

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E DE
NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA PARA MELHORAR AS
PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

THYALA ANARELLI CUNHA E SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE POLÍMERO
SUPERABSORVENTE E DE NANO PARTÍCULAS DE
SÍLICA PARA MELHORAR AS PROPRIEDADES DE
CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

THYALA ANARELLI CUNHA E SANTOS

ORIENTADORA: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

BRASÍLIA/DF: MARÇO - 2016

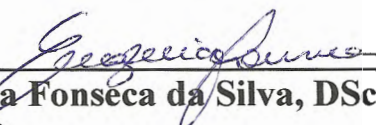
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DA ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E
DE NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA PARA MELHORAR
PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA**

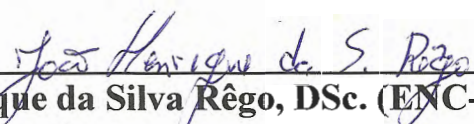
THYALA ANARELLI CUNHA E SANTOS

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

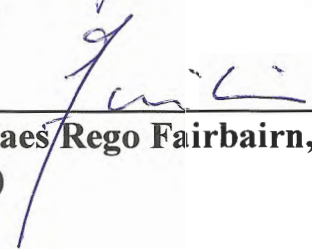
APROVADA POR:



**Prof.^a Eugênia Fonseca da Silva, DSc. (ENC-UnB)
(Orientadora)**



**Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**



**Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Dr. Ing. (COPPE-UFRJ)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 18 DE MARÇO DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, THYALA ANARELLI CUNHA E.
Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para as
Melhorar Propriedades de Concretos de Alto Desempenho [Distrito
Federal] 2016.
xx, 145p. 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2016).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de
Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
1. Retração autógena
2. Concreto de alta resistência
3. Polímero Superabsorvente
4. Nanossílica
I. ENC/FT/UnB
II. Título (mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, T. A. C. (2016). Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades de Concretos de Alto Desempenho. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-02A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thyala Anarelli Cunha e Santos.

TÍTULO: Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades de Concretos de Alto Desempenho.

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Thyala Anarelli Cunha e Santos
SQN 406, Bloco L, Apartamento 105, Asa Norte.
CEP: 70.847-120 Brasília – DF – Brasil

*Aprender não é acumular certezas
Nem estar fechado em respostas
Aprender é incorporar a dúvida
É debruçar-se com curiosidade sobre a realidade
E recriar o próprio espaço
É construir e reconstruir pacientemente uma obra que não será definitiva
Pois o humano é transitório
Aprender não é conquistar nem apoderar-se, mas comungar
Aprender é estar sempre caminhando
E refazendo o sonho pelo qual se pôs a andar
(...)
Tem que ser um ato de amor para não ser um ato vazio.
(Paulo Freire)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Maria das Graças, por confiar, torcer e vibrar com cada vitória minha, por sempre incentivar minha busca por conhecimento, mesmo que às vezes tenham sido necessários enormes sacrifícios, você me ensinou a jamais desistir.

Minha irmã Iviane, pelo amor, apoio e empenho desmedidos, e por mostrar que para estar junto nem sempre é preciso estar perto; ao meu cunhado Fábio, companhia certa ao longo de 2015, por me proporcionar o aprendizado de como é ter um irmão.

Meu noivo Davi, por toda compreensão e por todo amor que há nesta vida. E principalmente por me suportar, por encarar a distância com convicção na nossa história e por entender que todo sacrifício envolve uma pitada de dor. Também a toda a sua família, Cida, Sebastião, Dani, Thomas e minha florzinha Clarice, por não me deixarem desistir.

À tia Goreti, pois em cada pedacinho do sonho tem um dedo seu. Você sempre foi mãe, pai, amiga, orgulho e inspiração. Aos demais familiares, pelas palavras de incentivo sabiamente inseridas nos momentos mais oportunos. Ao Donato, por ter aparecido nas nossas vidas.

À minha orientadora professora Eugênia, pela dedicação inestimável, por ser uma excelente profissional e um ser humano iluminado, e pelos preciosos conhecimentos transmitidos sempre com muito carinho e apreço. Só desperta paixão em aprender aquele que tem paixão em ensinar.

Aos professores João Henrique e Eduardo, que me concederam a honra de compor a banca de avaliação do meu trabalho, por aceitarem o convite e pelas sugestões e análises significativas às quais certamente tentarei atender na versão definitiva.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, (PECC/UnB), por todo conhecimento transmitido ao longo destes dois anos, sempre com zelo e dedicação.

À engenheira Anne Lopes, ao Sílvio e todo o corpo técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., pela disponibilização não só dos espaços físicos do Laboratório de Aparecida de Goiânia para realização de parte do programa experimental, mas também pelo tempo e dedicação empenhados para viabilizar a realização deste trabalho.

Ao professor chefe do Laboratório de Materiais (LEM/UnB), Elton Bauer, e aos técnicos Washington, Severino e Patrícia, pela dedicação e ajuda com a realização dos ensaios.

Aos amigos e doutorandos Alejandro e Paulo, pelas conversas e momentos de descontração, e pelas valiosas contribuições acadêmicas e pessoais para que este trabalho se tornasse realidade.

Aos colegas do mestrado: Pablo, Mirellen, Vamberto, Débora, Thiago, Rogério, Waldir, Jéssica, Lílian, Divino, Matheus e Lucas, pela companhia de todas as horas e por tornarem a jornada mais divertida.

Aos amigos de Brasília, Flávia, Paola, Kátia, João, Galileu, Érica, por sempre estarem por perto, pelas ótimas conversas que sempre renderam muitas risadas.

Aos amigos de Minas, aos quais não citarei nomes para não esquecer nenhum, por todo incentivo e carinho sempre. Especialmente minhas amigas e irmãos Mari, Rafa (e minha afilhada Aurora), Fernanda e Ellen, eternas companheiras levadas para vida toda.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade que me foi dada, e por todos os esforços em manter-se nos caminhos da universidade pública, gratuita e de excelência.

Aos companheiros do CEPLAN/UnB, por todo apoio e compreensão.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos tão fundamental para o andamento da pesquisa, e por continuar acreditando e investindo no futuro, em um Brasil onde a educação infelizmente nunca foi prioridade. Crises e governos se vão, mas um país se faz com homens e livros.

*Sonho que se sonha só
é só um sonho que se sonha só
mas sonho que se sonha junto é realidade
(Raul Seixas)*

*Dedico este trabalho à minha mãe Maria das
Graças, minha Irmã Iviane e ao meu noivo Davi,
pelo apoio incondicional em cada passo que dou.*

RESUMO

ESTUDO DA ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E DE NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA PARA AS MELHORAR PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA.

Autor: Thyala Anarelli Cunha e Santos

Orientadora: Eugênia Fonseca da Silva

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Março de 2016.

Os Concretos de Alta Resistência (CAR) proporcionaram avanços significativos na construção civil, devido à resistência superior, eficiência e durabilidade frente aos ataques do meio ambiente. No entanto, o elevado consumo de cimento, as baixas relações água/cimento e presença de adições minerais tornam necessários cuidados especiais na sua fabricação, de forma a evitar o surgimento de elevadas tensões de tração que geram retração autógena considerável e conseqüentemente, à fissuração dos elementos estruturais. A retração autógena é um fenômeno intimamente relacionado com a hidratação do cimento, e não depende de qualquer interferência externa. Entre as estratégias mitigadoras, a cura interna com o uso de Polímero Superabsorvente (PSA) é relatada como a mais eficiente, uma vez que proporciona água necessária à hidratação dos compostos, minimizando o surgimento de tensões nos poros capilares. No entanto, o uso de PSA aumenta a porosidade do concreto, pois deixa vazios não conectados no material endurecido, o que, reduz a resistência mecânica. Neste trabalho propõe-se o uso de nanossílica (NS) para compensar a perda de resistência mecânica causada pelo PSA. Foram desenvolvidas nove misturas contendo diferentes teores destas adições. Avaliou-se as propriedades tanto no estado fresco (como teor de ar, densidade e tempo zero pelo método do ultrassom), como no estado endurecido (resistência à compressão, à flexão e módulo de elasticidade). Também foi determinada a retração autógena, desde o tempo zero até os 28 dias. Os resultados indicam que o polímero superabsorvente é eficiente para mitigação da retração autógena, chegando a eliminá-la quase por completo no teor de 0,3%. Também se observou que a adição de NS, nos teores estudados, aumenta a resistência mecânica dos concretos (em média 15% em relação a referência). A NS, quando utilizada sozinha, aumentou a retração autógena das misturas em 10%, além de causar redução no tempo zero. Nas misturas híbridas, contendo ambas as adições, a adição de NS mostrou-se bastante promissora, uma vez que não prejudicou a ação benéfica do PSA mitigar a retração autógena, obtendo valores muito próximos ao traço contendo apenas PSA. Sua adição também compensou, quase em sua totalidade, as perdas nas propriedades mecânicas causadas pelo PSA.

Palavras-chave: concreto de alta resistência (CAR); retração autógena; polímero superabsorvente; nanossílica.

ABSTRACT

STUDYING ADDITION OF SUPERABSORBENT POLYMER AND SILICA NANOPARTICLES TO IMPROVE PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETES.

Author: Thyala Anarelli Cunha e Santos

Supervisor: Eugênia Fonseca da Silva

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, March 2016

The High Strength Concretes (HSC) provided significant advances in civil construction, due its superior strength, sustainability, efficiency and durability against of environmental attacks. However, due to the high cement content, low water/cement ratio and mineral additions, a special attention is needed mostly in the production, in order to prevent the appearance of tensile stresses that may generate autogenous shrinkage and consequently the cracking of structural elements. The autogenous shrinkage is a phenomenon closely associated to the cement hydration process, and it does not depend of any external interference. Among the mitigation strategies, the internal cure using superabsorbent polymer (SAP) is reported as the most effective, whereas that it provides the necessary water for hydration of the compounds, preventing the appearance of tensile stresses in the capillary pores. However, the use of SAP increases the porosity of the concrete, because it leaves not connected voids in the hardened material, which reduces the mechanical strength. In this work was proposed the use of nanosilica (NS) to compensate the strength decrease caused by addition of SAP. Nine mixtures containing different amounts of these additions were produced. Was evaluated properties both in the fresh state (air content, density and setting time, by ultrasonic method), and in the hardened state (compressive strength, flexural strength, elastic modulus). Also autogenous shrinkage was determined, from setting zero until 28 days. The results indicate that the superabsorbent polymer is effective for the mitigation of autogenous shrinkage, reaching almost eliminate it completely with 0.3% content. It was also observed that the addition of NS in the studied content, increases the mechanical strength of the concrete (on average 15% compared to reference). The NS, when used alone, increases the autogenous shrinkage of the mixtures at 10%, and cause a reduction at time zero. In the hybrid mixtures, containing both the additions, the addition of NS seemed to be very promising, since it did not reduce the beneficial action of PSA to mitigate autogenous shrinkage, getting very close to the mixtures values containing only PSA. His addition also made up almost entirely, losses in mechanical properties caused by PSA.

Key words: high strength concrete (HSC); autogenous shrinkage; superabsorbent polymer; nanosilica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Importância do tema	2
1.2	Justificativa da pesquisa.....	3
1.3	Objetivo geral.....	3
1.4	Objetivo específico	4
1.5	Estrutura do trabalho.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Os concretos de alta resistência e alto desempenho.....	6
2.2	Variações volumétricas em meios cimentícios	11
2.2.1	Deformações não-autógenas.....	12
2.2.2	Deformações autógenas.....	12
2.2.2.1	Contração Le Chatelier	13
2.2.2.2	Expansão Inicial	14
2.3	A retração autógena	15
2.3.1	Mecanismos da retração autógena.....	17
2.3.1.1	Variação da depressão capilar	18
2.3.1.2	Variação da tensão superficial.....	19
2.3.1.3	Variação da pressão de disjunção.....	19
2.3.2	Soluções mitigadoras da retração autógena.....	19
2.4	O polímero superabsorvente	21
2.4.1	Efeitos adicionais do polímero superabsorvente	25
2.5	A nanotecnologia aplicada à construção civil.....	26
2.5.1	Aplicação da nanossílica em meios cimentícios	28
2.5.2	Efeitos da nanossílica nas propriedades dos materiais	32
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	34
3.1	Misturas utilizadas	34
3.2	Planejamento experimental.....	35
3.2.1	Variáveis de resposta	35
3.2.2	Fatores controláveis.....	36
3.3	Materiais constituintes	37

3.3.1	Cimento Portland.....	37
3.3.2	Sílica ativa	38
3.3.3	Agregado miúdo – areia	39
3.3.4	Aditivo superplastificante.....	40
3.3.5	Polímero Superabsorvente.....	41
3.3.6	Nanossílica	44
3.3.7	Água	46
3.4	Composição das misturas.....	47
3.4.1	Mistura de referência.....	47
3.4.2	Ajuste dos traços.....	47
3.5	Produção dos microconcretos	48
3.5.1	Mistura.....	48
3.5.2	Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.	50
3.6	Propriedades no estado fresco.....	52
3.6.1	Espalhamento pelo tronco de cone	52
3.6.2	Penetração de cone	52
3.6.3	Teor de ar incorporado	52
3.6.4	Densidade	53
3.7	Tempo Zero (T_0).....	53
3.8	Retração autógena.....	56
3.9	Propriedades no estado endurecido.....	58
3.9.1	Resistência à compressão em cilindros	59
3.9.2	Resistência à compressão em cubos	60
3.9.3	Resistência à tração na flexão.....	60
3.9.4	Módulo de elasticidade.....	61
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
4.1	Propriedades no estado fresco.....	63
4.1.1	Espalhamento	64
4.1.2	Penetração de cone	65
4.1.3	Teor de ar incorporado	67
4.1.4	Densidade	69
4.2	Tempo zero (T_0)	71

4.3	Retração autógena.....	76
4.3.1	Efeito do Polímero Superabsorvente.....	80
4.3.2	Efeito da Nanossílica.....	83
4.3.3	Efeito do uso combinado de PSA e NS.....	85
4.3.3.1	Efeito da adição de NS nas misturas contendo 0,2% de PSA.....	86
4.3.3.2	Efeito da adição de NS nas misturas contendo 0,3% de PSA.....	87
4.3.3.3	Considerações sobre o uso de misturas híbridas na retração autógena..	89
4.3.4	A retração autógena nas primeiras idades.....	89
4.4	Propriedades no estado endurecido.....	92
4.4.1	Resistência à compressão em cilindros.....	93
4.4.1.1	Efeito do PSA.....	94
4.4.1.2	Efeito da NS.....	97
4.4.1.3	Efeito do uso combinado de PSA e NS.....	99
4.4.2	Resistência à compressão em cubos.....	100
4.4.2.1	Efeito do PSA.....	103
4.4.2.2	Efeito da NS.....	104
4.4.2.3	Efeito do uso combinado de PSA e NS.....	106
4.4.3	Resistência à tração na flexão em prismas.....	108
4.4.3.1	Efeito do PSA.....	110
4.4.3.2	Efeito da NS.....	111
4.4.3.3	Efeito do uso combinado de PSA e NS.....	112
4.4.4	Módulo de Elasticidade.....	113
4.4.4.1	Efeito do PSA.....	114
4.4.4.2	Efeito da NS.....	115
4.4.4.3	Efeito do uso combinado de PSA e NS.....	116
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
5.1	Sugestões para futuras pesquisas.....	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
	APÊNDICE A.....	130
	APÊNDICE B.....	131
	APÊNDICE C.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Mecanismos da retração segundo diversos autores.....	18
Tabela 3-1: Teores de PSA, NS e SP para os traços desenvolvidos.....	35
Tabela 3-2: Matriz experimental da pesquisa realizada em microconcretos.....	36
Tabela 3-3: Caracterização química do cimento CPV - ARI RS utilizado.	37
Tabela 3-4: Caracterização física e mecânica do cimento CPV - ARI RS utilizado.....	38
Tabela 3-5: Caracterização física e química da Sílica Ativa utilizada.	38
Tabela 3-6: Características físico-químicas do Superplastificante utilizado na pesquisa. ..	41
Tabela 3-7: Características do PSA utilizado na pesquisa.	42
Tabela 3-8: Resultados da mistura contendo a nanossílica utilizada na pesquisa.....	46
Tabela 3-9: Características físicas e químicas da NS utilizada.....	46
Tabela 3-10: Composição do microconcreto de referência.	47
Tabela 3-11: Composição dos microconcretos da pesquisa.	48
Tabela 3-12: Roteiro de mistura dos microconcretos.....	48
Tabela 3-13: Resumo das propriedades no estado fresco determinadas.	56
Tabela 3-14: Planejamento dos ensaios de propriedades mecânicas.....	58
Tabela 4-1: Resumo dos resultados das propriedades no estado fresco.....	63
Tabela 4-2: Perda de massa de água média dos 3 corpos de prova utilizados para os ensaios de retração autógena.	77
Tabela 4-3: Resultados médios para a retração autógena e porcentagem de redução, dos traços contendo apenas PSA, em comparação com a mistura de REF, na mesma idade....	80
Tabela 4-4: Resultados médios para a retração autógena e porcentagem de redução, dos traços contendo apenas NS, em comparação com a mistura de REF, na mesma idade.	84
Tabela 4-5: Resultados médios da retração autógena e porcentagem de redução, dos traços contendo as duas adições, em comparação com: a mistura de REF; às misturas contendo apenas PSA; às misturas contendo apenas NS (no mesmo teor).....	85

Tabela 4-6: Valores dos picos de expansão inicial observados para as misturas estudadas, e quanto representa em relação à referência.....	90
Tabela 4-7: Resultados de resistência à compressão em cilindros para as idades: (a) 7 dias; e (b) 28 dias.	94
Tabela 4-8: Comparação da resistência à compressão em cilindros do traço PSA03 com duas relações a/c diferentes	96
Tabela 4-9: resultados de resistência à compressão em cilindros obtidos pelos autores.....	97
Tabela 4-10: Resistência à compressão de pastas contendo NS e PSA.....	100
Tabela 4-11: Resultados de resistência à compressão, em cubos, para as idades: (a) 7 dias; e (b) 28 dias.	102
Tabela 4-12: Resultados de resistência à tração na flexão, em prismas, para as idades: (a) 7 dias; e (b) 28 dias.....	109
Tabela 4-13: Resistência à flexão das misturas realizadas por Pourjavadi <i>et al.</i>	113
Tabela 4-14: Resultados médios do ensaio de módulo de elasticidade para as misturas estudadas, aos 28 dias, e o valor que cada um representa em relação à REF e aos traços contendo apenas PSA e apenas NS, no mesmo teor.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Obra pioneira em CAR/CAD no Brasil: Museu de arte de São Paulo	7
Figura 2-2: Obra pioneira em CAR/CAD no Distrito Federal	8
Figura 2-3: Obras recentes em CAD	9
Figura 2-4: Comparação entre a microestrutura de diferentes tipos de concreto..	10
Figura 2-5: Tipos de sistema propostos	11
Figura 2-6: Organograma com a classificação das deformações volumétricas em meios cimentícios.....	12
Figura 2-7: Balanço volumétrico dos reagentes e hidratos.....	14
Figura 2-8: Evolução da microestrutura em função do tempo para um concreto com baixa relação a/c.....	16
Figura 2-9: Classificação do tipo de cura do concreto	20
Figura 2-10: Representações Esquemáticas dos tipos de estruturas moleculares presentes nos polímeros.....	22
Figura 2-11: (a) Partícula esférica de PSA, colorida com tinta azul, nos estados seco e saturado. (b) Representação de uma partícula de PSA a base de poliacrilato, nos estados seco e saturado.....	23
Figura 2-12: Representação esquemática da evolução da hidratação (inchamento) do PSA em meio cimentício em função do tempo.....	24
Figura 2-13: Relação entre o tamanho da partícula e a área superficial.....	29
Figura 2-14: Micrografia de pastas de cimento com 14 dias de idade.	31
Figura 2-15: (a) Representação esquemática de uma partícula de nanossílica; (b) mecanismo de atuação da NS na hidratação do cimento.....	32
Figura 3-1: Esquema do programa experimental desenvolvido na pesquisa em microconcretos.....	34
Figura 3-2: Curva granulométrica e demais propriedades da amostra de agregado miúdo selecionada.	39
Figura 3-3: Ensaio de determinação da umidade superficial da areia – Frasco de Chapman.	40
Figura 3-4: (a) Microscópio digital profissional LCD Celestron #44345; (b) Partículas de PSA seco vistas do microscópio digital e aumentadas 1600x.....	41
Figura 3-5: Distribuição granulométrica do PSA.....	42
Figura 3-6: Métodos para determinação da absorção em meio aquoso. (a) proveta graduada; (b) análise em microscópio ótico.....	43

Figura 3-7: Determinação da absorção do PSA em meio cimentício pelo método <i>Slump-flow test</i>	44
Figura 3-8: Micrografias da nanossílica empregada na pesquisa utilizando Microscopia Eletrônica de Transmissão - MET	45
Figura 3-9: Fabricação dos microconcretos.....	49
Figura 3-10: Moldagem dos corpos de prova.....	50
Figura 3-11: Desforma e cura dos corpos de prova.....	51
Figura 3-12: Ensaio no estado fresco	53
Figura 3-13: Esquema ensaio de determinação do Tempo Zero (T_0).	55
Figura 3-14: Ensaio de determinação do tempo zero.	55
Figura 3-15: Esquema para ensaio de retração autógena	57
Figura 3-16: Ensaio de retração autógena	57
Figura 3-17: Corpos de prova pra ensaios de propriedades mecânicas.....	58
Figura 3-18: Ensaio de resistência a compressão em cilindros.....	59
Figura 3-19: Ensaio de resistência à compressão em cubos.	60
Figura 3-20: Ruptura de corpo de prova à flexão.....	61
Figura 4-1: Valores de espalhamento dos microconcretos estudados.	64
Figura 4-2: Valores determinados para Penetração de cone das misturas estudadas.	66
Figura 4-3: Teor de ar incorporado das misturas estudadas	67
Figura 4-4: Teor de ar incorporado em relação ao teor de PSA (a) e ao teor de NS (b). Entre parênteses encontra-se o teor de superplastificante de cada mistura.	68
Figura 4-5: Variação do teor de ar incorporado e da densidade aparente em função da adição de nanossílica	68
Figura 4-6: Densidade no estado fresco das misturas estudadas.....	69
Figura 4-7: Densidade no estado fresco em relação ao teor de PSA (a) e ao teor de NS (b).	71
Figura 4-8 Curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo para os microconcretos estudados.....	72
Figura 4-9: Tempo zero das misturas estudadas, obtido pelo ensaio de propagação do pulso ultrassônico.....	73
Figura 4-10: Resultados médios da retração autógena das nove misturas estudadas, a partir de T_0 até 28 dias.	79

Figura 4-11: Resultados médios da retração autógena dos microconcretos com adição apenas de PSA, em dois teores, em comparação com o traço de referência.	80
Figura 4-12: Resultados da retração autógena para 9 diferentes tipos de PSA (SAP), com relação água cimento (0,30 + água de cura interna), em comparação com duas misturas de referência com relação água cimento de 0,30 e 0,36.....	82
Figura 4-13: Resultados médios da retração autógena das misturas contendo apenas adição de nanossílica em comparação com o traço de referência.....	83
Figura 4-14: Resultados médios da retração autógena das misturas contendo 0,2% de PSA e diferentes teores de nanossílica (0, 1 e 2% de NS), em comparação com o traço de referência.	86
Figura 4-15: Resultados médios da retração autógena das misturas contendo 0,3% de PSA e diferentes teores de nanossílica (0, 1 e 2% de NS), em comparação com o traço de referência.	87
Figura 4-16: Resultados médios da retração autógena nas primeiras 72 horas, para os nove microconcretos estudados.....	90
Figura 4-17: Resistência à compressão em cilindros das misturas avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.....	93
Figura 4-18: Resultados da resistência à compressão em cilindros das misturas contendo apenas PSA e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.	95
Figura 4-19: Resultados da resistência à compressão em cilindros das misturas contendo apenas NS e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.	97
Figura 4-20: Resultados da resistência à compressão em cilindros das misturas híbridas, das misturas contendo apenas adição de PSA e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.....	99
Figura 4-21: Resistência à compressão em cubos das misturas avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.....	101
Figura 4-22: Resultados da resistência à compressão em cubos das misturas contendo apenas PSA, em comparação com o traço REF, para as idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.	103
Figura 4-23: Resultados da resistência à compressão em cubos das misturas contendo apenas nanossílica, em comparação com o traço REF, para as idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.	105
Figura 4-24: Resultados da resistência à compressão em cubos das misturas híbridas, das misturas apenas com PSA e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.	107

Figura 4-25: Resistência à tração na flexão, em prismas, das nove misturas avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.	108
Figura 4-26: Resultados da resistência à tração na flexão em prismas nas idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.	110
Figura 4-27: Resultados da resistência à tração na flexão, em prismas, nas idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.	111
Figura 4-28: Resultados da resistência à tração na flexão, em prismas, nas idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.	112
Figura 4-29: Valores do módulo de elasticidade, determinados experimentalmente, para as misturas contendo PSA em relação à REF, aos 28 dias.	114
Figura 4-30: Valores do módulo de elasticidade obtidos para as misturas contendo NS, em relação à REF, aos 28 dias.	115
Figura 4-31: Valores do módulo de elasticidade obtidos para as misturas híbridas, das misturas contendo apenas PSA e da mistura de REF, aos 28 dias.	116

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

°C	Graus Celsius
a/ag	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFm	Monossulfato (etringita secundária)
AFt	Trissulfato (Agulha de etringita)
ARR	Aditivo Redutor de Retração
ASTM	American Society for Testing and Materials
C ₃ S	Silicato tricálcico
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CaO	Óxido de cálcio (cal livre)
CAR	Concreto de Alta Resistência
CH/Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
cm	Centímetro (10 ⁻² m)
cm ³	Centímetro cúbico
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
CP	Corpo de prova
CPV ARI	Cimento Portland tipo V Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
d	Diâmetro
DF	Distrito Federal
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização)
dm	Taxa de variação da massa
dq	Taxa de variação da temperatura
DTU	Universidade Técnica da Dinamarca
dw	Taxa de variação do trabalho
EUA	Estados Unidos da América
g	Gramas
GPa	Giga pascal (10 ⁹ Pa)
GO	Estado de Goiás
h	Altura
HPC	High performance concrete
Kg	Quilograma (10 ³ g)
Km	Quilômetro (10 ³ m)
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais UnB
m	Metro
mm	milímetro
mm ²	milímetro quadrado
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de magnésio (Magnésio livre)
Mg-S-H	Silicato de magnésio hidratado
min.	Minutos
Mpa	Mega Pascal (10 ⁶ Pa)
NBR	Norma Brasileira Registrada
NBR NM	Norma MERCOSUL

nm/ηm	Nanômetro (10^{-9} m)
NS	Nanossílica
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
pH	Potencial hidrogeniônico (escala ácido-base)
PSA	Polímero Superabsorvente
PVC	Policloreto de Vinila
RAA	Reação álcali-agregado
UR	Umidade Relativa
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (União Internacional dos Laboratórios e Especialistas em Materiais)
s	Segundos
SAP	Superabsorbent Polymer (Polímero Superabsorvente)
SiO ₂	Óxido de silício
SP	Superplastificante
S.P.	Estado de São Paulo
SSS	Saturada superfície seca
STJ	Superior Tribunal de Justiça
T ₀	Tempo zero
TC - RCC	RILEM Technical Committee - Recommendations for use of superabsorbent polymers in concrete construction (Comitê Técnico - recomendações de uso do polímero superabsorvente nas construções de concreto)
TC 196 - IC	RILEM Technical Committee 196 - Internal Curing (Comitê Técnico - Cura Interna)
TC 225 - SAP	RILEM Technical Committee 225 - Superabsorbent Polymer (Comitê Técnico - Polímero Superabsorvente)
Ton.	Tonelada
UnB	Universidade de Brasília
US\$	Moeda (Dólar dos Estados Unidos)
V	Volume
ZT	Zona de Transição
E	Deformação
μm	Micrômetro (10^{-6} m), ou microstrain

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do concreto de alta resistência, na década de 70, proporcionou inúmeras vantagens para a construção civil, permitindo solucionar uma série de requisitos que o concreto de resistência normal, muitas vezes, não se mostrava capaz de satisfazer. Sua alta resistência, alta durabilidade e elevada trabalhabilidade proporcionou a construção de elementos estruturais mais resistentes, com seções menores e grandes vãos, traduzindo-se em uma economia global de material e, muitas vezes, em ganhos de área útil no edifício.

A microestrutura mais densa, devido à baixa relação água/cimento, a presença de adições minerais e um elevado consumo de cimento torna este concreto menos permeável e mais resistente aos ataques de agentes agressivos como cloretos, sulfatos e CO₂ e apresenta maior resistência à abrasão. Entretanto, estas particularidades que o torna tão vantajoso também trazem prejuízos, sendo o principal deles o elevado grau de retração autógena ao qual estão suscetíveis, que podem causar quadros de fissuração que comprometem a estabilidade, durabilidade e estética da estrutura.

A retração autógena é um fenômeno intimamente relacionado com a mudança da umidade interna e resulta no surgimento de tensões de tração na pasta de cimento e, apesar de conhecida desde o início do século XX, ganhou importância somente após o advento dos concretos de alto desempenho, onde este fenômeno é mais pronunciado, devido ao refinamento da microestrutura.

Desde o final da década de 90, têm sido estudadas técnicas e estratégias mitigadoras da retração autógena, destacando-se o uso de materiais absorventes saturados em água capazes de promover a cura interna. Estes materiais são chamados de agentes de cura interna, pois atuam fornecendo água aos capilares à medida que avança a hidratação do cimento, evitando assim o surgimento das tensões de tração responsáveis pela retração autógena. Como exemplo, cita-se o uso de agregado leve pré-saturado tais como argila expandida, pedra-pome, perlita, estalita e terras diatomáceas (SUAREZ, 2015).

Uma alternativa mais recente para a cura interna foi proposta por Jensen e Hansen (2001), e consiste na adição de partículas poliméricas superabsorventes e finas (Polímeros Superabsorventes - PSA) ao concreto. Estes polímeros absorvem enormes quantidades de água e, posteriormente, a libera no interior da pasta de cimento, fornecendo água

necessária para a matriz circundante e mitigando, ou até mesmo eliminando a autodessecação.

No entanto, o PSA, durante o processo de dessorção, deixa vazios na pasta de cimento, que acabam por prejudicar a resistência mecânica destes materiais.

Para promover a compensação desta perda de resistência gerada, propõe-se o uso de nano partículas de sílica, uma vez que este material é reconhecido no meio técnico devido à sua capacidade de melhoria das propriedades mecânicas.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Devido à importância deste tema, em 2007, a RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*) criou um comitê específico para avaliar as propriedades do PSA (*Technical Committee TC 225 – SAP*), que em 2012 publicou seu relatório intitulado “*Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction – State Of The Art Report*”, com 10 capítulos de diversos pesquisadores. Este comitê encerrou suas atividades em 2015 e, neste mesmo ano, foi estabelecido um novo comitê, o “*TC 260 RSC – Recommendations for use of superabsorbent polymers in concrete construction*”, cujo objetivo é estabelecer as recomendações práticas de uso do PSA para construtores e demais envolvidos na indústria da construção civil.

Os resultados dos ensaios interlaboratoriais realizados pelos membros do *TC 225 – SAP*, em diversas partes do mundo, com materiais locais, foram publicados em artigo científico no periódico especializado *Materials and Structures* sob o título “*Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test*”, de autoria de Mechtcherine *et al.* (2013a), comprovando a eficácia do PSA em mitigar a retração autógena.

O uso do PSA é hoje reconhecido no meio técnico como a mais eficaz estratégia de mitigação da retração autógena, mas apresenta algumas restrições, sendo a diminuição da resistência mecânica do concreto a mais importante dentre elas.

Diante do exposto, Pourjavadi *et al.* (2012) propôs a utilização de combinação de PSA e nano partículas de sílica, ou nanossílica (NS) de forma a compensar a perda de resistência

mecânica causada pelo polímero, obtendo resultados satisfatórios, haja vista que a incorporação de nano partículas em materiais cimentícios permite um melhor controle da microestrutura destes, produzindo materiais mais resistentes e duráveis, podendo melhorar a coesão, minimizar a fluência, evitar fissuração nas primeiras idades, aumentar a ductilidade e a resistência do material (GLEIZE, 2007).

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O estudo pioneiro realizado por Pourjavadi *et al.* (2012) avaliou a eficácia do uso combinado do PSA e da NS nas propriedades mecânicas de microconcretos, porém, não foram encontrados na literatura técnica estudos de como estas duas adições podem interferir na retração autógena dos concretos de alta resistência.

Por tratar-se de técnicas relativamente novas, espera-se com esta pesquisa contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico destes materiais, possibilitando, assim, seu uso seguro e eficaz em obras reais num futuro próximo.

O presente trabalho está inserido na linha de pesquisa de “Sistemas construtivos e desempenho de materiais e componentes” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC-UnB). Foram desenvolvidas algumas pesquisas anteriores na UnB sobre o uso de PSA como agente de cura interna para mitigar a retração autógena, apresentando resultados consistentes que comprovam efetivamente sua eficácia, sobretudo com relação às misturas de referência. Cita-se Pereira e Matos (2011), Claro e Saraiva (2013), Ordoñez (2013), Traldi e Aguirre (2013), Andrade Neto (2014), Moraes e Cerqueira (2014), Manzano (2014) e Suárez (2015).

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa consiste em avaliar a capacidade das nano partículas de sílica (NS) em compensar a perda de resistência mecânica em microconcretos de alto desempenho causada pela adição de polímeros superabsorventes (PSA) e como sua adição afeta a retração autógena, o tempo zero e as propriedades do material no estado fresco.

1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Mensurar a efetividade da adição de nanossílica nas propriedades mecânicas de microconcretos contendo polímero superabsorvente, a saber: resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade;
- Avaliar a interferência do uso combinado de NS e PSA nas propriedades dos microconcretos no estado fresco, por meio dos ensaios: espalhamento, penetração de cone, densidade e teor de ar incorporado;
- Avaliar a interferência do uso combinado de NS e PSA no tempo zero e na variação volumétrica de microconcretos pelo estudo da retração autógena.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo deste trabalho aborda a introdução ao tema estudado, com a importância do tema e justificativa da pesquisa. Além disto, são apresentados os objetivos geral e específico do trabalho, além de sua estrutura.

O segundo capítulo contém a revisão da bibliografia, abordando aspectos gerais relacionados à conceituação dos concretos de alto desempenho e as diversas variações volumétricas a que estão submetidos, com atenção especial à retração autógena e suas soluções mitigadoras. Este capítulo também aborda uma pesquisa bibliográfica sobre os Polímeros Superabsorventes e as nano partículas de sílica, com foco principal nos efeitos da adição destes materiais nos compósitos à base de cimento Portland, tanto no estado fresco quanto endurecido.

O terceiro capítulo descreve o programa experimental realizado, com a exposição das misturas estudadas e seus componentes. Apresenta também o planejamento e a metodologia empregada para a caracterização dos materiais selecionados, confecção dos microconcretos e métodos de ensaio para determinação das propriedades de interesse na pesquisa.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados experimentais obtidos no programa experimental por meio de tabelas e gráficos. Ainda, contém a análise destes resultados, de forma a proporcionar um maior entendimento do material estudado, com base em resultados de outros pesquisadores e bibliografias anteriores. O capítulo é dividido entre

propriedades no estado fresco, retração autógena e propriedades no estado endurecido, sendo avaliado em cada uma delas o efeito do PSA, o efeito da NS e o efeito do uso combinado das duas adições.

O quinto e último capítulo abrange as considerações finais, onde são apresentadas as conclusões obtidas com base nos resultados experimentais, além de sugestões para trabalhos futuros relacionados com esta pesquisa.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas durante a realização deste trabalho, assim como os Apêndices, onde constam: a composição dos microconcretos, data e local de realização (Apêndice A); os resultados individuais dos corpos de prova de retração autógena (Apêndice B); e os resultados individuais dos corpos de prova utilizados para determinação das propriedades mecânicas e elásticas (Apêndice C).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estado da arte dos concretos de alto desempenho (CAD), com foco no fenômeno da retração autógena. São abordadas as diferentes soluções mitigadoras, principalmente o uso de agentes de cura interna, com ênfase no Polímero Superabsorvente (PSA). Ainda, um breve resumo dos efeitos adicionais causados pelo uso de PSA em meios cimentícios, sendo o mais relevante destes a diminuição da resistência mecânica. Para compensar tal perda, propõe-se a adição de nano partículas de sílica (NS), cuja revisão também consta neste tópico.

2.1 OS CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTO DESEMPENHO

Na década de 1970, quando a resistência à compressão dos concretos utilizados em pilares de alguns edifícios de grande altura foi maior do que o habitual, considerou-se legítimo chamar este material de “concreto de alta resistência” (CAR). No entanto, eles foram feitos usando a mesma tecnologia que concretos comuns, exceto pelo fato de que os materiais utilizados para torná-los superiores eram cuidadosamente selecionados e controlados (AITCIN, 1998).

No entanto, quando os superplastificantes começaram a ser utilizados para diminuir a relação água/cimento (a/c) ou água/aglomerante (a/ag) para algo em torno de 0,40, em vez de aplicados exclusivamente para melhorar a fluidez do material, verificou-se que estes concretos tinham outras características melhoradas, tais como maior capacidade de fluxo, maior módulo de elasticidade, resistência à flexão mais elevada, menor permeabilidade, resistência à abrasão melhorada e maior durabilidade. Assim, a expressão “concreto de alta resistência” já não descrevia adequadamente a melhoria global nas propriedades desta nova família de concretos, surgindo, então, o termo “concreto de alto desempenho” (CAD). No entanto, a aceitação desta expressão ainda não é geral, pela dificuldade de se definir e quantificar o que é o desempenho de um material (AITCIN, 1998).

Em 1991, o ACI (*American Concrete Institute*) definiu o CAD como sendo um material que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade, que não podem ser atingidas rotineiramente com componentes usuais e práticas convencionais de mistura, lançamento e cura. No ano de 2002, quando concretos de até 120 MPa

chegaram ao mercado, o *ACI Committee On High Strength Concrete* revisou sua definição, para abranger dosagens que ultrapassem 55 MPa. (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Neste sentido, a norma brasileira NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (2014), revisada em 2014, apresenta classe de resistências de concreto com até 90 MPa, ante 50 MPa da versão anterior.

No Brasil, a primeira obra considerada como CAR foi o edifício sede do MASP (Museu de Arte de São Paulo), apresentado na Figura 2-2. Construído em 1968, representou um recorde alcançado pelo Brasil à sua época, com o maior vão livre em laje reta, de 74 metros, e concreto de 45 MPa de resistência à compressão (HARTMANN e HELENE, 2004).



Figura 2-1: Obra pioneira em CAR/CAD no Brasil: Museu de arte de São Paulo – (MASP) – São Paulo SP (MASP, 2013).

Em Brasília, a obra pioneira em CAD é o edifício sede do STJ - Superior Tribunal de Justiça (Figura 2-2a), projetado pelo arquiteto Oscar Niemeyer e inaugurado em 1995, contendo mais de 133 mil metros quadrados de área construída, dois subsolos e 6 edificações. Segundo Silva (1996), o complexo possui grandes volumes de concreto armado e protendido, sendo que o CAD foi utilizado em pontos estratégicos no Prédio dos Plenários, uma das edificações do conjunto arquitetônico. Ao todo, foram lançados quase 5000 m³ de CAD com $f_{ck,28}$ alcançando a faixa de 70-90 MPa. O vão livre principal, com aproximadamente 60 metros de extensão, é apoiado em pilares em forma de tronco de pirâmide com base 4x4 m e 3,8 m de altura, que concentram carga de 7500 toneladas. O CAD foi utilizado nos pilares mais solicitados, e também nas regiões críticas das lajes e vigas protendidas da fachada principal (Figura 2-3b). O concreto, para atender as concepções estruturais, necessitava de alta resistência mecânica, baixa segregação e

elevado abatimento (bombeamento). O traço foi dosado segundo o método ACI, com adição de sílica ativa importada da Noruega, microssílica, aditivo químico superplastificante de base melanina, aditivo plastificante, e relação a/c em torno de 0,30, com consumo de cimento de 515 Kg/m³.



(a)



(b)

Figura 2-2: Obra pioneira em CAR/CAD no Distrito Federal: Superior Tribunal de Justiça – STJ: (a) Foto aérea do conjunto arquitetônico projetado por Oscar Niemeyer (MOCH, 2010); (b) Vista frontal do Edifício dos Plenários, com seu vão de 60m de comprimento. O CAD da ordem de 70-90 MPa foi utilizado nos pilares em tronco-pirâmide e em algumas vigas da fachada principal (© GOOGLE, 2014).

Na última década, destaca-se o edifício comercial E-Tower (Figura 2-3a), que foi construído em São Paulo no ano de 2002, onde o conceito de alto desempenho foi aplicado não apenas nos materiais, mas em também em todo o processo construtivo. Com 162 metros de altura, alcançou, a sua época, a maior resistência já obtida no Brasil (105 a 149 MPa) e o maior módulo de elasticidade que se teve notícia na literatura internacional (48 GPa), com relação água/cimento igual a 0,19. A redução do volume de concreto gerou economia de materiais e mão de obra. A redução das seções dos pilares nos andares térreos

proporcionou um ganho de 16 vagas de garagem, avaliadas em US\$ 80.000 (HARTMANN e HELENE, 2003).

Entre as obras mais recentes, cita-se o Estádio Nacional Mané Garrincha (Figura 2-3b). Essa obra foi reconstruída em 2013 como parte das obras destinadas à realização da Copa do Mundo de 2014, com custo de R\$1,015 bilhão e capacidade para 72.788 pessoas. Com mais de 218 mil metros quadrados de área construída, o novo estádio Brasília consumiu um volume de concreto da ordem de 177.000 m³. Um dos grandes desafios desta obra foi a construção dos 288 pilares externos, que sustentam o anel de compressão da cobertura, com 46 m de altura. Fabricados em concreto de 60 MPa, com elevado consumo de cimento e adições minerais (cinza volante), os pilares circulares possuem 1,2m de diâmetro e foram concretados utilizando formas em camisas, com altura de 2 metros, que eram erguidas a cada 2 dias. A temperatura do concreto foi monitorada para não ultrapassar 60°C (LOTURCO, 2014).



(a)



(b)

Figura 2-3: Obras recentes em CAD: (a) Edifício E-Tower – São Paulo SP (AFLALO GASPÉRINI, 2007); (b) Estádio Nacional Mané Garrincha – Brasília DF (LOTURCO, 2014).

Confeccionar concretos com adequada trabalhabilidade usando baixas relações água/cimento, com o uso das chamadas superpozolanas, como sílica ativa e metacaulim, e elevados consumos de cimento é uma tarefa complexa. A razão para isto é que, com o aumento da resistência à compressão, as propriedades do concreto não são mais

governadas exclusivamente pela relação a/c ou a/ag , parâmetros essenciais para concretos usuais em virtude da porosidade da pasta de cimento hidratado. Em concretos comuns, o excesso de água adicionada na mistura faz com que, tanto a pasta de cimento hidratado quanto a Zona de Transição (ZT) representem os elos mais fracos da estrutura, onde o colapso mecânico começa a desenvolver-se quando submetida a uma carga de compressão. No CAD, como a resistência dos hidratos da pasta de cimento aumenta, devido à melhoria promovida na microestrutura, a zona de transição praticamente desaparece, fazendo com que o material se comporte como um verdadeiro compósito e a curva tensão deformação sofra influência direta do agregado graúdo. A Figura 2-4 mostra um comparativo entre a ZT de um concreto comum e de um CAD (AITCIN, 1998).

