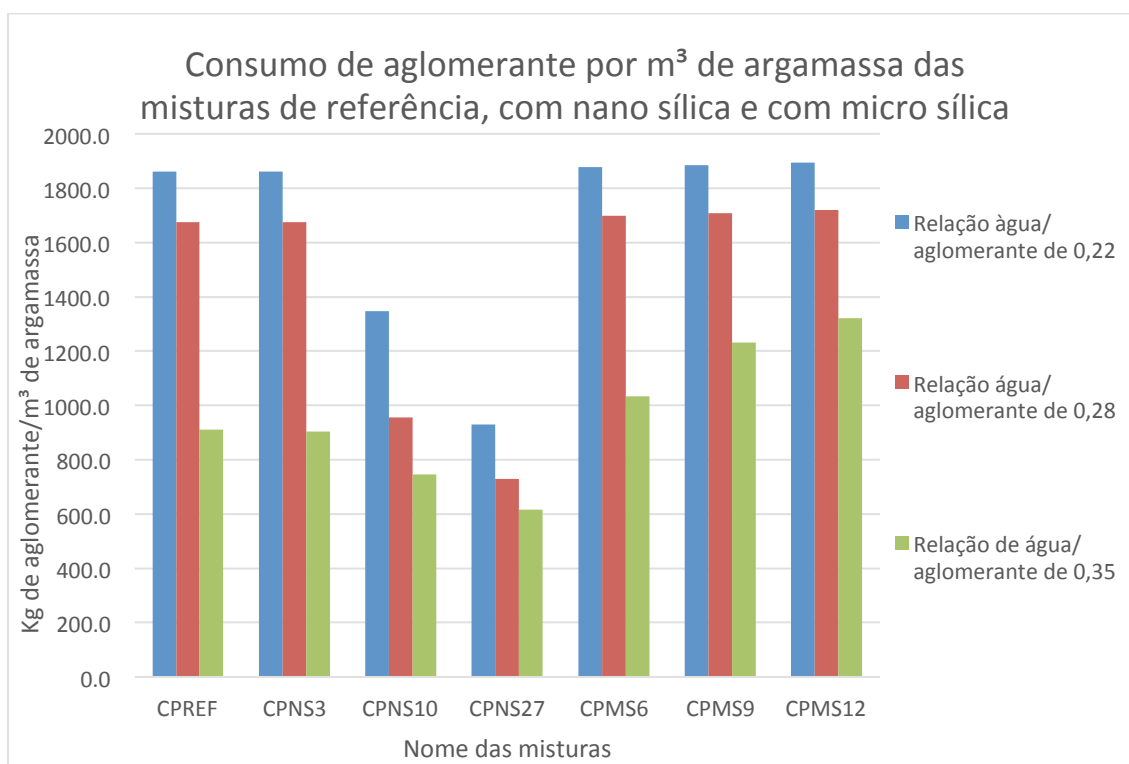


Figura 10- Consumo de aglomerante das misturas de referência (CPREF), apenas com nano sílica (CPNS) e apenas com micro sílica (CPMS) nas diferentes relações água/aglomerante
 Fonte: Autoria própria (2016).

Quando a nano sílica e a micro sílica são empregadas juntas, percebe-se, com apoio da figura 18, que nas misturas com 9% de micro sílica há uma queda notória no consumo de aglomerante no teor de 0,3% de nano sílica (MNS93) e relação água/aglomerante 0,35 e no teor de 1,0% de nano sílica (MNS910) e relação água/aglomerante de 0,22, o que não se observa no teor de 2,7 % de nano sílica, onde as diferentes adições de micro sílica e relação água/aglomerante tem

comportamento mais lineares. Nas relações com 12% de micro sílica, em todas as misturas da figura 18, houve o aumento no consumo de aglomerante se comparada às misturas com menores teores de micro sílica.