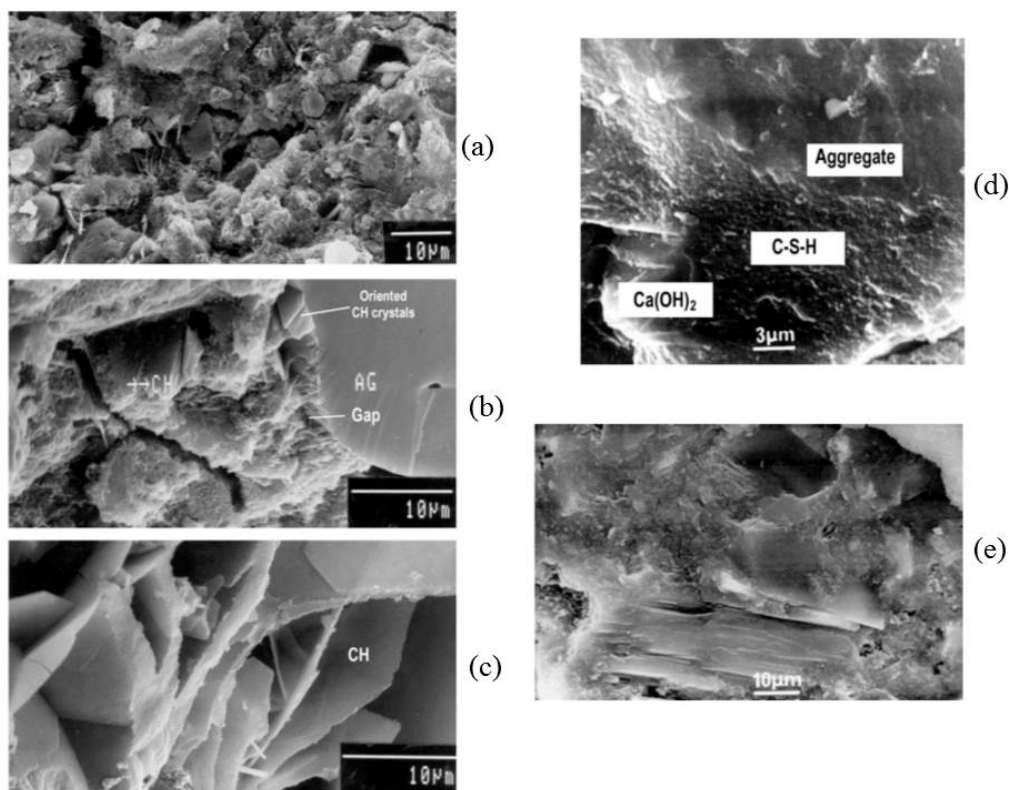


Figura 2-4: Comparação entre a microestrutura de diferentes tipos de concreto. Na esquerda: Microestrutura de um concreto de alta relação a/c : (a) alta porosidade e heterogeneidade; (b) cristal orientado de Ca(OH)_2 no agregado; (c) Os cristais CH. Na direita: Microestrutura de um CAD: (d) baixa porosidade; (e) homogeneidade da matriz (AITCIN, 2008).

Ainda, nos concretos de alto desempenho, o alto consumo de cimento, a baixa relação a/c e as adições minerais altamente reativas causam um refinamento dos poros devido à maior presença de produtos de hidratação, o que densifica a microestrutura, aumentando a demanda de água e potencializando a autodessecação, o que resulta em maiores níveis de

retração e fissuração nestes concretos (LOPES, 2011). Estas variações volumétricas podem ter consequências desastrosas, tais como danos estruturais, estéticos, além de comprometer a durabilidade do material.

2.2 VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS EM MEIOS CIMENTÍCIOS

Não há, na literatura, um consenso sobre os diversos termos utilizados para descrever os diferentes tipos de variações volumétricas que ocorrem nos materiais cimentícios. Muitos termos são usados para definir o mesmo tipo, e muitos tipos são definidos pelo mesmo termo. Neste trabalho, usa-se a terminologia proposta por Silva (2007), baseada em conceitos da termodinâmica. Nesta, o universo é dividido em duas partes: o sistema e sua vizinhança, separados por uma fronteira. Os sistemas podem ser classificados como aberto, fechado e isolado, conforme mostrado na Figura 2-5. No sistema aberto, matéria e energia são trocados entre sistema e vizinhança através da fronteira; no sistema fechado, há troca de energia, mas há conservação de matéria (massa); já no sistema isolado, não há nenhuma troca entre o sistema e a vizinhança, ou seja, há conservação de massa e energia.

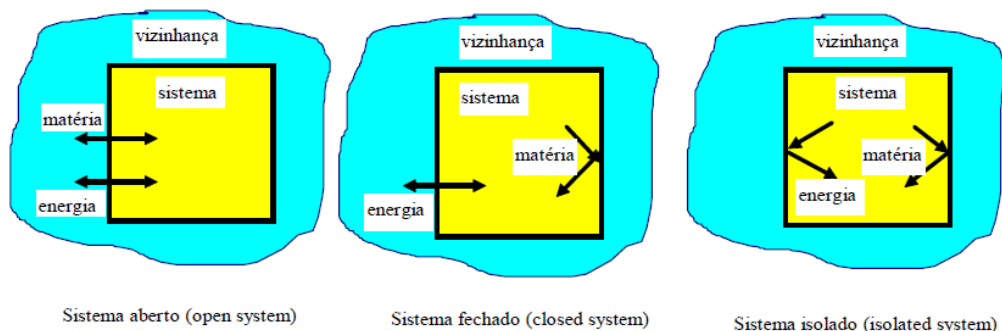


Figura 2-5: Tipos de sistema propostos (SILVA, 2007).

Segundo a metodologia adotada por Silva (2007), nos sistemas abertos e fechados ocorrem deformações autógenas e não-autógenas, enquanto no sistema isolado, ocorrem somente deformações autógenas. A classificação proposta é mostrada na Figura 2-6 a seguir.

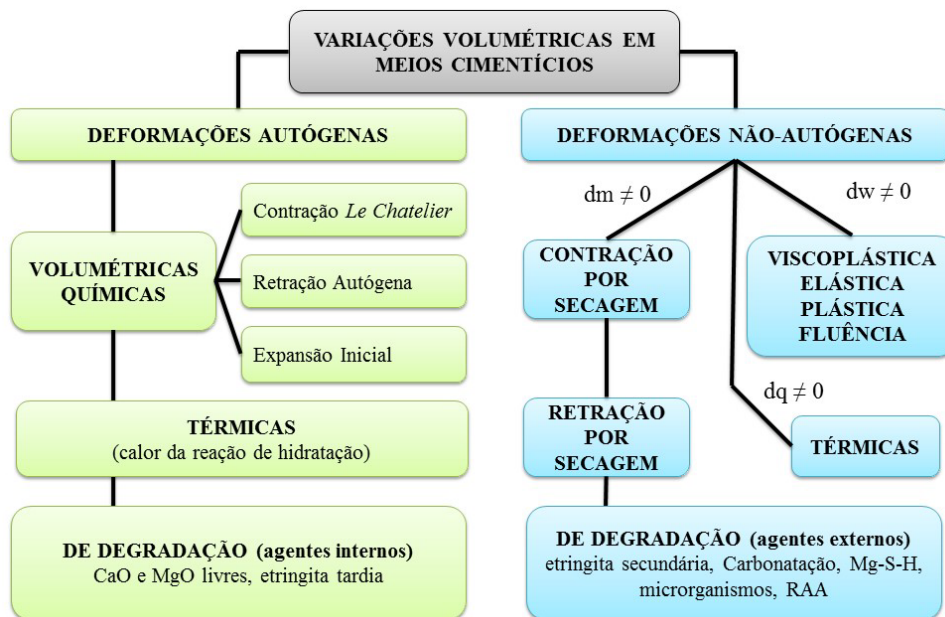


Figura 2-6: Organograma com a classificação das deformações volumétricas em meios cimentícios, onde: dm = variação de massa; dw = variação de trabalho; dq = variação de temperatura. Adaptado, (SILVA, 2007).

2.2.1 Deformações não-autógenas

As deformações não-autógenas podem ser classificadas em função de três fatores: variação da massa (dm), variação de calor (dq) e variação de trabalho (dw). As deformações devido à variação de massa podem ser de três tipos: contração por secagem, retração por secagem ou expansivas de degradação, todas geradas por evaporação ou sucção de água (agente externo). Aquelas devido à variação de calor são chamadas deformações térmicas. Estas são consequência do aporte de calor externo e podem ocorrer durante todo o intervalo de hidratação. As que ocorrem devido à variação de trabalho podem ser viscoplásticas, quando em suspensão, ou elásticas, plásticas e por fluência, no estado sólido (SILVA, 2007).

2.2.2 Deformações autógenas

Segundo Silva (2007), as deformações autógenas podem ser térmicas, devido ao calor proveniente das reações de hidratação (aporte de calor interno); volumétricas químicas, devido à diferença de volume entre os reagentes e os hidratos; e expansivas de degradação, que ocorrem devido aos agentes internos (reação álcali-sílica, CaO e MgO livres, formação de etringita tardia etc.).

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o efeito do PSA em mitigar a retração autógena, e por isso, apresenta um enfoque maior nas deformações volumétricas químicas, deformações estas que dependem do estado do material: em suspensão, ocorre a Contração de *Le Chatelier*, enquanto a expansão inicial e a retração autógena ocorrem no material endurecido.

2.2.2.1 *Contração Le Chatelier*

O primeiro estágio da variação volumétrica química é conhecido como *Contração Le Chatelier*, devido ao nome do pesquisador que foi o primeiro a observar a redução de volume das pastas devido à hidratação do cimento, em 1900 (SILVA, 2007). Este fenômeno ocorre com o material ainda em suspensão, após as primeiras horas de hidratação. A contração de *Le Chatelier* pode ser definida como um fenômeno físico-químico decorrente do balanço volumétrico das reações de hidratação, já que a soma dos volumes molares iniciais da água e do cimento anidro (volume inicial) é maior que o volume dos componentes hidratados (volume final). Como ocorre quando a pasta ainda está fluida, o material não se opõe às variações volumétricas impostas, de forma que não são geradas fissuras. Pode ser estimada por meio do balanço volumétrico dos principais compostos do cimento, lembrando que os valores calculados dependem do conhecimento acerca da estequiometria do C-S-H e sua massa específica (MANZANO, 2014). No balanço volumétrico apresentado por Silva (2007), observa-se um decréscimo de 16,5% no volume final, conforme Figura 2-7.

Neste trabalho, o termo *contração* é utilizado para denominar as variações volumétricas que não causam fissuração, enquanto o termo *retração* é empregado quando o material apresenta um esqueleto mineral suficientemente rígido para se opor as variações volumétricas, podendo gerar fissuras.

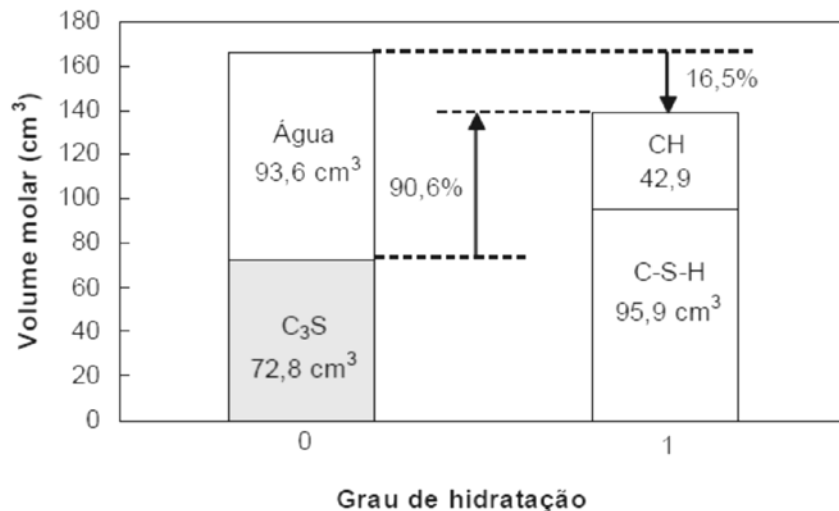


Figura 2-7: Balanço volumétrico dos reagentes e hidratos, no estado inicial (grau de hidratação 0) e após as reações de hidratação (grau de hidratação 1), onde nota-se o decréscimo de 16,5% do volume molar dos compostos (Adaptado, BOIVIN, 2001 apud SILVA (2007)).

2.2.2.2 Expansão Inicial

Segundo Silva (2007), a expansão autógena inicial é a variação volumétrica macroscópica que pode ocorrer nos sistemas cimentícios, com tempo de duração de algumas horas (após a transição suspensão-sólido) até cerca de duas semanas após o contato com a água, dependendo da mistura. É possível que continue se desenvolvendo microscopicamente e de forma localizada por mais tempo, no entanto, sua magnitude é inferior à retração autógena, de modo que, no balanço geral, esta última predomina. Também, pode haver expansão com o material na fase fluida, porém estas deformações não recebem uma denominação especial por não serem relevantes ao estudo das deformações.

Alguns autores descrevem hipóteses como causas da expansão inicial, sendo que a primeira parece mais consistente, tais como:

- Segundo Baroguel-Bouny *et al.* (2004), o crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio (CH) e talvez agulhas de etringita, gerando uma fase sólida que exerce pressão nas paredes do poro durante seu crescimento (pressão de cristalização ou pressão de crescimento);
- Formação de C-S-H interno, cujo volume é maior que o volume do grão anidro que lhe deu origem (BAROGUEL-BOUNY, MOUNANGA, *et al.*, 2004).
- Redistribuição da água de exsudação abundante na superfície, que é redirecionada em direção ao interior do concreto; e pressão de disjunção, que faz os produtos de

hidratação emergirem, devido à maior superfície total, incrementando a região onde a absorção é impedida (LURA, 2003).

2.3 A RETRAÇÃO AUTÓGENA

A deformação autógena é a deformação autônoma de uma pasta de cimento, argamassa ou concreto, durante o endurecimento. Em concretos tradicionais, a deformação autógena é insignificante quando comparado com a retração por secagem. Já nos CADs, a baixa relação água/aglomerante e as adições minerais causam uma queda significativa da umidade relativa interna (RH) da pasta de cimento durante a hidratação, mesmo selado. É um fenômeno intimamente relacionado com a mudança da umidade. Esta retração resulta no surgimento de tensões de tração na pasta de cimento, que pode resultar no aparecimento de micro ou microfissuras, prejudicando a qualidade do concreto e o desempenho da estrutura. A retração autógena é um fenômeno conhecido desde o início do século 20, mas a sua importância prática só foi reconhecida nos últimos anos (LURA, 2003).

A retração autógena é ocasionada pela hidratação do cimento Portland, sem qualquer influência externa. Não ocorre nem ganho nem perda de massa, não desenvolve gradiente de umidade ou temperatura, e não é resultado de carga externa. Pode ser definida como a redução macroscópica dos materiais após o início da pega, em condições de “isolamento” específicas, sem que ocorra mudança de volume devido à entrada ou saída de substâncias, variação de temperatura ou aplicação de força externa (HASPARYK, LOPES, *et al.*, 2005).

A partir de certo grau de hidratação, após o Tempo Zero (transição suspensão-sólido), quando o material possui rigidez suficiente para se opor às variações volumétricas, esta redução do volume causada pela retração autógena se torna incompatível com as deformações mecânicas admissíveis pelo esqueleto mineral recém-formado. O volume de ar presente na porosidade da pasta, inicialmente saturada em água, aumenta devido à diferença de volume entre reagentes e hidratos e pela saída da água dos poros gerada pela hidratação, o que causa a aproximação das partículas de cimento hidratado. Este fenômeno é provocado pela autodessecação e sucede a contração de *Le Chatelier* (SILVA, 2007).

A Figura 2-8 representa a evolução da microestrutura de uma argamassa de cimento com baixa relação a/c, baseada nas micrografias de Vernet (1992).

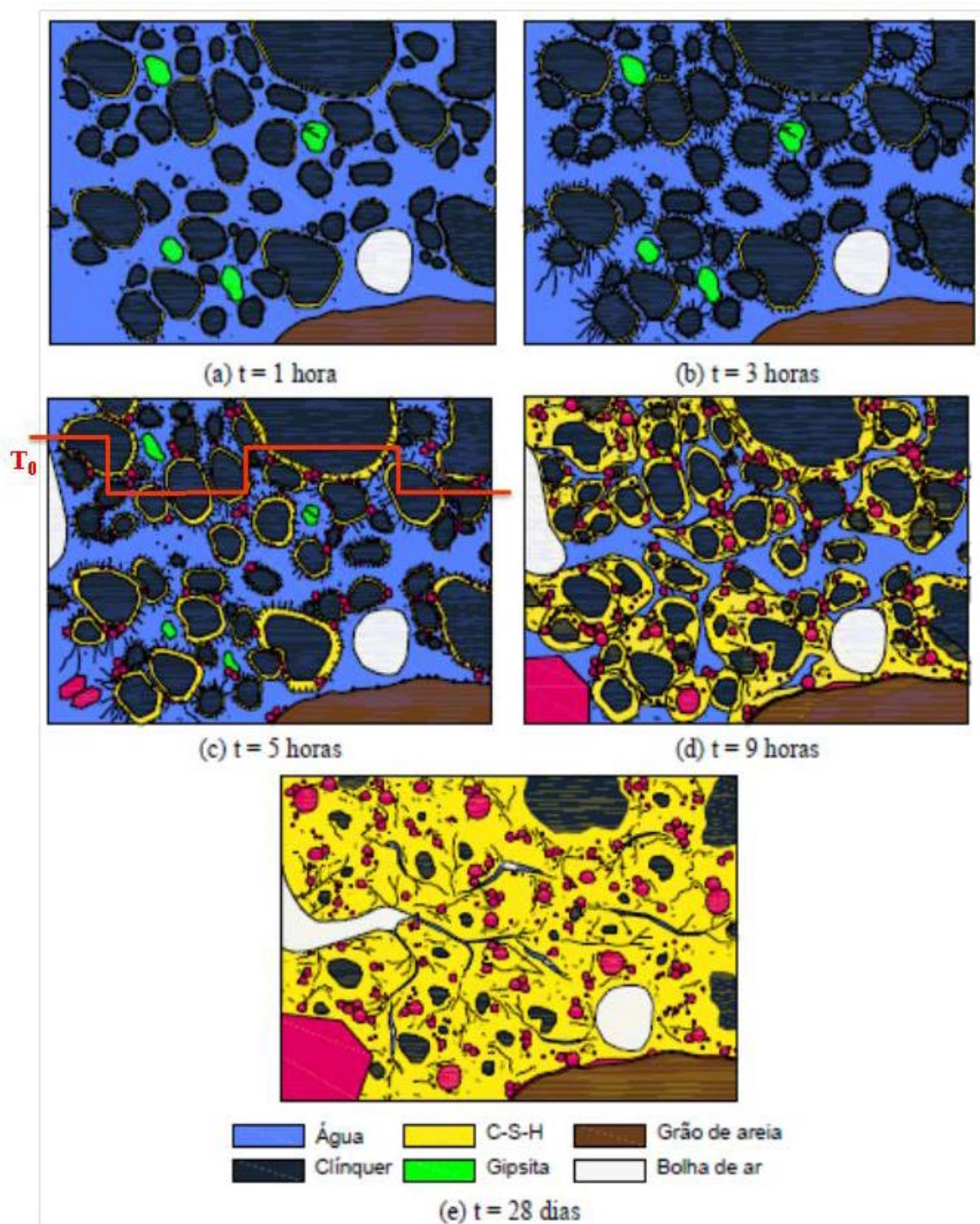


Figura 2-8: Evolução da microestrutura em função do tempo para um concreto com baixa relação a/c. (Adaptado Vernet, (1992) apud ROJAS *et al.* (2014)).

Os estágios são descritos a seguir (MANZANO, 2014):

- a) Grãos de clínquer começam a hidratar, formando C-S-H; os íons sulfato oriundos da dissolução da gipsita se difundem na água; um gel rico em alumina e sílica é formado ao redor do grão de clínquer e observam-se pequenas hastes de etringita primária (AFt).
- b) Crescimento de cristais AFt, nitidamente mais aciculares que os anteriores. Sua formação é associada com uma acentuada elevação do calor de hidratação.
- c) Forma-se uma camada espessa em torno do grão de clínquer anidro, e subconjuntos de grãos (grãos anidros, grãos parcialmente hidratados e grãos totalmente hidratados) ligam-se mecanicamente formando o primeiro caminho sólido e contínuo (representado pela linha vermelha), determinando o Tempo Zero. O consumo de água pelas reações de hidratação ocasiona o surgimento dos primeiros poros capilares.
- d) A hidratação prossegue com o espessamento da camada de hidratos formada; além do C-S-H e CH provenientes do C3S, ocorrem a dissolução da etringita primária e a formação de placas hexagonais de etringita secundária (representadas pela cor rosa). Ocorre o estreitamento do capilar devido à autodessecação.
- e) Com o avanço da hidratação, a água livre no interior dos poros é reduzida, decorrente da reação com o cimento, até os capilares não estarem mais saturados, e a umidade no interior do material torna-se menor que 100%. Este fenômeno conduz à retração autógena.

2.3.1 Mecanismos da retração autógena

Os mecanismos que conduzem à retração autógena ainda não são completamente entendidos, embora se aceite que há uma relação entre a retração autógena e a variação da umidade relativa interna nos poros da pasta. O estudo destes mecanismos depende do estado de ligação da água-superfície sólida, dentro do material (LURA, 2003).

Kovler e Zhutovsky (2006) realizaram uma discussão sobre estes mecanismos e concluíram que, segundo vários autores, a variação da depressão capilar é o mais influente quando a água dos poros é contínua, enquanto a variação da pressão de disjunção é preponderante quando o sistema tem baixo grau de hidratação (Tabela 2-1).

Tabela 2-1: Mecanismos da retração segundo diversos autores ((MANZANO, 2014), Adaptado de (KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006)).

Autor	Umidade Relativa (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Kovler e Zhutovsky	Variações na pressão de disjunção Acréscimo nos efeitos capilares										
Powers	Variação na energia de superfície					Variação da pressão capilar					
Feldman e Sereda	Movimento de água interlamelar					Variação da pressão capilar e na energia de superfície					
Wittmann	Variação na energia de superfície					Variações na pressão de disjunção					

Para Van Breugel e Tuan (2014), muitos estudos experimentais têm mostrado uma forte correlação entre retração autógena e a umidade relativa presente na rede porosa do material. Essa correlação foi intensamente estudada por Powers na década de sessenta do século passado. Ele discutiu três mecanismos principais, desencadeados por variações na umidade relativa, a saber: variação da depressão capilar; variação da tensão superficial; e variação da pressão de disjunção. Segundo os autores, o trabalho de Powers ainda é relevante e uma fonte de inspiração para experimentalistas da retração autógena. As principais características destas três mecanismos são apresentadas resumidamente a seguir.

2.3.1.1 Variação da depressão capilar

O fenômeno da capilaridade gera interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros. Na interface líquido-gás se estabelece um gradiente de pressão designado de pressão capilar (ou depressão capilar) que é função da tensão superficial líquido-gás, do raio de curvatura e do ângulo de molhamento. Na interface líquido-gás, o líquido tende a reduzir a sua superfície para garantir o menor contato com a fase gasosa, formando o menisco. Uma vez formado o menisco, o ângulo de contato é diferente de zero, o que diminui a atração entre o líquido e a parede do tubo (MORTIMER, 2008).

De acordo com Silva (2007), à medida que o material seca, há o aparecimento dos meniscos dentro dos capilares, seguida de uma diminuição progressiva do raio de curvatura destes, para manter o equilíbrio entre o líquido e a fase gasosa. Aparece, assim, uma diferença de pressão entre a fase líquida e a fase gasosa (depressão capilar) que é acentuada

com a intensificação da secagem. Essa depressão do líquido deve ser globalmente equilibrada por uma retração do sólido.

2.3.1.2 Variação da tensão superficial

Segundo Lopes (2011), a tensão superficial é um atributo dos líquidos gerado por forças de atração que as moléculas internas exercem junto às da superfície: aquelas situadas no interior são atraídas em todas as direções por suas vizinhas e, por isso, a resultante das forças atuantes em cada uma delas é quase nula; já as moléculas da superfície sofrem apenas atração lateral e inferior, e estabelece-se a tensão na superfície, que a faz contrair e comportar-se como uma película elástica. Em materiais cimentícios, onde os produtos de hidratação têm elevada área específica, são formados inúmeros meniscos. Então, com a diminuição da umidade relativa há um aumento da tensão superficial na interface sólido-líquido no menisco e, conseqüentemente, há retração macroscópica do material.

2.3.1.3 Variação da pressão de disjunção

Numa dada temperatura, a espessura da camada de água adsorvida depende da umidade relativa. Porém, acima de certa umidade relativa, essa camada não consegue mais se desenvolver livremente porque a distância entre as duas superfícies de contato é muito pequena. Se a umidade relativa continuar a crescer, a adsorção de água tende a separar as duas superfícies sólidas e a aumentar a espessura da camada de água adsorvida. As duas superfícies sólidas sofrem uma pressão chamada de pressão de disjunção. Essa pressão é máxima no estado saturado, de modo que, quando o sistema passa de um estado saturado para um não saturado, ocorre retração porque a pressão de disjunção diminui e as duas superfícies se movem, ficando mais próximas (SILVA, 2007).

2.3.2 Soluções mitigadoras da retração autógena

Procedimentos de cura convencionais, como a cura úmida, tal como utilizado para a retração por secagem, não são eficazes no caso de retração autógena. Podem eliminá-la apenas em pequenas seções transversais, pois a entrada de água a partir da superfície externa é limitada. Além disso, a cura externa pode ser de difícil aplicação em algumas

superfícies. Tendo em conta esta limitação, diferentes estratégias têm sido desenvolvidas nos últimos anos, algumas listadas abaixo (BENTZ e JENSEN, 2004):

- Aditivo redutor de retração ARR, que reduz a tensão superficial da água e consequentemente a tensão capilar desenvolvida nos poros;
- Modificação da composição mineralógica do cimento;
- Controle da distribuição do tamanho das partículas do cimento;
- Uso de aditivos expansivos;
- Uso de aditivos compensadores da retração, que promovem a formação de etringita adicional;
- Adição de fibras (polímeros, celulose, metálicas, carbono etc.), que funcionam como pequenos tirantes, evitando o aparecimento de fissuras;
- Utilização de cimentos expansivos: incrementam a formação de etringita;
- Uso de formas flexíveis;
- Cura interna com agregados leves saturados ou com polímeros superabsorventes;
- Uso combinado de uma ou mais estratégias.

Dentre estas, a estratégia da cura interna tem sido bastante investigada, por meio da qual são utilizados materiais porosos e/ou absorventes de forma a criar reservatórios internos de água de cura. O Comitê Técnico da RILEM (TC 196 – CI) propõe a seguinte classificação para as estratégias de cura, segundo a Figura 2-9.

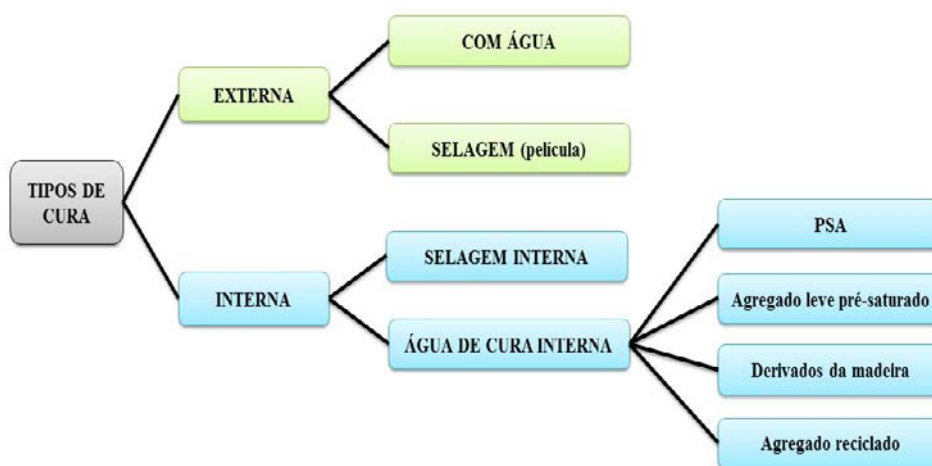


Figura 2-9: Classificação do tipo de cura do concreto (Adaptado, Kovler e Jensen (2007)).

Dentre as estratégias mais eficientes de mitigação da retração autógena, a utilização de agregados leves e polímeros com grande capacidade de absorção de água mostram-se

como alternativas eficientes, capazes de atuar como reservatórios internos, proporcionando uma fonte de água para curar o volume de pasta na sua vizinhança. Este processo de cura interna compensa a autodessecação e ajuda a evitar a retração autógena (LURA, 2003).

O uso de polímero superabsorvente como agente de cura interna em meios cimentícios foi proposto pela primeira vez por Jensen e Hansen (2001) e se mostrou a estratégia mais eficiente para mitigar ou até mesmo neutralizar a retração autógena, motivo pelo qual vem sendo amplamente estudada desde então.

2.4 O POLÍMERO SUPERABSORVENTE

Os materiais sólidos são agrupados em três classificações básicas: metais, cerâmicas e polímeros. O termo polímero vem do grego *poli* (muitos) + *meros* (iguais). Trata-se de um tipo de macromolécula que tem como principal característica a presença de uma unidade química que se repete (monômero), ligadas de forma covalente por uma ligação de polimerização. Os polímeros podem ser agrupados segundo várias classificações, em relação à sua ocorrência, estrutura, natureza, cadeia, morfologia, comportamento mecânico etc. Conforme a ocorrência, eles podem ser considerados naturais (existentes na natureza) e sintéticos (a maioria orgânicos), que são produzidos pelo homem, como o nylon, o polietileno, o PVC, entre outros. Os polímeros sintéticos podem ser classificados em elastômeros (possuem alta elasticidade), fibras (são capazes de se orientar para formar filamentos compridos e finos com grande resistência) e plásticos (podem ser moldados sobre pressão e se transformar em diversos objetos). Segundo a sua estrutura molecular, os polímeros podem se classificar em: lineares (unidades ligadas em cadeias únicas), ramificados (cadeias com ramificações laterais conectadas às principais), com ligações cruzadas (cadeias lineares se juntam em várias posições por ligações covalentes) e em rede (com três ligações covalentes ativas, formando redes tridimensionais), conforme Figura 2-10 (CALLISTER JR., 2002).

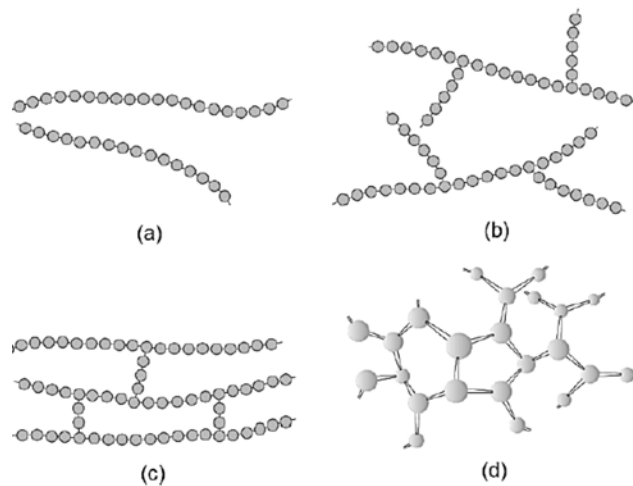


Figura 2-10: Representações Esquemáticas dos tipos de estruturas moleculares presentes nos polímeros: (a) lineares em cadeias únicas, (b) lineares com ramificações, (c) lineares com ligações cruzadas, e (d) ligadas em rede (tridimensional). Os círculos designam unidades de *-mero* individuais (CALLISTER JR., 2002).

Segundo Jensen e Hansen (2001), os polímeros superabsorventes (PSAs) são um grupo de materiais poliméricos sintéticos que têm a capacidade de absorver uma quantidade significativa de líquido a partir do ambiente e de reter este líquido dentro da sua estrutura sem se dissolver. São utilizados principalmente para a absorção de água e soluções aquosas. Cerca de 95% da produção mundial de PSA é para uso como absorvente de urina nas fraldas descartáveis. Os PSAs podem apresentar uma absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso. No entanto, em soluções salinas diluídas, tais como a urina, a capacidade de absorção dos produtos comerciais é de aproximadamente 50 g/g.

Os PSAs são polieletrólitos reticulados que começam a inchar em contato com água ou soluções aquosas, resultando na formação de um hidrogel. Uma partícula de PSA é mostrada na Figura 2-11a. Na prática da engenharia, os PSAs são, na sua maioria, poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados. Na indústria de higiene apenas PSA baseados em ácido poliacrilato reticulado são usados (Figura 2-11b) (FRIEDRICH, 2012).

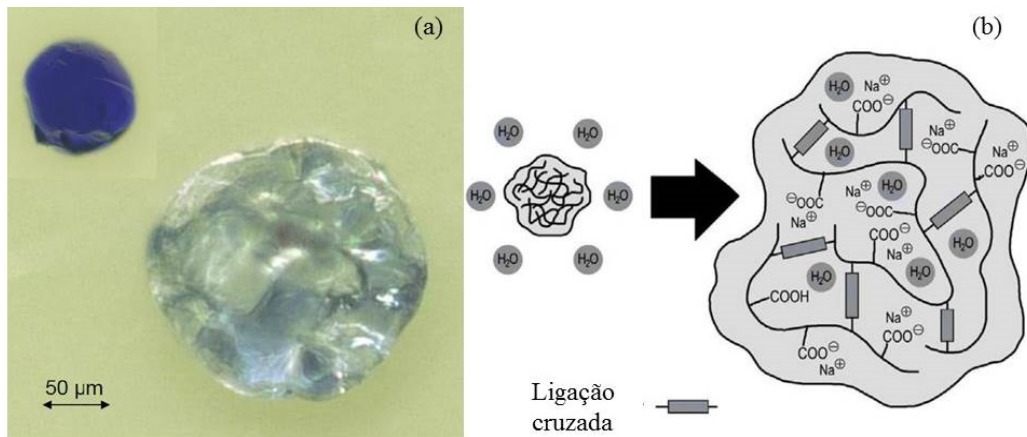


Figura 2-11: (a) Partícula esférica de PSA, colorida com tinta azul, nos estados seco e saturado (ASSMANN, 2013). (b) Representação de uma partícula de PSA a base de poliácrlato, nos estados seco e saturado (FRIEDRICH, 2012).

Para um melhor entendimento do conceito da utilização dos PSA como agentes de cura interna, é fundamental o conhecimento da cinética da migração de água dentro e fora das partículas de PSA. Os mecanismos de transporte de água para a partícula PSA são: a pressão osmótica, a interação eletrostática, a entropia, a ação capilar e a interação de Coulomb, que dependem da natureza química do polímero. Quando um PSA de ligação cruzada é introduzido num meio aquoso, as unidades iônicas dissociam-se e criam uma densidade de carga ao longo das cadeias que geram repulsões eletrostáticas que tendem a expandir o gel e promovem o inchamento. Além disso, é produzida uma elevada concentração de íons no gel, o que causa uma pressão osmótica que irá ser reduzida pela diluição da carga, isto é, pelo inchamento do gel (KIATKAMJORNWONG, 2006).

O PSA se apresenta em duas fases distintas: colapsado e saturado. A transição de fase é resultado de um equilíbrio competitivo entre as forças repulsivas que atuam de modo a expandir a rede polimérica e as forças de atração que atuam para diminuir a mesma. Vários mecanismos estão envolvidos neste processo. A pressão osmótica determina a movimentação de água do lado mais saturado para o menos saturado, devido à elevada concentração de íons, promovendo o ingresso de água no interior do polímero. A matriz macromolecular de um PSA é um polieletrólito, ou seja, um polímero com grupos ionizáveis que podem dissociar-se em solução. Por esta razão a concentração iônica no interior é elevada, o que gera um fluxo de água para o seu interior. A salinidade da solução aquosa é de especial importância para o inchamento do PSA. Os íons na solução podem alterar as interações inter e intramoleculares dos polieletrólitos devido à proteção das cargas na cadeia de polímero. Além disso, como a concentração de íons fora do PSA

aumenta, a pressão osmótica no interior do gel diminui, conduzindo a uma redução na taxa de inchamento (JENSEN e HANSEN, 2001).

Propriedades importantes dos PSA incluem capacidade de inchamento (absorção), a resistência e o módulo de elasticidade do gel dilatado. Todas essas propriedades dependem de quão reticulada é a rede do polímero. O tamanho das partículas também influencia na capacidade de absorção, já que o tempo gasto na saturação está diretamente ligado à sua granulometria. Partículas muito grandes podem ter sua eficiência reduzida devido ao tempo insuficiente para absorção durante a mistura, enquanto partículas muito finas podem apresentar menor absorção devido à superfície menos ativa (JENSEN e HANSEN, 2001).

Na desorção, ocorre o fluxo ao contrário, ou seja, do interior do PSA para o meio cimentício, que se encontra menos saturado que o interior do polímero devido ao consumo da água pelas reações de hidratação. Assim, o PSA libera a água em seu interior para a pasta, causando a redução do inchamento e diminuindo seu volume. Este processo é representado esquematicamente na Figura 2-12.

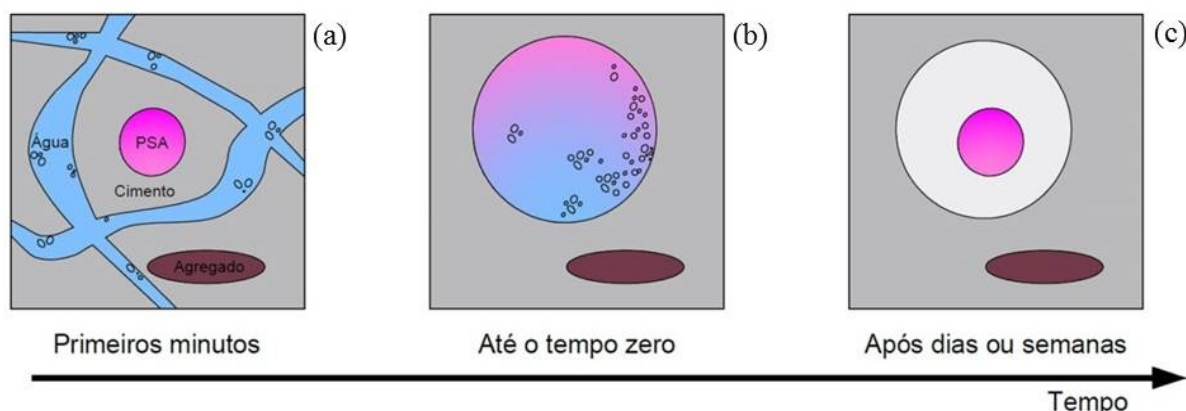


Figura 2-12: Representação esquemática da evolução da hidratação (inchamento) do PSA em meio cimentício em função do tempo: (a) Primeiros 5 minutos – dispersão homogênea de partículas de cimento, água, polímero e agregado; (b) de 5 a 10 minutos – o PSA alcança sua absorção final; (c) Após 7 dias – a água é liberada para a matriz cimentícia, causando redução do volume do PSA, permanecendo em seu lugar um poro praticamente vazio ((MANZANO, 2014) Adaptado, (MÖNNIG, 2009)).

Segundo Mönnig (2009), os PSAs também podem cumprir outras funções, como:

- Neutralizar ou adiar a retração por secagem;
- Funcionar como agentes incorporadores de poros de ar, aumentando a resistência ao congelamento-descongelamento, a durabilidade e a densidade do concreto; e

- Extrair a água da mistura do concreto fresco, causando o endurecimento da pasta, que é acompanhada por uma redução da porosidade capilar.

2.4.1 Efeitos adicionais do polímero superabsorvente

O uso de PSA no concreto afeta outras propriedades do material como a trabalhabilidade e características reológicas. Atualmente, apenas alguns resultados estão disponíveis na literatura sobre a influência dos PSA sobre a trabalhabilidade. Portanto, serão necessários maiores esforços em pesquisas para entender completamente o comportamento reológico do concreto contendo PSA, pois a capacidade de absorção pode mudar drasticamente as propriedades do concreto fresco. No entanto, Toledo Filho *et al.* (2012) observaram que a adição de PSA equivale à remoção da água livre do sistema, que resultou na redução do espalhamento medido na argamassa. Se não for adicionada água extra para compensar essa tendência, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica aumentam. Concluíram que a adição de PSA reduz a trabalhabilidade e atrasa o tempo de pega do concreto. O efeito espessante do PSA no concreto fresco, como observado por Jensen e Hansen (2002), pode ser vantajoso para aplicações práticas especiais, tais como bombeamento ou concreto projetado.

O efeito do PSA nas propriedades mecânicas foi estudado por Mechtcherine *et al.* (2013a), Silva *et al.* (2014), entre outros. De acordo com os estudos realizados, como era esperada, a resistência à compressão dos microconcretos de referência sempre foi maior, nas diversas idades, comparadas com as misturas com adição de PSA. Os teores mais elevados de PSA provocaram maior redução na resistência à compressão. Este efeito na resistência pode ser explicado pela modificação da microestrutura da pasta de cimento, após a liberação da água do PSA, deixando vazios maiores e, portanto, aumentando a sua porosidade. Entretanto, precisa ser considerada a redução na resistência à compressão devido à adição do PSA, que deve ser avaliada para cada tipo de polímero e em cada aplicação específica do concreto.

Jensen e Hansen (2002) fizeram um teste preliminar da influência da água de cura interna nas propriedades mecânicas, onde a resistência máxima com água de cura interna deveria ser comparável à resistência da argamassa de referência, de acordo com uma estimativa teórica. No entanto, a resistência mais baixa medida das argamassas com água de cura

interna pode ser um resultado da condição de umidade das amostras. Dois extremos opostos existem:

- A cura em água levou à saturação completa das amostras com e sem cura interna. Logo, as amostras devem ter alcançado o mesmo grau de hidratação e, conseqüentemente, a menor resistência da amostra com cura interna é devido à maior porosidade. No entanto, esta comparação é irreal, visto que em estruturas comuns, normalmente, não é possível assegurar a cura eficiente a partir de uma fonte externa.
- A permeabilidade das amostras é baixa para permitir a entrada de água de cura. Assim, as amostras terão condições diferentes de umidade quando ensaiadas à compressão: As amostras com cura interna estarão úmidas devido ao arrastamento de água, enquanto que a argamassa de referência terá uma RH reduzida devido à autodessecação.

É importante salientar que ainda não é possível determinar se a água adicional de cura interna participa ou não do processo de hidratação do cimento. Segundo Hashout *et al.* (2012), o motivo pelo qual a resistência mecânica das misturas contendo PSA é sempre prejudicada quando comparada com a mistura de referência é devido ao fato do acréscimo da água de cura modificar a relação a/c das misturas com adição de polímero, aumentando este parâmetro, e conseqüentemente causando redução nas propriedades mecânicas do material. Logo, sugere que a comparação correta deve ser realizada com uma mistura de referência com a mesma relação a/c da mistura contendo polímero.

2.5 A NANOTECNOLOGIA APLICADA À CONSTRUÇÃO CIVIL

O termo nanotecnologia vem da unidade nanômetro (nm), medida que corresponde à bilionésima parte do metro (10^{-9} m). A nanotecnologia é a engenharia dos materiais e das estruturas com tamanho entre 1 e 100 nm, atingindo o tamanho de moléculas e átomos. Isto equivale a dizer que, por exemplo, são estruturas cerca de 30.000 vezes menor que a espessura de um fio de cabelo humano, ou do tamanho da molécula do nosso DNA. O estudo das coisas infinitamente pequenas teve início em uma palestra do físico Richard Feynman, vencedor do prêmio Nobel de Física de 1965, intitulada “Há mais espaços lá embaixo!”, ministrada no Encontro Anual da Sociedade Americana de Física, que ocorreu no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), em 29 de dezembro de 1959 (GLEIZE, 2007).

A nanotecnologia explora as propriedades e fenômenos que ocorrem em nano escala, onde a matéria apresenta um comportamento especial, devido às elevadas superfícies e aos efeitos quânticos. A incorporação de nano objetos ou nano partículas gera um efeito de aumento da superfície de contato e da reatividade, o que traz diversas vantagens em termos de reforço e eficiência. A nanotecnologia é fundamentalmente uma ciência interdisciplinar, influenciando, em maior ou menor escala, as atividades da vida humana (GLEIZE, 2007).

O objetivo da nanotecnologia é criar, produzir, caracterizar e aplicar estruturas, dispositivos e sistemas, controlando forma e tamanho na escala nanométrica. Na fabricação destes materiais, cada átomo é posicionado de maneira independente, cuidando para que a estrutura seja consistente com as leis da física e da química e permitindo especificá-la com detalhes atômicos, de forma que os custos de fabricação não excedam largamente os custos da matéria-prima e energia utilizadas. (MORAIS, 2012).

Ainda segundo Morais (2012), existem muitas razões que fazem com que a nano escala seja tão importante, como:

- As propriedades mecânicas e quânticas dos elétrons são influenciadas pelas alterações feitas na nano escala. Através da manipulação dos materiais, é possível variar suas propriedades micro e macroscópicas, como capacidade de carga, magnetização e temperatura de fusão, sem alterar a sua composição química.
- A organização sistemática da matéria em nano escala é um elemento chave. O desenvolvimento da nanociência nos levará a inúmeras possibilidades, como colocar dispositivos dentro de células vivas ou novos materiais, usando o recurso de automontagem com elementos da natureza.
- Componentes em nano escala têm alta relação superfície/volume, tornando-os ideais para o uso em materiais compósitos, sistemas interativos, transporte de drogas pelo organismo humano e armazenamento de energia química.
- Sistemas macroscópicos compostos de nano estruturas podem ter densidade maior, o que permite melhorar características como a condutividade elétrica. Isso pode resultar em novos conceitos de eletrônica, como circuitos menores e mais rápidos, com funções mais sofisticadas e baixo consumo de energia.

Os nano materiais possuem um papel fundamental quando aplicados aos produtos cimentícios, pois permitem alterações em sua microestrutura que os tornam mais

resistentes e duráveis. Dentre os nano materiais aplicados aos meios cimentícios, destacam-se os nano tubos de carbono, a nanossílica e as nano partículas de dióxido de titânio.

2.5.1 Aplicação da nanossílica em meios cimentícios

Nas últimas décadas, nota-se um interesse cada vez maior na utilização de adições minerais incorporadas ao material cimentício, pois além de economizar energia e preservar recursos naturais, proporcionam vantagens técnicas ao produto final. As vantagens da utilização de adições minerais podem ser atribuídas ao aumento de propriedades tecnológicas, à redução do consumo de clínquer, à diminuição no impacto ambiental através de menor desperdício, além da redução da emissão de CO₂ dos fornos de cimento (NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Algumas adições minerais passaram a ser utilizadas com o objetivo de se obter concretos de alto desempenho. Esta aplicação, além do bom resultado relacionado à durabilidade, também proporcionou às estruturas elevados valores de resistência. O excelente resultado na atividade pozolânica de alguns desses materiais fez com que fossem denominadas adições minerais altamente reativas. Atualmente, como principais pozolanas altamente reativas em uso no concreto ou em materiais cimentícios, têm-se a sílica ativa, o metacaulim e a cinza da casca de arroz com queima controlada (ANDRADE, 2015).

Quando se adiciona partículas de micro ou nanossílica aos materiais cimentícios, em adição ou substituição parcial do cimento, ocorre uma alteração das propriedades físicas e químicas do material, devido à sua participação no processo global da hidratação e desenvolvimento da microestrutura. Essa característica é responsável pela alteração das propriedades do material no estado fresco e endurecido quando comparado aos materiais produzidos apenas com cimento comum (SENF, 2009a).

A Sílica (SiO₂) está presente em concretos convencionais através da composição do cimento. No entanto, um dos avanços proporcionados pelo estudo do concreto em nano escala é que o empacotamento das partículas pode ser melhorado com o uso de nanossílica, o que leva a uma maior compactação da sua estrutura, resultando em melhores propriedades mecânicas. A adição de nanossílica também pode controlar a degradação do C-S-H causada pela lixiviação de cálcio, bem como a penetração da água e, portanto, contribuir para a melhoria na durabilidade (MORAIS, 2012).

Para Gleize, (2007), a incorporação de nano partículas representa um papel muito importante, à medida que permite um melhor controle da microestrutura, produzindo materiais mais resistentes e duráveis, podendo melhorar a coesão, minimizar a fluência, evitar fissuração nas primeiras idades, aumentar a ductilidade e sua resistência.

Segundo Senff *et al.* (2009b), as nano partículas possuem uma grande área de superfície e elevada reatividade, quando comparadas com partículas com a mesma composição química e de tamanho maior. Esta característica, quando se fala em aplicação em misturas cimentícias, é responsável pela alteração de propriedades no estado fresco e endurecido, em comparação com as adições convencionais. Os grãos nanométricos participam de forma mais efetiva das reações pozolânicas, características da hidratação, resultando em novos materiais com desempenho superior. Assim, a adição de NS em substituição parcial do cimento tem adquirido atenção crescente nos últimos anos.

A Figura 2-13 mostra um diagrama com a relação entre o tamanho e a área superficial de partículas de materiais utilizados em concretos e argamassas. Quanto menor o tamanho da partícula, maior a área superficial do material, de forma não necessariamente linear, conduzindo ao material que os autores chamaram de concreto de nanoengenharia. (SOBOLEV e SANCHEZ, 2010).

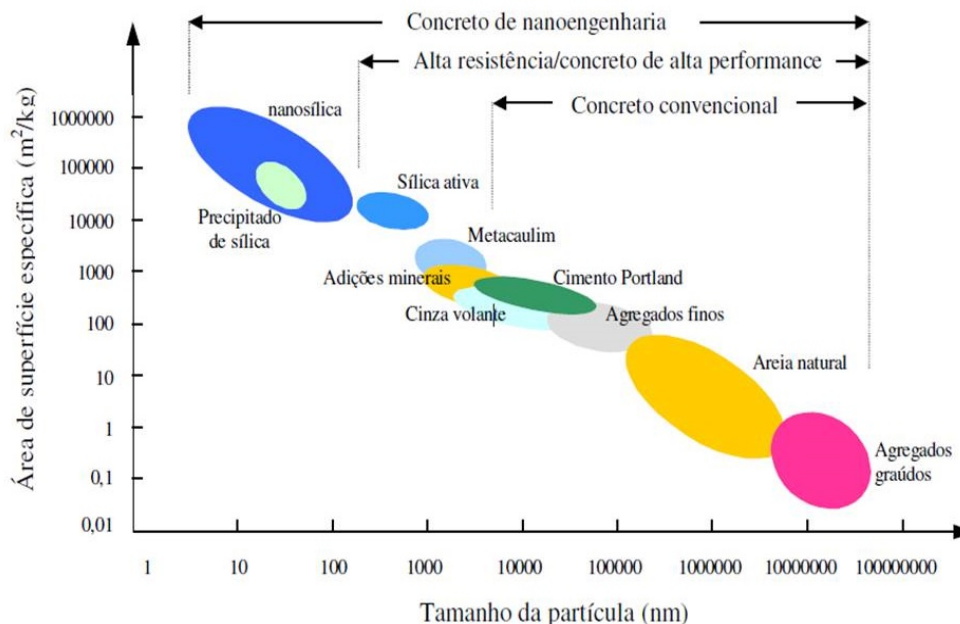


Figura 2-13: Relação entre o tamanho da partícula e a área superficial (SOBOLEV e SANCHEZ, 2010).

De acordo com Aïtcin (1998), a adição de nanossílica atua de duas formas distintas: uma química e uma física. A ação física corresponde à atuação do material como fíler, ou seja, as partículas situam-se nos espaços entre os grãos maiores, provocando uma distribuição uniforme dos produtos de hidratação e contribuindo para uma estrutura mais densa, menos permeável e mais resistente. A ação química ocorre devido à sua alta reatividade, promovendo reações pozolânicas. A NS reage rapidamente com o Ca(OH)_2 formado durante a hidratação do cimento, resultando em mais C-S-H, composto resistente que tende a preencher os vazios capilares.

Segundo Sobolev e Sanchez (2010), a ação benéfica das nano partículas na microestrutura e no desempenho de materiais à cimentícios pode ser explicada pelos seguintes fatores:

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

O concreto deve ser entendido como um material de macro estrutura, fortemente influenciado pelas suas nano propriedades. Compreendê-lo neste nível levará a novos caminhos para a melhoria da qualidade, em termos de resistência e durabilidade. Pode-se dizer que o concreto é um material de múltiplas escalas de observação (MORAIS, 2012).

As propriedades do concreto em seu estado inicial, como fluidez e trabalhabilidade, são regidas pela distribuição e tamanho das partículas, enquanto que as propriedades do concreto no estado endurecido, como resistência e durabilidade, são afetadas tanto pela granulação das partículas como pela porosidade (QUERCIA e BROUWERS, 2010).

A Figura 2-14 mostra micrografias de pastas de cimento de diferentes conteúdos de NS com 14 dias de idade. Verifica-se uma estrutura mais densa nas pastas contendo NS.

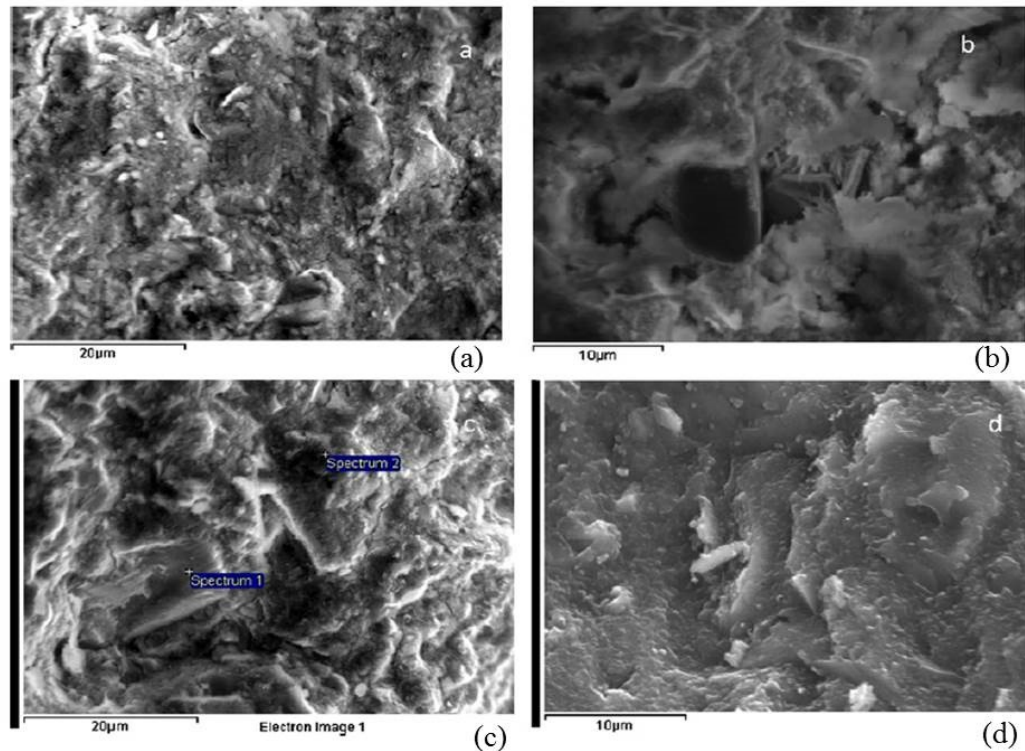


Figura 2-14: Micrografia de pastas de cimento com 14 dias de idade. (a) Estrutura da amostra de referência; (b) amostra com 0,5% NS; (c) amostra com 1% NS; (d) amostra com 5% NS (STEFANIDOU e PAPAYIANNI, 2012).

A atuação da NS na hidratação se dá por meio das seguintes etapas: silicatos de cálcio são criados durante a hidratação do cimento, quando a NS e o CH são dissolvidos, tornando-se disponíveis para reagir; as partículas de nanossílica atraem as partículas de CH dissolvidas, originando mais C-S-H; os novos géis de C-S-H aumentam a densidade da pasta de cimento, reforçando a estrutura entre os grãos de cimento. Uma imagem ilustrativa da partícula de NS e seu mecanismo de ação são mostrados na Figura 2-15 (AKZONOBEL, 2013).

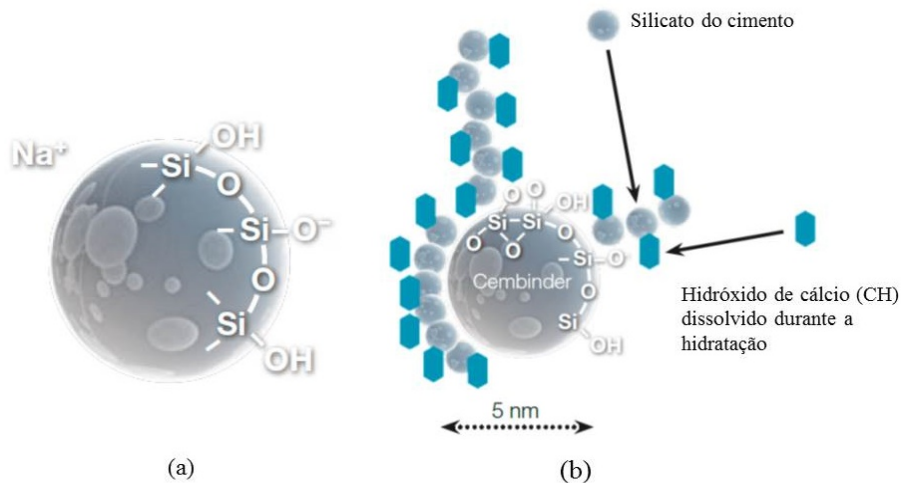


Figura 2-15: (a) Representação esquemática de uma partícula de nanossílica; (b) mecanismo de atuação da NS na hidratação do cimento (AKZONOBEL, 2013).

2.5.2 Efeitos da nanossílica nas propriedades dos materiais

Segundo Qing *et al.* (2008), as propriedades mecânicas são as mais avaliadas dentre os trabalhos que abordam adição de nanossílica em materiais cimentícios, sendo a resistência à compressão a principal delas. Pesquisadores afirmam que a adição de nanossílica conduz a um aumento dos resultados de resistência à compressão quando comparado aos materiais sem adição ou com adições de sílica ativa ou cinza volante. O autor notou um aumento de até 26% na resistência mecânica das misturas contendo nanossílica, em comparação com a referência, e que mesmo em pequenas quantidades, a adição de NS aumenta a resistência à compressão em 10% e a resistência a flexão em 25%. No entanto, estes resultados dependem do método de produção e das condições de síntese das NS (proporções molares, tipo de reação, duração da reação etc.) e do fato de que a dispersão da NS, na massa, tem um papel importante.

A permeabilidade é influenciada pela solidez e porosidade da massa hidratada na matriz. Apesar de constituir uma rede porosa, a permeabilidade é baixa, embora a capilaridade dos poros forme espaços relativamente grandes entre os grãos de cimento. Como a resistência e a permeabilidade à água estão sempre juntas para afetar o desempenho final do concreto é essencial avaliar as propriedades mecânicas considerando os vários tipos de esforços, juntamente com as propriedades físicas do concreto (QUERCIA e BROUWERS, 2010).

Quando a NS é incorporada na mistura, exerce influência direta na demanda de água. Se o teor de água é mantido, a NS melhora o empacotamento das partículas de cimento,

diminuindo o volume entre elas, o que torna a pasta mais fluida. No entanto, os aglomerados de NS possuem alta adsorção de água devido à elevada área superficial e porosidade. Teoricamente, a adição de NS melhorará a fluidez da pasta apenas se todos os aglomerados puderem atuar como *filler* e ocupar os espaços vazios entre as partículas de cimento, liberando um pouco de água livre (MORAIS, 2012).

Pourjavadi *et al.* (2012), utilizaram a NS para melhorar as propriedades mecânicas de pastas contendo polímeros superabsorventes (PSA), avaliando também seu impacto sobre outras propriedades. Utilizaram, para tal, três teores de NS e, em cada um deles, fez variar os teores de PSA. Os autores verificaram que mesmo pequenas adições de NS podem compensar o efeito negativo o PSA na resistência à compressão.

No entanto, as condições de mistura, a formulação e o percentual de adição ou substituição da nanossílica e os seus respectivos efeitos nas propriedades das pastas de cimento Portland ainda são pouco estudados. Alguns autores ainda afirmam que pesquisas têm produzido resultados adversos entre os mais variados estudos encontrados na literatura. Estudos demonstram que apesar de ser evidente o potencial da nanossílica proporcionar aumento de resistência mecânica dos materiais cimentícios, não há ainda um consenso sobre o melhor percentual e em quais condições de mistura se pode obter o melhor desempenho para materiais de matriz cimentícia (SOBOLEV e SANCHEZ, 2010).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo visa apresentar como se deu a realização do programa experimental desenvolvido ao longo da pesquisa, as misturas utilizadas, variáveis de resposta e fatores controláveis. Neste tópico também constam a caracterização dos materiais utilizados na confecção dos microconcretos, as propriedades no estado fresco e endurecido avaliadas, bem como os métodos de ensaio utilizados. Os efeitos do PSA e da NS nos microconcretos de alta resistência são avaliados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (LEM/UnB) e nos Laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia - GO. A Figura 3-1 mostra esquematicamente o desenvolvimento do programa experimental deste estudo.

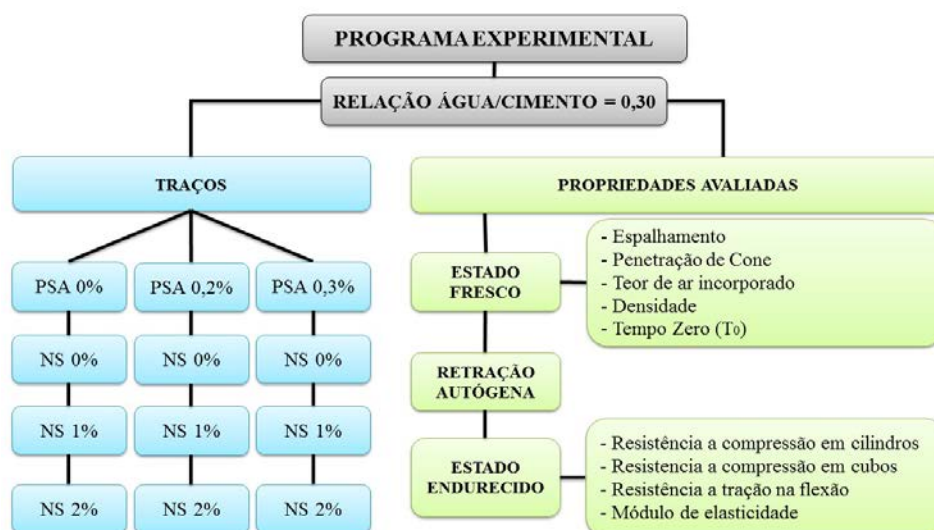


Figura 3-1: Esquema do programa experimental desenvolvido na pesquisa em microconcretos.

3.1 MISTURAS UTILIZADAS

O programa experimental é composto de nove misturas de microconcretos de alta resistência, todas com relação a/c igual a 0,30. Destas, três foram produzidas anteriormente por Manzano (2014) e Suárez (2015), utilizando o mesmo traço de referência, os mesmos fornecedores e o mesmo polímero, porém com materiais de lotes diferentes. São elas: uma mistura de referência (REF), e duas misturas com teores de 0,2% e 0,3% de polímero superabsorvente (PSA02 e PSA03). As outras seis misturas foram produzidas durante este programa experimental, a saber: duas misturas contendo teores de 1 e 2% de nanossílica (NS1 e NS2), e quatro misturas híbridas, contendo ambas as adições (PSA02-NS1, PSA02-

NS2, PSA03-NS1 e PSA03-NS2), conforme mostrado na Tabela 3-1. O teor de superplastificante de cada mistura foi determinado experimentalmente no LEM, de forma a conseguir um espalhamento de 190±10mm, conforme a norma DIN 18555-2 (1982).

Convém ressaltar que, nas misturas contendo polímero, foi acrescentada água adicional para cura interna, para ser absorvida pelo PSA. Esta água de cura interna não foi considerada no cálculo da relação a/c, como procedem diversos pesquisadores, entre eles Jensen e Hansen (2002), Kovler e Jensen (2007), Dudziak e Mechtcherine (2010), Ordoñez (2013) e Manzano (2014). Se fosse considerada a água de cura interna no cálculo, os traços contendo polímero apresentariam a/c total maior, tornando injusta a comparação com a relação a/c igual a 0,30. O teor de superplastificante de cada mistura foi determinado experimentalmente no LEM, de forma a conseguir um espalhamento de 190±10mm, determinado conforme a norma DIN 18555-2 (1982).

Tabela 3-1: Teores de PSA, NS e SP para os traços desenvolvidos.

Referência	Microconcreto	Teor PSA (%)	Teor NS (%)	Teor de SP (%)
Manzano (2014)	REF	0	0	2,6
Manzano (2014)	PSA02	0,2	0	3,0
Manzano (2014)	PSA03	0,3	0	3,2
Pesquisa	NS1	0	1	3,0
Pesquisa	NS2	0	2	3,5
Pesquisa	PSA02-NS1	0,2	1	3,2
Pesquisa	PSA02-NS2	0,2	2	3,5
Pesquisa	PSA03-NS1	0,3	1	3,5
Pesquisa	PSA03-NS2	0,3	2	3,9

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta (ou dependentes) são aquelas que possibilitam quantificar características e propriedades, relacionando-as com a qualidade do material. Elas são determinadas de maneira experimental, em três grupos: estado fresco, retração autógena e propriedades no estado endurecido.

- a) Propriedades no estado fresco: espalhamento, penetração de cone, teor de ar incorporado, densidade no estado fresco e tempo zero (T_0);
- b) Retração autógena;
- c) Propriedades no estado endurecido: resistência à compressão em cilindros, resistência à compressão em cubos, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

3.2.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis são aqueles que podem exercer influência sobre as variáveis de resposta. Para os microconcretos estudados, os fatores controláveis foram os teores de PSA e NS e idade do ensaio. Na Tabela 3-2 é apresentada a matriz experimental da pesquisa.

Tabela 3-2: Matriz experimental da pesquisa realizada em microconcretos

TRAÇO	Fatores Controláveis		Variáveis de Resposta												
	Teor PSA (%)	Teor NS (%)	Estado Fresco					Retração Autógena	Estado Endurecido						
			Espalhamento	Penetração de Cone	Teor de Ar Incorporado	Densidade	Tempo Zero (T_0)		Resistência à Compressão	Resistência à Tração na Flexão	Módulo de Elasticidade				
												Fresco	Fresco	Fresco	Fresco
REF	0	0													
PSA02	0,2	0													
PSA03	0,3	0													
NS1	0	1													
NS2	0	2													
PSA02-NS1	0,2	1	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco	Fresco	Contínuo (T_0 até 28 dias)				7 e 28 dias	7 e 28 dias	28 dias	
PSA02-NS2	0,2	2													
PSA03-NS1	0,3	1													
PSA03-NS2	0,3	2													

1. A composição do traço de referência cuja relação a/c = 0,30 foi proposta pelo TC-225-SAP (RILEM, 2012), com espalhamento de 190 ± 10 mm determinado pelo cone DIN 18555-2 (1982).

2. Para os demais microconcretos estabeleceu-se o mesmo espalhamento do traço REF, por meio da variação do teor de superplastificante.

3.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

A seleção de materiais foi realizada de acordo com a disponibilidade da região e dos fornecedores. Os materiais são utilizados de maneira como são comercializados, sem qualquer tipo de alteração nas suas características iniciais.

3.3.1 Cimento Portland

No estudo experimental é utilizado cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV ARI RS, proveniente da mesma partida de fabricação. O cimento CPV ARI foi proposto por conter elevado teor de clínquer e, conseqüentemente, menor conteúdo de adição mineral, minimizando assim o seu efeito na retração autógena. Além disso, este tipo de cimento tem uma elevada empregabilidade em concretos de alta resistência (CAR).

Os resultados de caracterização química do cimento utilizado são mostrados na Tabela 3-3. Já a caracterização física e mecânica do cimento foi realizada no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A e estão apresentados na Tabela 3-4.

Tabela 3-3: Caracterização química do cimento CPV - ARI RS utilizado.

Composição Química		Teores (%)	Limites NBR 5733	Referência Normativa
Perda ao fogo		1,82	≤ 4,5	NBR NM 18:2012
Resíduo insolúvel		0,79	≤ 1,0	NBR NM 15:2012
Trióxido de Enxofre - SO ₃		3,28	*	NBR NM 16:2012
Óxido de Magnésio - MgO		4,36	≤ 6,5	NBR NM 11-2:2012
Dióxido de Silício - SiO ₂		24,41	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃		3,02	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃		7,09	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Cálcio - CaO		53,44	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Cálcio livre - CaO livre		2,16	≤ 3,00	NBR NM 13:2012
Sulfato de Cálcio - CaSO ₄		2,16	-	NBR NM 16:2012
Álcalis Totais	Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,29	-	NBR NM 17:2012
	Óxido de Potássio - K ₂ O	0,77	-	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	0,80	-	NBR NM 17:2012
Álcalis solúveis em água	Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,18	-	NBR NM 17:2012
	Óxido de Potássio - K ₂ O	0,64	-	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	0,60	-	NBR NM 17:2012

Tabela 3-4: Caracterização física e mecânica do cimento CPV - ARI RS utilizado.

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites NBR 5733	Referência Normativa	
Tempo de início de pega	h:min	02:30	≥ 1:00	NBR NM 65:2003	
Tempo de fim de pega	h:min	03:10	≤ 10:00	NBR NM 65:2003	
Água de consistência - pasta	(%)	32,4	-	NBR NM 43:2003	
Expansão em autoclave	(%)	0,03	-	ASTM C151	
Resistência à compressão	1 dias	MPa	32,1	≥ 14,0	NBR7215:1996
	3 dias	MPa	37,2	≥ 24,0	NBR7215:1996
	7 dias	MPa	41,8	≥ 34,0	NBR7215:1996

Como os respectivos resultados, podemos concluir que o material atende os requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras. Os teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio estão aceitáveis, evitando as reações expansivas devido à hidratação tardia destes compostos.

3.3.2 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada na fabricação dos microconcretos é de origem nacional, do tipo não densificada, proveniente de um mesmo lote de fabricação e fornecida em sacos de 15 kg. Fixou-se o teor de 10% em relação à massa do cimento, conforme recomendação do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012). Os ensaios de caracterização física e química foram realizados no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A estão apresentados na Tabela 3-5. Os resultados encontram-se dentro das especificações das normas pertinentes.

Tabela 3-5: Caracterização física e química da Sílica Ativa utilizada.

Propriedade	Teores (%)	Limites NBR 13956:2012	Método de Ensaio		
Massa Específica (g/cm ³)	2,21	-	NBR NM 23:2001		
Características químicas	Perda ao fogo	3,22	≤ 6,0	NBR NM 15:2012	
	Óxido de Magnésio - MgO	0,49	-	NBR 13956:2012	
	Dióxido de Silício - SiO ₂	93,55	≥ 85	NBR 13956:2012	
	Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,16	-	NBR 13956:2012	
	Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	0,15	-	NBR 13956:2012	
	Óxido de Cálcio - CaO	0,37	-	NBR 13956:2012	
	Álcalis Totais	Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,26	-	NBR NM 17:2012
		Óxido de Potássio - K ₂ O	0,85	-	NBR NM 17:2012
Equivalente alcalino	0,82	≤ 1,5	NBR NM 17:2012		

3.3.3 Agregado miúdo – areia

O agregado miúdo utilizado na produção dos microconcretos é do tipo areia de rio natural e lavada, proveniente do depósito aluvial do Rio Corumbá, na região de Pires do Rio – GO, aproximadamente 230 Km de Brasília. A escolha do agregado miúdo baseou-se na distribuição granulométrica, entre cinco tipos de areia média-grossa disponíveis pelo fornecedor, sendo preferida uma composição contínua, dentro da zona utilizável e mais próxima da zona ótima. O ensaio da composição granulométrica foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB). Demais características são analisadas no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A. Na Figura 3-2 é mostrada a distribuição granulométrica da amostra selecionada, que se apresentou dentro dos limites da zona utilizável da norma ABNT NBR 7211 (2011). A figura também mostra os valores obtidos para módulo de finura, absorção, dimensão máxima e massa específica na condição SSS (saturada superfície seca).

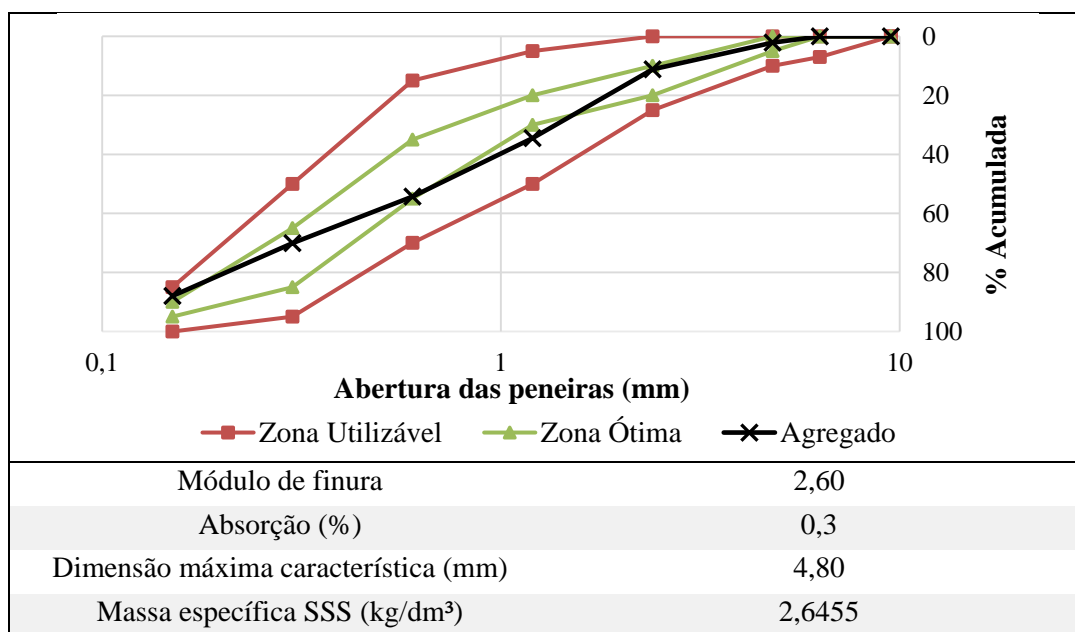


Figura 3-2: Curva granulométrica e demais propriedades da amostra de agregado miúdo selecionada.

O agregado miúdo foi armazenado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB) em sacos plásticos lacrados para preservar sua umidade. Além disso, durante a confecção das misturas, antes da pesagem do material, utilizou-se o método do Frasco de Chapman para determinar a umidade superficial da areia, conforme mostrado na Figura 3-3.



Figura 3-3: Ensaio de determinação da umidade superficial da areia – Frasco de Chapman.

Neste método, o frasco de volume conhecido é preenchido com 200ml de água, até atingir a marca desejada. Então se adiciona 500g de areia úmida, e o frasco é chacoalhado para remover as bolhas de ar. Procede-se então a leitura no gargalo graduado, e a umidade é calculada conforme a equação a seguir:

$$H(\%) = \left[\frac{500 - (L - 200) \cdot \gamma}{(L - 700) \cdot \gamma} \right] \cdot 100 \quad \text{Equação 3-1}$$

Onde:

$H(\%)$ = teor de umidade, em porcentagem;

L = leitura realizada no frasco de Chapman, em milímetros;

γ = massa específica da areia na condição SSS.

3.3.4 Aditivo superplastificante

O aditivo químico utilizado nesta pesquisa é do tipo redutor de água de grande eficiência (superplastificante de 3ª geração), a base de policarboxilato e de pega normal (N), segundo a classificação da ABNT NBR 11768 (2011). Na Tabela 3-6 são apresentadas as características físico-químicas do aditivo empregado na pesquisa, fornecidas pelo fabricante. A escolha do superplastificante baseou-se em estudos comparativos realizados no PECC por Manzano (2014), cujo critério de seleção baseou-se no produto que apresentou o menor teor para atender ao espalhamento especificado (190 ± 10 mm).

Tabela 3-6: Características físico-químicas do Superplastificante utilizado na pesquisa.

Característica	Resultado
Base química	Eterpolicarboxilato
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Branco turvo
Massa Específica (g/cm ³)	1,067 – 1,107
pH	6
Teor de sólidos (%)	30
Teor de cloretos	Isento

3.3.5 Polímero Superabsorvente

O polímero superabsorvente utilizado no trabalho foi fornecido pelo Professor e pesquisador. Ole Mejlhede Jensen e desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). Trata-se de um polímero do tipo ácido acrílico/acrilamida, com ligações cruzadas covalentes, produzido pela técnica de polimerização por suspensão inversa (JENSEN e HANSEN, 2001).

O PSA foi especialmente desenvolvido para uso em ambiente alcalino elevado, como a suspensão cimentícia. Ele foi fornecido como um pó seco e branco, com partículas esféricas. Na Figura 3-4 é apresentado o polímero superabsorvente utilizado, no estado seco, visto pelo Microscópio Digital Profissional LCD marca CELESTRON Modelo # 44345, com um aumento de 1600x. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da UnB (MANZANO, 2014).

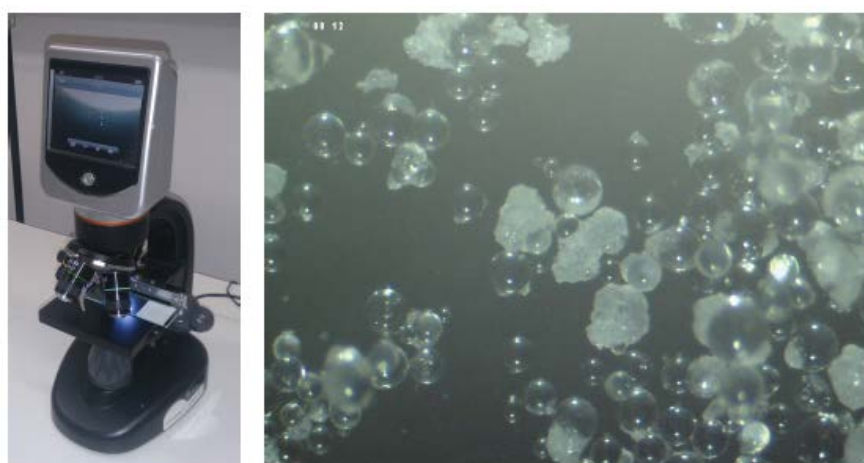


Figura 3-4: (a) Microscópio digital profissional LCD Celestron #44345; (b) Partículas de PSA seco vistas do microscópio digital e aumentadas 1600x (MANZANO, 2014).

Os teores de PSA estudados nessa pesquisa são 0,2% e 0,3% relativos à massa do cimento. O maior teor, de 0,3% de PSA, foi estabelecido baseado em pesquisa de doutorado realizada anteriormente no PECC com o mesmo polímero. O uso de 0,3% de PSA mostrou-se suficiente para a mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência, não justificando um teor mais elevado. O teor de 0,2% foi escolhido por apresentar o melhor custo/benefício, traduzido como a melhor relação entre boa redução da retração autógena e menores perdas de resistência mecânica (SILVA, MANZANO, *et al.*, 2014).

Na Tabela 3-7 são apresentadas algumas características do polímero superabsorvente fornecido por Jensen, que foi utilizado nesta pesquisa.

Tabela 3-7: Características do PSA utilizado na pesquisa (MANZANO, 2014).

Característica	Método	Resultado
Massa específica (g/ml)	Picnômetro	1,456
Absorção em meio aquoso (g/g)	Proveta graduada	95,8
	Microscópio ótico	80,3
Absorção em meio cimentício (g/g)	<i>Slump-flow</i>	15,0

As figuras a seguir representam a determinação de algumas das propriedades de interesse do PSA utilizado na pesquisa. Na Figura 3-5 é apresentada a distribuição granulométrica típica do polímero utilizado na confecção dos microconcretos, por meio do ensaio de peneiramento de jato de ar (ASSMANN, 2013).

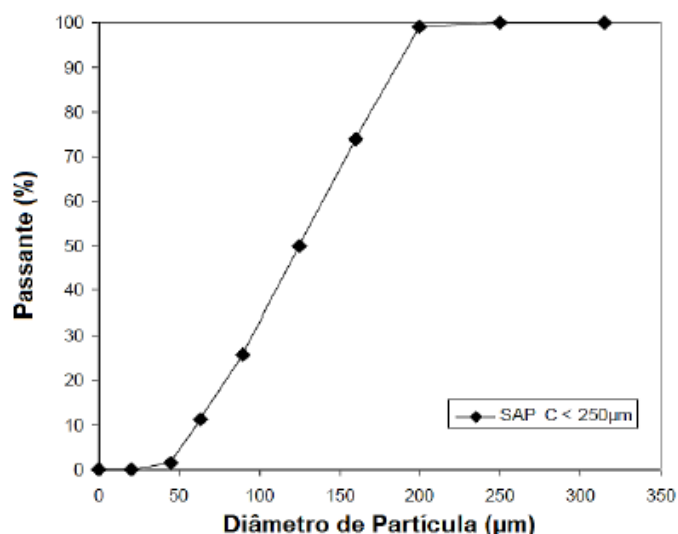


Figura 3-5: Distribuição granulométrica do PSA (ASSMANN, 2013).

Este ensaio foi reproduzido na UnB com o equipamento de granulometria a laser do Laboratório de Geotecnia da UnB, segundo as prescrições da Norma ERT 420.2-02:2012a, da EDANA (2012), por Manzano (2014).

A Figura 3-6a apresenta o método para determinação da absorção do PSA no meio aquoso, sendo chamado de método da proveta graduada. Este método foi desenvolvido por Jensen (JENSEN, 2011), e consiste em adicionar uma quantidade de polímero seco na proveta, onde é determinado o volume unitário solto. Então, adiciona-se água e mede-se o volume final na proveta ocupado pelo PSA. Neste ensaio, o valor encontrado para absorção em meio aquoso foi 95,8 g/g. Já a Figura 3-6b apresenta outro método para a determinação da absorção em meio aquoso, por meio da análise de imagens geradas pelo Microscópio Digital Profissional LCD, marca Celestron, modelo #44345, aumentadas 520x, pertencente ao Laboratório de Geotecnia da UnB. O método consiste na relação entre o volume do PSA seco, medido a partir do diâmetro da partícula seca, e o diâmetro da partícula na sua capacidade máxima de inchamento. O valor encontrado para a absorção em meio aquoso neste ensaio foi de 80,3g/g (MANZANO, 2014).

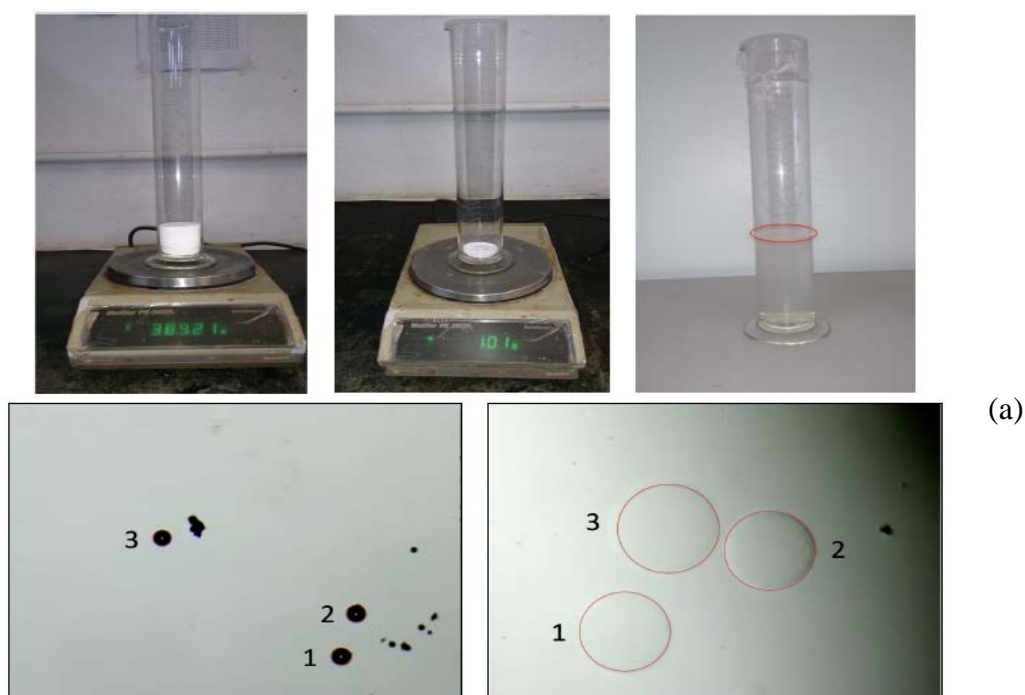


Figura 3-6: Métodos para determinação da absorção em meio aquoso. (a) proveta graduada; (b) análise em microscópio ótico (MANZANO, 2014).