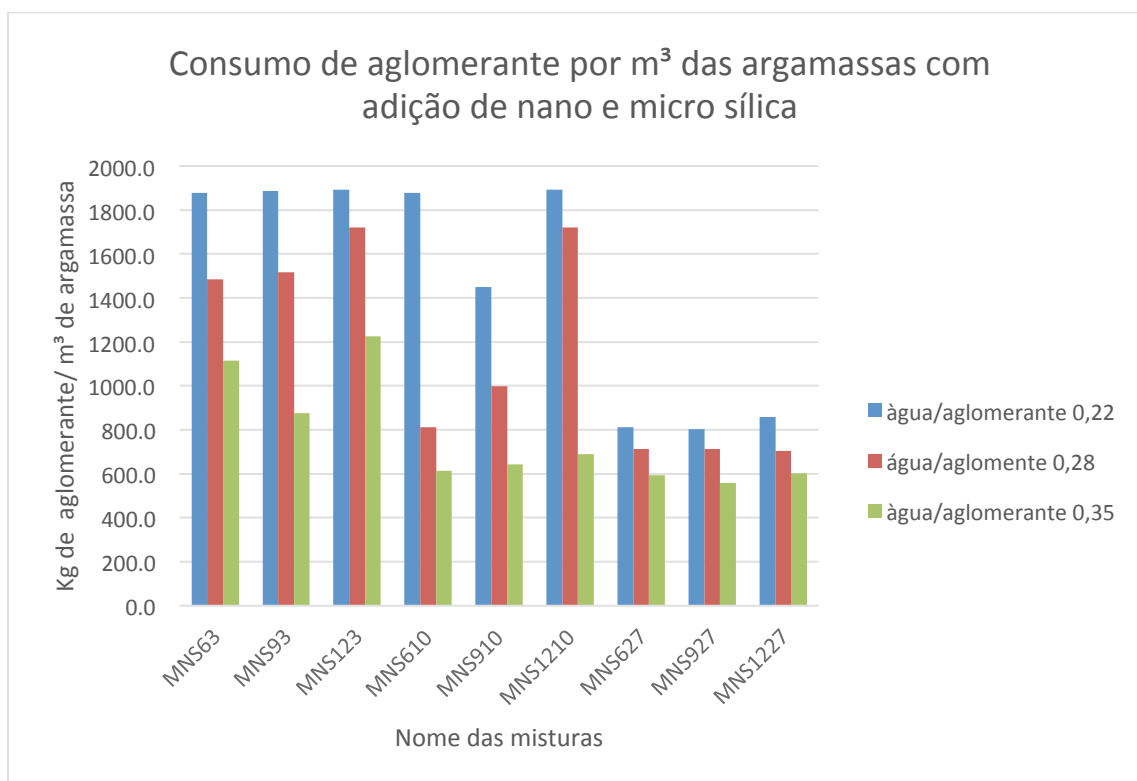


Figura 11 - Consumo de aglomerante das misturas empregando nano e micro sílica conjuntamente (MNS)
 Fonte: Autoria própria (2016).

Com os valores do consumo de aglomerante e a resistência à compressão pode-se obter uma análise melhor quanto ao desempenho dos componentes. Na figura 19, onde se encontra em forma de gráfico o consumo de aglomerante para 1 m³ de argamassa para alcançar 1 MPa das misturas de referência (CPREF) e das apenas com nano sílica (CPNS) e apenas com micro sílica (CPMS), observa-se que a nano sílica dispersa em aditivo (misturas do tipo CPNS) aumenta significativamente o desempenho da argamassa em todas as relações água/aglomerante e nos variados teores adicionados. Quando as adições são apenas de micro sílica (misturas com o nome do tipo CPMS) nota-se que o aumento do seu teor na adição ocasiona o aumento do consumo de cimento para cada MPa

de resistência à compressão, notando que conforme a relação água/aglomerante diminui e o teor de micro sílica aumenta tem-se piores resultados.