Na Figura 3-7 é apresentada a absorção do PSA em meio cimentício. Como já dito, esta propriedade é a de maior interesse para a pesquisa, pois é fundamental para o cálculo

correto da quantidade de água de cura interna que será liberada para diminuir a retração autógena. Nesta pesquisa, utilizou-se o método do *Slump-flow Test*, ou espalhamento da argamassa, proposto por Mönnig (2005). O método consiste na determinação experimental do espalhamento ao longo do tempo em uma mistura contendo um determinado teor de PSA (foi utilizado neste caso o teor de 0,2%), e comparar seu valor com o espalhamento de misturas com diversas relações a/c (água variável). A determinação do espalhamento é realizada de acordo com a norma DIN 18555-2 (1982), após 10 minutos de mistura da água, e em intervalos de 6 minutos, do qual os primeiros 2 minutos são considerados como tempo adicional de mistura. Cada mistura possui uma quantidade de água, que representa uma absorção do PSA. O objetivo é determinar a quantidade de água necessária para que a curva da mistura sem polímero coincida com a da mistura com polímero, aos 52 minutos, situação na qual a água absorvida pelo PSA não mais contribui para o espalhamento.

No ensaio realizado, a absorção do PSA foi de 15g/g, valor este que será considerado para a realização dos traços de microconcretos desta pesquisa (MANZANO, 2014).

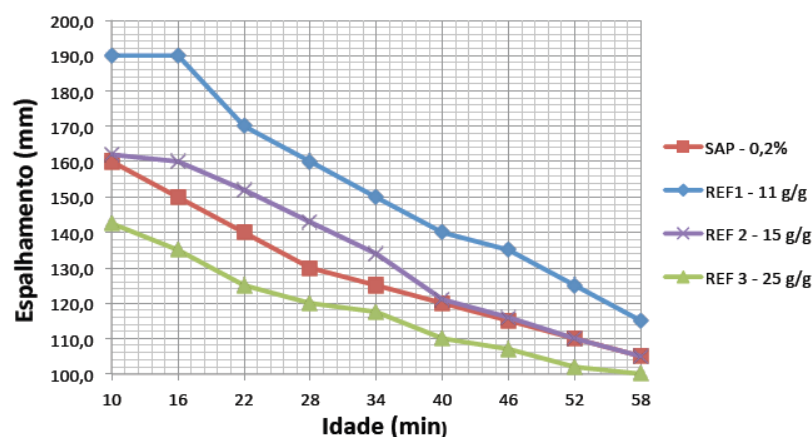


Figura 3-7: Determinação da absorção do PSA em meio cimentício pelo método *Slump-flow test*: o espalhamento da mistura contendo PSA é comparado com o espalhamento obtido em misturas com relação a/c variável, simulando a quantidade de água absorvida. (MANZANO, 2014).

3.3.6 Nanossílica

A nanossílica utilizada na pesquisa foi escolhida devido às suas características físicas e químicas, e considerando a existência prévia de fornecedor no Brasil. Trata-se de uma solução aquosa de sílica coloidal com teor de sólidos de 30%.

Segundo o fabricante, trata-se de uma dispersão aquosa alcalina e estabilizada, onde as partículas de NS amorfa possuem carga superficial negativa, são descontínuas, de forma ligeiramente rugosa, esférica, e estreita distribuição granulométrica. A dispersão é um líquido translúcido, ligeiramente mais viscoso que a água. Segundo recomendação, é especialmente desenvolvida para uso em concreto, com funções de: controlar a estabilidade, segregação e perda de água, melhorar a durabilidade, reduzir a penetração de cloretos e promover desenvolvimento rápido da resistência. (AKZONOBEL, 2013).

Na Figura 3-8 é mostrada a análise da micrografia da nanossílica utilizada na pesquisa, pelo método da Microscopia Eletrônica de Transmissão – MET. É possível observar aglomerados de partículas, tendendo ao formato esférico e com pouca variação de tamanho. As nano partículas apresentam uma grande tendência de aglomeração entre si, o que está relacionado à elevada energia de superfície, reduzida distância entre as partículas e sua configuração molecular. Observa-se, também, que o tamanho das partículas é de aproximadamente 27nm, confirmando que o material utilizado nesta pesquisa é composto por partículas em escala nanométrica (ANDRADE, 2015).

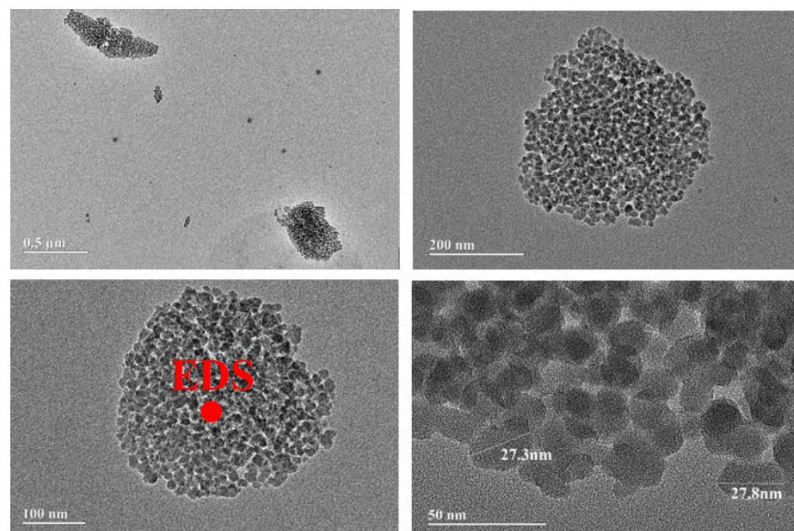


Figura 3-8: Micrografias da nanossílica empregada na pesquisa utilizando Microscopia Eletrônica de Transmissão - MET (ANDRADE, 2015).

Os teores de NS utilizados nesta pesquisa são 1% e 2% em relação à massa do cimento, considerando o teor de sólidos de 30%. Assim, a porcentagem da solução adicionada é, respectivamente, 3,34% e 6,67%, de forma a atingir os teores desejados. Estes valores foram selecionados a partir de pesquisa de doutorado realizada no PECC, sendo estes teores, combinados com 10% de Sílica Ativa, os que apresentaram o maior ganho de

resistência mecânica. Os resultados obtidos por Andrade e Rêgo (2015), utilizando os teores de 1%, 2% e 3% da nanossílica tipo NS30 (contendo 30% de teor de sólidos na composição), são mostrados Tabela 3-8, onde se verifica o melhor desempenho para a NS30-3%, aos 7 dias (aumento de aproximadamente 34% na resistência a compressão). No entanto, como o objetivo é apenas compensar a perda de resistência mecânica causada pelo polímero, e considerando que a mistura possui um elevado consumo de cimento e baixa relação a/c, optou-se pelos teores de 1% e 2%, de forma a evitar a elevação excessiva do teor de superplastificante da mistura.

Tabela 3-8: Resultados da mistura contendo a nanossílica utilizada na pesquisa (ANDRADE e RÊGO, 2015).

Traço	Resistência (MPa) 7dias	Desempenho (%)
Ref.	28,48	100
NS30-1%	35,15	123,42
NS30-2%	37,60	132,02
NS30-3%	38,14	133,92

A Tabela 3-9 mostra as principais características da nanossílica utilizada na confecção dos microconcretos deste trabalho, de acordo com o fabricante.

Tabela 3-9: Características físicas e químicas da NS utilizada

Propriedade	Valor
Natureza química	Sílica amorfa
Apresentação – estado físico	Solução aquosa coloidal – líquido
Cor – odor	Claro/ligeiramente turvo – odor suave
Teor de sílica (%)	30
Tamanho aproximado das partículas	~ 5 nm
pH	10,5 (9 -11)
Viscosidade (MPa.s)	< 50
Densidade (g/cm ³)	1,2
Teor NaO ₂ (%)	0,55

3.3.7 Água

A água utilizada na pesquisa é proveniente da rede de abastecimento público, ou seja, sem nenhum tipo de tratamento adicional. É importante salientar que, para a mistura dos microconcretos, é feita previamente a mistura dos materiais líquidos, ou seja, a água é misturada ao aditivo superplastificante e a nanossílica, de forma manual. Após a mistura dos materiais secos na betoneira, a solução contendo água, SP e NS são adicionados.

Importante também observar que, da quantidade de água calculada para cada traço, é adicionada a água de absorção do PSA, e descontada a água relativa à umidade superficial da areia e também aquela presente na solução aquosa da nanossílica.

3.4 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

O programa experimental das misturas desta pesquisa foi planejado considerando uma matriz 3x3, sendo três teores de PSA (0%; 0,2% e 0,3%) e três teores de NS (0%; 1% e 2%), todos com relação água/cimento de 0,30, totalizando nove misturas.

3.4.1 Mistura de referência

A composição do microconcreto de referência com relação $a/c = 0,30$ foi sugerida pelo comitê organizador TC 225-SAP (RILEM, 2012) para realização dos ensaios interlaboratoriais propostos pelo mesmo, e está demonstrada na Tabela 3-10. A relação a/c estabelecida de 0,30 é usual para concretos de alta resistência.

Tabela 3-10: Composição do microconcreto de referência.

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

3.4.2 Ajuste dos traços

O ajuste dos traços com relação $a/c = 0,30$ e diferentes teores de PSA e NS foi realizado de modo a manter o mesmo espalhamento (190 ± 10 mm), considerando os mesmos quantitativos da mistura de referência, aumentando-se o teor de aditivo superplastificante até se obter o espalhamento dentro do intervalo médio esperado. O teor de água adicionada para cura interna foi calculado adotando-se a absorção do PSA no meio cimentício igual a 15 g/g, conforme dito no item 3.3.5, e a massa do polímero seco utilizada para cada mistura. Na Tabela 3-11 é apresentada a composição dos microconcretos estudados nessa pesquisa, com suas respectivas quantidades.

Tabela 3-11: Composição dos microconcretos da pesquisa.

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

1. Adotou-se o valor de 15g/g para a absorção do PSA;

2. A umidade superficial da areia foi determinada pelo Frasco de Chapman ;

3. O teor de SP foi determinado experimentalmente até se obter o espalhamento desejado.

3.5 PRODUÇÃO DOS MICROCONCRETOS

3.5.1 Mistura

O roteiro de mistura para a produção dos microconcretos foi baseado nas recomendações do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012), para realização dos ensaios interlaboratoriais. Na Tabela 3-12 é apresentada a sequência e os tempos de mistura. A areia foi utilizada na condição com umidade superficial e procedeu-se à correção da umidade para a condição saturada com superfície seca (SSS). O PSA foi pré-misturado junto com os materiais secos. A contagem do tempo foi feita a partir da adição da água aos materiais secos.

Tabela 3-12: Roteiro de mistura dos microconcretos.

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

Para os ensaios realizados no Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) foi utilizada uma betoneira de eixo vertical com capacidade para 100 litros. A sala de dosagem de concreto não é climatizada e, portanto, os traços foram fabricados no

início do dia para minimizar os efeitos da temperatura. Para os ensaios realizados no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A. foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 320 litros. Antes do início de cada mistura, as betoneiras foram imprimadas com argamassa 1:1. A Figura 3-9 mostra o procedimento de fabricação dos microconcretos.

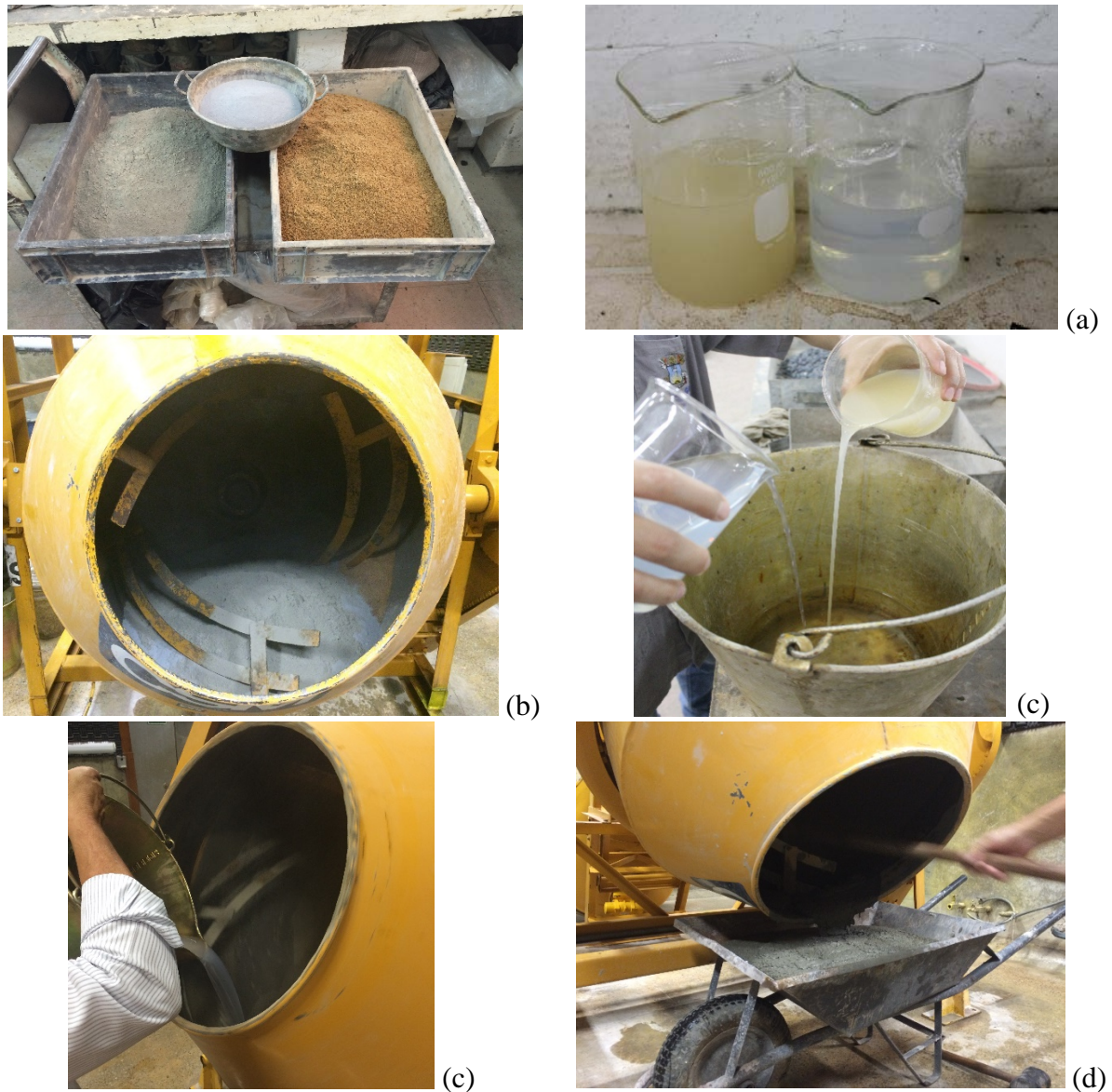


Figura 3-9: Fabricação dos microconcretos: (a) Pesagem dos materiais secos e líquidos; (b) Mistura dos materiais secos na betoneira; (c) Adição dos materiais líquidos (NS e SP) na água; (d) Adição da solução de água, NS e SP aos materiais secos na betoneira; (d) Mistura finalizada.

3.5.2 Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm (resistência à compressão) e prismáticos de 7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm (para ensaios de retração autógena) foi realizada em duas camadas, e então os corpos de prova foram levados para adensamento em mesa vibratória. Os corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm (para ensaio de módulo de elasticidade) e o corpo de prova prismático destinado ao ensaio de tempo zero, de 150 mm x 150 mm x 300 mm, foram moldados em três camadas, sendo os cilíndricos adensados com vibradores de imersão, e o CP prismático adensado com 30 golpes do soquete normal, por camada. Finalmente, a moldagem dos corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, destinados à resistência à tração na flexão, foi realizada em duas camadas e adensados em mesa de adensamento. Na Figura 3-10, são apresentadas as etapas de moldagem, adensamento e acabamento dos corpos de prova confeccionados.

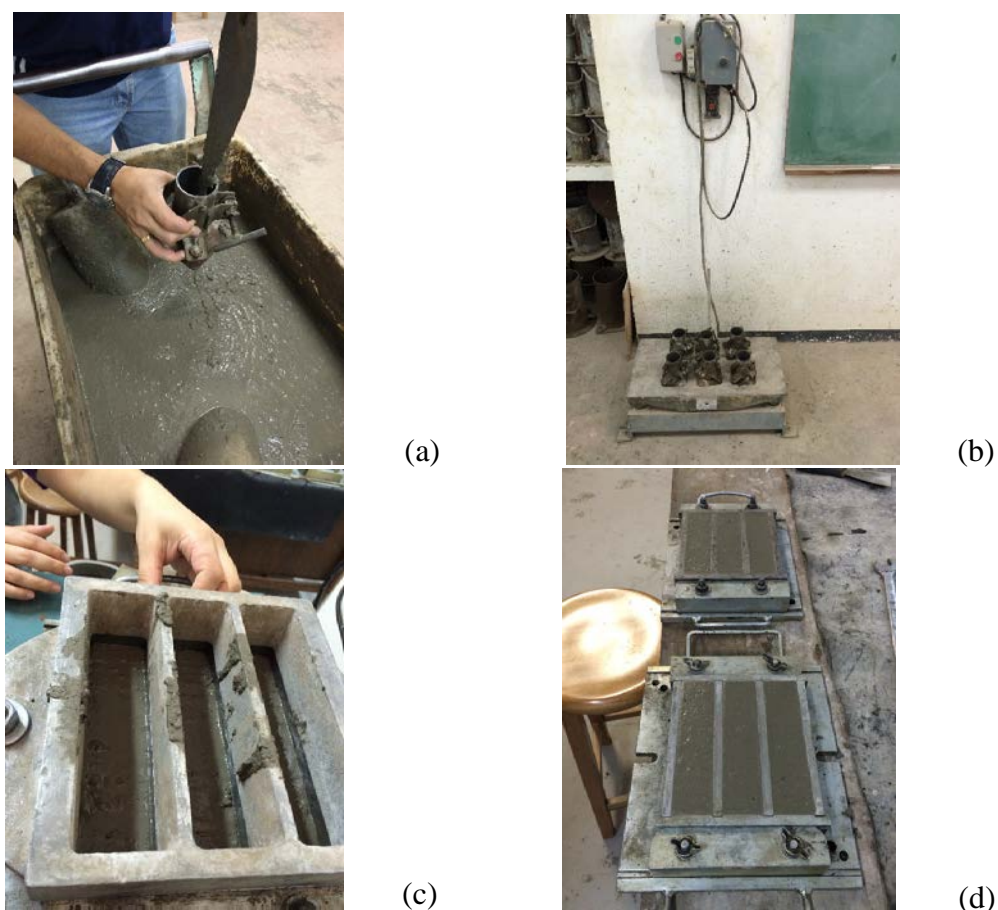


Figura 3-10: Moldagem dos corpos de prova: (a) Preenchimento das formas dos CPs cilíndricos 10x5cm; (b) Adensamento com mesa vibratória dos corpos de prova cilíndricos; (c) Adensamento com mesa de adensamento dos CPs prismáticos 4x4x16cm; (d) Corpos de prova prismáticos após a finalização e acabamento;

Após a moldagem, foi feito o acabamento da superfície dos corpos de prova com espátula e régua. Os corpos de prova destinados ao ensaio de propriedades no estado endurecido (propriedades mecânicas e módulo de elasticidade) foram cobertos com filme plástico, evitando a perda de água, até o desmolde, em 24 horas. Então, os mesmos foram medidos com paquímetro digital de resolução 0,01mm e pesados em balança digital com 0,01g de precisão, e posteriormente levados para câmara com 100% de umidade relativa, e imersos em solução de água com cal até a idade do ensaio. Os corpos de prova destinados aos ensaios de tempo zero e retração autógena foram lacrados, dentro de suas formas, com filme plástico e fita adesiva, de forma a evitar a perda de água, e então levados para serem acoplados nos respectivos equipamentos de leitura. Na Figura 3-11 é apresentado o processo de desforma e cura dos corpos de prova.

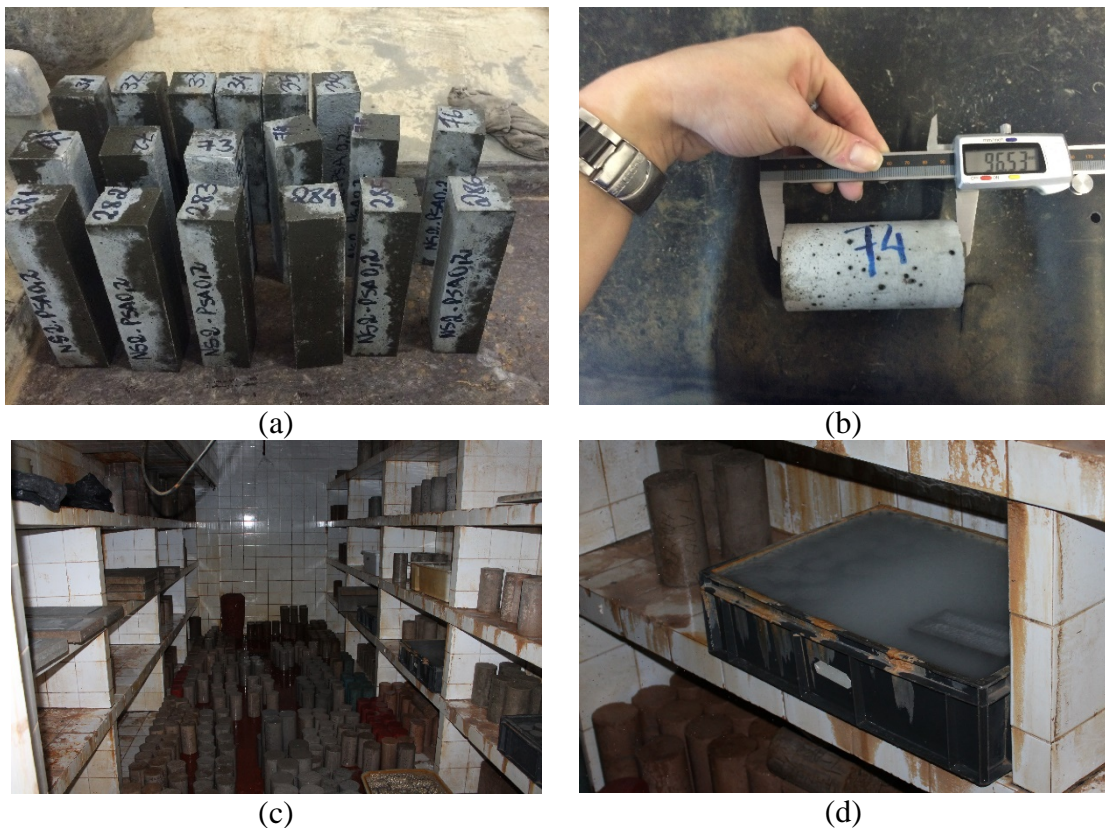


Figura 3-11: Desforma e cura dos corpos de prova: (a) desforma dos CPs prismáticos após 24 horas; (b) medição das dimensões dos CPs com paquímetro digital; (c) câmara úmida do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB); (d) Bandeja contendo os corpos de prova imersos em água com cal, dentro da câmara úmida.

3.6 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

3.6.1 Espalhamento pelo tronco de cone

Foi adotado o método do tronco de cone de *Hagermann*, de acordo com a norma DIN 18555-2 (1982), sem aplicação de golpes na mesa. Este método foi recomendado pelo Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012). O ensaio consiste na colocação do microconcreto no tronco de cone em duas camadas, cada uma recebendo 10 golpes uniformemente distribuídos com soquete normal. Logo após o adensamento levanta-se lentamente o tronco de cone para fazer a medição do espalhamento. Para fins comparativos também foram realizados o ensaio de espalhamento de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 13276 (2005), moldado em 3 camadas, sendo a primeira adensada com 15 golpes do soquete normal, a segunda com 10 golpes e a terceira com 5 golpes, sem aplicação de golpes na mesa. O espalhamento é mostrado na Figura 3-12a.

3.6.2 Penetração de cone

O ensaio de penetração de cone tem como referência a Norma ASTM C780 (2014). A amostra foi colocada no recipiente cilíndrico, em três camadas iguais ao longo da altura, aplicando 20 golpes em cada, com espátula. A amostra é então colocada rente à parte inferior do cone de tal forma que o mesmo fique no ponto correspondente ao eixo do recipiente, tocando na superfície da amostra. Na sequência, libera-se o dispositivo em queda livre, permitindo que o mesmo penetre na amostra. Passados dez segundos registra-se a profundidade de penetração do cone, em milímetros (Figura 3-12b).

3.6.3 Teor de ar incorporado

A determinação do teor de ar incorporado nos microconcretos foi realizada pelo método pressométrico, segundo a norma ABNT NBR NM 47 (2002). Este método determina a porcentagem de ar que não foi possível expulsar durante as operações de mistura e adensamento, e o ar introduzido deliberadamente no concreto. Para tal, coloca-se a amostra em um recipiente cilíndrico, adensada com espátula em três camadas homogêneas. O método é baseado na relação entre o volume de ar e a pressão aplicada, numa temperatura constante, sem necessidade de cálculos adicionais, pois o equipamento já fornece a leitura em porcentagem de ar. Então, procede-se o fechamento hermético do equipamento por meio

das chaves que se encontram na tampa e a abertura da válvula de ar principal. Por fim, bate-se ligeiramente no manômetro para estabilizar a pressão e procede-se a leitura da porcentagem de ar (Figura 3-12c).

3.6.4 Densidade

A densidade no estado fresco dos microconcretos foi determinada conforme procedimento estabelecido pela Norma ABNT NBR 13278 (2005). O ensaio consiste na razão entre a massa do microconcreto (determinada em balança com resolução de 0,01g) e o volume necessário para preencher um recipiente de volume conhecido. O recipiente utilizado para a determinação da densidade é o mesmo utilizado no ensaio de penetração de cone e possui volume de 400 ml (Figura 3-12b).

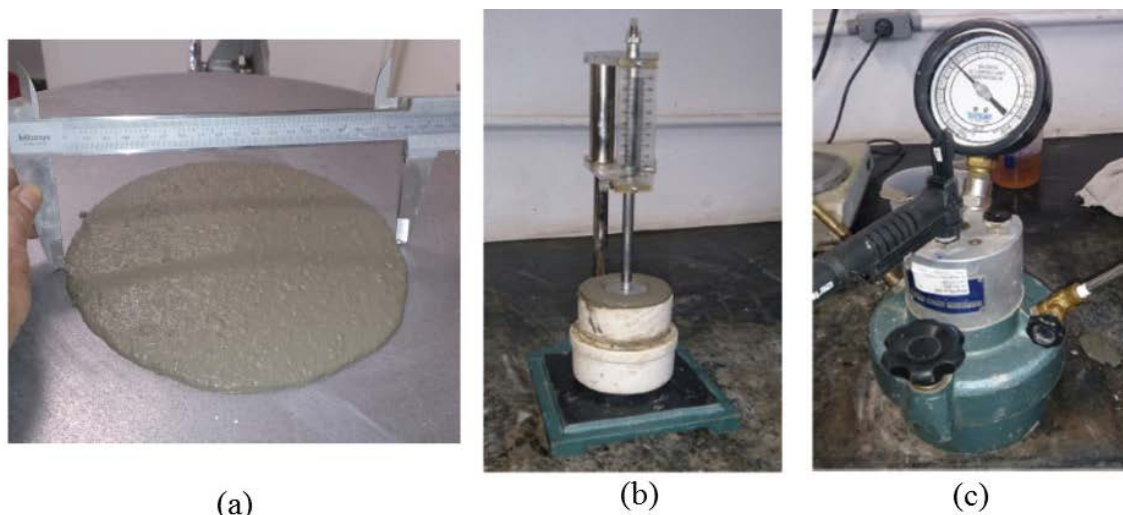


Figura 3-12: Ensaio no estado fresco: (a) espalhamento pelo tronco de cone; (b) penetração de cone e densidade; (c) teor de ar aprisionado (MANZANO, 2014).

3.7 TEMPO ZERO (T_0)

Segundo Silva (2007), os primeiros ensaios utilizando o método do pulso ultrassônico para determinação da pega dos concretos foi proposto por Casson e Domone em 1982. Os autores usaram o método para mostrar a influência da temperatura e dos aditivos no tempo de pega. Também apresentam uma correlação razoável entre a derivada da velocidade do pulso ultrassônico (em relação ao tempo) e a máxima velocidade da reação de hidratação.

A metodologia para determinar o tempo de transição suspensão-sólido (tempo zero) utilizada nesta pesquisa foi proposta por Silva (2007), sendo utilizada como referência a

norma ABNT NBR 8802 (2013). A finalidade do ensaio é determinar a velocidade propagação de uma onda ultrassônica através do tempo necessário para que a mesma percorra uma distância conhecida. O ensaio é realizado nas primeiras 48 horas após a moldagem, a partir do momento de adição da água. O procedimento é descrito a seguir:

1. Fabricar o concreto com ambiente e materiais constituintes na temperatura (21 ± 2 °C);
2. Aferir o equipamento usando a barra de referência metálica, que acompanha o aparelho, com vibração do tempo de trânsito conhecida;
3. Colocar uma camada fina de gel de silicone nas faces dos transdutores, para garantir contato contínuo entre sua superfície e o concreto;
4. Acoplar o receptor e transmissor nos furos existentes nas laterais da forma, penetrar os transdutores de modo a facear a forma internamente, proporcionando um arranjo com transmissão direta do pulso elétrico em onda de choque;
5. Moldar o corpo de prova em forma prismática, com seção transversal de 150 mm x 150 mm e comprimento de 300 mm, adensado manualmente com soquete do cone de Abrams, em três camadas de 30 golpes cada;
6. Cobrir a superfície exposta com filme plástico e fita adesiva, evitando a fuga de água;
7. A aquisição dos dados de velocidade de propagação da onda longitudinal, durante as primeiras 48 horas após a moldagem. O intervalo entre as leituras é de 3 minutos;
8. Traçar a curva velocidade de propagação versus idade do concreto.
9. O patamar de percolação (tempo zero) é assumido como sendo a idade do concreto onde houve um aumento brusco na velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Este ensaio foi realizado no laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., para cada um dos nove microconcretos Na Figura 3-13 é mostrado o esquema geral do ensaio, e na Figura 3-14 é mostrado o ensaio realizado no laboratório de FURNAS.

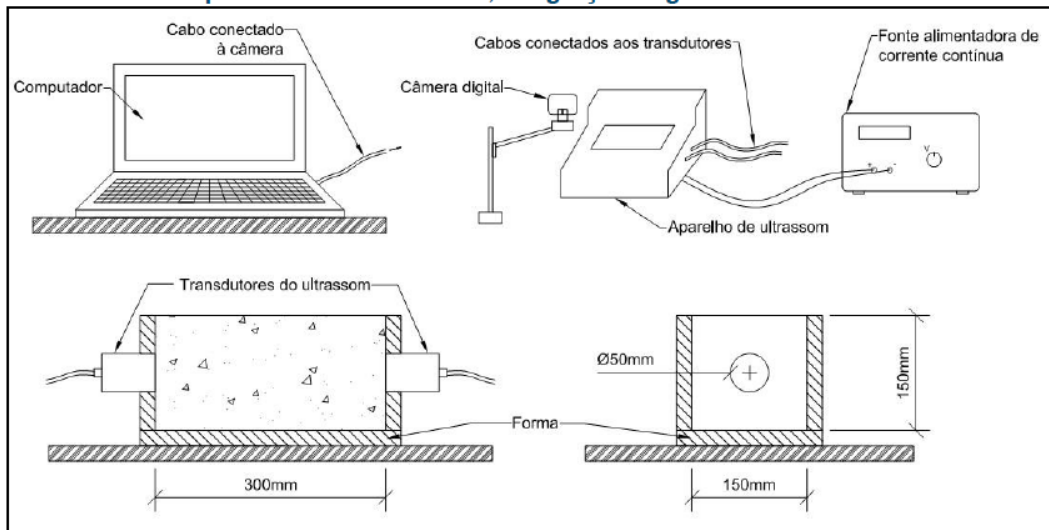


Figura 3-13: Esquema ensaio de determinação do Tempo Zero (T_0) pelo método do pulso ultrassônico (SILVA, LOPES, *et al.*, 2011a).

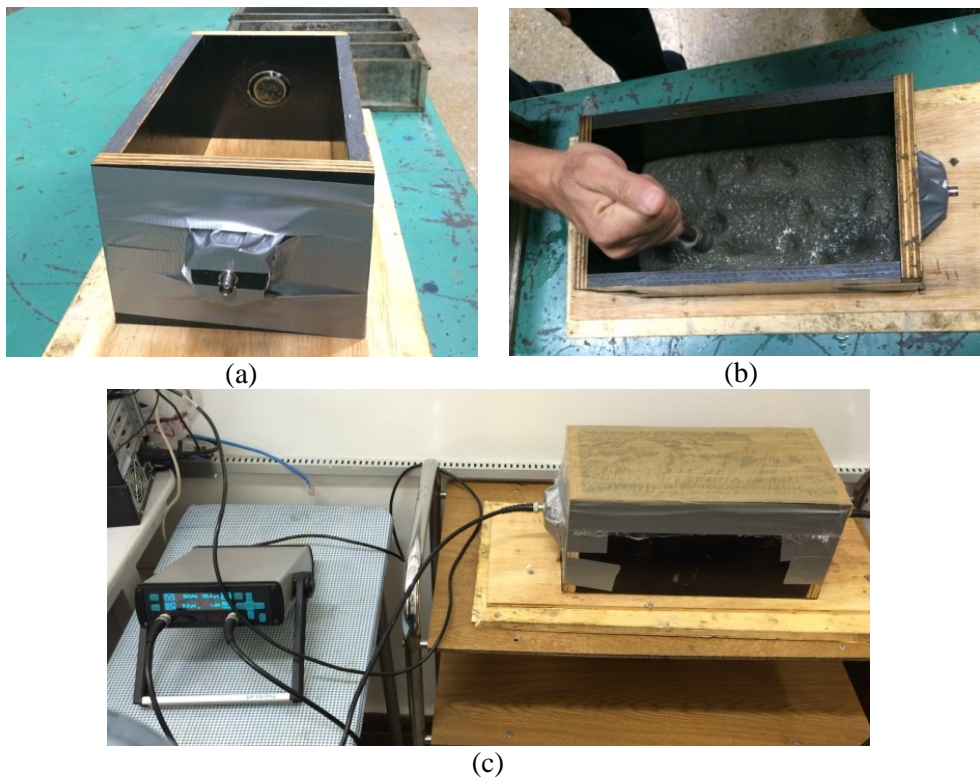


Figura 3-14: Ensaio de determinação do tempo zero: (a) Forma utilizada para moldagem do CP prismático 15x15x30cm, com os transdutores acoplados; (b) adensamento do material; (c) Corpo de prova acoplado ao equipamento.

A Tabela 3-13 mostra um resumo das propriedades no estado fresco dos microconcretos determinadas nesta pesquisa.

Tabela 3-13: Resumo das propriedades no estado fresco determinadas.

Propriedade	Dimensão do corpo de prova	Nº de Corpos de Prova	Laboratório
Tempo Zero	15 x 15 x 30 cm	1	FURNAS
Teor de ar incorporado	Volume = 0,1 cm ³	1	LEM
Espalhamento tronco de cone	Diâmetro = 8,5 cm Altura = 6 cm	2	LEM
Densidade e penetração de cone	Volume = 0,04 cm ³	1	LEM

3.8 RETRAÇÃO AUTÓGENA

A metodologia para determinação da retração autógena utilizada neste trabalho foi a mesma adotada por Silva (2007), baseada na metodologia proposta por Terzawa (1999), com modificações. O procedimento inclui a moldagem de três corpos de prova prismáticos com dimensões 7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm provenientes de uma mesma betonada, para cada uma das nove misturas. A determinação foi realizada a partir do tempo zero, de forma contínua, até 28 dias. As formas metálicas usadas no ensaio foram preparadas com antecedência e forradas por folhas de poliestireno (espessura 3 mm), para diminuir o atrito entre o material e as paredes da forma e permitir movimentação. Foram instalados dois pinos metálicos rosqueados nas extremidades, que coincidem com o eixo longitudinal da amostra, e mediu-se a distância entre os mesmos (as deformações são determinadas nesse comprimento).

As três formas foram preenchidas em duas camadas e adensadas em mesa vibratória. Em seguida, cobriu-se a superfície exposta com uma folha de poliestireno e a amostra foi envolvida, juntamente com a forma, com várias camadas de filme plástico e fita adesiva, com o intuito de minimizar a perda de água por evaporação. O conjunto foi então pesado e levado para sala com umidade ($50 \pm 2\%$) e temperatura (21 ± 2 °C) controladas. A pesagem do molde preenchido tem o intuito de avaliar a perda de massa de água verificada após o término do ensaio (28 dias).

Um esquema geral do ensaio é apresentado na Figura 3-15. Na Figura 3-16 é mostrado o ensaio realizado no LEM/UnB.

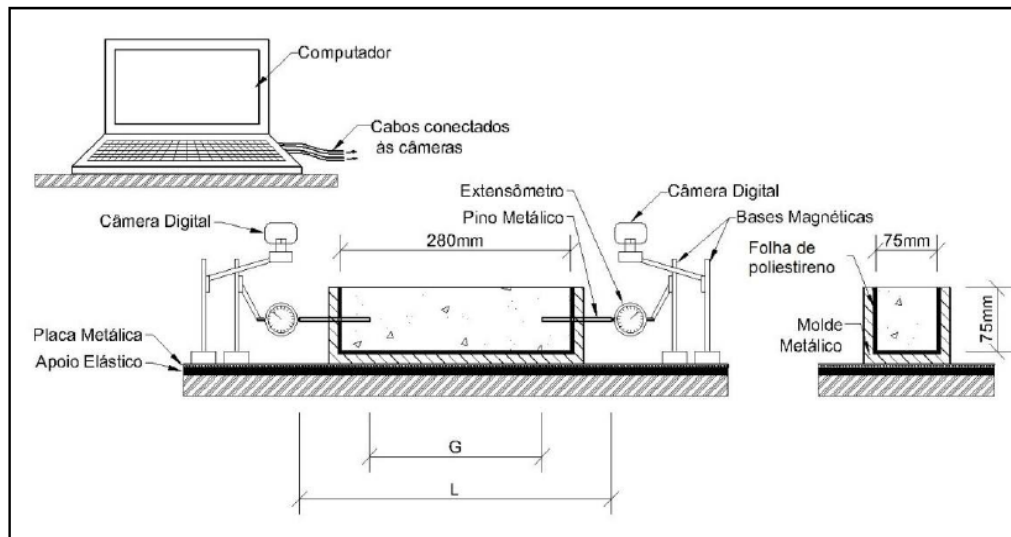


Figura 3-15: Esquema para ensaio de retração autógena (SILVA, LOPES e LATIF, 2011b).

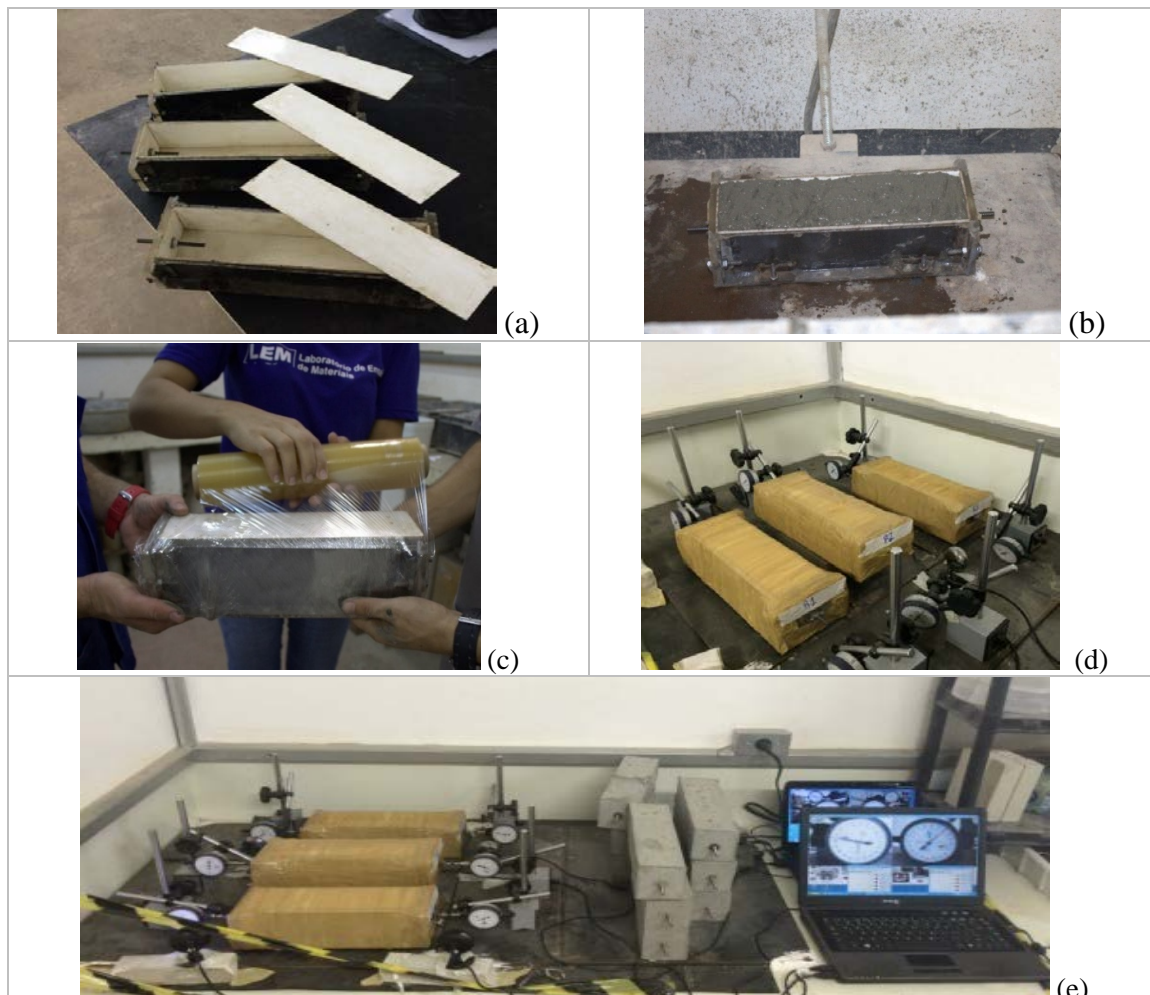


Figura 3-16: Ensaio de retração autógena: (a) Preparação das formas; (b) adensamento em mesa vibratória; (c) Finalização e lacre dos corpos de prova com filme plástico; (d) CPs lacrados e posicionados sobre placa metálica em sala climatizada; (e) CPs acoplados aos extensômetros para aquisição dos dados por meio de fotografia digital.

Os corpos de prova foram colocados sobre base metálica numa bancada e, depois de ultrapassado o tempo zero, iniciou-se a determinação da retração autógena, acoplado um extensômetro em cada um dos pinos das extremidades. Realizou-se a leitura por meio de câmeras digitais ligadas a dois computadores e posicionadas frente aos extensômetros, de forma tal que realizem o registro de imagens dos deslocamentos dos ponteiros dos extensômetros em intervalos de tempo pré-determinados, 24 horas por dia, sem a necessidade de acompanhamento do técnico. Após 28 dias finaliza-se o ensaio e o conjunto molde e corpo de prova é novamente pesado para a verificação da perda de massa de água.

3.9 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios de determinação das propriedades no estado endurecido foram realizados conforme o planejamento mostrado na Tabela 3-14.

Tabela 3-14: Planejamento dos ensaios de propriedades mecânicas.

Ensaio	Idade (dias)	Dimensão dos CPs (cm)	Nº de CPs	Laboratório
Resistência à compressão em cilindros	7 e 28	5 x 10	6	LEM
Resistência à compressão em cubos	7 e 28	4 x 4 x 4	12	LEM
Resistência à tração na flexão	7 e 28	4 x 4 x 16	6	LEM
Módulo de elasticidade	28	10 x 20	3	FURNAS

Os CPs confeccionados para as propriedades mecânicas são apresentados na Figura 3-17.



Figura 3-17: Corpos de prova pra ensaios de propriedades mecânicas: (a) Corpos de prova prismáticos de 4x4x16cm para ensaio de tração na flexão e compressão em cubos, devidamente identificados após a desforma; (b) Cilindros 5x10cm para resistência a compressão após a desforma; (c) Moldagem dos cilindros 20x10cm pra ensaio de módulo de elasticidade.

3.9.1 Resistência à compressão em cilindros

O ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UnB (LEM/UnB) é apresentado abaixo, na Figura 3-18.

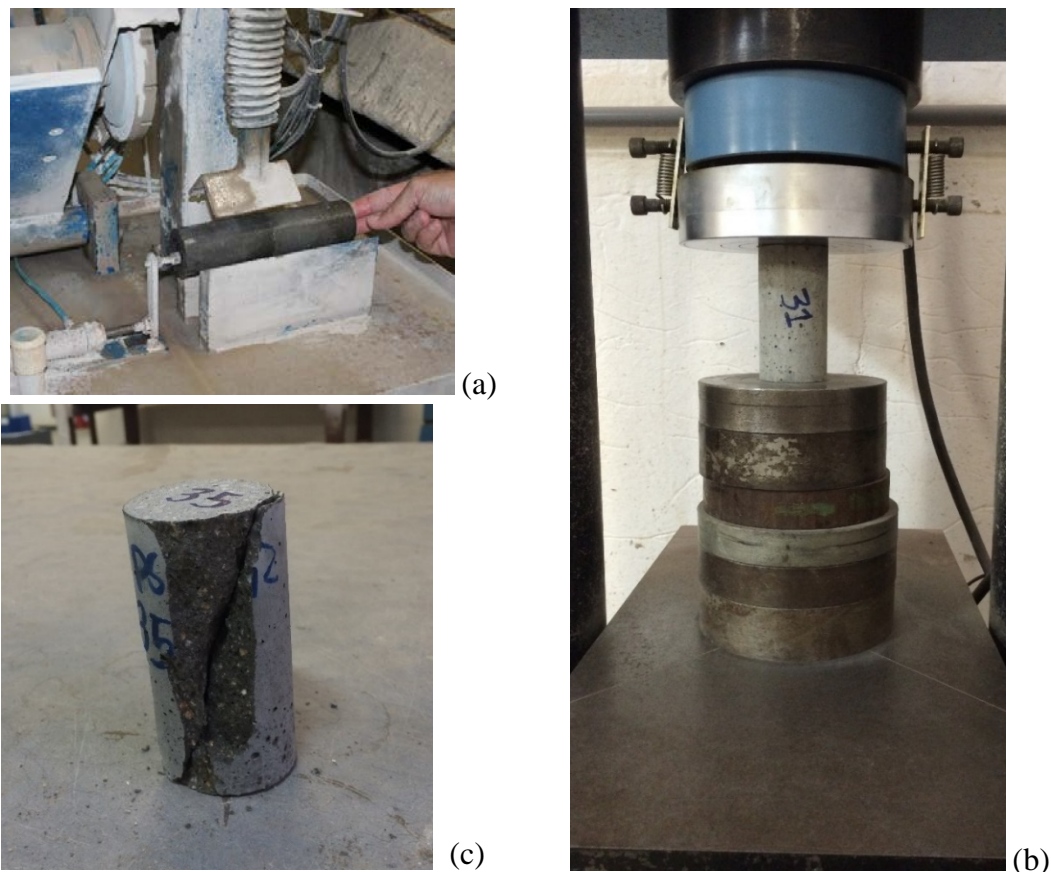


Figura 3-18: Ensaio de resistência a compressão em cilindros: (a) retificação das bases e topos dos CPs; (b) Prensa utilizada na ruptura dos CPs; (c) Corpo de prova rompido após o ensaio.

A resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos foi determinada segundo a Norma ABNT NBR 5739 (2007). Antes da execução do ensaio, realizou-se a retificação da base e o topo dos corpos de prova, de forma eliminar qualquer irregularidade superficial e obter bases paralelas entre si. O equipamento utilizado para ruptura foi uma prensa de marca Dinateste, com 100 toneladas de capacidade. A determinação da força foi realizada com auxílio de célula de carga do mesmo fabricante, com indicador digital com resolução de 0,01 tonelada.

3.9.2 Resistência à compressão em cubos

Os ensaios de determinação da resistência à compressão em cubos também foram efetuados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB), segundo a norma ABNT NBR 13279 (2005). Neste ensaio, utilizaram-se as metades dos corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm, provenientes da ruptura à flexão, apoiadas em bases metálicas de 4x4 cm, de forma a garantir que a área de contato com a prensa seja sempre igual a 16 cm². O ensaio foi realizado no mesmo equipamento do item anterior e estão mostrados na Figura 3-19 a seguir.

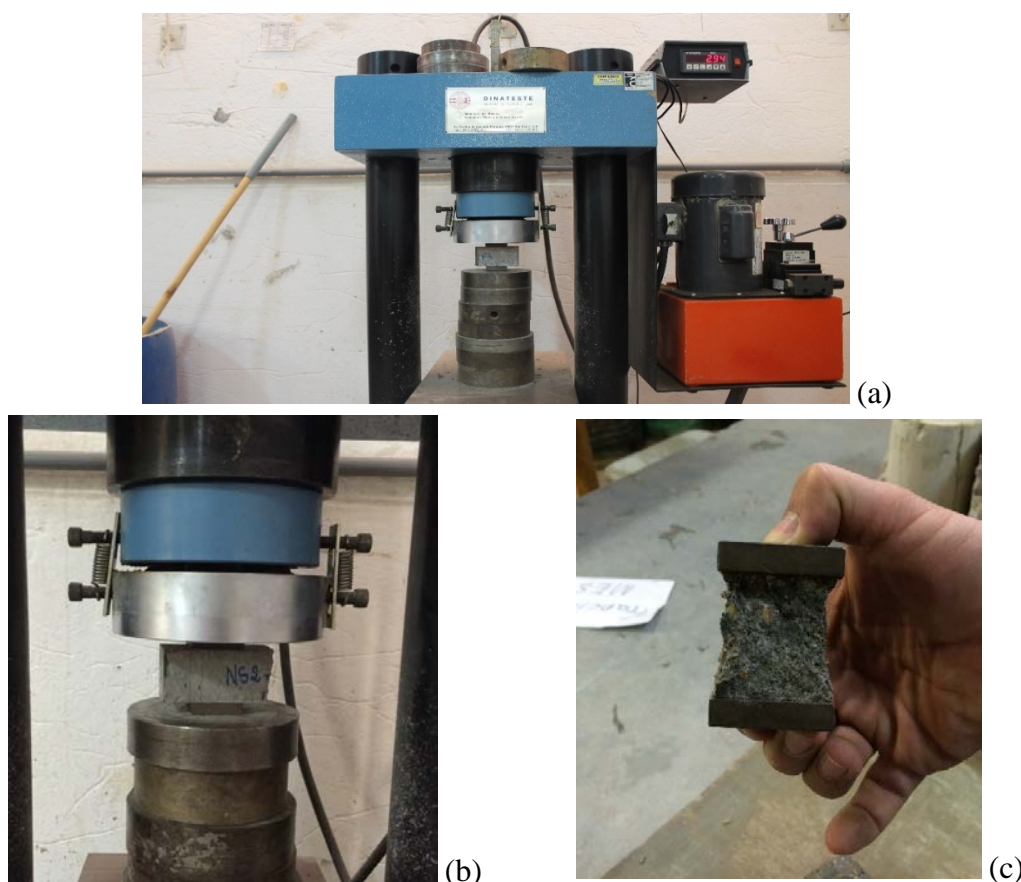


Figura 3-19: Ensaios de resistência à compressão em cubos: (a) Prensa Dinateste do LEM/UnB utilizada nos ensaios de resistência à compressão, com célula de carga com resolução de 0,01 ton.; (b) detalhe do posicionamento do CP na prensa, entre bases metálicas; (c) corpo de prova após a ruptura.

3.9.3 Resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos foi realizada segundo as prescrições da Norma ABNT NBR 13279 (2005), no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB). Os corpos de prova foram marcados em três posições,

com caneta permanente, a saber: na metade, e a 4cm de cada uma das extremidades, demarcando os pontos onde serão apoiados durante o ensaio. Então, executou-se o ensaio de flexão em três apoios numa prensa de operação manual com 10 toneladas de capacidade, e equipada com célula de carga de precisão de 1kg. A execução do ensaio de ruptura dos corpos de prova à flexão é mostrada na Figura 3-20.

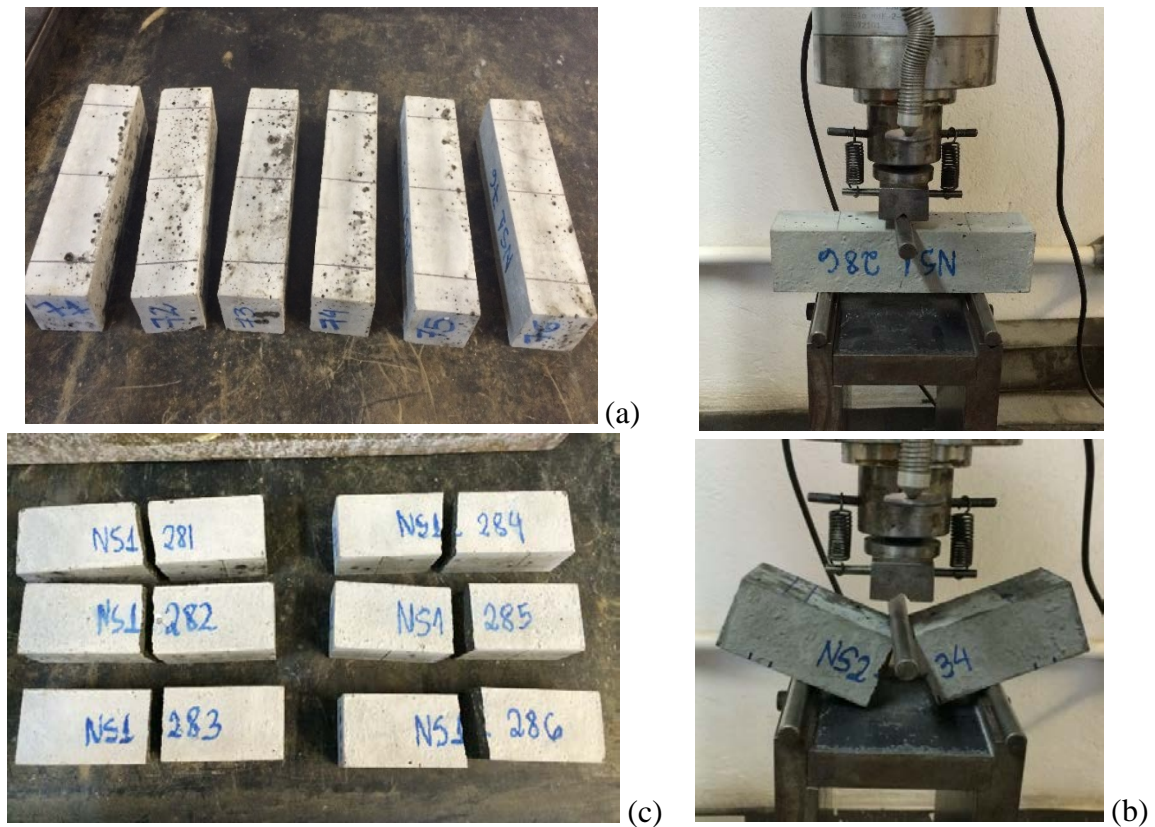


Figura 3-20: Ruptura de corpo de prova à flexão: (a) Marcação das posições de apoio do CP na prensa; (b) Posicionamento do corpo de prova na prensa antes e após o ensaio; (c) padrão de ruptura dos prismas à flexão em uma mesma idade.

3.9.4 Módulo de elasticidade

Seguindo as prescrições da ABNT NBR 8522 (2011), os ensaios para determinar o módulo de elasticidade dos microconcretos foram realizados nas instalações do Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A.. Os corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade tiveram seus topos retificados assim como aqueles destinados ao ensaio de resistência à compressão. Para a realização do ensaio, determinou-se a resistência à compressão em dois corpos de prova de 10 cm x 20 cm, para a elaboração de um plano de carregamento, definindo a tensão limite superior (igual a 30% da tensão de ruptura) e limite inferior (0,5 MPa). Então, três corpos de prova de uma mesma betonada foram

submetidos a quatro ciclos de carregamento e descarregamento, obedecendo à velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Nesses intervalos determinaram-se as deformações com ajuda de extensômetros posicionados nas duas geratrizes opostas.

Após a leitura, se necessário, e carregou-se o corpo de prova novamente com igual velocidade, até que ocorresse a ruptura. Então, calcula-se o módulo de elasticidade secante em GPa.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os nove microconcretos estudados. Foram avaliados os resultados das propriedades no estado fresco, a retração autógena e as propriedades no estado endurecido. Para cada uma das propriedades foram analisados, separadamente, o efeito da:

- Influência do teor de polímero superabsorvente (PSA);
- Influência do teor de nanossílica (NS);
- Influência do uso combinado de PSA e NS.

4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Como citado no capítulo 3, os ensaios realizados no estado fresco foram: a determinação do espalhamento pelo método do tronco de cone segundo a Norma DIN 18555-2 (1982) e segundo a Norma ABNT NBR 13276 (2005), ambos sem os golpes da mesa; penetração de cone, conforme prescrito na Norma ASTM C780 (2014); determinação do teor de ar aprisionado segundo a Norma ANBT NBR NM 47 (2002), densidade no estado fresco pela Norma ABNT NBR 13278 (2005) e tempo zero, segundo a NBR NM 58, modificada por Silva (2007). As propriedades no estado fresco foram determinadas para cada moldagem, sendo o resultado o valor médio entre duas determinações: uma realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB e a outra realizada no Laboratório de FURNAS Centrais Hidroelétricas S.A. Na Tabela 4-1 é mostrada a média dos resultados dos diferentes ensaios realizados.

Tabela 4-1: Resumo dos resultados das propriedades no estado fresco

TRAÇOS	Teor adições (%)			Resultados obtidos				
	PSA	NS	SP	Espalhamento		Densidade est. fresco (g/ml)	Teor de ar (%)	Penetração de cone (mm)
				DIN (mm)	NBR (mm)			
REF	0	0	2,6	193	233	2,316	1,7	83
PSA02	0,2	0	3	193	225	2,257	2,4	80
PSA03	0,3	0	3,2	192	220	2,243	2,9	80
NS1	0	1	3	187	196	2,307	3,2	79
NS2	0	2	3,5	193	222	2,315	3,4	83
PSA02-NS1	0,2	1	3,2	188	206	2,27	3,3	78
PSA02-NS2	0,2	2	3,5	180	195	2,225	3,2	69
PSA03-NS1	0,3	1	3,5	198	210	2,258	3,8	81
PSA03-NS2	0,3	2	3,9	180	199	2,257	3,4	73

4.1.1 Espalhamento

Os valores de espalhamento pelo tronco de cone da Norma DIN 18555-2 (1982), sem golpes da mesa, ficaram dentro do intervalo estipulado no programa experimental (190 ± 10 mm), em todas as misturas, valores estes alcançados por meio da variação do teor de aditivo superplastificante e adicionando-se a quantidade de água de cura interna específica para cada microconcreto. Os resultados do espalhamento determinados pela Norma Brasileira NBR 13276 (2005) foi determinado para fins comparativos e situam-se dentro do intervalo de 195 a 233 mm, ou seja, 215 ± 20 mm. Na Figura 4-1 são apresentados os valores de espalhamento obtidos segundo as duas normas utilizadas.

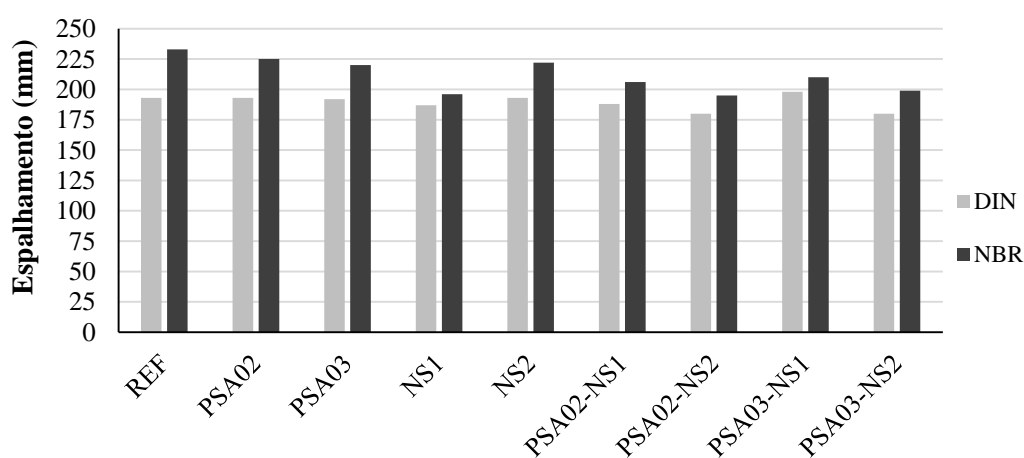


Figura 4-1: Valores de espalhamento dos microconcretos estudados.

O parâmetro espalhamento foi fixado nas premissas da pesquisa. Logo, o resultado desta propriedade indica que os microconcretos estudados obtiveram valores de acordo com previsto no programa experimental.

a) Influência do teor de polímero superabsorvente (PSA)

Nas misturas contendo apenas PSA, em relação ao traço de referência, houve uma demanda maior de aditivo superplastificante (aumento de 15 e 23% para os traços PSA02 e PSA03, respectivamente). Esperava-se que a adição da água de cura interna aos microconcretos contendo PSA seria suficiente para alcançar o espalhamento especificado. Tal fato parece corroborar a hipótese de que o PSA tem influência na reologia dos microconcretos, conforme colocado por Manzano (2014). Ressalta-se ainda que, mesmo na mistura de referência, o teor de superplastificante utilizado foi bastante elevado (2,6%), situando-se acima da recomendação do fabricante.

b) Influência do teor de nanossílica (NS)

Nas misturas contendo apenas NS também houve necessidade de se elevar a quantidade de superplastificante utilizada, de modo à atingir o espalhamento especificado (foi utilizado 15 e 35% a mais de SP nas misturas NS1 e NS2, respectivamente). Segundo Morais (2012), quando a nanossílica é incorporada na mistura, esta exerce influência direta na demanda de água, pois aumenta o empacotamento das partículas, diminuindo a distância entre elas. Como a quantidade de água foi fixada em todas as misturas, era esperado que houve uma demanda maior de aditivo superplastificante nos traços contendo esta adição.

c) Influência do uso combinado de PSA e NS

Pelo exposto anteriormente, foi constatado também que nas quatro misturas contendo adição simultânea de PSA e NS houve uma perda de trabalhabilidade, ocasionando redução no espalhamento. Nestes traços, a efetividade da mistura foi reduzida, sendo necessário tempo adicional de mistura para atingir o espalhamento. Nestes microconcretos o teor de superplastificante adotado foi superior ao utilizado na referência, particularmente nos maiores teores utilizados (aumento de 23 e 35% para os traços PSA02-NS1 e PSA02-NS2, e aumento de 35 e 50% para os traços PSA03-NS1 e PSA03-NS2), corroborando com os resultados das adições isoladas, onde ambas causam redução na trabalhabilidade e consequente aumento no consumo de SP para obter o mesmo espalhamento. Contudo, é possível notar que a influência da NS no consumo de SP é mais pronunciada que o efeito do PSA. Isso pode estar relacionado com os teores mais elevados desta adição utilizados.

4.1.2 Penetração de cone

Segundo Angelim (2000), os resultados obtidos por meio do ensaio de penetração de cone apresentam uma forte correlação com a tensão de escoamento, uma propriedade reológica do material. Os resultados obtidos nesta pesquisa foram maiores que o limite mínimo para consistência de argamassas de revestimentos estabelecido pelo autor, para que o material seja considerado fluído, cujo valor é de 69 mm. Portanto, as misturas estudadas nesta pesquisa podem ser classificadas como microconcretos muito fluidos. Na Figura 4-2 são mostrados os resultados da penetração de cone das nove misturas estudadas.

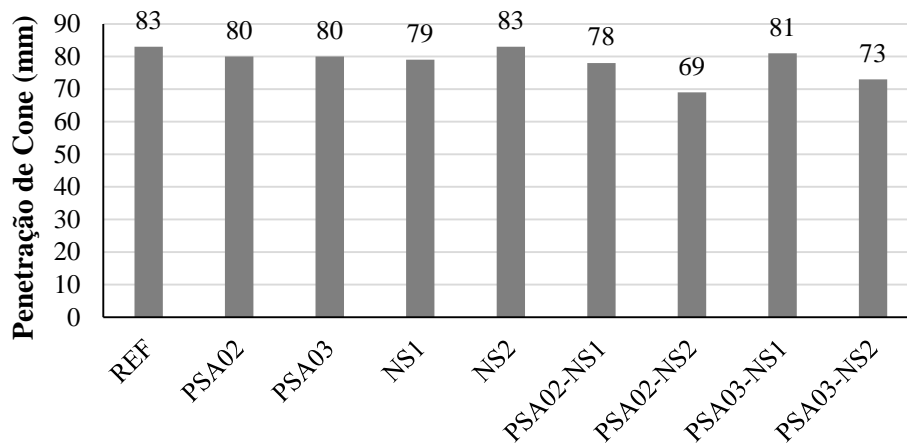


Figura 4-2: Valores determinados para Penetração de cone das misturas estudadas.

a) Influência da adição de PSA

Conforme encontrado por Manzano (2014) e Suárez (2015), a mistura contendo PSA apresenta ligeira queda na penetração de cone (96% para ambas as misturas PSA02 e PSA03). Esta redução está diretamente relacionada com a perda de trabalhabilidade verificada no ensaio de espalhamento. (Item 4.1.1 deste trabalho).

Os resultados obtidos por Traldi e Aguirre (2013) no mesmo ensaio, foram 67 mm para o microconcreto de referência ($a/c = 0,30$), e 70 mm com adição de 0,3% de PSA, que corresponde a 95% da referência.

b) Influência da adição de NS

As misturas contendo adição de NS apresentaram valores variáveis de penetração de cone, uma vez que esta medida está relacionada com a fluidez do material, que depende do teor de SP utilizado. É possível fazer uma correlação com o resultado obtido no ensaio de espalhamento, onde se verifica que os traços que obtiveram maiores valores de penetração de cone são aqueles que obtiveram também o maior valor de espalhamento.

c) Influência do uso combinado de PSA e NS

As misturas híbridas, contendo ambas as adições, apresentaram valores de penetração de cone que não variaram expressivamente do valor obtido para a mistura de referência. Esta medida está relacionada com a fluidez do material, o que depende do teor de SP utilizado.

4.1.3 Teor de ar incorporado

Os valores obtidos para o teor de ar incorporado das nove misturas estudadas são apresentados na Figura 4-3.

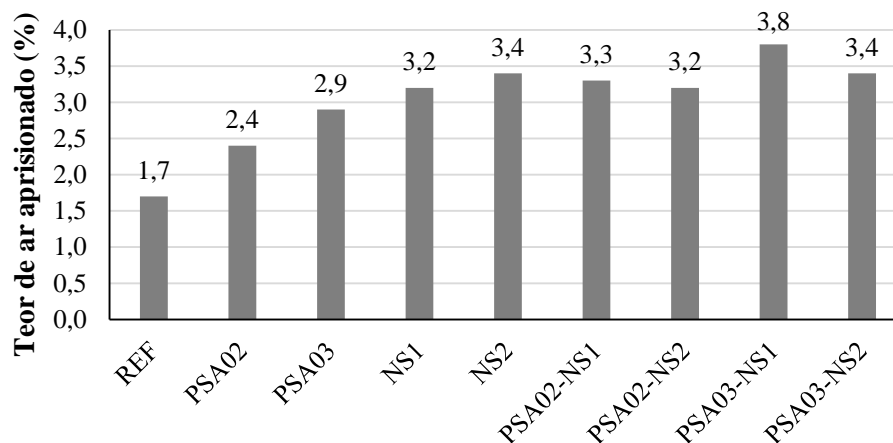


Figura 4-3: Teor de ar incorporado das misturas estudadas

a) Influência do teor de polímero superabsorvente (PSA)

Os resultados de Manzano (2014) e Suárez (2015) sobre a influência do teor de PSA no ar incorporado é representada na Figura 4-4a. Observa-se que a adição de polímero superabsorvente tem grande influência no teor de ar incorporado do microconcreto, chegando a proporcionar um aumento de 71% em relação ao traço de referência. A maior presença de bolha de ar, deixadas na matriz durante o processo de liberação da água de cura pelo PSA parece justificar este comportamento, que também pode afetar o desenvolvimento das propriedades mecânicas, conforme será mostrado no item 4.3.

LAUSTSEN et. al. (2008) concluíram que as misturas de concreto contendo alguns tipos de PSA apresentaram vantagens sobre os aditivos químicos incorporadores de ar tradicionais, como estabilidade do sistema de vazios de ar e controle, tanto da quantidade de ar incorporado, como do tamanho dos vazios de ar. Esses pesquisadores proporcionam informação valiosa sobre o uso potencial do PSA como aditivo incorporador de ar para melhorar o comportamento do concreto nos ciclos de gelo-degelo.

Em pesquisa desenvolvida por Mechtcherine *et al.* (2013a), os resultados do ensaio de teor de ar aprisionado foram 2,8% para a mistura de referência ($a/c = 0,30$), e 3,2% para a mistura com adição de 0,3% de PSA. Embora, o resultado obtido nesta pesquisa para o microconcreto de referência tenha sido inferior (1,7%) o resultado para a mistura com 0,3% de PSA foi próximo

ao obtido por estes pesquisadores (2,9%). Nas duas pesquisas foi observado um incremento expressivo no teor de ar aprisionado com a adição de PSA.

b) Influência do teor de nanossílica (NS)

A influência do teor de NS no ar incorporado é representada na Figura 4-4b. O aumento do teor de nanossílica também causou aumento no teor de ar incorporado, o que está de acordo com os resultados obtidos por Senff *et al.* (2009b). Segundo os autores, a presença de nano partículas de sílica causa a diminuição na densidade no estado fresco, o que interfere no teor de ar incorporado. O resultado obtido pelo pesquisador é apresentado na Figura 4-5.

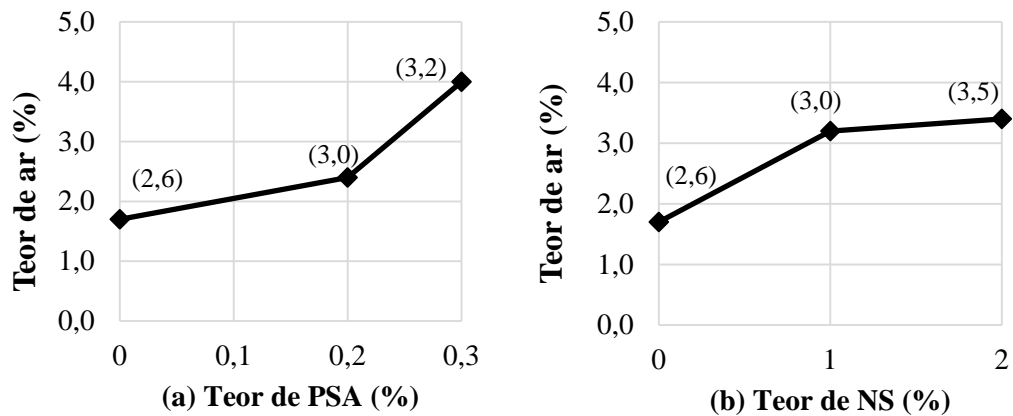


Figura 4-4: Teor de ar incorporado em relação ao teor de PSA (a) e ao teor de NS (b). Entre parênteses encontra-se o teor de superplastificante de cada mistura.

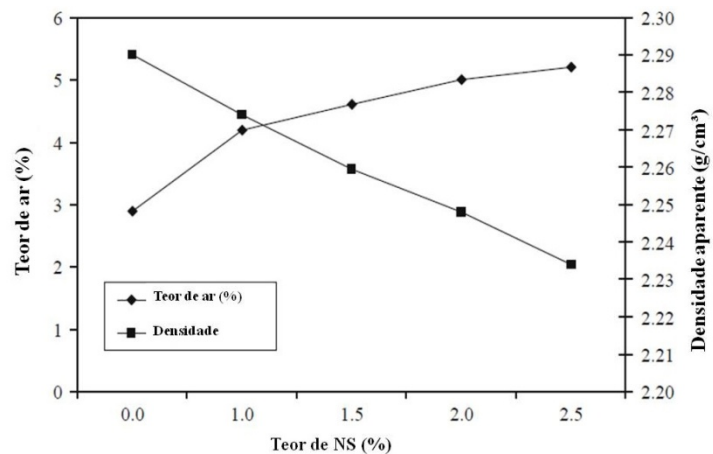


Figura 4-5: Variação do teor de ar incorporado e da densidade aparente em função da adição de nanossílica obtidos por Senff *et al.* (2009b).

c) Influência do uso combinado de PSA e NS

O teor de ar das misturas contendo as duas adições se manteve num patamar elevado, conforme era esperado, já que ambas as adições causam aumento nesta propriedade. No entanto, os efeitos não foram somados, uma vez que o valor obtido para estas misturas estão muito próximos dos valores obtidos para os traços contendo apenas adição de NS.

Suarez (2015), ao comparar misturas com relações a/c de 0,30, 0,35 e 0,40, sem adição de PSA, verificou que os resultados do teor de ar incorporado das misturas eram muito próximos (1,7%, 1,6% e 1,6%, respectivamente), apesar do teor do aditivo superplastificante não ter se mantido constante (consumo de aditivo igual a 2,6%, 1,6% e 1,3%, respectivamente), mostrando que o SP não exerce influência considerável nesta propriedade.

No entanto, é sabido que o teor de superplastificante, quando utilizado acima dos limites recomendados pelo fabricante, como é o caso desta pesquisa, pode incorporar ar na mistura (MANZANO, 2014). Como o teor de superplastificante aumentou expressivamente com o aumento do teor de nanossílica, pode-se sugerir que o aumento do teor de ar incorporado também está relacionado com o aumento da quantidade de aditivo utilizado na mistura.

4.1.4 Densidade

Os valores de densidade no estado fresco obtidos para as nove misturas estão representados na Figura 4-6.

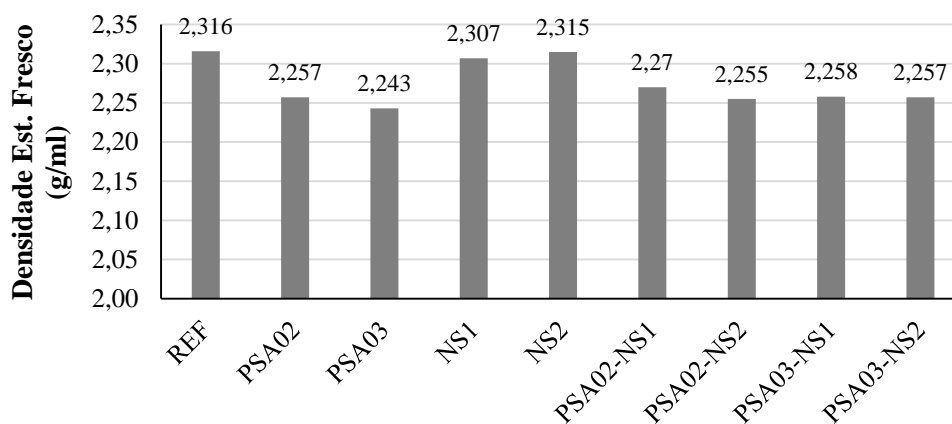


Figura 4-6: Densidade no estado fresco das misturas estudadas.

a) Influência do teor de polímero superabsorvente (PSA)

Os resultados obtidos por Manzano (2014) e Suárez (2015) mostram uma diminuição na densidade no estado fresco dos microconcretos causada pela adição de polímeros superabsorventes, comparados com o microconcreto REF, para 97% do valor de REF, em ambos os traços PSA02 e PSA03, conforme mostrado na Figura 4-7a. Este comportamento pode ser explicado pelo maior teor de ar aprisionado ocasionado pelo polímero, e também à adição de uma maior quantidade de água (água de cura interna), em comparação com o microconcreto de referência (SUAREZ, 2015).

Mechtcherine et al. (2013a) observaram que o PSA diminui a densidade dos concretos, e mostram que a densidade no estado fresco de 2,33 g/ml para o microconcreto de referência ($a/c = 0,30$), e 2,31 g/ml para o microconcreto com 0,3% de PSA. Os resultados obtidos nesta pesquisa para o mesmo ensaio foram 2,316 g/ml no microconcreto de referência com relação $a/c = 0,30$ e 2,243 g/ml no traço com PSA03, sendo muito próximos dos observados no estudo do autor, e corroborando com a afirmação de que a adição de PSA reduz a densidade das misturas.

b) Influência do teor de nanossílica (NS)

A influência do teor de nanossílica na densidade da mistura é apresentada na Figura 4-7b. O teor de NS fez reduzir ligeiramente a densidade da mistura (cerca de 1%), redução esta que não é expressiva. Senff *et al.* (2009b), ao avaliar a densidade no estado fresco de misturas com teor de 2,5% de nanossílica em substituição ao cimento, obtiveram redução expressiva na densidade dos materiais (redução de aproximadamente 35%), que os autores atribuem ao efeito combinado do aumento do teor de ar de incorporado, ao mesmo tempo em que se verificou que a densidade das partículas de nanossílica é menor a do cimento.

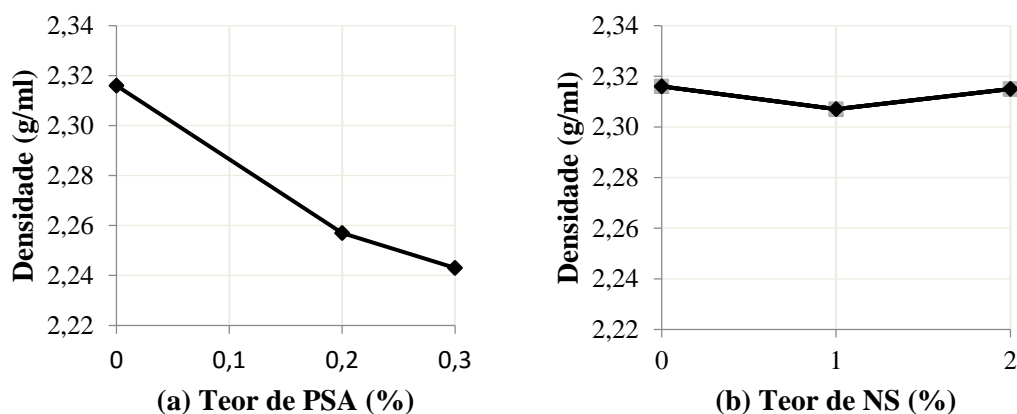


Figura 4-7: Densidade no estado fresco em relação ao teor de PSA (a) e ao teor de NS (b).

c) Influência do uso combinado de PSA e NS

Nas quatro misturas contendo as duas adições, a densidade no estado fresco foi praticamente igual em todas elas, e a redução na densidade foi da ordem de 2 a 3% em relação à mistura de referência. A redução na densidade obtida nestas misturas foi muito próxima aos valores obtidos nas misturas contendo apenas PSA, indicando que a influência do PSA nesta propriedade é bem mais pronunciada que a influência da adição de NS.

4.2 TEMPO ZERO (T_0)

O tempo zero ou tempo de transição suspensão-sólido, marca o momento inicial da determinação experimental da retração autógena, no qual o microconcreto desenvolve uma estrutura suficientemente rígida para se opor às variações de volume. O período total de tempo considerado para a execução do ensaio foi de 48 horas, pois após este período ocorre uma estabilização das leituras de velocidade de pulso ultrassônico. Na Figura 4-8 são mostrados os gráficos de velocidade do pulso ultrassônico obtidos, em função do tempo, para as nove misturas estudadas. O ensaio foi realizado no Laboratório de FURNAS Centrais Hidroelétricas S.A. o ensaio das misturas de REF, PSA02 e PSA03 foram realizados por Manzano (2014) e Suárez (2015).

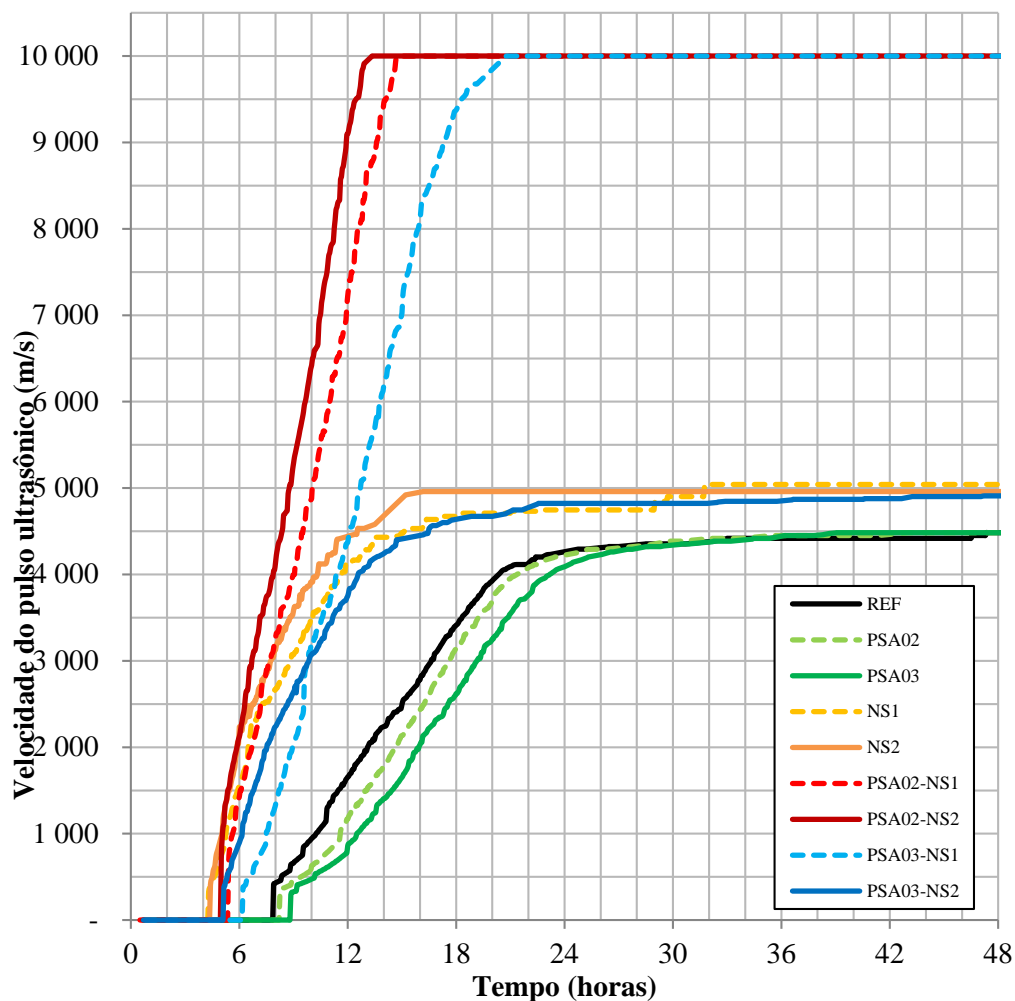


Figura 4-8 Curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo para os microconcretos estudados.

Para Trtnik e Gams (2014), os gráficos do tempo zero podem ser associados com os estágios de hidratação do cimento. Imediatamente após a mistura, ocorre a Fase 1, ou pré-indução, com duração de aproximadamente 15 minutos. Na Fase 2, chamada de dormência, as leituras de velocidade começam a ser efetuadas, no entanto, são todas nulas (0 m/s). A Fase 3 se inicia no momento onde ocorre uma mudança brusca na velocidade, chamada de período de aceleração, e corresponde ao primeiro caminho contínuo de grãos mecanicamente ligados, demarcando assim o tempo zero. A Fase 4, ou período de desaceleração, é caracterizada pelo aumento dos valores de velocidade, porém com uma taxa de crescimento menor. Já na Fase 5, ou fase de estabilização, as variações são menores. Esta última fase é caracterizada por uma queda na taxa de aceleração e consequentemente pela manutenção de uma velocidade de propagação aproximadamente constante.

Na Figura 4-9 é apresentado o resumo dos valores obtidos para o tempo zero dos nove microconcretos estudados.

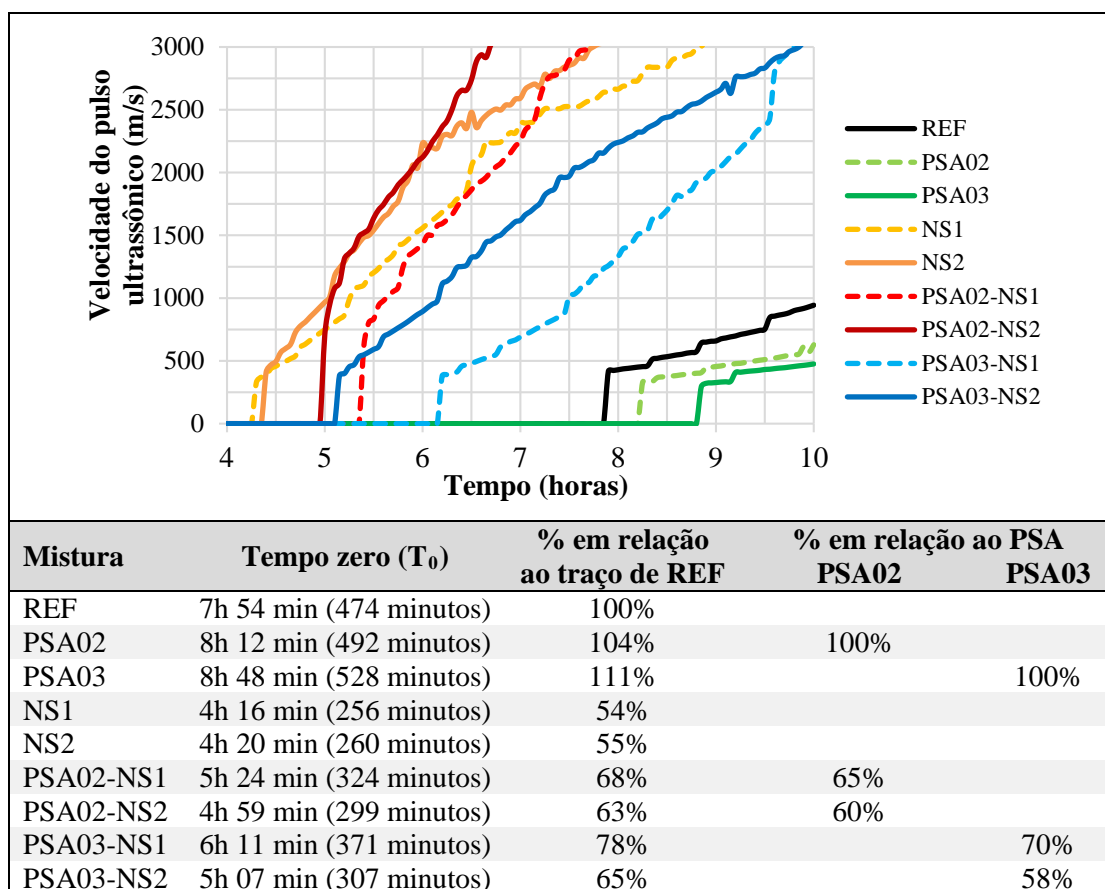


Figura 4-9: Tempo zero das misturas estudadas, obtido pelo ensaio de propagação do pulso ultrassônico.