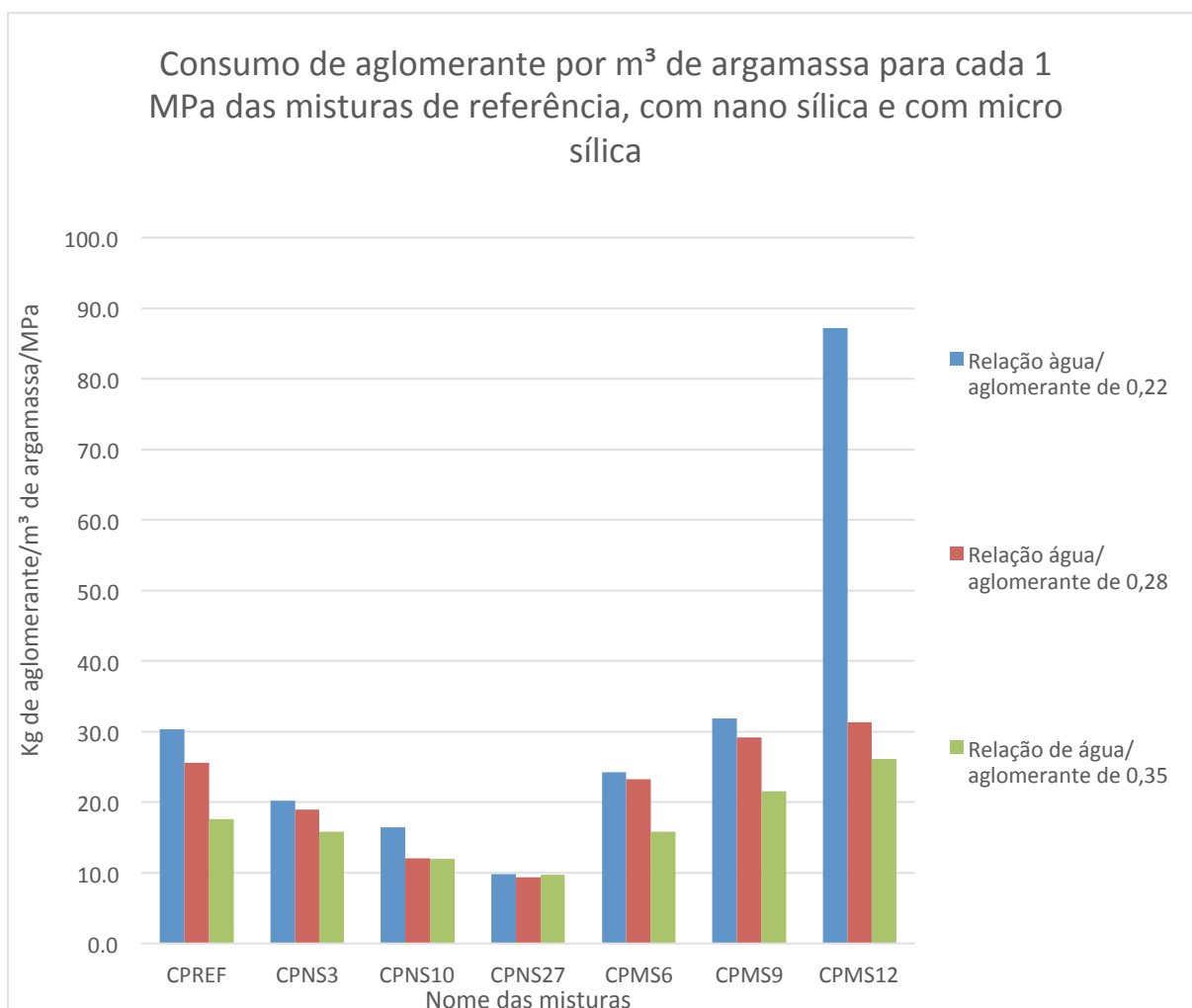


Figura 12 - Consumo de aglomerante para produzir 1 m³ de argamassa das misturas de referência, somente com nano sílica e somente com micro sílica para cada MPa de resistência à compressão

Fonte: Autoria própria (2016).

Quando esta comparação é levada para as misturas que empregaram nano e micro sílica juntamente, representada na figura 20, verifica-se que as adições de micro sílica em 12% resultam em consumos maiores quando em menores relações água/aglomerante, e, no teor de 1,0% de nano sílica (MNS610, MNS910 e MNS1210), as misturas tem um comportamento que não rege uma linearidade se comparadas com as outras misturas. As adições de nano sílica em 0,3% (MNS63,

MNS93 e MNS123) resultam em um aumento de consumo de aglomerante para obter cada MPa conforme aumenta-se o teor de micro sílica, enquanto as misturas com 2,7% de nano sílica (MNS627, MNS927 e MNS1227) comportam-se de forma mais linear e com valores mais de consumo mais próximos conforme adiciona-se micro sílica à mistura.