O valor atingido pela velocidade final de propagação de onda ultrassônica depende da evolução da fração de volume sólido total. Assim, a maior velocidade atingida por alguns traços pode ser explicada pelo fato dessas misturas possuírem uma fração sólida maior. Ainda, é possível que as diferenças obtidas nas curvas de T_0 dessas misturas seja devido à programação do equipamento, alterando a frequência das ondas emitidas.

a) Influência do teor de polímero superabsorvente (PSA)

Ao observar a Figura 4-9, nota-se que a adição de polímero superabsorvente causa um aumento no valor do tempo zero destas misturas, em 4% e 11%, para os traços PSA02 e PSA03, respectivamente.

Dudziak e Mechtcherine (2010) observaram que a adição de PSA afetou o T_0 em concretos de ultra-alto desempenho (HPC). Eles estudaram um teor de 0,4% de um determinado PSA e relataram um aumento de 1h40min no tempo zero em relação à mistura de referência, o que representa um acréscimo de aproximadamente 20%.

Ordoñez (2013), estudou a influência do teor de PSA em microconcretos com relação a/c igual a 0,30. Para a mistura de referência, o resultado do tempo zero foi de 6h 20min (380 minutos). As misturas contendo PSA (nos teores de 0,3, 0,4 e 0,6%) apresentaram tempo zero de, respectivamente, 7h 30min, 7h 50min e 7h 50min. Observou-se que a presença do PSA retardou a pega em relação à mistura de referência em até 80 minutos. No teor de 0,3% de PSA, a pesquisadora constatou um aumento de 12% no tempo zero, quando comparado com a referência, valor muito próximo do encontrado neste trabalho. Segundo a mesma, o atraso no tempo de pega devido ao PSA pode estar relacionado com um aumento das partículas floculadas de cimento, ao mesmo tempo em que o acréscimo de água para cura interna provoca o afastamento das partículas de cimento umas das outras.

Este comportamento também foi verificado nas pesquisas realizadas anteriormente por Silva (2013), Manzano (2014), Moraes e Cerqueira (2014) e Suarez (2015). Contudo, segundo estes autores, o aumento do T_0 tem grande influência do teor de aditivo superplastificante utilizado, não podendo assim justificar todo o aumento observado nesta propriedade ao PSA.

b) Influência do teor de nanossílica (NS)

A nanossílica teve efeito reverso, uma vez que diminuiu o tempo zero para 54% e 55%, nos traços NS1 e NS2, respectivamente. Para a maioria dos trabalhos, à medida que a nanossílica é adicionada à mistura, o tempo de pega é reduzido, a taxa de liberação de calor aumenta, o Ca(OH)_2 reage com a nanossílica e as misturas se mostram mais consistentes. A NS não só se comporta como agente de melhoria da microestrutura, mas também, como um ativador para acelerar as reações pozolânicas do compósito (SCRIVENER e KIRKPATRICK, 2008).

Pourjavadi *et al.* (2012), ao analisar pastas de cimento com relação a/c igual a 0,45 contendo e 1% de nanossílica, observaram que o tempo de pega foi de 410 minutos para a mistura de referência, enquanto a pasta contendo 1% de NS obteve um resultado de 393 minutos (redução de aproximadamente 6% no tempo zero). Para os autores, a redução do

tempo de pega causada pela NS é devido à existência de um grande número de ligações insaturadas altamente reativas e também à valência livre dos elétrons na superfície das nano partículas, em forma de grupos *silanol*, que possuem elevada afinidade com a portlandita presente no cimento, favorecendo o rápido crescimento dos cristais C-S-H.

Senff *et al.* (2009b) estudaram a influência do teor de nanossílica no tempo de pega utilizando o aparelho de Vicat, e concluíram que o aumento do teor de nanossílica causa uma diminuição expressiva no tempo de pega, de 61% e 37%, usando teores de 1 e 2% de nanossílica. Segundo os autores, este comportamento está relacionado com a aceleração das reações de hidratação proporcionada pelas nano partículas altamente reativas e com elevada superfície específica. Os resultados apresentados pelos autores mostram que é possível estabelecer uma relação entre o tempo zero e o tempo para o início do período de aceleração da hidratação do cimento, pois a queda do tempo de pega está relacionada com uma diminuição proporcional no tempo necessário para atingir a máxima temperatura de hidratação.

Aleen *et al.* (2014) completam que a nanossílica age como pontos de nucleação, promovendo a aceleração das reações de hidratação do cimento e também como ativadora das atividades pozolânicas, o que causa uma redução considerável no tempo zero. Além disso, a NS acelera o consumo de C_3S , a formação de portlandita (pequenos cristais de CH) e o surgimento de grupos homogêneos de C-S-H, favorecendo, assim, o primeiro caminho sólido de grãos mecanicamente ligados, conhecido como patamar de percolação, momento este que define o início da pega.

De acordo com Björnström *et al.* (2004), ainda não foi estabelecido se a hidratação mais rápida do cimento na presença de NS é devido à sua reatividade química mediante dissolução (atividade pozolânica) ou à elevada área superficial. Além disso, o autor observou a maior presença de hidróxido de cálcio (CH) nas amostras com adição de nanossílica, na idade de 9 horas. O rápido crescimento dos cristais de CH e a diminuição dos íons de cálcio na solução ocorrem no final do período de indução e sugerem que a precipitação de CH está relacionada com o início da fase de aceleração e, conseqüentemente, com o tempo de pega.

c) Influência do uso combinado de PSA e NS

Quando comparamos o efeito da adição de NS nos traços contendo PSA, nota-se que a redução proporcionada pela nanossílica nestas misturas é da mesma ordem de grandeza que os efeitos da NS pura sobre o traço de referência. Quando se toma o valor obtido para a mistura PSA02 como 100%, observa-se que a redução proporcionada pela adição de 1 e 2% de NS nos microconcretos com este mesmo teor de PSA é de 65 e 60%, respectivamente. A redução proporcionada pela adição apenas de NS foi da ordem de 55%.

No entanto, também se observa que o valor encontrado para esta propriedade nas misturas contendo as duas adições é superior ao valor encontrado para as misturas contendo apenas NS, mostrando que o efeito do PSA em aumentar o T_0 ainda é relevante. Em comparação com o traço NS2, cujo valor foi 260 minutos, a adição de 0,2% de PSA (mistura PSA02-NS2) aumentou o resultado para 299 minutos (aumento de 15%), e a adição de 0,3% de PSA (mistura PSA03-NS2) elevou o T_0 para 307 minutos (incremento de 16%). No entanto, deve notar-se que a adição do NS e PSA em tais dosagens não altera de forma expressiva o tempo de endurecimento a ponto de prejudicar a trabalhabilidade das pastas.

Segundo Pourjavadi *et al.* (2012), pouca ou nenhuma atenção tem sido dada ao efeito da adição de PSA sobre tempo zero em materiais cimentícios, tampouco seu efeito combinado com NS. Os dados obtidos pelos pesquisadores em pastas contendo 1% de NS indicam uma redução de 22 e 17 minutos no tempo zero (9 e 7%) nos traços com adição de 0,1 e 0,3% de PSA, respectivamente, corroborando com a ideia de que o PSA retarda o tempo zero, mesmo nas misturas contendo nanossílica.

Trtnik e Gams (2014) acrescentam que diferentes dosagens de superplastificante podem influenciar significativamente o valor do tempo zero, uma vez que é sabido que este aditivo tem capacidade de diminuir a cinética da hidratação, fazendo com que as reações ocorram mais lentamente, o que causa um incremento no tempo de pega.

4.3 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Os resultados apresentados de retração autógena são referentes à média dos valores obtidos de três corpos de prova ensaiados para cada uma das nove misturas. Os resultados individuais dos três corpos de prova estão mostrados no APÊNDICE B, e se encontraram muito próximos entre si, revelando um bom controle das operações de ensaio.

A perda de massa de água foi determinada para cada corpo de prova, com o objetivo de verificar se a retração avaliada foi um fenômeno exclusivamente autógeno ou se houve perda expressiva de água. O cálculo foi realizado a partir do volume de cada corpo de prova (28,5x7,5x7,5cm), e da quantidade de água que foi adicionada no traço (210g de água por litro de concreto), proporcional a este volume. Os corpos de prova (juntamente com suas formas) foram pesados em dois momentos: logo após a moldagem e após terminado o ensaio, aos 28 dias. A retração de origem térmica foi desprezada em virtude das dimensões reduzidas dos corpos de prova ensaiados. A variação de massa de água dos corpos de prova, em relação à massa total, foi menor que 2%, em todos os microconcretos, até 28 dias. A perda de massa média está apresentada na Tabela 4-2. Portanto, pode-se dizer que neste período houve uma boa selagem dos corpos de prova, sem perda de água considerável.

Tabela 4-2: Perda de massa de água média dos 3 corpos de prova utilizados para os ensaios de retração autógena.

TRAÇO	Perda de massa média (%)
REF	1,87%
PSA02	0,38%
PSA03	1,09%
NS1	0,99%
NS2	0,97%
PSA02-NS1	1,09%
PSA02-NS2	0,79%
PSA03-NS1	1,19%
PSA03-NS2	1,49%

Para fins de análise, este tópico será organizado em subitens, a saber: efeito do PSA; efeito da NS; efeito do uso combinado de PSA e NS; e o efeito nas primeiras idades.

Para a análise dos resultados, em cada seção é apresentada uma tabela contendo os valores absolutos da retração autógena obtido para os traços estudados em diversas idades: no pico de expansão e com 1, 3, 7 e 28 dias. Nesta tabela também constam a retração autógena efetiva (valor situado entre o pico de expansão e a retração autógena absoluta em cada idade) e a porcentagem que cada um dos traços representa em relação à mistura de referência. Os valores da porcentagem em relação à mistura de referência (REF) foram calculados dividindo-se a retração autógena efetiva da mistura estudada pela retração autógena efetiva da mistura de referência ($L_{pRef}-L_{dRef}$), conforme a equação a seguir:

$$\%_{EM\ RELAÇÃO\ A\ REF} = \left[\frac{L_{pi} - L_{di}}{L_{pRef} - L_{dRef}} \right] \times 100 \quad \text{Equação 4-1}$$

Onde:

L_{pi} : Leitura da deformação medida no pico de expansão para o traço estudado;

L_{di} : Leitura da deformação medida na idade requerida para o traço estudado;

L_{pRef} : Leitura da deformação medida no pico de expansão para o traço de referência;

L_{dRef} : Leitura da deformação medida na idade requerida para o traço de referência.

Na Figura 4-10 são mostradas as curvas da retração autógena das nove misturas estudadas nesta pesquisa, desde o T_0 até a idade de 28 dias, quando o ensaio foi finalizado. Os efeitos de cada adição serão discutidos separadamente a seguir. Para desprezar a contração *Le Chatelier*, que ocorre antes da transição suspensão-sólido (tempo zero) e, portanto, não causa fissuração, a idade zero dos gráficos apresentados nesta seção corresponde ao tempo zero (T_0) determinado experimentalmente para as respectivas misturas, conforme mostrado no item 4.2.

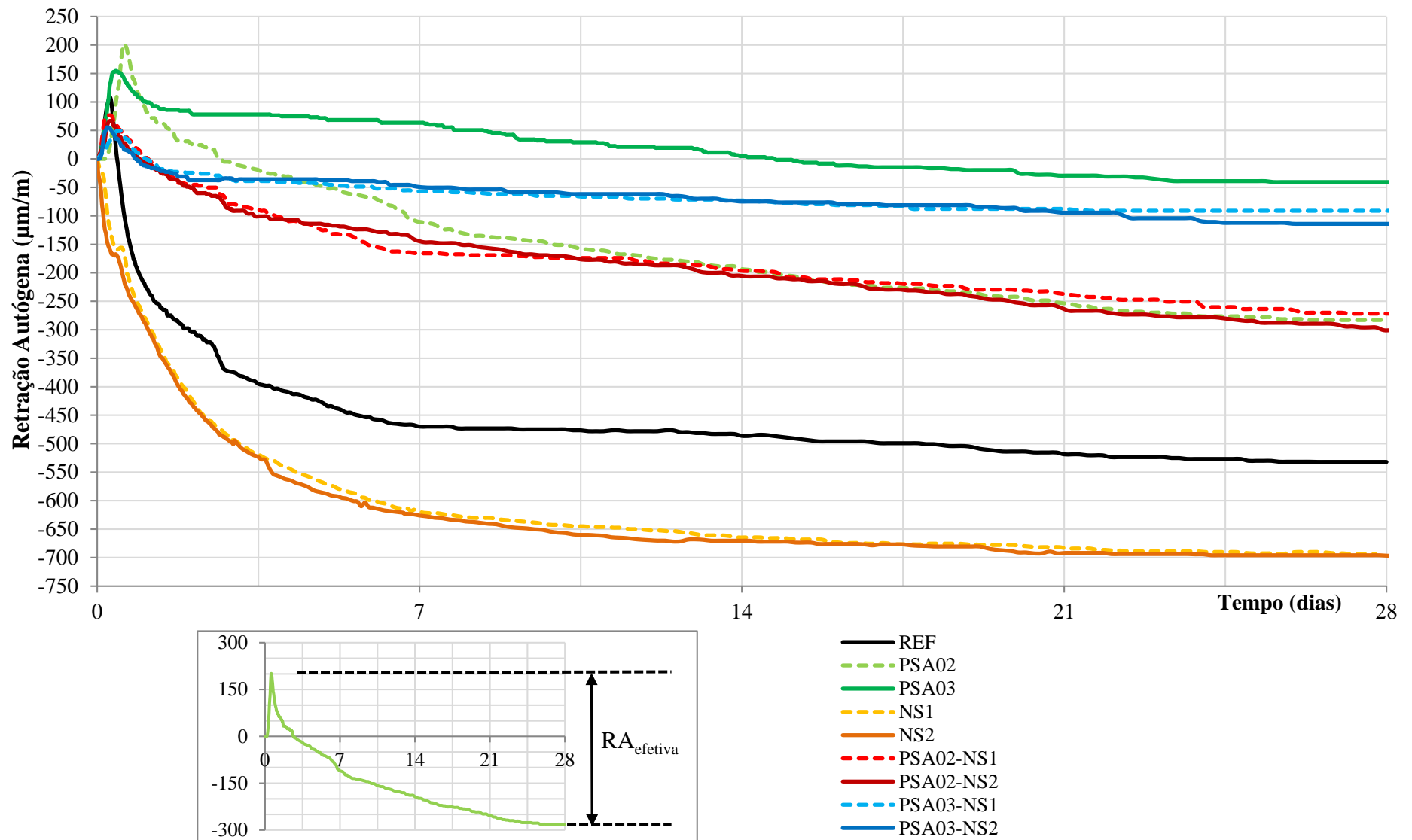


Figura 4-10: Resultados médios da retração autógena das nove misturas estudadas, a partir de T_0 até 28 dias. No detalhe, representação esquemática do valor da retração autógena efetiva (L_{pi} - L_{di}).

4.3.1 Efeito do Polímero Superabsorvente.

Na Tabela 4-3 são apresentados os resultados de retração para os traços contendo apenas adição de PSA (sem NS), nas misturas confeccionadas por Manzano (2014) e Suárez (2015), conforme descrito anteriormente. A porcentagem de redução da retração autógena foi calculada conforme Equação 4-1, em comparação com o traço REF, na mesma idade.

Tabela 4-3: Resultados médios para a retração autógena e porcentagem de redução, dos traços contendo apenas PSA, em comparação com a mistura de REF, na mesma idade.

Traço	Idade	Retração autógena ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Retração autógena efetiva (Lpi-Ldi)	% em relação à REF
REF	Pico	109	-	-
	1 dia	-216	325	-
	3 dias	-376	485	-
	7 dias	-470	579	-
	28 dias	-532	641	-
PSA02	Pico	202	-	-
	1 dia	94	108	33
	3 dias	-10	212	44
	7 dias	-111	313	54
	28 dias	-283	485	76
PSA03	Pico	154	-	-
	1 dia	101	53	16
	3 dias	78	76	16
	7 dias	63	91	16
	28 dias	-41	195	30

Na Figura 4-11 abaixo são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena para o traço REF e os traços contendo dois teores diferentes de PSA, determinados a partir do T₀ até a idade de 28 dias.

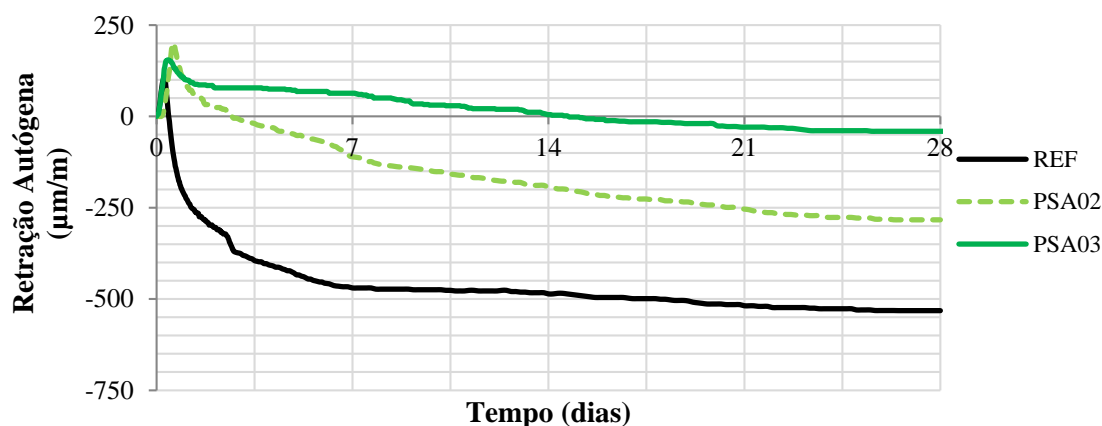


Figura 4-11: Resultados médios da retração autógena dos microconcretos com adição apenas de PSA, em dois teores, em comparação com o traço de referência.

Em todas as misturas observou-se expansão inicial, até 14 horas, sendo o valor máximo de 202 $\mu\text{m}/\text{m}$ para o traço PSA02. Para o traço de referência (REF), a magnitude da retração autógena aos 28 dias foi de -532 $\mu\text{m}/\text{m}$. Este valor é bastante próximo do valor encontrado por Ordoñez (2013), de -536 $\mu\text{m}/\text{m}$, para o mesmo traço de referência, mesma relação água cimento, porém com superplastificante de outro fabricante e materiais de lotes diferentes. Ambos os traços contendo 0,2 e 0,3% de PSA mostraram-se eficientes na redução da retração autógena nos microconcretos estudados, no entanto o teor de 0,3% obteve um desempenho superior. Enquanto a mistura contendo 0,2% de PSA reduziu a retração para 44% do valor de REF aos 3 dias e 76% aos 28 dias; a mistura contendo adição de 0,3% de PSA reduziu para 16% a retração autógena (sendo que nesta idade, ainda ocorria expansão nesta mistura), e aos 28 dias apresentou apenas 30% da retração autógena do traço de REF.

Esta característica mitigadora da retração autógena apresentada pelo polímero superabsorvente foi verificada por um grande número de pesquisadores, dentre os quais cita-se Jensen e Hansen (2002), Assmann (2013), Mönning (2009), Pereira e Matos (2011), Silva *et al.* (2014) e Suárez (2015).

A mistura contendo 0,3% de PSA proporcionou a melhor eficiência na redução da retração autógena em todas as idades. O efeito da expansão inicial foi neutralizado aproximadamente aos 15 dias de idade, ao contrário das demais misturas, onde o gráfico atinge a parte negativa do eixo antes dos 3 dias. Para este traço, o valor final da retração foi de -41 $\mu\text{m}/\text{m}$, aos 28 dias o que representa uma redução de 70% da retração autógena observada para o traço de referência. Este comportamento é similar ao observado por Traldi *et al.* (2014), cujo valor encontrado foi de 6 $\mu\text{m}/\text{m}$, que significa 21% da retração determinada mistura de referência, para o mesmo traço e utilizando o mesmo polímero, porém com aditivo superplastificante de outro fabricante e materiais de lotes diferentes.

Mechtcherine (2013b) avaliou a influência de nove tipos de polímeros superabsorventes na retração autógena de microconcretos contendo relação água cimento igual a 0,30 (acrescida da água de cura interna de cada polímero), areia, sílica ativa e teor fixo de superplastificante. Os PSAs utilizados, à base de ácido acrilamida, possuem diferentes formas e tamanhos das partículas, bem como densidade e absorção. Em todas as misturas foi utilizado o teor de 0,3% de PSA em massa de cimento e os resultados são apresentados na Figura 4-12.

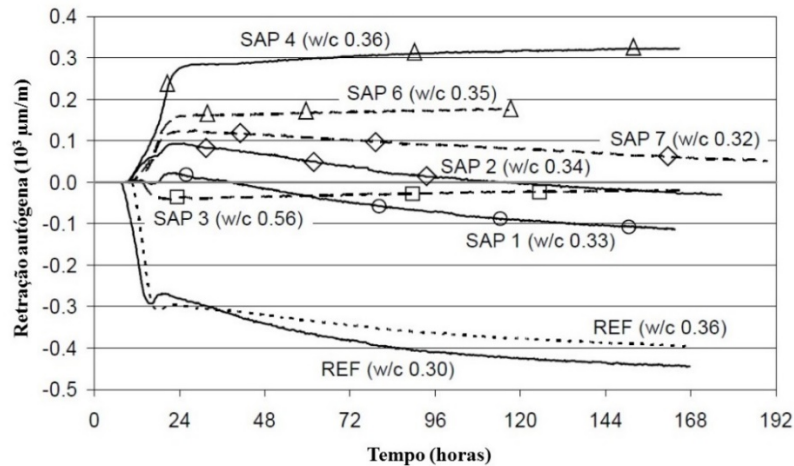


Figura 4-12: Resultados da retração autóloga para 9 diferentes tipos de PSA (SAP), com relação água cimento (0,30 + água de cura interna), em comparação com duas misturas de referência com relação água cimento de 0,30 e 0,36 (MECHTCHERINE, SCHROEFL e GEORGES, 2013b).

Os dados dos autores revelam a eficiência de todos os tipos de PSA estudados em mitigar e até mesmo eliminar a retração autóloga nos microconcretos. Enquanto a mistura de referência obteve uma retração da ordem de $-450 \mu\text{m/m}$ aos 7 dias (168 horas), o PSA menos eficiente (SAP1) obteve valores em torno de $-110 \mu\text{m/m}$ (redução de 75%), e o PSA mais eficiente (SAP4), atingiu uma expansão de aproximadamente $300 \mu\text{m/m}$, eliminando por completo a retração autóloga nesta mistura. O SAP2 estudado pelos autores, que possui aproximadamente a mesma absorção do PSA desta pesquisa (15g/g, ou adição de 0,045 na relação a/c), apresentou uma retração autóloga da ordem de $-30 \mu\text{m/m}$ aos 7 dias (redução de 93% em relação à REF), em comparação com $63 \mu\text{m/m}$ obtidos na mistura PSA03 desta pesquisa, que representa uma redução de 84% em relação à mistura REF.

Em estudo anterior, Manzano (2014) compara a retração autóloga da mistura contendo 0,3% de PSA (relação a/c igual a 0,30 acrescida 0,045 relativos à água de cura interna) com duas misturas de referência: uma com relação a/c igual a 0,30 e outra com relação a/c de 0,35. Este estudo tem por finalidade avaliar se a água adicional presente nas misturas contendo PSA (água de cura interna) participa ou não do processo de hidratação, hipótese esta que foi levantada por alguns pesquisadores ao perceberem perdas de propriedades mecânicas causada pelo polímero. Nos resultados obtidos, o pesquisador observou que a retração autóloga para ambas as misturas de referência foram muito próximas, em todas as idades, e notadamente superior à obtida para o microconcreto contendo PSA. É sabido que a retração autóloga, por ser um fenômeno intimamente relacionado com a queda da umidade interna na pasta de cimento, deveria responder positivamente ao acréscimo de

água na mistura, apresentando valores menores quanto maior fosse a relação a/c. No entanto isto não ocorreu, favorecendo a hipótese de que a água absorvida pelo PSA contribui para a hidratação dos compostos.

É interessante acrescentar que o efeito mitigador do PSA sobre a retração autógena é reduzido com o passar do tempo. No teor de 0,3% de PSA, por exemplo, a retração autógena com 1 dia de idade representa 16% do valor de REF, enquanto aos 28 dias, este valor é de 30%. Este comportamento pode estar relacionado com a cinética de desorção da água de cura interna do PSA, ao longo do processo de hidratação do cimento. Grande parte da água absorvida pelo polímero é liberada nas primeiras idades, fazendo com que seu efeito sobre a retração autógena seja mais pronunciado (MANZANO, 2014).

4.3.2 Efeito da Nanossílica

Na Figura 4-13 são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena para o traço REF e os traços contendo apenas adição de nanossílica (sem PSA), determinados a partir do T₀ até a idade de 28 dias.

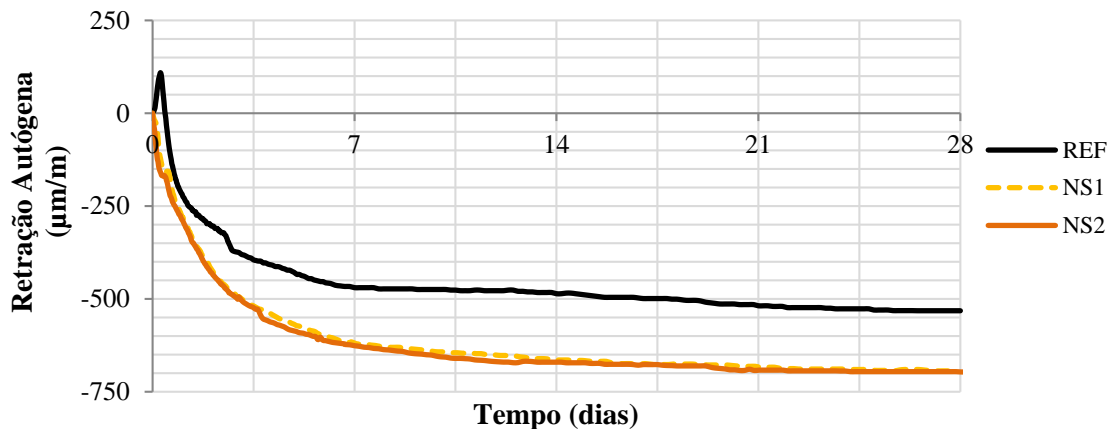


Figura 4-13: Resultados médios da retração autógena das misturas contendo apenas adição de nanossílica em comparação com o traço de referência.

Os valores da retração autógena absoluta para os traços contendo apenas NS, em comparação com o traço de referência, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias e também no pico de expansão, são apresentados na Tabela 4-4. O fenômeno da expansão inicial não foi verificado nos traços contendo apenas adição de nanossílica, motivo pelo qual o pico apresentado é igual à zero. Segundo Aleen, Heikal e Morsi (2014), este fato pode estar relacionado com a elevada atividade pozolânica da nanossílica, o que a torna capaz de

reagir com o CH, que é expansivo, reduzindo a quantidade deste composto na mistura e produzindo mais C-S-H. Os autores ainda relatam que as propriedades físicas e estruturais dos produtos de hidratação desempenham um papel importante na expansão das pastas de cimento. As misturas contendo NS são menos porosas e, portanto, tem menos espaços para acomodar as variações volumétricas, sendo, portanto mais sensíveis a estas variações.

Tabela 4-4: Resultados médios para a retração autógena e porcentagem de redução, dos traços contendo apenas NS, em comparação com a mistura de REF, na mesma idade.

Traço	Idade	Retração Autógena ($\mu\text{m/m}$)	Retração autógena efetiva (Lpi-Ldi)	% em relação à REF
REF	Pico	109	-	-
	1 dia	-216	325	-
	3 dias	-376	485	-
	7 dias	-470	579	-
	28 dias	-532	641	-
NS1	Pico	0	-	-
	1 dia	-274	274	84
	3 dias	-494	494	102
	7 dias	-621	621	107
	28 dias	-694	694	108
NS2	Pico	0	-	-
	1 dia	-284	284	87
	3 dias	-494	494	102
	7 dias	-626	626	108
	28 dias	-707	707	110

Nota-se que a retração autógena observada aos 28 dias, para os dois traços com NS, atingiu valores absolutos superiores aos do traço REF (-532 $\mu\text{m/m}$), sendo de -694 $\mu\text{m/m}$ para a mistura NS1 e -707 $\mu\text{m/m}$ para NS2. Quando se compara a retração autógena efetiva, o valor obtido na mistura de REF foi -641 $\mu\text{m/m}$, aos 28 dias, enquanto o valor observado para os traços NS1 e NS2 foi de -694 $\mu\text{m/m}$ e -707 $\mu\text{m/m}$, correspondendo a um aumento de 8 e 10%, respectivamente.

Segundo Belkowitz *et al.* (2015), o aumento da retração nas misturas contendo nanossílica pode estar relacionado com a elevação da temperatura de hidratação, pois as nano partículas de sílica apresentam um elevado impacto na velocidade das reações de hidratação. Os autores estudaram o desenvolvimento da temperatura em misturas contendo diferentes tipos de nanossílica e verificaram que a elevação da temperatura é inversamente proporcional ao tamanho das partículas adicionadas. Este fato pode acelerar o processo de autodessecação e, assim, favorecer o surgimento de capilares onde se desenvolvem as tensões de tração responsáveis pela retração autógena.

Ainda, conforme mostrado no item 4.1.5 deste trabalho e em concordância com diversos pesquisadores, a adição de NS acelera o processo de hidratação do cimento, agindo como pontos de nucleação e por meio das reações pozolânicas, proporciona a produção de mais moléculas de C-S-H. Segundo Lura (2003), a maior presença de gel de C-S-H está diretamente relacionada com a redução da umidade relativa interna (RH), fenômeno este que é considerado como o principal mecanismo de desenvolvimento da retração autógena.

Ainda, sabe-se que a NS proporciona uma estrutura mais fechada de poros, reduzindo o seu tamanho. Como a tensão nestes poros é inversamente proporcional ao raio do poro, tem-se um aumento da tensão capilar, o que causa incremento na retração autógena.

4.3.3 Efeito do uso combinado de PSA e NS

Os resultados são mostrados na Tabela 4-5, bem como a porcentagem que cada uma representa em relação à mistura de referência e em relação ao traço contendo apenas uma adição (PSA ou NS, no mesmo teor).

Tabela 4-5: Resultados médios da retração autógena e porcentagem de redução, dos traços contendo as duas adições, em comparação com: a mistura de REF; às misturas contendo apenas PSA; às misturas contendo apenas NS (no mesmo teor).

Traço	Idade	Retração Autógena ($\mu\text{m/m}$)	Retração autógena efetiva (Lpi-Ldi)	% em relação à REF	% em relação à PSA	% em relação à NS
PSA02-NS1	Pico	76	-	-	-	-
	1 dia	7	69	21	64	25
	3 dias	-80	156	32	74	32
	7 dias	-166	242	42	77	39
	28 dias	-272	348	54	72	50
PSA02-NS2	Pico	67	-	-	-	-
	1 dia	-3	70	22	65	25
	3 dias	-91	158	33	75	32
	7 dias	-143	210	36	67	34
	28 dias	-312	379	59	78	54
PSA03-NS1	Pico	49	-	-	-	-
	1 dia	2	47	14	89	17
	3 dias	-39	88	18	116	18
	7 dias	-57	106	18	116	17
	28 dias	-91	140	22	72	20
PSA03-NS2	Pico	55	-	-	-	-
	1 dia	-11	66	20	125	23
	3 dias	-37	92	19	121	19
	7 dias	-49	104	18	114	17
	28 dias	-89	144	22	74	20

As nove misturas confeccionadas possibilitam diversas comparações. Contudo, o principal interesse desta pesquisa consiste em avaliar o efeito causado pela adição de nanossílica nas misturas contendo PSA, em comparação com o traço de referência, e com os traços contendo apenas PSA. Por esse motivo, nesta seção julgou-se conveniente avaliar separadamente apenas o efeito da adição de nanossílica em cada um dos teores de polímero utilizados.

4.3.3.1 Efeito da adição de NS nas misturas contendo 0,2% de PSA

Na Figura 4-14 são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena para os seguintes traços: REF, PSA02, PSA02-NS1, PSA02-NS2, determinados a partir do T_0 até a idade de 28 dias.

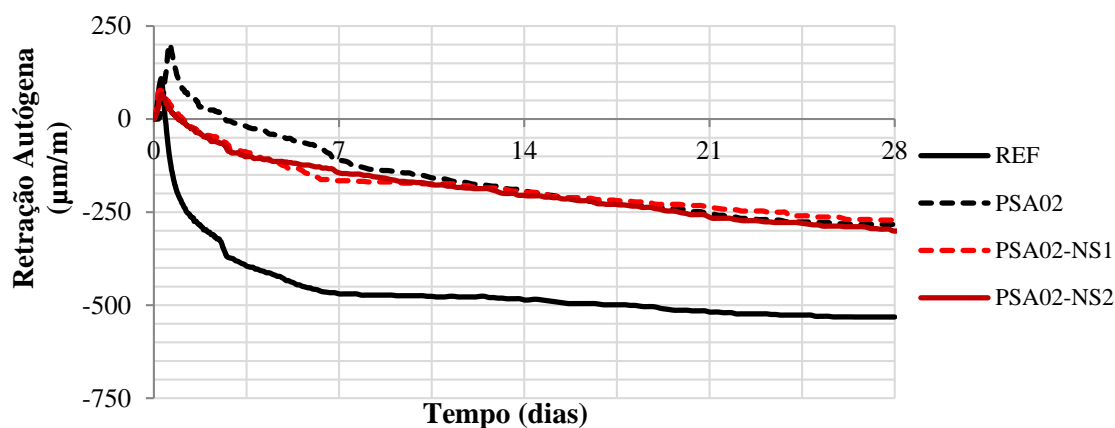


Figura 4-14: Resultados médios da retração autógena das misturas contendo 0,2% de PSA e diferentes teores de nanossílica (0, 1 e 2% de NS), em comparação com o traço de referência.

Na Figura 4-14 pode-se observar que a retração autógena nos traços contendo as duas adições foi menor que o valor de REF, mas muito próximos entre si, não justificando a adição de 2% de NS. Além disso, os resultados estão próximos aos valores observados para o traço contendo apenas 0,2% de PSA, que apresentou expansão expressiva. Logo, uma análise dos valores efetivos é necessária.

Na Tabela 4-5 é possível notar que houve uma redução da retração autógena nos traços contendo adição simultânea de PSA e NS. Em comparação com a mistura de REF aos 28 dias (-532 $\mu\text{m}/\text{m}$ - Tabela 4-3), a mistura PSA02-NS1 apresentou valor de -272 $\mu\text{m}/\text{m}$, e a mistura PSA02-NS2, -312 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Contudo, quando se observa a retração autógena efetiva observada aos 28 dias, medida do pico até o mínimo valor medido, nota-se que, em comparação com o traço PSA02 (485 $\mu\text{m/m}$ - Tabela 4-3), a retração das misturas híbridas foi menor, atingindo 348 $\mu\text{m/m}$ e 379 $\mu\text{m/m}$, para as misturas PSA02-NS1 e PSA02-NS2, o que representa 72 e 78% do valor obtido para a mistura PSA02, respectivamente. Este fato se deve ao pico de expansão bastante pronunciado obtido na mistura contendo apenas polímero.

Ainda, nota-se que, ao comparar o efeito das duas adições nos microconcretos aos efeitos observados apenas pela NS (Tabela 4-4), percebe-se que a porcentagem de redução da retração autógena nestas misturas é maior que a redução proporcionada apenas pela adição de PSA ante a mistura de REF. Aos 28 dias, as misturas PSA02-NS1 e PSA02-NS2 apresentaram 50 e 54% da retração autógena obtida nos traços NS1 e NS2, respectivamente, enquanto a mistura contendo PSA02 apresentou 76% da retração autógena da mistura de REF. Isso indica que a efetividade do PSA em reduzir a retração autógena dos microconcretos não foi prejudicada pela adição de NS, sendo, neste caso, até incrementada.

4.3.3.2 Efeito da adição de NS nas misturas contendo 0,3% de PSA

Na Figura 4-15 são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena para os seguintes traços: REF, PSA03, PSA03-NS1, PSA03-NS2, determinados a partir do T_0 até a idade de 28 dias.

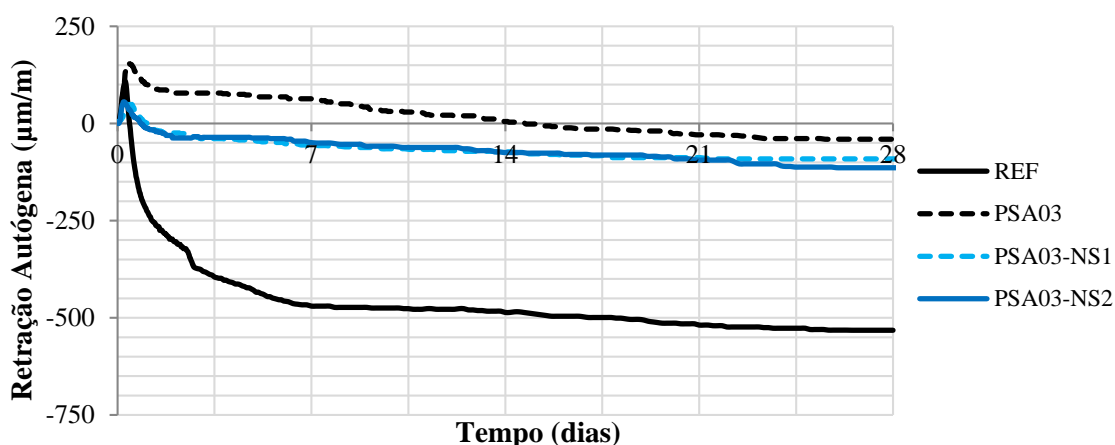


Figura 4-15: Resultados médios da retração autógena das misturas contendo 0,3% de PSA e diferentes teores de nanossílica (0, 1 e 2% de NS), em comparação com o traço de referência.

Conforme mostrado na Figura 4-15, a retração autógena nos traços contendo as duas adições foi expressivamente menor que o valor de REF, em todas as idades. Os valores obtidos nestas duas misturas híbridas foram muito próximos entre si, conforme verificado no item 4.2.3.1, não sendo benéfico para esta propriedade a adição de teor acima de 1% de NS. Contudo, os valores da retração autógena dessas misturas foram maiores que valor encontrado apenas para o PSA. Este resultado era esperado, uma vez que se constatou que as nano partículas de sílica promovem um aumento na retração autógena, ao mesmo tempo em que o PSA causa sua redução.

Na Tabela 4-5 é possível notar que houve uma redução da retração autógena nos traços contendo a combinação das duas adições. Em comparação com a mistura de REF aos 28 dias (-532 $\mu\text{m}/\text{m}$), a mistura PSA03-NS1 apresentou valor de -91 $\mu\text{m}/\text{m}$, e a mistura PSA03-NS2, -89 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Novamente, quando se observa a retração autógena efetiva, medida do pico até o mínimo valor medido, nota-se que, em comparação com o traço PSA03 aos 28 dias (195 $\mu\text{m}/\text{m}$ - Tabela 4-3), a retração das misturas híbridas foi menor, 140 para a mistura PSA03-NS1 (72% do valor obtido para a mistura PSA03), e 144 $\mu\text{m}/\text{m}$ para PSA02-NS2, (o que representa 74% da retração autógena do traço PSA03). Mais uma vez, este fato se deve ao pico de expansão bastante pronunciado obtido na mistura contendo apenas polímero.

Contudo, nota-se que, no caso dos traços contendo 0,3% de polímero, a adição de nanossílica também causou uma maior redução na retração autógena, quando comparadas com a redução proporcionada apenas pela adição de PSA em relação à REF. As misturas PSA03-NS1 e PSA03-NS2 apresentaram ambas 20% da retração autógena obtida nos traços NS1 e NS2, respectivamente, enquanto a mistura contendo PSA03 apresentou 30% da retração autógena da mistura de REF. Isso indica que a efetividade do PSA em reduzir a retração autógena dos microconcretos não foi prejudicada pela adição de NS, sendo, neste caso, até aumentada.

É importante salientar que este efeito potencializador da nanossílica na redução da retração autógena não era esperado, e se deve especialmente à ausência de picos de expansão nos traços contendo NS, em contraposição com valores de expansão inicial não desprezíveis obtidos nos microconcretos contendo PSA. Alguns pesquisadores, ao contrário do que ocorre nesta pesquisa, adotam a retração autógena efetiva apenas como o valor medido a

partir do momento onde a curva de RA *versus* tempo atinge o eixo negativo, desconsiderando assim os picos de expansão do material. Porém, a autora entende que a retração autógena se inicia à partir do pico de expansão do material.

Outro estudo em desenvolvimento no PECC utilizando os mesmos materiais desta pesquisa, e provenientes de um mesmo lote de fornecimento, porém em concretos, tem mostrado resultados preliminares com comportamentos semelhantes aos obtidos no presente estudo. Estes resultados serão publicados oportunamente.

4.3.3.3 Considerações sobre o uso de misturas híbridas na retração autógena

Diante do exposto nos itens anteriores, observa-se que em ambos os teores de PSA (0,2 e 0,3%), o efeito da adição de nanossílica em 2% não é justificado para a mitigação da retração autógena, pois apresentou valores próximos ao teor de 1%. Contudo, para que sejam tomadas conclusões, é necessário a avaliação das propriedades mecânicas. Pode-se observar também que, ao analisar os traços híbridos contendo 1% de nanossílica, àquele com teor de 0,3% de PSA se mostrou o mais eficiente (mistura PSA03-NS1), ao passo que promoveu uma redução de 78% da retração autógena obtida para o traço de referência.

4.3.4 A retração autógena nas primeiras idades

Para um melhor entendimento do efeito da adição de PSA nas primeiras idades, são apresentados na Figura 4-16 os resultados médios da evolução da retração autógena dos microconcretos estudados, desde T0 até 3 dias (72 horas). Esta é uma análise de fundamental importância para o estudo, uma vez que, nas idades iniciais, mesmo se tratando de concreto de alta resistência, o material é mais susceptível à fissuração, devido à sua menor capacidade de absorver as tensões de tração. Conforme citado na revisão bibliográfica, os materiais cimentícios estão continuamente submetidos às deformações autógenas, no entanto estas são mais críticas nas primeiras idades.

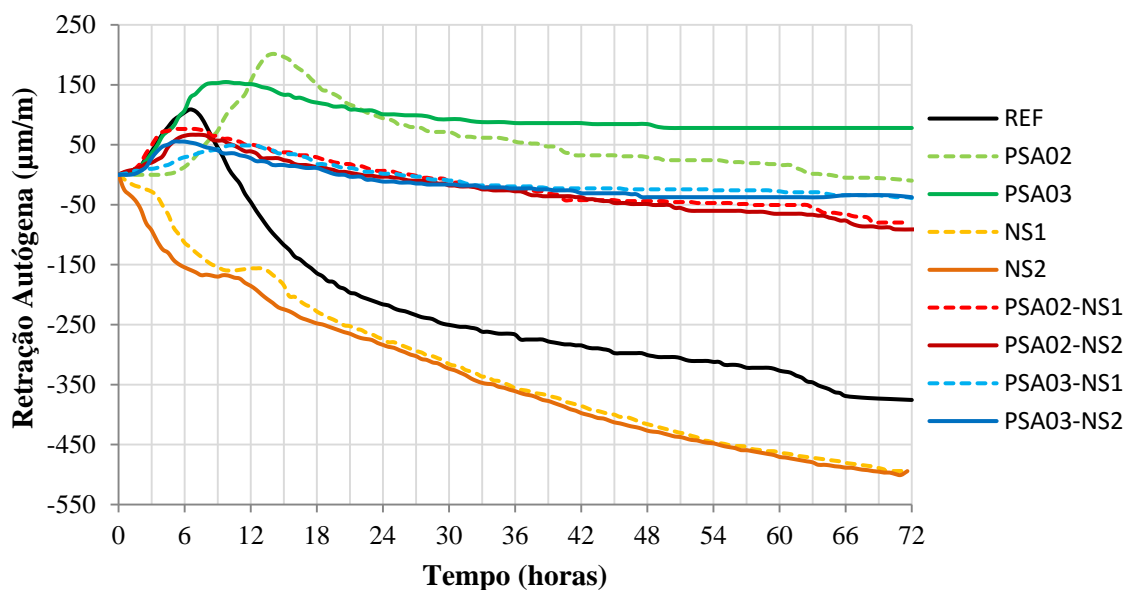


Figura 4-16: Resultados médios da retração autóloga nas primeiras 72 horas, para os nove microconcretos estudados.

A expansão inicial ocorre até cerca de 2 dias após o tempo zero. Observa-se que a adição de PSA ocasionou um aumento considerável nos valores dos picos de expansão das misturas, atingindo 202 µm e 154 µm para os traços PSA02 e PSA03, em contraponto com o valor de 109 µm obtido para o traço de referência (aumento de 85% e 41%, respectivamente). Os valores obtidos para os picos de expansão das nove misturas estudadas são apresentados na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Valores dos picos de expansão inicial observados para as misturas estudadas, e quanto representa em relação à referência.

Traço	Pico de expansão inicial (µm/m)	Hora de ocorrência	% em relação ao traço de REF
REF	109	06:30h	100
PSA02	202	14:00h	185
PSA03	154	9:30h	141
NS1	0	-	-
NS2	0	-	-
PSA02-NS1	76	5:00h	70
PSA02-NS2	67	6:30h	61
PSA03-NS1	49	10:00h	44
PSA03-NS2	55	5:30h	50

Observou-se também que, para o traço contendo 0,2% de PSA, o pico demorou mais tempo para ocorrer (cerca de 14 horas). Nas misturas contendo apenas adição de NS, não foram observados picos de expansão. Os traços híbridos, contendo NS e PSA, apresentaram

valores de pico de expansão menores em relação ao pico da mistura de REF, o que era esperado, uma vez que as misturas contendo apenas NS não apresentaram picos de expansão. Por se tratar de um concreto de alta resistência, o material provavelmente suporta os esforços máximos de compressão induzidos pela expansão máxima observada.

A expansão inicial pode ser atribuída à: (i) formação e crescimento de grandes cristais de hidróxido e cálcio e talvez agulhas de etringita; (ii) formação de C-S-H interno e (iii) redistribuição da água de exsudação (SILVA, 2007). É possível observar que os picos de expansão coincidem, aproximadamente, com o período de grande formação dos produtos de hidratação (período de aceleração e desaceleração, descritos no item 4.1.5).

Segundo Ordoñez (2013), estas deformações expansivas resultam das variações volumétricas químicas causadas, particularmente, pela reação da fase alita com C-S-H e CH, além da formação da etringita e posterior formação do monossulfato. Logo, uma justificativa para o aumento dos picos nos traços contendo adição de PSA pode ser feita a partir da prematura liberação de água para cura interna durante a autosssecagem. A presença de expansão inicial nos traços contendo PSA é mais um indício da sua efetividade na redução da retração autógena, uma vez que esta ocorrerá em idades avançadas, oferecendo tempo extra para o concreto adquirir resistência suficiente e suportar as tensões induzidas.

Já nos traços contendo adição de NS, a ausência de expansão inicial pode estar relacionada com a aceleração das reações de hidratação, e ao consumo de CH expansivo nas reações pozolânicas proporcionadas pela nanossílica (ALEEN, HEIKAL e MORSI, 2014).

As misturas contendo teor combinado de PSA e NS, assim como esperado, apresentaram os valores de pico menores que os microconcretos contendo apenas PSA. Este comportamento era esperado, uma vez o polímero tende a aumentar os picos de expansão, enquanto a adição de nanossílica teve como consequência a ausência de expansão inicial.

Após o pico de expansão inicial, o comportamento varia de acordo com a mistura e os teores de NS e PSA adicionados. Na mistura de referência e nos traços contendo apenas NS, as curvas continuam a apresentar retração autógena considerável, demarcada pela grande inclinação das mesmas. Para o microconcreto de REF, cerca de 60% da retração autógena total ocorrem antes dos 3 dias de idade. Nas misturas contendo nanossílica a situação é mais crítica, pois aos 3 dias já ocorreram aproximadamente 70% da retração autógena total. A maior velocidade de desenvolvimento da retração autógena nestas

misturas se deve principalmente ao fato da nanossílica promover a aceleração das reações de hidratação e, conseqüentemente, os picos de calor se desenvolvem mais precocemente. Esta fase coincide com o período de grande produção de hidratos.

Nos traços contendo apenas PSA ou as duas adições combinadas, ocorre uma inflexão na curva, de forma que o avanço da retração é mais lento. Aos 3 dias, na mistura PSA02 ocorreu apenas 4% da retração autógena total, enquanto na mistura PSA03, nesta idade ainda é observada expansão. No caso dos microconcretos híbridos, a mistura PSA03-NS2 apresentou maior velocidade na retração autógena, onde aos 3 dias decorreram 64% da retração autógena total deste traço, que é muito pequena. Esta também é uma vantagem proporcionada pelo PSA, uma vez que ao desenvolver a retração mais lenta, proporciona tempo para que o concreto adquira resistência para suportar as tensões induzidas.

4.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, as propriedades dos microconcretos estudadas foram: a resistência à compressão (em cilindros e cubos), a resistência à tração na flexão (em prismas) e o módulo de elasticidade. Em cada uma destas, será avaliado separadamente a influência do teor de PSA, a influência da NS e a influência do uso combinado destes dois materiais.

Dos resultados individuais das propriedades mecânicas foram eliminados os valores que se afastaram da média em mais de 6%, para a resistência à compressão em cilindros, segundo a Norma ABNT NBR 7215 (1996). Para a resistência à tração na flexão e resistência à compressão em cubos, a Norma ABNT NBR 13279 (2005) prescreve que devem ser eliminados os corpos de prova que se afastem mais de 0,3 e 0,5 MPa da média, respectivamente. No entanto, a norma trata de argamassas para revestimento de paredes e tetos, sendo estes desvios representativos quando são abordadas resistências usuais da ordem de 8 MPa, para argamassa do tipo III, segundo a Norma NBR ABNT 13281 (2001). Como nesta pesquisa os microconcretos de alta resistência atingiram valores bastante superiores para estas propriedades, os desvios prescritos não se aplicam, sobretudo para a resistência à compressão em cubos, mesmo fazendo a eliminação do número máximo de corpos de provas permitidos pela norma. No entanto, o aumento no desvio obtido é proporcional ao aumento dos valores da resistência, que foram aproximadamente dez vezes maiores que a resistência da argamassa tipo III. Os resultados individuais das propriedades no estado endurecido são mostrados no APÊNDICE C.

4.4.1 Resistência à compressão em cilindros

A avaliação foi feita em 6 cilindros de 5x10 cm, para cada idade de estudo (7 e 28 dias), na condição de cura úmida, conforme a metodologia descrita no capítulo anterior. Na Figura 4-17 são mostrados os resultados obtidos para as nove misturas estudadas nesta pesquisa.

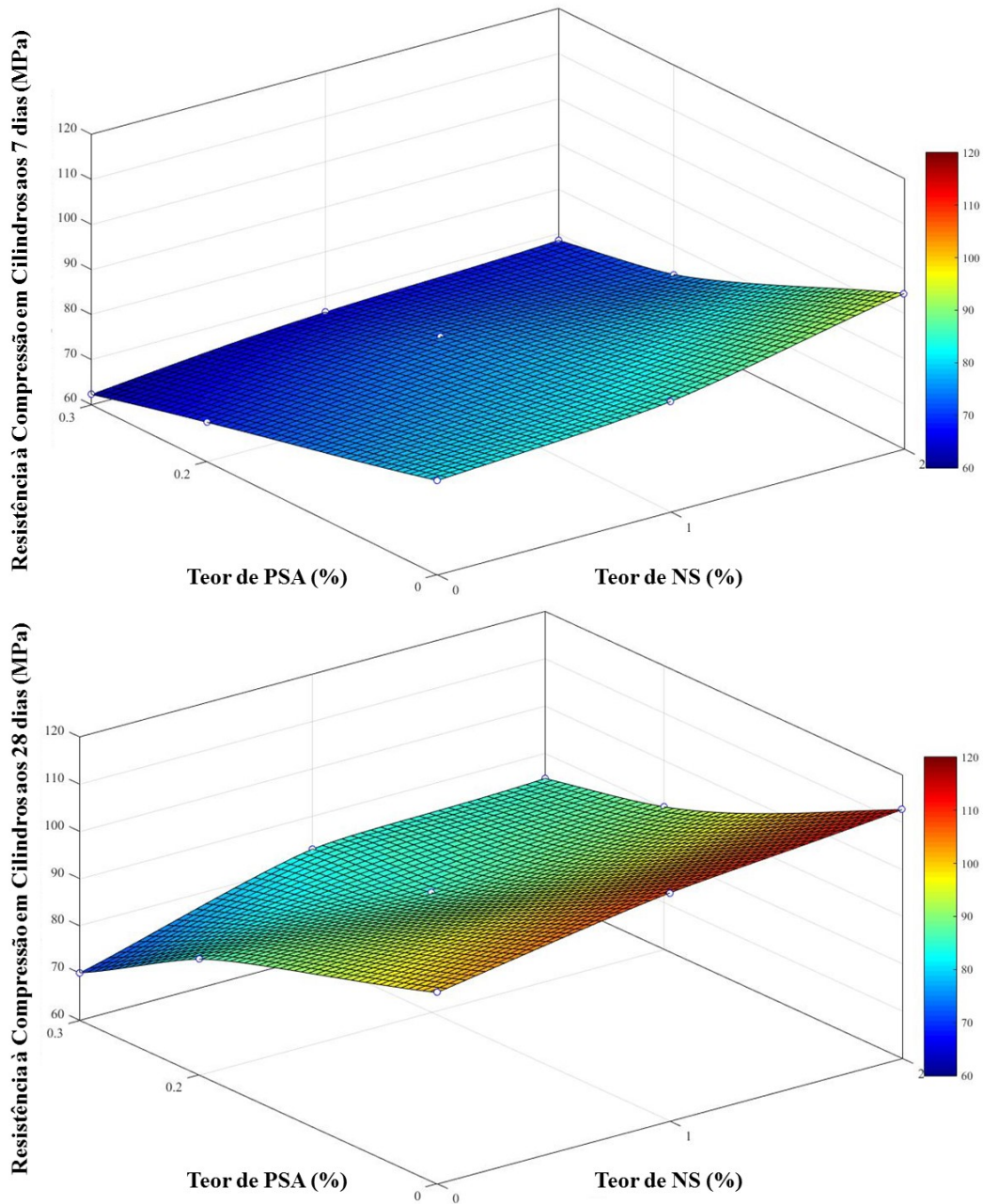


Figura 4-17: Resistência à compressão em cilindros das misturas avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.

É possível verificar a tendência dos dados obtidos. A resistência à compressão em cubos aumenta à medida que um maior é o teor de nanossílica utilizado, e diminui com a adição

de maior quantidade de polímero superabsorvente. Os detalhes deste comportamento são explorados adiante. Na Tabela 4-7 são apresentados os resultados médios de resistência à compressão dos microconcretos nas idades estudadas. Também são mostrados o desvio absoluto das amostras em relação aos resultados médios dos corpos de prova, a porcentagem em relação à mistura de referência e a porcentagem em relação aos traços contendo apenas PSA, no mesmo teor. Os desvios apresentados situaram-se todos abaixo dos 6% recomendados pela Norma ABNT NBR 7215 (1996), mostrando um bom controle durante a realização dos ensaios.

Tabela 4-7: Resultados de resistência à compressão em cilindros para as idades: (a) 7 dias; e (b) 28 dias.

(a) 7 dias					
TRAÇO	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	% em relação à REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	80,9	3,0	100%		
PSA02	68,7	4,3	85%		
PSA03	62,3	4,7	77%		
NS1	84,5	3,0	104%		
NS2	94,5	3,3	117%		
PSA02-NS1	73,8	3,6	91%	107%	87%
PSA02-NS2	73,6	2,8	91%	107%	77%
PSA03-NS1	66,0	3,2	82%	106%	78%
PSA03-NS2	68,6	2,4	85%	110%	72%

(b) 28 dias					
TRAÇO	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	% em relação à REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	100,5	4,3	100		
PSA02	84,5	3,2	84%		
PSA03	70,1	3,2	70%		
NS1	108,3	2,5	108%		
NS2	112,1	2,3	112%		
PSA02-NS1	85,3	3,6	85%	101%	79%
PSA02-NS2	90,1	2,9	90%	107%	80%
PSA03-NS1	84,0	5,0	84%	120%	78%
PSA03-NS2	84,7	2,2	84%	121%	76%

4.4.1.1 Efeito do PSA

Na Figura 4-18 são representados os resultados de resistência à compressão das misturas contendo adição de PSA confeccionadas por Manzano (2014), em relação à mistura de

referência, para as idades de 7 e 28 dias. Verifica-se que o PSA causa um decréscimo na resistência à compressão em cilindros, para ambas as idades estudadas. Aos 7 dias, enquanto a mistura de referência obteve um valor de 80,9 MPa, as misturas contendo polímero apresentaram 68,7 e 62,3 MPa, o que representa 85 e 77% da resistência da REF, para as misturas PSA02 e PSA03, respectivamente. Já aos 28 dias, o microconcreto de referência obteve 100,5 MPa, ante 84,5 e 70,1 MPa das misturas PSA02 e PSA03 (84 e 70% da REF).

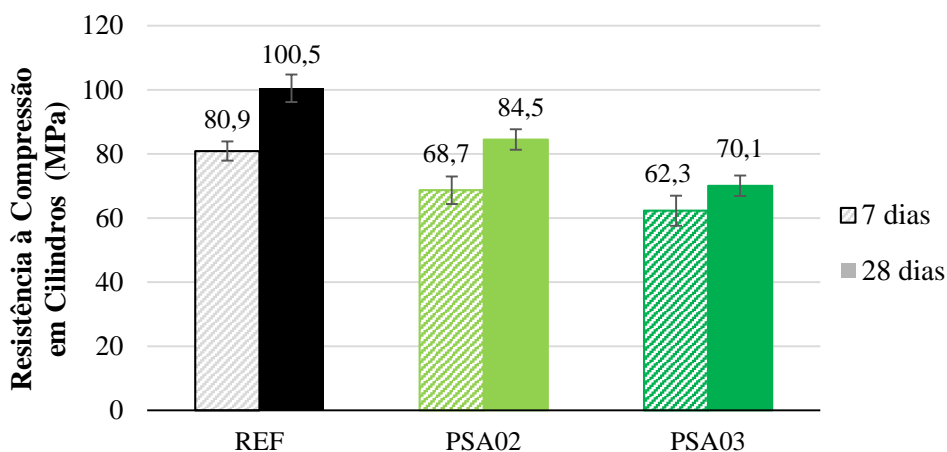


Figura 4-18: Resultados da resistência à compressão em cilindros das misturas contendo apenas PSA e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.

Diversos estudos relatam a perda de resistência mecânica causada pelo PSA, quando comparado com uma mistura de referência com a mesma relação a/c (sem a água adicional de cura), dentre eles cita-se Lura, (2003), Dudziak e Mechtcherine (2010) e Silva (2014).

Ordoñez (2013), ao analisar microconcretos contendo polímero superabsorvente, concluiu que a adição de 0,3% de PSA reduziu a resistência à compressão em cilindros em cerca de 8% aos 28 dias. Segundo ela, as reduções apresentadas na resistência provavelmente se devem a um incremento da porosidade dos microconcretos devido à introdução de partículas de PSA. Estas partículas, ao entrarem em contato com água, absorvem a mesma e aumentam de volume. Durante a hidratação do cimento, quando a umidade relativa externa se torna menor, o PSA libera a água que se encontra em seu interior, e reduz de volume. Esta redução da dimensão do PSA pode gerar vazios no material e afetar a resistência mecânica do microconcreto.

No trabalho de Traldi *et al.* (2014), utilizando tores de 0,3 e 0,6% de PSA, foi verificado que a resistência à compressão aos 28 dias foram de 97,8 MPa, 84,1 MPa e 65,4 MPa, para

os traços de referência, e os traços contendo 0,3 e 0,6% de PSA, respectivamente. A adição de 0,3% do PSA na mistura provocou uma redução na resistência à compressão dos cilindros da ordem de 14%; e a adição de 0,6% do PSA uma redução da ordem de 33%.

Devido à perda significativa de resistência mecânica, algumas publicações questionam se é apropriado utilizar o PSA como agente de cura interna. Não existe ainda um consenso entre os pesquisadores sobre se a água adicional introduzida na mistura (água de cura interna) participa ou não do processo de hidratação. Caso esta resposta seja positiva, se faz necessária uma comparação das misturas contendo PSA com uma referência cuja relação a/c total seja semelhante à a/c total da mistura contendo PSA, pois a perda de resistência pode estar relacionada devido ao aumento da relação a/c causado pela água de cura. Por a/c total entende-se a relação água/cimento acrescida da água de cura interna (HASHOLT, JENSEN, *et al.*, 2012). Desta forma, a comparação é mais adequada e não penaliza o traço contendo PSA, como muitas vezes acontece.

Manzano (2014), em seu trabalho de doutorado, estudou a influência da relação a/c nas propriedades mecânicas de microconcretos contendo PSA, comparando-os com duas relações a/c distintas: 0,30 e 0,35. A adição de 0,3% de PSA, considerando uma absorção de 15g/g, causa um incremento de 0,045 na relação a/c da mistura (a/c total de 0,345), e, portanto é razoável a comparação com a mistura com relação a/c igual a 0,35. Os resultados são mostrados na Tabela 4-8. Nota-se que os valores de resistência do traço PSA03 são bem próximos da relação a/c = 0,35. A diferença entre o traço PSA03 e a referência 0,35 é de apenas 8% (contra 30% de diferença entre o PSA03 e a referência 0,30), indicando que a perda de resistência pode não ser devido à adição de PSA, mas sim pelo incremento causado na relação a/c devido ao acréscimo da água de cura interna.

Tabela 4-8: Comparação da resistência à compressão em cilindros do traço PSA03 com duas relações a/c diferentes (MANZANO, 2014).

Mistura	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
REF a/c = 0,30	89,9	100,5
REF a/c = 0,35	64,5	76,0
PSA03	62,3	70,1
% traço PSA03 em relação à REF a/c = 0,35	97%	92%

Mechtcherine *et al.* (2013b), ao estudar diferentes polímeros superabsorventes, observou que a adição de PSA no teor de 0,3% causa uma redução na resistência à compressão em

cilindros. Seus resultados são mostrados na Tabela 4-9. A adição de ambos os tipos de PSA causam uma redução de aproximadamente 10% quando comparados com a REF1, aos 7 dias. No entanto, esta redução é menos pronunciada quando se compara com a REF2, cuja redução foi de aproximadamente 5% para os ambos os teores avaliados. Na idade de 28 dias, as misturas contendo PSA apresentam em média 81 MPa de resistência à compressão, o que representa 79% da resistência da REF1, e 87% da REF2. Estes resultados são bem próximos dos encontrados nesta pesquisa.

Tabela 4-9: resultados de resistência à compressão em cilindros obtidos pelos autores (MECHTCHERINE, SCHROEFL e GEORGES, 2013b).

Mistura	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
REF1 a/c = 0,30	73	102
REF2 a/c = 0,36	70	93
PSA1 0,3%	66	82
PSA2 0,3%	67	80

4.4.1.2 Efeito da NS

Na Figura 4-19 são representados os resultados de resistência à compressão das misturas contendo adição de NS, em relação à mistura de referência, para as idades de 7 e 28 dias.

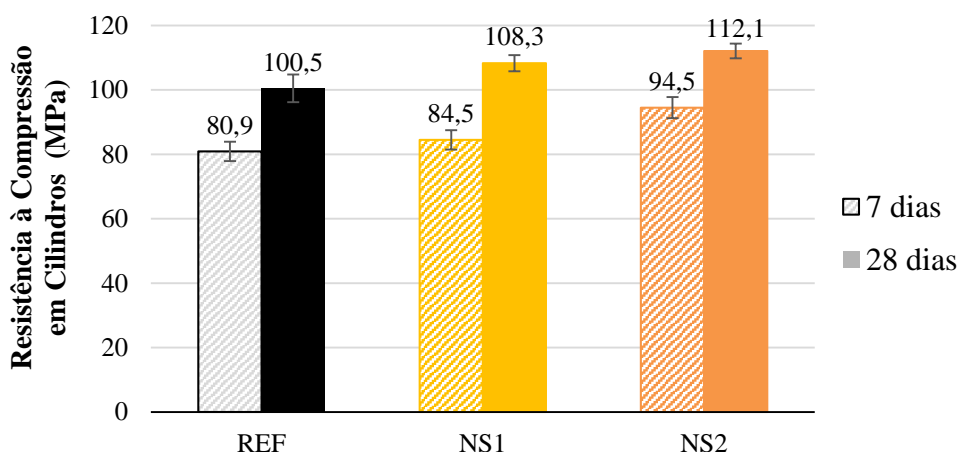


Figura 4-19: Resultados da resistência à compressão em cilindros das misturas contendo apenas NS e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.

Conforme mostrado, verifica-se que a adição de NS aumenta a resistência à compressão das misturas. Aos 7 dias, a mistura REF apresentou resultado igual a 80,9 MPa, enquanto para as misturas NS1 e NS2 os valores obtidos foram 84,5 e 94,5 MPa (aumento de 4 e

17%, respectivamente). No entanto, devido aos expressivos desvios observados, é necessário uma análise estatística para concluir sobre a relevância destas diferenças. Já aos 28 dias, a REF apresentou 100,5 MPa, contra 108,3 e 112,1 MPa das misturas NS1 e NS2 (aumento de 8 e 12%). Segundo Aleen, Heikal e Morsi (2014), o ganho de resistência proporcionado pela NS ocorre devido à hidratação contínua promovida pela mesma e a formação de grandes quantidades de C-S-H e aluminossilicato (principais compostos responsáveis pela resistência à compressão). Além disso, as nano partículas se acumulam nos poros disponíveis, formando uma estrutura mais compacta. Outra razão para este comportamento é o fato da NS comportar-se não só como material de enchimento para melhorar a macroestrutura, mas também como um ativador para promover as reações pozolânicas, reagindo com o CH e levando a uma maior precipitação dos produtos hidratados, tornando a microestrutura homogênea, densa e compacta. Vários estudos demonstraram que a aplicação de NS em sistemas de cimento aumenta o desenvolvimento de resistência, especialmente na fase inicial de hidratação.

Em estudo realizado por QING *et al.* (2008), mostrou-se que a adição de 10% em peso de cimento, de nano partículas de SiO₂ com agentes dispersantes, aumenta a resistência à compressão em compósitos cimentícios, com 28 dias, em até 26%, comparado com um aumento de apenas 10%, com a adição de 15% de pó de sílica, na mesma idade. Sobolev e Sanchez (2010) obtiveram resultados parecidos. Os autores notaram que a adição de 15% de sílica ativa aumenta a resistência em 10%, enquanto a adição de teores menores de NS, de 3 e 5%, promove aumento de 14 e 17% na resistência à compressão, respectivamente.

Andrade (2015) realizou ensaios de índice de desempenho da nanossílica com cimento Portland, em argamassas com relação a/c igual a 0,48. O índice de desempenho é obtido aos 7 dias ao comparar uma mistura contendo apenas cimento Portland (como aglomerante) com as demais misturas de interesse, onde parte do cimento é substituída por alguma adição pozolânica. O autor observou que as misturas contendo adição de 1 e 2% de nanossílica obtiveram índice de desempenho de 24 e 32%, para a resistência à compressão, respectivamente. Os resultados obtidos nesta pesquisa estão de acordo com os resultados do autor, que utilizou-se nanossílica de um mesmo fabricante da utilizada nesta pesquisa, mas de lotes diferentes e com particularidades relativas à composição das misturas.

4.4.1.3 Efeito do uso combinado de PSA e NS

Na Figura 4-20 são representados os resultados de resistência à compressão das misturas contendo adição de ambos os materiais estudados, PSA e NS, em relação à mistura de referência, para as idades de 7 e 28 dias.

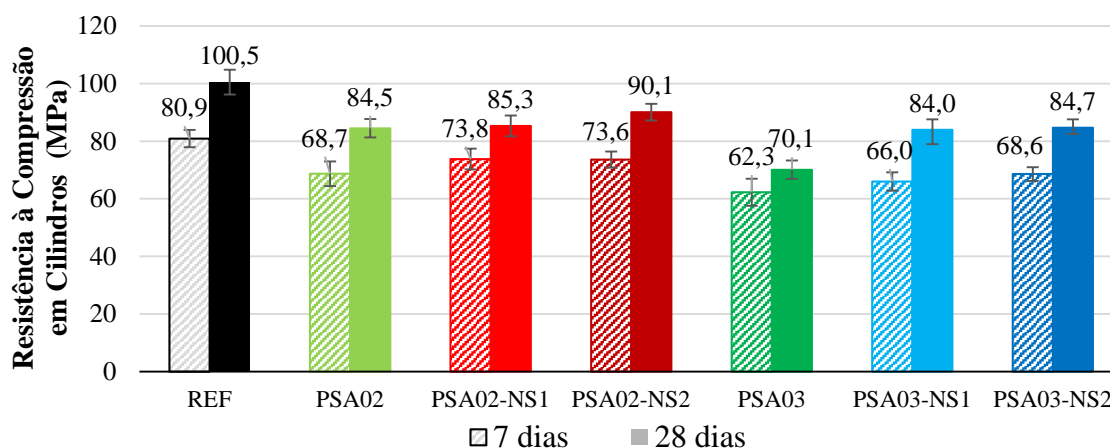


Figura 4-20: Resultados da resistência à compressão em cilindros das misturas híbridas, das misturas contendo apenas adição de PSA e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.

Os resultados mostrados acima revelam que a adição de NS nas misturas contendo PSA causou um incremento na resistência mecânica, no entanto este aumento não foi suficiente para compensar toda a perda causada pelo PSA.

Ao comparar os traços contendo 0,2% de PSA, observa-se que, aos 7 dias, a resistência da mistura contendo apenas PSA foi de 68,6 MPa (85% da mistura REF). As adições de 1 e 2% de nanossílica proporcionaram incremento de 7% em relação ao resultado da mistura PSA02 (73,8 e 73,6 MPa, respectivamente). No entanto, a melhoria promovida pela adição de NS não foi suficiente para compensar toda a perda proporcionada pelo polímero, ou seja, para atingir a resistência de 80,9 MPa da mistura de referência. O mesmo comportamento é verificado aos 28 dias.

Para o teor de 0,3% de polímero, o comportamento foi parecido com o da mistura PSA02. A resistência à compressão obtida para a mistura PSA03 aos 28 dias foi 70,1 MPa (70% da resistência de REF). Já as misturas PSA03-NS1 e PSA03-NS2 obtiveram valores iguais a 84,0 e 84,7 MPa, mostrando um aumento da ordem de 20% em relação à resistência do

microconcreto PSA03, no entanto, insuficiente para compensar a perda causada pela adição do polímero em relação à referência.

O melhor resultado de ganho de resistência, nas misturas contendo PSA, aconteceu para a mistura PSA03-NS1. Nesta mistura, a resistência à compressão em cilindros reduziu 16% em relação à REF, sendo que, na mistura contendo apenas PSA no mesmo teor (PSA03), sem adição de NS, a porcentagem de redução da resistência foi o dobro deste valor (30%). Portanto, a adição de 1% de nanossílica foi capaz de recuperar metade da resistência mecânica perdida aos 28 dias.

Pourjavadi *et al.* (2012), utilizaram a NS em pó para melhorar as propriedades mecânicas de pastas contendo PSA. Foram desenvolvidas nove misturas contendo três teores de NS, e em cada um deles, variando os teores de PSA. No estudo, os autores verificaram que pequenas adições de NS podem compensar o efeito negativo o PSA na resistência à compressão, conforme a Tabela 4-10. No estudo, verificou-se que pequenas adições (0,5 e 1% de NS) foram suficientes para compensar a perda de resistência causada pelo PSA utilizado. Contudo, neste estudo, a perda de resistência causada pelo PSA utilizado foi praticamente desprezível, em comparação com a porcentagem de redução relatada na literatura, da ordem de 10 a 30%, dependendo da dosagem empregada.

Tabela 4-10: Resistência à compressão de pastas contendo NS e PSA obtidas por Pourjavadi *et al.* (2012).

Mistura	NS (%)	PSA (%)	Resistência à Compressão (MPa)	% em relação à mistura Z-0
Z-0	0	0	43,4	100%
Z-1	0	0,1	43,3	100%
Z-2	0	0,3	41,9	97%
H-0	0,5	0	46,6	108%
H-1	0,5	0,1	46,0	106%
H-2	0,5	0,3	45,7	105%
O-0	1	0	49,5	114%
O-1	1	0,1	49,2	113%
O-2	1	0,3	48,3	114%

4.4.2 Resistência à compressão em cubos

A avaliação foi feita nas 12 metades dos corpos de prova prismáticos, provenientes da ruptura à flexão dos 6 prismas de 16 x 4 x 4 cm, conforme a metodologia anteriormente descrita no capítulo 3. Na Figura 4-21 são mostrados os resultados obtidos para as nove

misturas avaliadas, representados em um gráfico de superfície, para as duas idades estudadas. É possível verificar a tendência dos dados obtidos. A resistência à compressão em cubos aumenta à medida que um maior é o teor de nanossílica utilizado, e diminui com a adição de maior quantidade de polímero superabsorvente. Os detalhes deste comportamento são explorados adiante.

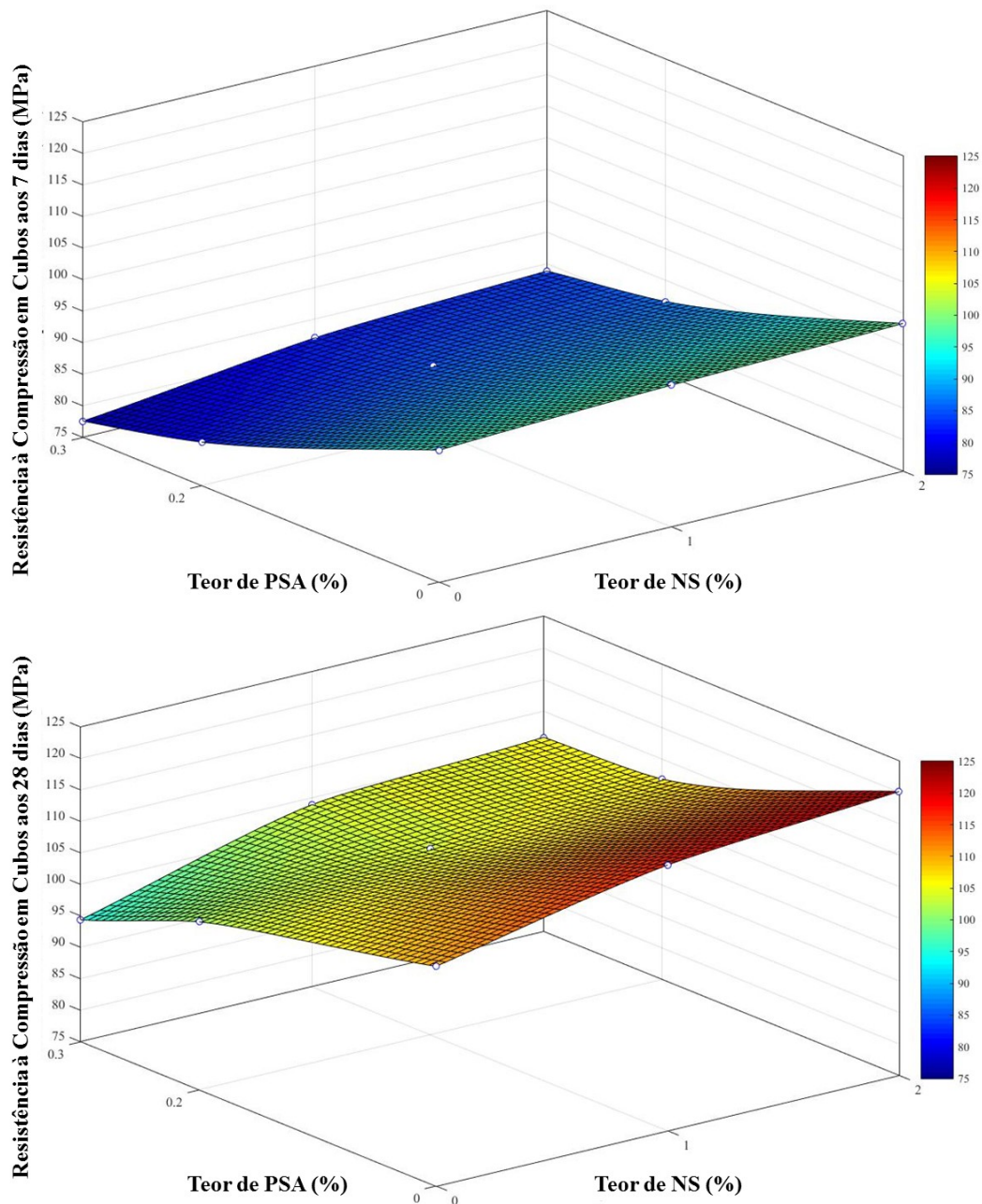


Figura 4-21: Resistência à compressão em cubos das misturas avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.

Na Tabela 4-11 são apresentados os resultados médios da resistência à compressão em cubos das misturas fabricadas. Também são mostrados o desvio absoluto das amostras em relação aos resultados médios dos corpos de prova, a porcentagem desta propriedade para cada mistura, em relação à mistura de referência (100%) e a porcentagem em relação aos traços contendo apenas PSA, no mesmo teor. Os desvios absolutos obtidos, neste caso, não se enquadraram nas recomendações da Norma ABNT NBR 13.279 (2005), cujo valor é de 0,3 MPa. Conforme já mencionado no início deste capítulo, esta norma é referente à argamassas de revestimento de paredes e tetos, e foi utilizada apenas como diretriz para o ensaio. Contudo, é possível observar que os valores obtidos enquadram-se na ordem de 10 vezes o valor prescrito pela mesma, ao mesmo tempo que a resistência obtida também é 10 vezes superior à resistência de uma argamassa comum de revestimento (aproximadamente 8 MPa)

Tabela 4-11: Resultados de resistência à compressão, em cubos, para as idades: (a) 7 dias; e (b) 28 dias.

(a) 7 dias					
TRAÇO	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	% em relação à REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	95,9	3,5	100		
PSA02	81,9	4,2	85%		
PSA03	77,6	2,7	81%		
NS1	99,1	1,5	103%		
NS2	99,6	2,5	104%		
PSA02-NS1	84,9	1,6	89%	104%	86%
PSA02-NS2	85,4	2,2	89%	104%	86%
PSA03-NS1	81,9	0,9	85%	106%	83%
PSA03-NS2	84,3	1,8	88%	109%	85%

(b) 28 dias					
TRAÇO	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	% em relação à REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	109,9	4,3	100		
PSA02	101,7	5,0	93%		
PSA03	94,4	3,1	86%		
NS1	117,5	1,6	107%		
NS2	119,0	3,8	108%		
PSA02-NS1	104,6	1,2	95%	103%	89%
PSA02-NS2	106,3	2,0	97%	105%	89%
PSA03-NS1	103,3	2,3	94%	109%	88%
PSA03-NS2	106,5	1,3	97%	113%	89%

4.4.2.1 Efeito do PSA

Na Figura 4-22 comparam-se os resultados de resistência à compressão em cubos das misturas contendo apenas adição de PSA realizadas por Manzano (2014), em relação à mistura de referência, aos 7 e 28 dias.

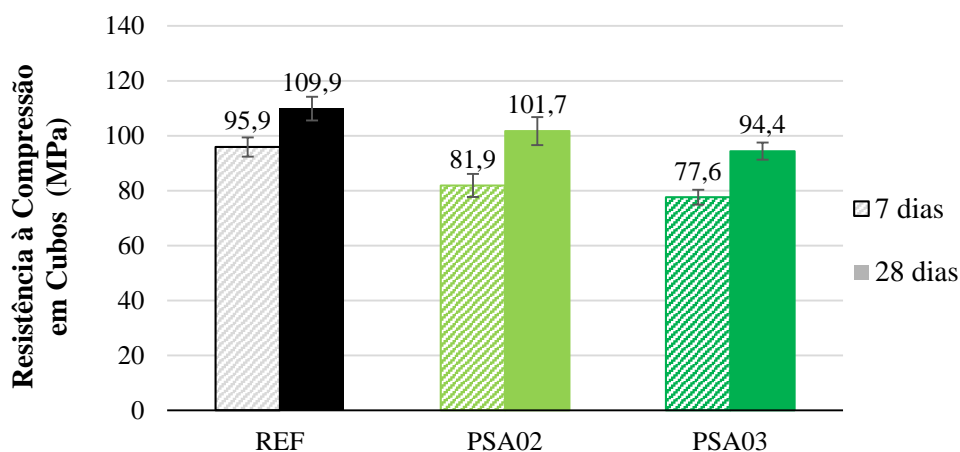


Figura 4-22: Resultados da resistência à compressão em cubos das misturas contendo apenas PSA, em comparação com o traço REF, para as idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.

Pode-se observar que o PSA causa um decréscimo na resistência à compressão em cubos em ambas as idades estudadas. Aos 7 dias, enquanto a mistura de referência obteve um valor de 95,9 MPa, as misturas contendo polímero apresentaram 81,9 e 77,6 MPa, que se traduz em uma queda de 15 e 19%, para as misturas PSA02 e PSA03, respectivamente. Já aos 28 dias, o microconcreto de referência obteve 109,9 MPa, ante 101,7 e 94,4 MPa das misturas PSA02 e PSA03 (93 e 86% da resistência do traço de REF).

Conforme exposto no item 4.3.1, este comportamento está de acordo com os resultados obtidos nos trabalhos consultados, comprovando que a adição de PSA reduz significativamente as propriedades mecânicas dos materiais à base de cimento.

Em seu trabalho de mestrado, Ordoñez (2013), concluiu que a adição de 0,3% de PSA reduz a resistência à compressão em cubos em aproximadamente 5% aos 28 dias. Como esperado, o microconcreto de referência obteve a maior resistência à compressão para as idades analisadas. Por ser um concreto de alto desempenho, é esperado obter elevada resistência à compressão.

Claro e Saraiva (2013) encontraram reduções na resistência à compressão em cubos ordem de 6% a 7% aos 7 e 28 dias, respectivamente, utilizando PSA no teor de 0,3% em relação à massa de cimento. Já utilizando PSA no teor de 0,6%, os autores encontraram reduções na ordem de 13% aos 7 dias e 15% aos 28 dias, valores muito próximos aos obtidos nesta pesquisa.

Nota-se que, tanto na resistência à compressão em cilindros quanto na feita em cubos, o PSA causou diminuição na resistência mecânica dos microconcretos. Ao compararmos os valores da Tabela 4-6 (compressão em cilindros) com a Tabela 4-11 (compressão em cubos), é possível observar que a resistência a compressão obtida na segunda é bem superior à primeira, em média 15%, valor próximo do obtido por Ordoñez (2013), que observou que a resistência das misturas medidas em cubos é da ordem de 20% superior que a resistência medida em cilindros, para todas as misturas.

No entanto, neste trabalho, os traços contendo PSA apresentaram uma redução menor no ensaio de resistência em cubos (7 e 17% para os teores de PSA02 e PSA03), quando comparados com a redução obtida no ensaio de compressão em cilindros 9 (16 e 30%, respectivamente).

De forma geral, a perda de resistência à compressão dos microconcretos, com o emprego do PSA, pode ser atribuída aos efeitos causados pelo PSA na hidratação do cimento. O polímero sofre inchamento ao entrar em contato com a água. Na fase da hidratação, a água necessária para a cura interna vai sendo desprendida do polímero voltando este a seu tamanho original, o que parece deixar vazios na estrutura.

Segundo Dudziak e Mechtcherine (2010), diferentes teorias podem dar explicação ao fato do PSA gerar diminuição na resistência à compressão. Uma delas explica que a redução possivelmente se apresenta devido ao fato do concreto estar misturado com a partícula de PSA e, portanto, ter água extra na sua mistura. Como resultado dessa mistura se tem a formação de poros, inicialmente preenchidos pela incorporação de água para cura interna e, subsequentemente, esvaziados pela utilização dessa água.

4.4.2.2 Efeito da NS

Conforme verificado no ensaio de resistência à compressão em cilindros, o efeito da NS na resistência à compressão em cubos foi similar, mostrando que a adição deste material

promove um aumento na resistência em ambas as idades estudadas. Na Figura 4-23 são representados os resultados de resistência à compressão em cubos das misturas contendo apenas adição de NS, em relação à mistura de referência, para as idades de 7 e 28 dias.