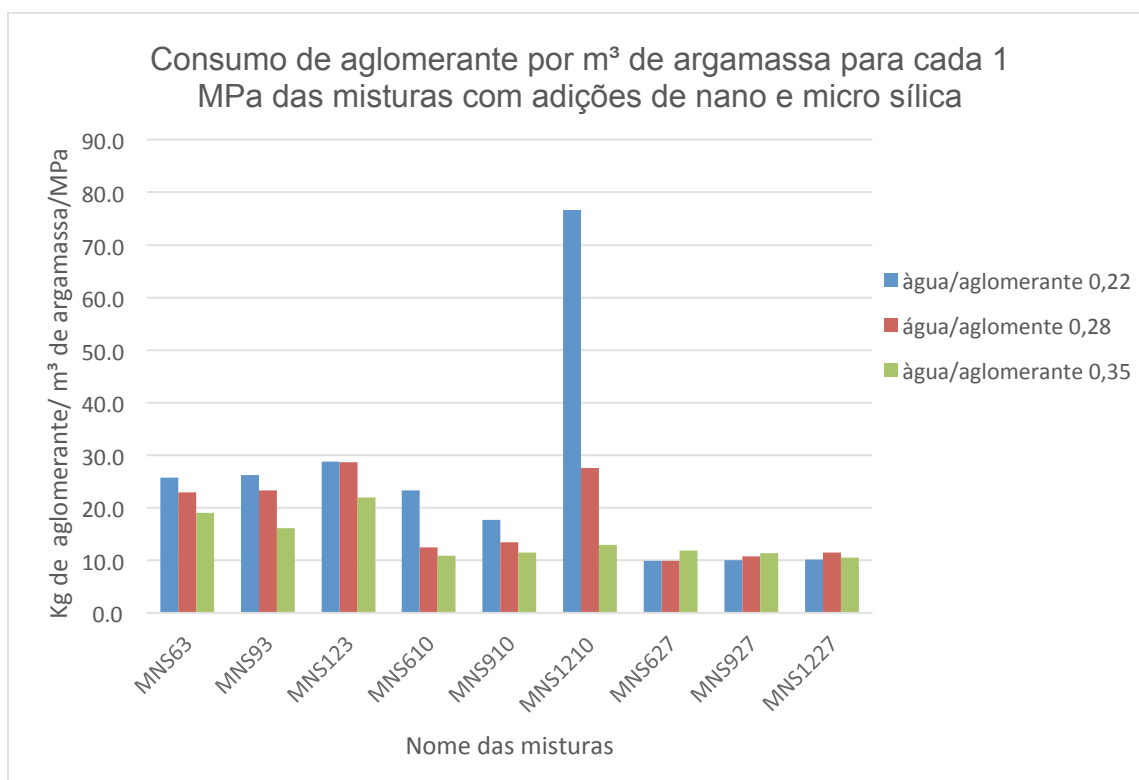


Figura 13 - Consumo de aglomerante para produzir 1 m³ de argamassa das misturas empregando nano sílica e micro sílica juntamente para cada MPa de resistência à compressão
Fonte: Autoria própria (2016).

Nas análises feitas, onde considerou-se a resistência à compressão, resistência à tração e o consumo de aglomerante, notou-se que a nano sílica obteve os melhores resultados comparados com as outras misturas analisadas. Os melhores desempenhos obtidos, considerando os fatores de resistência à compressão e consumo de aglomerante, foi o de 9,4 Kg de aglomerante/m³ para cada MPa de resistência à compressão obtido pela mistura com 2,7% de adição de nano sílica dispersa em aditivo e 0% de micro sílica na relação água/aglomerante de 0,28, onde esta alcançou 77,8 MPa empregando 2,04 Kg de agregado miúdo para

cada kg de aglomerante e, para produção de 1 m³ de argamassa tem consumo de 729,2 kg. Contudo o melhor resultado de resistência à compressão foi de 95 Mpa, alcançado com a argamassa com 2,7% de nano sílica dispersa em aditivo e 0% de micro sílica na relação água/aglomerante 0,22, com consumo de aglomerante de 930,3 kg/m³, resultando em 9,8 kg de aglomerante para cada Mpa por m³.

Nas adições de micro sílica os resultados de resistência à compressão e relação de consumo para cada MPa foram inferiores às misturas com apenas micro sílica e, nas relações água/aglomerante baixa e alto teor de micro sílica, foram menos eficientes até mesmo do que as argamassas de referência, sendo a maior resistência alcançada de 77,4 Mpa de compressão, com consumo de aglomerante para cada MPa de 24,3 Kg (cimento + micro sílica), e o menor consumo obtido por estas misturas foi de 15,8 Kg/m³ para cada MPa, alcançando 65,4 MPa de resistência à compressão. Essas misturas também tiveram ganho de resistência à compressão conforme maiores relações água/aglomerante.

As misturas onde foram combinados micro e nano sílica obtiveram melhores valores de consumo por MPa de resistência à compressão, e aumentaram conforme o teor de nano sílica dispersa em aditivo aumentaram. A micro sílica nessas misturas ocasionou grandes variações nas resistências e consumo de aglomerante por MPa e mostrou-se mais eficiente, normalmente, em teores mais altos de nano sílica dispersa em aditivo. Na resistência à tração estas misturas tenderam valores maiores normalmente em 9% de adição de micro sílica e com o aumento de nano sílica e do teor de água/aglomerante, porém o melhor valor obtido foi de 17,4 MPa, na mistura com 9% de micro sílica, 2,7% de nano sílica e na relação água/aglomerante de 0,22.

E, comparando o aditivo convencional com o que a nano sílica vem contida, de acordo com o uso e resultado retornado de cada um, nota-se que o espalhamento que o aditivo convencional proporcionou foi maior, mas a eficiência mostrada pelo consumo e valores de resistência à compressão foram obtidos com o aditivo com nano sílica. Porém, o aditivo com nano sílica mostrou-se, visualmente, menos eficiente na resistência à tração do que o aditivo convencional, o qual teve os melhores resultados entre todas as misturas, alcançando 20,5 MPa a um teor de 1,0% na relação água/aglomerante de 0,22, em um consumo de aglomerante (apenas cimento) 1157,4 kg/m³ de argamassa.

As argamassas de referência obtiveram resultados de resistência à tração superiores às argamassas com adição de apenas micro sílica, porém menores do que as com apenas nano sílica e ficando também menores na maioria do caso das relações entre micro e nano sílica.

No geral, as argamassas com apenas nano sílica se sobressaíram em relação às outras, enquanto as argamassas com a combinação de nano e micro sílica tiveram valores satisfatórios porém não muito elevados.

7.2 VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM CONCRETOS

Como Aïtcin (1998) considera que o concreto de alto desempenho não considera apenas a alta resistência e sim os mais variados fatores para adequar-se nessa classificação, e o objetivo da aplicação das argamassas em concretos convencionais é a melhoria no desempenho mecânico, físico e químico, o estudo para aplicação e viabilidade do concretos com a proposta de melhores desempenhos mecânicos, físicos e foi elaborado selecionando misturas que resultaram em um traço com baixo consumo de aglomerante para cada MPa obtido, e foi considerado também a resistência à compressão, como valor de grande importância para aplicação dos concretos e o comportamento de cada um com as adições.

Como a nano sílica, quando aplicada em pastas (cimento + água), obteve resultados satisfatórios de resistência à compressão, mesmo comparada com as argamassas sem adições e as que foram adicionadas aditivo convencional, percebe-se que esta adição altera o comportamento mecânico de forma acentuada. Esta constatação pode ser explicada, seguindo o referencial teórico, com o comportamento da hidratação do cimento, a qual gera alto calor de hidratação, ainda mais quando utilizado cimento do tipo CP-V ARI, sendo que a nano sílica, e até mesmo a micro sílica ajudam na redução do calor de hidratação, gerando menos tensões e fissuras internas à pasta. Também este fato analisado indica que a estrutura da pasta e das argamassas elaboradas pode ter sido alterada, esta agora sendo composta por cristais mais resistentes e menor porosos, deixando a pasta ou

argamassa mais sólida e conseqüentemente mais resistente, distribuindo melhor as tensões aplicadas sobre estas.

Na aplicação das argamassas em concretos, quando analisadas pela interferência quanto à fissuração interna e acúmulo de tensões, podem resultar em desempenho mecânico melhores, uma vez que a quantidade de cimento, causador do calor de hidratação, será diminuída para obter-se a quantidade de 1 m³ de concreto.

Nas misturas com micro e nano sílica, como pode ser observado, as resistências à compressão aumentaram em relação à misturas com adições somente de micro sílica e sem adições alguma, e diminuíram em relação às misturas que somente tiveram adição de nano sílica, assim mostrando que houve a falta de material para reação com as adições, tal como hidróxido de cálcio. Com esta análise consegue-se observar que, quando aplicados em concretos, estas misturas podem ter potencial para atingir resultados melhores, uma vez que a quantidade de hidróxido de cálcio disponível será maior, sendo estes mais acumulados na superfície dos agregados, onde gera-se uma zona mais fraca, podendo ser reestruturada e reforçada pela reação das adições.

Outro ponto a ser observado e considerado quanto ao aumento da resistência devido a sua reestruturação interna, é que por esta reestruturação obter menos poros, ou vazios, na argamassa, conseqüentemente o número de poros no próprio concreto será inferior ou com tamanhos reduzidos, impedindo que materiais penetrem no concreto e possam compromete-lo internamente ou a materiais que encontram-se internamente, tal como as armaduras no concreto armado, influenciando positivamente na sua durabilidade.

Observando que a sinergia entre as adições é variável em função da relação de cada uma e também da relação água/aglomerante, é importante que se trace o objetivo do produto final, o concreto. Um estudo mais aprofundado quanto à características desejadas pode indicar caminhos onde consiga-se as mesmas propriedades com menos materiais onerosos, tal como aglomerantes ou aditivos. Selecionando relações de água/aglomerante mais altos e aplicando adições de nano e micro sílica, consegue-se, conforme análises das misturas elaboradas, maiores adições de agregados, diminuindo o custo da produção do concreto porém podendo alcançar as mesmas propriedades.

A resistência à tração, como visto nas argamassas, não foi um ponto que houve grande aumento devido às adições, por outro lado em algumas adições se mostrou até bem inferior, assim deve ser considerado um estudo mais aprofundado para esta característica conforme a adição aplicada, uma vez que, seguindo a NBR 6118:2014, este valor é obtido em relação à uma função genérica que considera a classe do concreto, e não por ensaios experimentais considerando os valores obtidos, e como a resistência à compressão desses é aumentada e a resistência à tração não obtem aumento em proporções iguais, pode comprometer o dimensionamento quando não considerado estas influencias.

No quesito de trabalhabilidade, que é um fator importante para a aplicação dos concretos devido ao aumento do uso de bombas para lançamento deste, as adições de nano sílica, por vir dispersa em aditivo superplastificante, consegue dar melhor trabalhabilidade até mesmo em baixas relações água/aglomerante, sendo positiva sua influência nesta característica, já quando adicionado micro sílica percebe-se que esta necessita de mais água para se ter trabalhabilidade e quando ambas em conjunto uma consegue equilibrar a outra, contudo ainda a micro sílica em maior quantidade exige mais água para melhor trabalhabilidade. Por haver estas considerações devido o comportamento da adição de uma, outra ou ambas, deve-se racionalizar o uso de cada uma e, mais vez, traçar a sua aplicação, porém agora considerando seu lançamento. Contudo, este é um fator que pode se adequar às situações de projeto ou uso conforme a racionalização e observação do comportamento da nano e micro sílica juntas, ainda conseguindo bons desempenhos com menores consumo de aglomerante.

Analisando os principais fatores que aumentem o desempenho dos concretos, tanto mecânico como de aplicabilidade, os quais são a resistência à compressão, durabilidade e trabalhabilidade, deduz-se que as adições conseguem atender estes fatores através do uso racional de cada componente e para cada finalidade de uso do concreto a ser projetado.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As adições de nano sílica e micro sílica nas argamassas alteraram as características no estado fresco e também o desempenho mecânico. As alterações nas características do estado fresco foram mais perceptíveis quando adicionado micro sílica, onde o espalhamento diminuiu conforme o aumento do seu teor, o que já era esperado segundo a bibliografia de referência. Já a adição de nano sílica, por vir dispersa em aditivo superplastificante, fez com que o espalhamento aumentasse conforme seu maior teor na mistura, comportando-se inversamente à micro sílica.

No desempenho mecânico ambas implicaram no aumento da resistência à compressão das argamassas, porém ficou mais evidente que em maiores teores de nano sílica os resultados foram mais elevados, isso podendo ser explicado, segundo o referencial teórico, pela diminuição de hidróxido de cálcio que reage com a nano sílica e forma cristais mais densos de silicatos hidratados e também pela diminuição de poros das argamassas. Já a adição de micro sílica deve ser mais racionalizada em função da adição de superplastificante e relação água/aglomerante para se obter melhores resultados, sendo que a falta de racionalização pode causar até mesmo a redução da resistência à compressão, ou o seu emprego poderá ser considerado apenas como um filler (do tipo micro filler que apenas faz o preenchimento de vazios e melhora a distribuição das tensões que é submetida a mistura).

A resistência à tração das argamassas foi comprometida com a adição de micro sílica, fato contraditório ao referencial teórico. Já com as adições de nano sílica nas argamassas esse fato foi comprovado, porém há uma relação entre nano sílica e água/aglomerante em que obtém-se melhores resultados de resistência à tração.

O consumo de aglomerante relacionado com a resistência à compressão se mostrou mais satisfatório com as adições de nano e micro sílica, porém ainda nesse quesito as adições de nano sílica se sobressaíram. Nas misturas com adições de ambas esses valores de consumo se mantiveram mais lineares e com melhores resultados, mostrando que a adição das duas juntas torna-se eficiente.

Dentro do universo de valores obtidos e análises feitas, a nano sílica mostrou-se mais eficiente para o uso, porém a boa racionalização entre ela e a micro sílica as tornam mais eficientes, sendo que o fator que mais possa indicar o

uso de uma, de outra ou de ambas é quanto a aplicação e característica desejada do material, fazendo-se necessário uma boa racionalização e estudo sobre o caso.

Os resultados obtidos nas argamassas ao serem analisados como proposta de aplicação em concretos, a fim de obter melhores desempenho, indicaram um grande potencial. As adições, com suas reações que alteram a estrutura do concreto, podem até mesmo obter melhores resultados nos concretos do que nas argamassas, isso devido a quantidade de hidróxido de cálcio que, seguindo a bibliografia, é maior em concretos. Também, como a nano sílica vem dispersa em aditivo, consegue-se aumentar a trabalhabilidade e proporcionar melhor condição de lançamento do concreto. A diminuição do consumo de aglomerante para a produção de cada MPa de resistência à compressão do concreto, ainda proporcionada pelo emprego da nano sílica dispersa em aditivo superplastificante, também é um fator que indica grande viabilidade.

As adições aplicadas aos concretos trazem grandes benefícios e alteram as características destes, porém o bom desempenho depende de vários fatores, fazendo-se necessária a análise quanto ao comportamento que cada relação de adição irá implicar no produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN. P. C. **High Performance Concrete**. Québec: E & FN SPON,1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 12655**: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5738 – EMENDA 1**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6467**: Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 7222:** Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7809 – Versão corrigida 2008:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49:** Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos, SP: EDUFSCar, 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v.1, p. 261-310.

GIAMMUSSO, Salvador E. **Manual do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios e ciência e engenharia de materiais**. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1659-1685. v. 2.

JO, B.-W.; C.-H.; TAE, G.-H.; PARK, J. B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. **Construction and Building Materials**. [S.1.], v. 21, [n. 6], p. 1351 – 1355, [June] 2007.

LI, G.; Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. **Cement and Concret Research**. [S.1.], v. 34, [n. 6], p. 1043 – 1049, [June] 2004.

LI, H.; XIAO, H-G.; YUAN, J.; OU, J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. **Composites Part B: engineering**. [S.1.], v. 35, [n. 2], p. 185 – 189, [Mar.] 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.