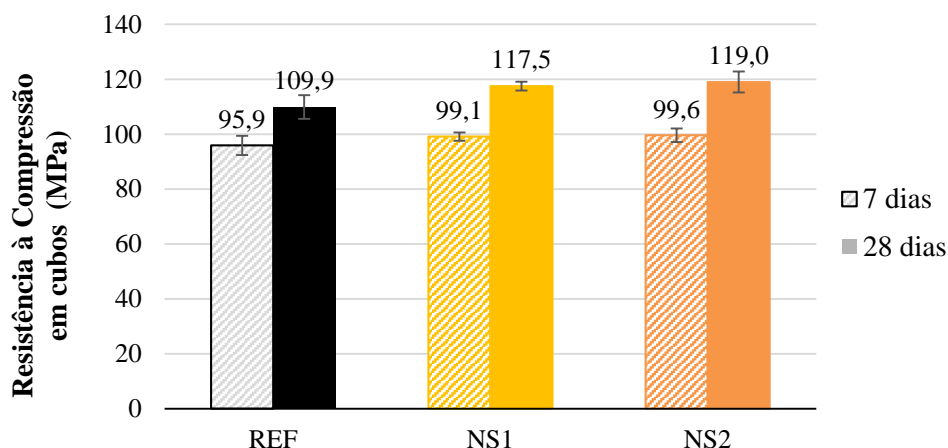


Figura 4-23: Resultados da resistência à compressão em cubos das misturas contendo apenas nanossílica, em comparação com o traço REF, para as idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.

Conforme mostrado, verifica-se que a adição de NS aumenta a resistência à compressão das misturas. Aos 7 dias, a mistura REF apresentou resultado igual a 95,9 MPa, enquanto para as misturas NS1 e NS2 os valores obtidos foram 99,1 e 99,6 MPa (aumento de 3 e 4%, respectivamente). Já aos 28 dias, a REF apresentou 109,9 MPa, em comparação com 117,5 e 119,0 MPa das misturas NS1 e NS2 (aumento de 7 e 8%). A magnitude do incremento devido à adição de nanossílica é aproximadamente a mesma para os dois tipos de corpos de prova ensaiados (cilindros e cubos), mostrando uma boa correlação entre a execução de ambos os ensaios.

Morais (2012) constatou que a adição de 1% de NS em concretos dosados para centrais causou incremento de aproximadamente 10% na resistência à compressão, quando comparada com a resistência da mistura de referência.

Segundo Andrade (2015), o efeito da NS é mais pronunciado nas primeiras idades, o que não foi verificado em nenhuma das propriedades mecânicas avaliadas nesta pesquisa. Para que as reações pozolânicas aconteçam, é necessário hidróxido de cálcio disponível, advindo da reação de hidratação do cimento e, como a nanossílica possui elevado teor de

sílica amorfa e tamanho de partícula muito pequeno, a maior parte do hidróxido de cálcio é consumida nas primeiras idades de hidratação. No entanto, por se tratar, neste trabalho, de concretos de alta resistência com elevado consumo de cimento tipo CP V-ARI, apresentando aproximadamente 90% da resistência final aos 7 dias, é provável que este efeito tenha ocorrido, mesmo em menor escala.

Segundo Senff (2009a), o ganho de resistência nas primeiras idades ocorre devido a uma ligeira aceleração na hidratação do cimento, enquanto nas idades finais pode ser atribuído principalmente à reação pozolânicas. Esta reação favorece o refinamento dos poros e a substituição do constituinte mais fraco (hidróxido de cálcio) que é solúvel em água, por um composto mais forte, o C-S-H. A substituição do hidróxido de cálcio por C-S-H evita possíveis problemas de lixiviação. O efeito químico da nanossílica também está presente na zona de transição através do aumento da aderência agregado-pasta.

Aleen, Heikal e Morsi (2014) avaliaram o incremento de resistência devido à adição de nanossílica em argamassas de alta resistência, até os 100 dias de idade. No estudo os autores mostram que a resistência à compressão, aos 28 dias, foi de 21 MPa na mistura de referência, e 30 e 32 MPa nas misturas com adição de 1 e 2% de NS (aumento de 32 e 42%, respectivamente). Os autores também notaram que, a partir dos 28 dias, houve aumento considerável nesta propriedade. Os resultados para as mesmas misturas aos 100 dias foram 27,5, 32 e 35 MPa. Isto é devido à formação contínua de grandes quantidades de C-S-H e aluminossilicatos (principais promotores da resistência à compressão). Esses produtos acumulam-se nos vazios, formando uma estrutura mais compacta e fechada.

4.4.2.3 Efeito do uso combinado de PSA e NS

O comportamento das duas adições na resistência à compressão em cubos pode ser verificado na Figura 4-24, para as idades de 7 e 28 dias. Assim como ocorreu no item 4.3.1.3, o efeito das duas adições simultâneas promoveu ganho de resistência devido à nanossílica, contudo este ganho não foi suficiente para compensar por completo a perda de resistência causada pelo PSA. Contudo, os resultados obtidos em cubos para as misturas híbridas foram promissores nesta propriedade, mostrando que a nanossílica é capaz de compensar quase na sua totalidade, a perda causada pelo polímero nos teores estudados.

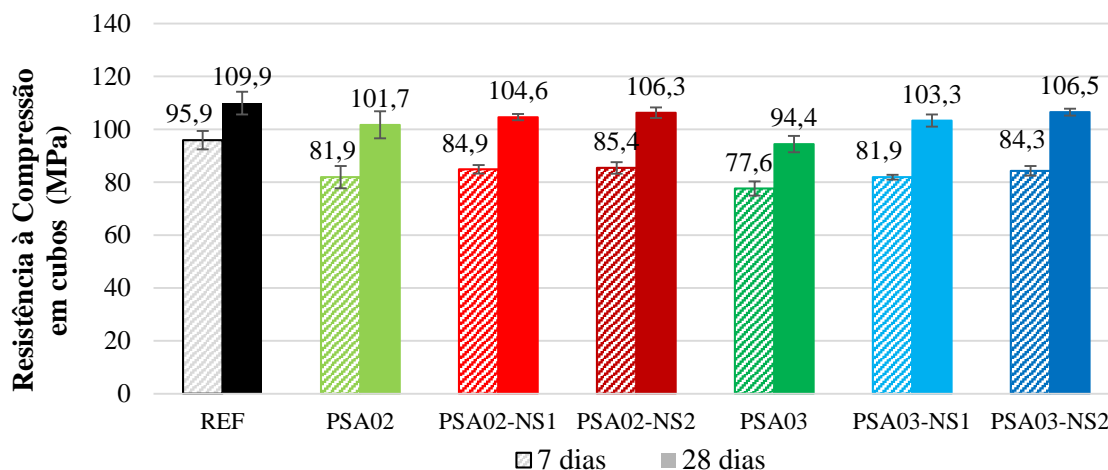


Figura 4-24: Resultados da resistência à compressão em cubos das misturas híbridas, das misturas apenas com PSA e do traço de REF, para as idades de 7 e 28 dias e seus respectivos desvios absolutos.

Em comparação com a mistura REF, os traços contendo 2% de NS mostraram-se bastante eficientes na compensação da perda ocasionada pelos dois teores de PSA utilizados. Aos 28 dias, enquanto a REF apresentou valor igual a 109,9 MPa, os traços PSA02-NS2 e PSA03-NS2 apresentaram, respectivamente, 106,3 e 106,5 MPa (97% da REF), mostrando que as nano partículas de sílica praticamente igualaram os valores obtidos.

No estudo de Pourjavadi *et al.* (2012), mostrado no item 4.3.1, verificou-se que mesmo pequenas adições (0,5 e 1% de NS) foram suficientes para compensar a perda de resistência causada pelo PSA utilizado, que foi muito pequena (da ordem de 4%) em relação àquelas relatadas na literatura (aproximadamente 10 a 30%).

Os resultados mostram também que a capacidade da nanossílica em promover a resistência à compressão não foram expressivamente afetada pela adição de polímero, uma vez que, nas misturas contendo PSA, as adições de 1 e 2% de NS promoveram incremento da ordem de 9 e 13% na resistência à compressão em cubos, em comparação com o aumento de 7 e 8% causado pela adição de nanossílica em comparação com a REF.

O melhor resultado, assim como ocorreu na compressão em cilindros, aconteceu para a mistura PSA03-NS1. Nesta, a resistência à compressão em cubos reduziu 6% em relação à REF, sendo que, na PSA03, sem adição de NS, a porcentagem de redução da resistência foi superior ao dobro do valor (14%). Portanto, a adição de 1% de NS foi capaz de recuperar metade da resistência mecânica perdida aos 28 dias. Este resultado, análogo ao obtido nos corpos de prova cilíndricos, mostram um bom controle na realização dos ensaios.

4.4.3 Resistência à tração na flexão em prismas

O comportamento da resistência à tração dos microconcretos foi avaliado pela análise de no mínimo 6 resultados de corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm, distribuídos nas idades de 7 e 28 dias, conforme metodologia descrita no capítulo 3. Na Figura 4-25 são mostrados os resultados obtidos para as nove misturas estudadas nesta pesquisa.

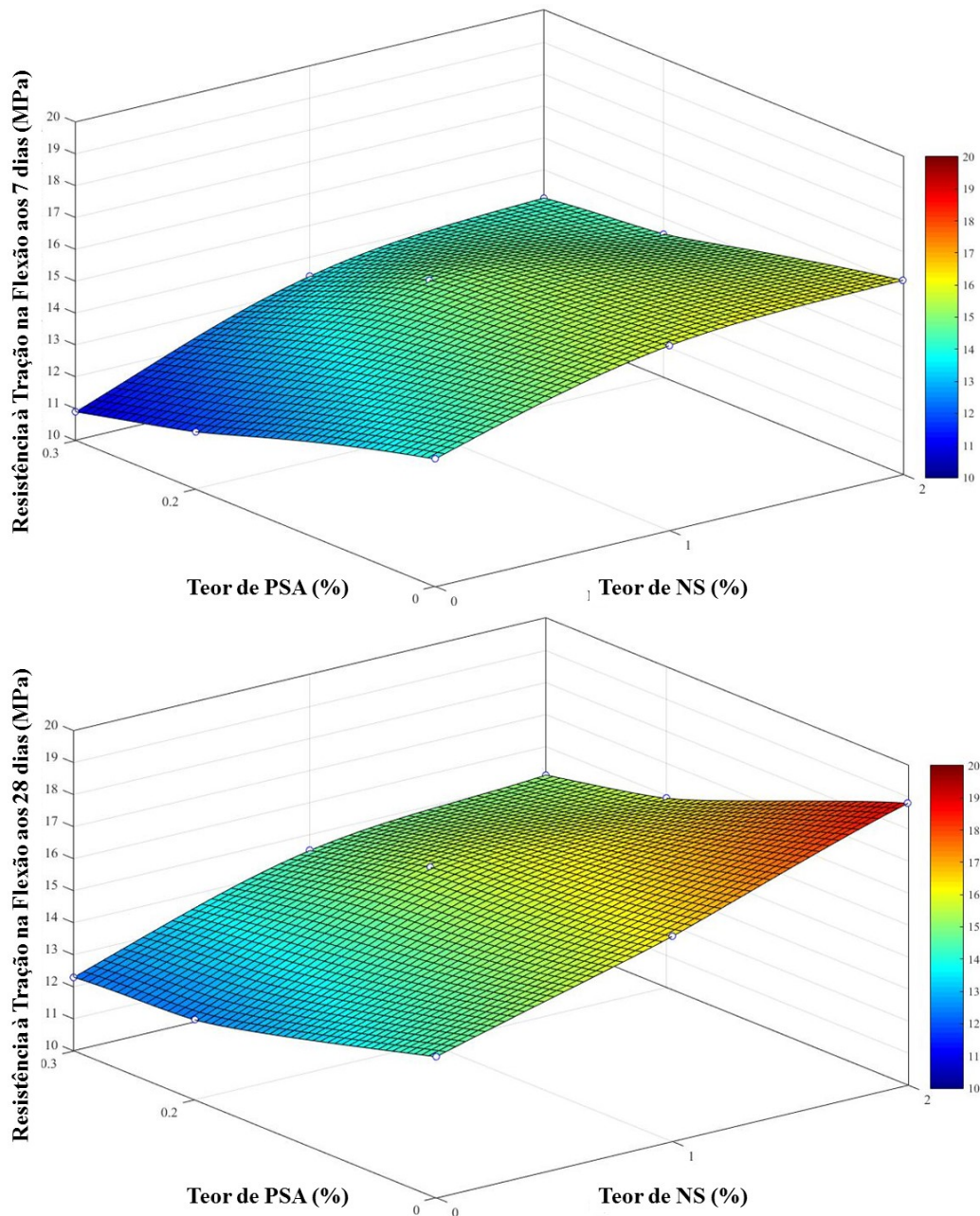


Figura 4-25: Resistência à tração na flexão, em prismas, das nove misturas avaliadas nas idades de 7 e 28 dias.

No gráfico de superfície é possível verificar a tendência dos dados obtidos. A resistência à tração na flexão aumenta à medida que se aumenta o teor de nanossílica utilizado e diminui com a adição de maior quantidade de polímero superabsorvente. Na Tabela 4-12 são apresentados os resultados médios dos ensaios de resistência à tração na flexão para os microconcretos estudados. Também é mostrado o desvio absoluto das amostras em relação aos resultados médios dos corpos de prova, a porcentagem que cada mistura representa, em relação à mistura de referência (100%), e a porcentagem em relação aos traços contendo apenas PSA, no mesmo teor. Os desvios obtidos, apesar de não atenderem o disposto na Norma ABNT NBR 13279 (2005), cujo valor é de 0,3 MPa, devido aos motivos já expostos no item 4.4.2, ficaram bem próximos do estabelecido, sendo que apenas 3 misturas não atenderam os desvios normalizados.

Tabela 4-12: Resultados de resistência à tração na flexão, em prismas, para as idades: (a) 7 dias; e (b) 28 dias.

(a) 7 dias					
TRAÇO	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	% em relação à REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	14,0	0,6	100%		
PSA02	11,8	0,5	84%		
PSA03	10,9	0,8	78%		
NS1	15,8	0,3	113%		
NS2	16,2	0,3	116%		
PSA02-NS1	14,6	0,3	104%	124%	92%
PSA02-NS2	14,5	0,3	103%	123%	89%
PSA03-NS1	13,4	0,2	96%	123%	85%
PSA03-NS2	14,1	0,3	101%	129%	87%

(b) 28 dias					
TRAÇO	Resistência (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	% em relação à REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	14,4	0,6	100%		
PSA02	12,5	0,5	87%		
PSA03	12,3	0,7	85%		
NS1	16,4	0,2	114%		
NS2	18,9	0,2	131%		
PSA02-NS1	15,5	0,4	108%	124%	95%
PSA02-NS2	15,9	0,4	110%	127%	84%
PSA03-NS1	14,5	0,2	101%	118%	88%
PSA03-NS2	15,1	0,3	105%	123%	80%

4.4.3.1 Efeito do PSA

Na Figura 4-26 comparam-se os resultados de resistência à tração na flexão das misturas contendo adição de PSA, em relação à mistura de referência, para as idades de 7 e 28 dias. Os resultados foram obtidos por Manzano (2014).

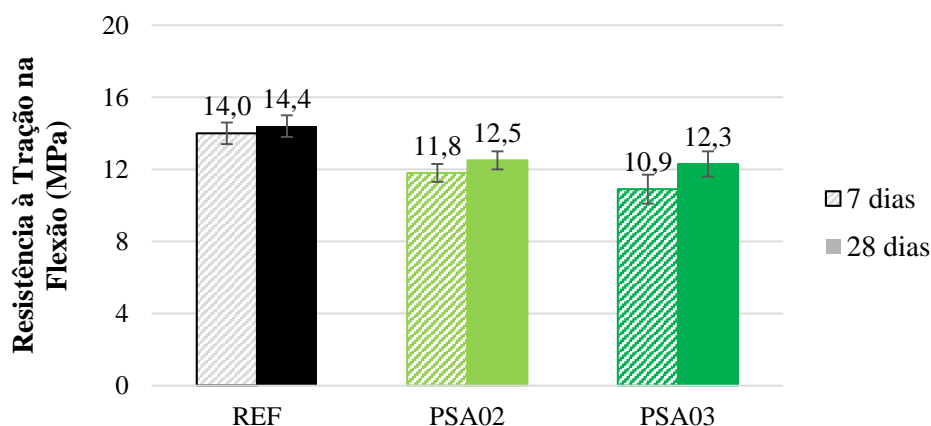


Figura 4-26: Resultados da resistência à tração na flexão em prismas nas idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.

Pode-se observar que o PSA causa um decréscimo na resistência à tração na flexão em ambas as idades estudadas. Aos 7 dias, enquanto a mistura de referência obteve um valor de 14,0 MPa, as misturas contendo polímero apresentaram 11,8 e 10,9 MPa, que representa uma redução de 16 e 22% para as misturas PSA02 e PSA03, respectivamente. Já aos 28 dias, o microconcreto de referência obteve 14,4 MPa, ante 12,5 e 12,3 MPa das misturas PSA02 e PSA03 (redução de 13 e 15% da resistência do traço de REF). Em resumo, houve perda de até 25% da resistência mecânica devido à adição de 0,3% de PSA.

Conforme já exposto, este comportamento está de acordo com os resultados obtidos nos trabalhos consultados, comprovando que a adição de PSA reduz consideravelmente as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios. Os resultados obtidos também indicam uma boa execução dos ensaios, uma vez que as 3 propriedades mecânicas apresentadas até o momento mostraram proporcionalidade em seus resultados.

Os resultados obtidos por Traldi *et al.* (2014), ao trabalharem com o mesmo traço e mesmo polímero, mostram valores iguais a 13,0 MPa (referência), 11,0 MPa (teor de 0,3% de PSA) e 9,3 MPa (teor de 0,6% de PSA), aos 28 dias. No traço contendo 0,3% de polímero, a redução na resistência à tração foi de 12% aos 7 dias e de 15% aos 28 dias, valores estes

muito próximos dos obtidos nesta pesquisa. A magnitude dos resultados obtidos está em consonância com os valores obtidos neste trabalho.

4.4.3.2 Efeito da NS

Na Figura 4-28 são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão das misturas contendo apenas adição de NS, em relação à mistura de referência, para as idades de 7 e 28 dias.

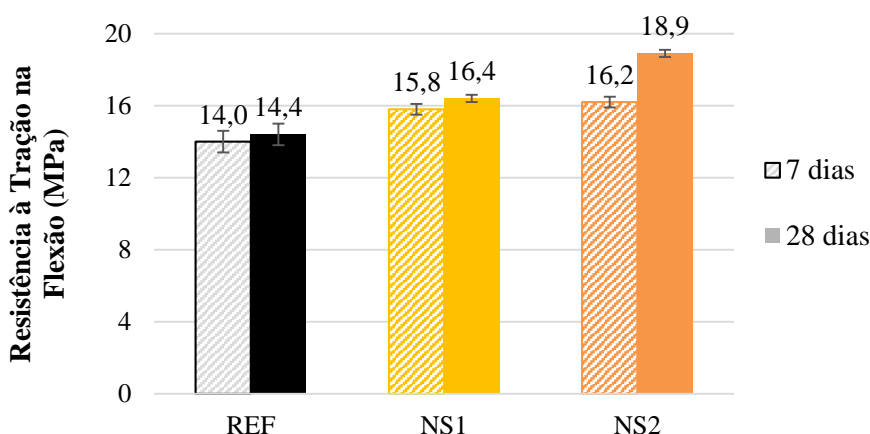


Figura 4-27: Resultados da resistência à tração na flexão, em prismas, nas idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.

Em consonância com resultados obtidos nas demais propriedades, verificou-se que a adição de NS causou significativo aumento na resistência à tração na flexão. Aos 7 dias, a mistura REF apresentou resultado igual a 14,0 MPa, enquanto para as misturas NS1 e NS2 os valores obtidos foram 15,8 e 16,2 MPa (aumento de 13 e 16%, respectivamente). Já aos 28 dias, a REF apresentou resistência à tração na flexão igual a 14,4 MPa, em comparação com 16,4 e 18,9 MPa das misturas NS1 e NS2 (aumento de 14 e 31%).

Novamente, nota-se que o incremento de resistência foi maior aos 28 dias, corroborando com os estudos realizados por Senff (2009a), para quem este fenômeno está relacionado com as reações pozolânicas que continuam ocorrendo na mistura.

Andrade (2015) observou que a adição de nanossílica também aumenta a resistência à tração por compressão diametral. No estudo, foram ensaiadas argamassas contendo apenas nanossílica, no teor de 3% e a combinação do teor de 3% de NS com adição de 10% de sílica ativa. Os resultados obtidos, aos 28 dias, foram 3,7 MPa para a mistura de referência,

4,3 MPa para a mistura contendo 3 % de NS (aumento de 17%), e 4,7 MPa para a mistura com adição de 3% de nanossílica e 10% de sílica ativa (aumento de 28%). Conforme esperado, a efetividade da nanossílica na presença de adição mineral foi superior quando comparada com a mistura contendo NS, mostrando que tanto as adições minerais altamente reativas, quanto à nanossílica coloidal proporcionaram o aumento do índice de desempenho à tração das misturas. Isto se deve principalmente as reações pozolânicas e ao efeito fíler, que densificam a matriz cimentícia proporcionando o aumento da resistência mecânica.

QING *et al.* (2008) verificaram que, mesmo em pequenas quantidades, a adição de NS aumentou a resistência à flexão em até 25%. No entanto, estes resultados dependem do método de produção e das condições de síntese das NS (proporções molares, tipo de reação, duração da reação etc.) e do fato de que a dispersão da NS, na massa, tem um papel importante. Esta colocação do autor é relevante, uma vez que, mesmo a maioria dos trabalhos consultados descreverem um aumento nas propriedades mecânicas devido à adição de NS, os resultados das diferentes pesquisas apresentam bastante divergência, fato que pode estar relacionado com as características da NS utilizada.

4.4.3.3 Efeito do uso combinado de PSA e NS

O comportamento das duas adições na resistência à tração na flexão pode ser verificado na Figura 4-28, para as idades de 7 e 28 dias.

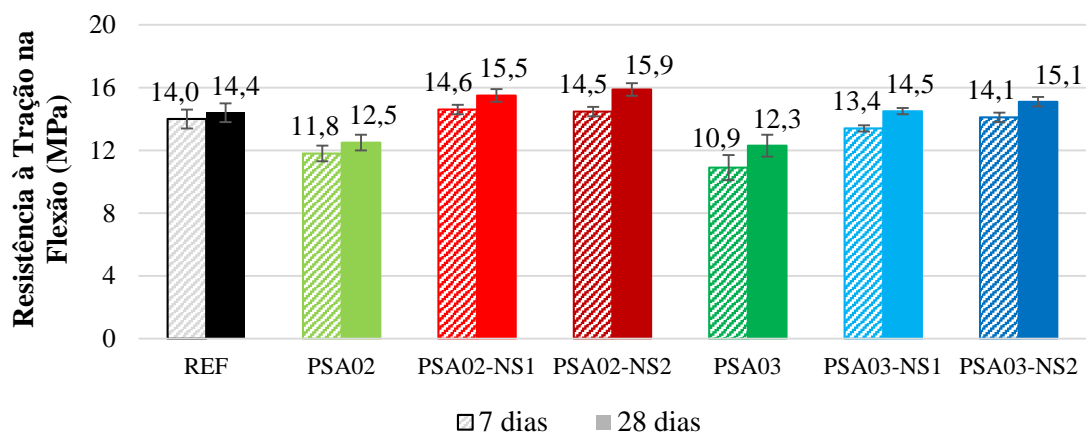


Figura 4-28: Resultados da resistência à tração na flexão, em prismas, nas idades de 7 e 28 dias, e seus respectivos desvios absolutos.

No ensaio de resistência à tração na flexão, a adição de nanossílica mostrou-se capaz de compensar, em sua totalidade, a perda de resistência causada pelo PSA, atingindo valores

inclusive superiores aos valores de referência para a mesma idade, indicando que a nanossílica é promissora na promoção da resistência à tração mesmo na presença de PSA.

Em comparação com a mistura de referência, os traços contendo 2% de NS mostraram-se bastante eficientes na compensação da perda ocasionada pelos dois teores de polímero utilizados. Aos 28 dias, enquanto a referência apresentou resistência à tração na flexão igual a 14,4 MPa, os traços PSA02-NS2 e PSA03-NS2 apresentaram, respectivamente, 15,9 e 15,1 MPa (aumento de 10 e 5% em relação à resistência de REF), mostrando que as nano partículas de sílica não só compensaram a perda causada pelo PSA nesta propriedade, como apresentaram valores superiores aos da REF, traduzindo-se num ganho real de resistência mesmo nos traços contendo PSA.

No estudo de Pourjavadi *et al.* (2012), os autores também avaliaram a resistência à flexão das amostras contendo teores de NS e de PSA. Os resultados são mostrados na Tabela 4-13. Nota-se que, nas misturas contendo 0,1% de PSA, a adição de NS nos teores de 0,5 e 1% compensou por completo a perda de resistência à tração (misturas H-1 e O-1), aos 7 dias. Já aos 28 dias, a resistência só foi completamente compensada ao se adicionar 1% de nanossílica, em ambos os teores de PSA estudados (105 e 102% da referência, para os teores de 0,5 e 1% de adição de nanossílica).

Tabela 4-13: Resistência à flexão das misturas realizadas por Pourjavadi *et al.* (2012).

Mistura	Teor de NS (%)	Teor de PSA (%)	Resistência à Flexão (MPa) (%)	
			7 dias	28 dias
Z-0	0	0	5,9 (100)	6,5 (100)
Z-1	0	0,1	5,5 (93)	6,2 (95)
Z-3	0	0,3	5,0 (85)	6,0 (92)
H-0	0,5	0	6,3 (107)	6,7 (103)
H-1	0,5	0,1	5,9 (100)	6,4 (98)
H-3	0,5	0,3	5,4 (91)	6,3 (97)
O-0	1	0	6,5 (110)	7,2 (111)
O-1	1	0,1	6,0 (102)	6,8 (105)
O-3	1	0,3	5,7 (97)	6,6 (102)

4.4.4 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi avaliado em três corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm na idade de 28 dias, conforme a metodologia descrita no capítulo 3. A dispersão máxima dos resultados foi de 4%, atendendo assim ao disposto na norma NBR 8522 (2008). Os resultados médios do módulo de elasticidade, realizado no laboratório de

FURNAS Centrais Hidroelétricas S.A., para os nove microconcretos estudados são apresentados na Tabela 4-14 abaixo. Também são mostradas as porcentagens que esta propriedade representa em relação ao traço de referência (REF) e em relação aos traços contendo apenas NS e apenas PSA, nos mesmos teores.

Tabela 4-14: Resultados médios do ensaio de módulo de elasticidade para as misturas estudadas, aos 28 dias, e o valor que cada um representa em relação à REF e aos traços contendo apenas PSA e apenas NS, no mesmo teor.

TRAÇO	Módulo de Elasticidade (GPa)	% em relação a REF	% em relação ao PSA	% em relação à NS
REF	38,1	100%		
PSA02	34,2	90%		
PSA03	34,8	91%		
NS1	43,1	113%		
NS2	42,4	111%		
PSA02-NS1	42,8	112%	125%	99%
PSA02-NS2	41,3	108%	121%	97%
PSA03-NS1	39,8	104%	114%	92%
PSA03-NS2	39,2	103%	113%	92%

4.4.4.1 Efeito do PSA

A Figura 4-29 apresenta os valores de módulo de elasticidade das misturas contendo apenas adição de PSA que foram confeccionadas por Manzano (2014), em comparação com o valor obtido para a REF. Observa-se que a adição de PSA causou uma redução no módulo de elasticidade das misturas da ordem de 10%, para ambas as misturas PSA02 e PSA03. Este comportamento era esperado, uma vez que o módulo de elasticidade está diretamente correlacionado com a resistência à compressão do material.

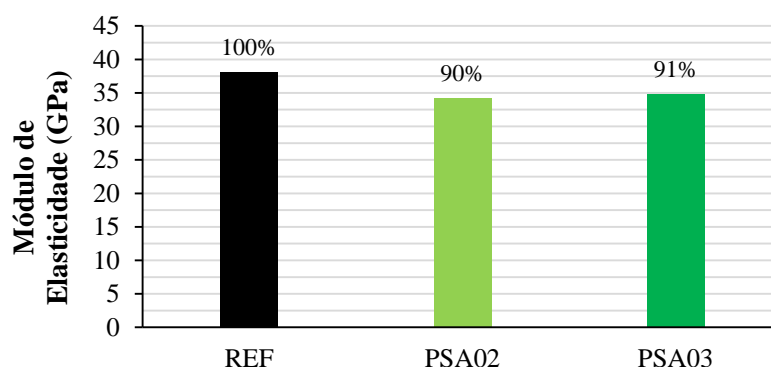


Figura 4-29: Valores do módulo de elasticidade, determinados experimentalmente, para as misturas contendo PSA em relação à REF, aos 28 dias.

Kovler e Jensen (2007) colocam que, nas idades precoces, a maioria dos trabalhos relata uma redução no módulo de elasticidade e demais propriedades mecânicas dos materiais contendo PSA. Entretanto, algumas publicações demonstram maiores resistências em idades avançadas para misturas contendo PSA, em relação às misturas de referência. Em geral, a resistência do concreto com PSA depende das condições de cura, idade e composição do material. Um efeito que pode ser esperado é a redução moderada na resistência, nas primeiras idades devido ao aumento da porosidade e umidade das amostras. Ao mesmo tempo, os corpos-de-prova ensaiados em idades avançadas, algumas vezes apresentam resistência e módulo de elasticidade mais elevados do que os resultados das misturas de referência. Este aumento provavelmente é devido à hidratação avançada do cimento, que pode compensar a redução na resistência causada pela elevada porosidade deixada pelo polímero. Contudo, faz-se necessário um estudo mais profundo deste comportamento para compreender suas causas, investigando a microestrutura dos concretos contendo PSA.

Convém observar que a redução apresentada nas propriedades mecânicas e no módulo de elasticidade das misturas contendo apenas PSA muito provavelmente apresentariam resultados mais elevados se a comparação fosse feita com uma mistura de referência com relação a/c mais elevada do que a utilizada no estudo, ou seja, uma mistura com relação a/c igual à das misturas contendo polímero, com o acréscimo da água de cura interna.

4.4.4.2 Efeito da NS

A Figura 4-29 abaixo apresenta os valores de módulo de elasticidade das misturas contendo apenas adição de nanossílica, em comparação com o valor obtido para o traço de referência.

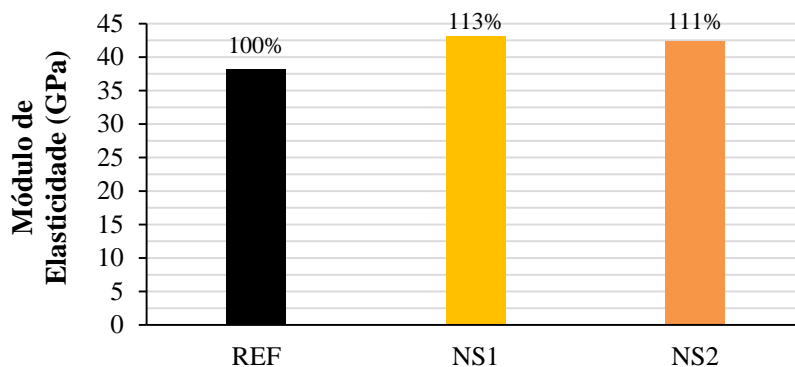


Figura 4-30: Valores do módulo de elasticidade obtidos para as misturas contendo NS, em relação à REF, aos 28 dias.

É possível observar que a adição de NS aumentou consideravelmente o módulo de elasticidade das misturas, da ordem de 12%, para ambas as misturas NS1 e NS2. Este comportamento era esperado, uma vez que o módulo de elasticidade está diretamente correlacionado com a resistência à compressão do material. É importante salientar que praticamente não houve diferença entre o resultado do ensaio obtido para os teores de 1 e 2% de NS, justificando assim o uso do teor menor, comportamento este já observado nas demais propriedades mecânicas avaliadas.

Pourjavadi *et al.* (2012) coloca que as nano partículas de sílica estão se tornando um componente cada vez mais importante em concretos especiais e de alto desempenho, devido ao grande aumento nas propriedades mecânicas, durabilidade e módulo de elasticidade, devido basicamente à sua reação com hidróxido de cálcio e formação de C-S-H adicional e diferentes mecanismos têm sido propostos para entender seu modo de ação, como já mencionado nesta pesquisa.

4.4.4.3 Efeito do uso combinado de PSA e NS

Na Figura 4-31 são apresentados os valores de módulo de elasticidade das misturas híbridas, em comparação com o valor obtido para ao traço de referência e para os traços contendo apenas PSA.

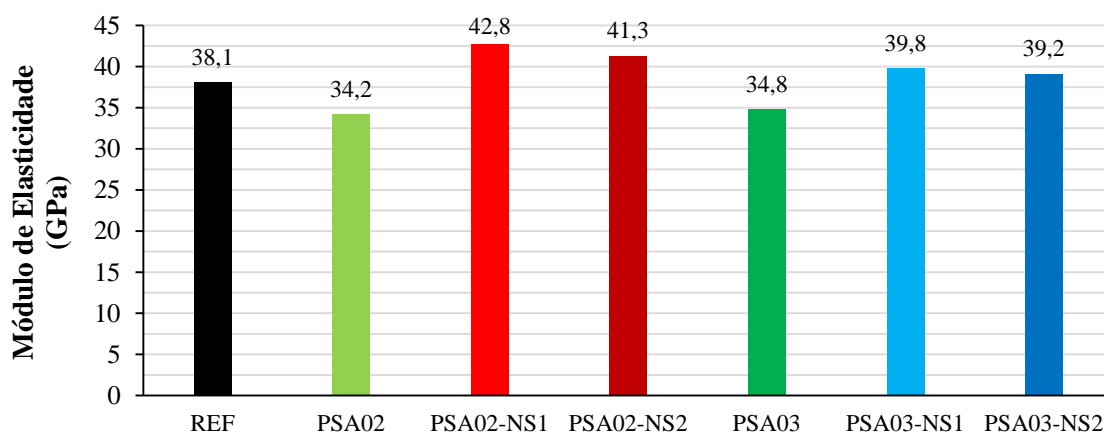


Figura 4-31: Valores do módulo de elasticidade obtidos para as misturas híbridas, das misturas contendo apenas PSA e da mistura de REF, aos 28 dias.

Nota-se que, de forma similar ao ocorrido na resistência à tração na flexão, os resultados dos módulos de elasticidade das misturas contendo PSA e NS também superaram os valores da REF, indicando a capacidade da nanossílica em compensar as perdas causadas pelo

PSA, sendo que nas quatro misturas híbridas, o valor do módulo foi superior ao valor obtido para a referência. Nas misturas contendo 0,2% de PSA, a adição de nanossílica aumentou o módulo de elasticidade em 12 e 8%, para os teores de 1 e 2% de NS. Já nos traços contendo 0,3% de polímero, a diferença foi menos pronunciada (4 e 3%, respectivamente), mas ainda superior ao resultado da REF. Este fato ocorre devido ao fato da redução do valor do módulo de elasticidade ter sido menor no traço PSA03 do que a redução observada para a mistura PSA02.

É possível observar que a adição de NS aumentou o módulo de elasticidade das misturas, em 13 e 11%, para as misturas NS1 e NS2, respectivamente. Este comportamento era esperado, uma vez que o módulo de elasticidade está diretamente correlacionado com a resistência à compressão do material. É importante salientar que não houve diferença expressiva entre o resultado do ensaio obtido para os teores de 1 e 2% de NS, corroborando com os demais resultados obtidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que o PSA estudado possui uma granulometria muito fina, o que lhe confere uma alta capacidade de absorção e inchamento elevado. Como consequência houve dificuldade para atingir os parâmetros de consistência fixados. Contudo, este comportamento deve ser verificado por meio de estudos reológicos deste material.

Para manter os índices de trabalhabilidade desejados para o microconcreto, houve a necessidade de um incremento considerável de aditivo superplastificante para as misturas contendo o PSA. Tal fato prejudica a comparação de resultados para as propriedades mecânicas do concreto estudado, devido ao maior teor de ar aprisionado causado pelo excesso do aditivo.

No caso das adições de nanossílica, o aumento do empacotamento causado pelo efeito filler também ocasionou perda de trabalhabilidade, fazendo-se necessários teores de superplastificante muito acima do recomendado pelo fabricante.

Contudo, o efeito das duas adições no tempo zero corrobora com resultados de pesquisas anteriores, onde se verifica que o PSA retarda o tempo zero, enquanto as nano partículas de sílica provocam sua redução. O aumento do tempo zero causado pelo PSA foi da ordem de 11% no teor de 0,3%. Já a adição de nanossílica reduziu o T_0 em aproximadamente 45% nos dois teores adicionados. A capacidade do PSA em aumentar o valor do tempo zero não foi perdida pela adição de NS, uma vez que as misturas contendo PSA e NS apresentaram aumento do T_0 quando comparadas com os microconcretos contendo apenas NS. Este comportamento também pode estar relacionado com o elevado teor de aditivo superplastificante utilizado.

O PSA, conforme relatado na literatura, mostrou-se uma excelente estratégia mitigadora da retração autógena, promovendo redução considerável nesta propriedade, ou até mesmo eliminando-a por completo. Mesmo no menor teor, a redução foi considerável. Contudo, o teor que apresentou o melhor resultado no que tange a retração autógena foi o teor de 0,3% de PSA. Nesta mistura, observou-se uma redução de 70% da retração aos 28 dias.

A efetividade do PSA em reduzir a retração autógena não sofreu interferência da adição de NS, uma vez que os traços híbridos obtiveram resultados bastante próximos dos resultados apresentados pelas misturas contendo apenas PSA. Ainda, conclui-se que a adição, quanto

a retração autógena, a adição 2% de nanossílica não causou efeito adicional em relação à adição de 1%, não justificando assim o uso do teor mais elevado. Quando adicionada sozinha (sem PSA) a nanossílica, causou aumento na retração autógena dos microconcretos em aproximadamente 10%.

Notou-se também uma expressiva queda nas propriedades mecânicas avaliadas devido à adição de PSA. Este comportamento era esperado e foi relatado por diversos pesquisadores na literatura. A adição de 0,3% de polímero ocasionou a redução de aproximadamente 20% em relação à mistura de referência com relação a/c igual a 0,30, nas as três propriedades estudadas: compressão em cilindros, compressão em cubos e tração na flexão.

No entanto, alguns pesquisadores consideram desigual comparar a mistura contendo PSA – e conseqüentemente, água adicional de cura interna – com a referência contendo relação a/c 0,30, pois estes pesquisadores acreditam que a água adicional da mistura participa do processo de hidratação, causando incremento na relação a/c da mistura.

Além disso, conhecendo-se as propriedades do polímero utilizado, é possível prever a perda de resistência ocasionada por ele e dimensionar os elementos estruturais considerando esta previsão. A fissuração a que as estruturas executadas em CAR estão susceptíveis, haja vista o elevado grau de retração autógena observado nestes materiais, pode ser extremamente prejudicial à estrutura como um todo, ocasionando perda de capacidade, exaustivas obras de recuperação e reforço, e até mesmo ruptura. Neste contexto, redução nas propriedades mecânicas devido ao PSA é vista como uma perda controlada e não necessariamente como um efeito colateral negativo.

A adição de nanossílica para aumentar as propriedades mecânicas de materiais à base de cimento e relatadas na literatura por diversos autores. Neste trabalho verificou-se que a adição de 2% de NS promoveu ganhos da ordem de 10% nas resistências à compressão em cilindros e cubos, e apresentou um efeito mais pronunciado na resistência à flexão, onde a melhoria foi de 31% em relação à mistura de referência.

Contudo, a propriedade de maior interesse neste trabalho consistiu em avaliar a capacidade da nanossílica em compensar as perdas de resistência causada pelo PSA. Neste quesito, verificou-se que a nanossílica é bastante promissora, pois em todas as misturas e para todas as propriedades no estado endurecido avaliadas, os microconcretos contendo ambas as adições obtiveram valores superiores quando comparados com as misturas contendo

apenas polímero superabsorventes. A mistura PSA03-NS1, quando comparada com a mistura PSA03 apresentou aumento de 20 e 9% nas resistências à compressão em cilindros e cubos e um aumento de 18 e 14% na resistência à tração na flexão e no módulo de elasticidade. Ainda que os valores obtidos não tenham compensado por completo a perda causada pelo PSA, os resultados foram satisfatórios. A diferença entre os resultados obtidos nas propriedades mecânicas entre as misturas PSA03-NS1 e PSA03-NS2 é muito pequena, não justificando assim o uso do teor maior de nanossílica estudado.

Logo, conclui-se que:

- O efeito do PSA é benéfico aos concretos de alto desempenho, uma vez que se mostrou extremamente eficaz na mitigação e até mesmo eliminação da retração autógena, sobretudo no teor de 0,3%; O PSA causa perda de resistência mecânica (de até 30% observada), quando comparado com uma referência com relação água/cimento que não considera a água de cura interna;
- A adição de nanossílica é promissora para promover a resistência mecânica dos microconcretos, mesmo com potencial aumento da retração autógena e grande redução no tempo de pega, uma vez que estas propriedades podem ser melhoradas pelo uso de aditivos redutor de retração e retardador de pega, facilmente encontrados no mercado; ainda, que o teor de 2% não é justificado quando utilizado em conjunto com o PSA, pois este não melhora expressivamente as propriedades mecânicas além da melhoria promovida pelo teor de 1%. Assim, faz-se necessário uma análise do custo envolvido para dobrar esta adição (de 1 para 2%), em relação à melhoria promovida nas propriedades.
- O efeito da adição de nanossílica nos microconcretos contendo PSA é bastante promissor, uma vez que estas misturas apresentaram baixos índices de retração autógena e, ainda assim, ganhos de resistência quando comparadas com as misturas contendo apenas PSA.
- A mistura que obteve o melhor resultado, considerando o equilíbrio entre a mitigação da retração autógena sem causar expressiva perda de resistência, foi a mistura PSA03-NS1.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para entender melhor as propriedades dos microconcretos contendo PSA e NS, é necessário excluir a interferência do teor variável de aditivo superplastificante, por meio de pesquisas com um teor fixo em todas as misturas, fixando a relação a/c, mesmo que para tal as misturas não sejam adequadamente trabalháveis.

Sugere-se também estudo acerca do uso de outros teores de NS em adição aos microconcretos contendo PSA, a fim de verificar o teor necessário para promover a compensação total da redução das propriedades mecânicas causadas pelo polímero.

É necessário investigar a microestrutura e reologia das pastas contendo PSA, com intuito de verificar se a água de cura interna participa ou não do processo de hidratação do cimento, assim como as propriedades relacionadas à durabilidade.

Para efeitos de dimensionamento de estruturas, sugere-se que sejam desenvolvidas pesquisas de modelagem numérica e modelos matemáticos que representem a retração autógena restringida que ocorre nas estruturas, visando a aplicação prática e segura deste material nas construções futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

© GOOGLE. © Google Street View. © **Google Maps**, maio 2014. Disponível em: <www.google.com.br/maps>. Acesso em: 15 janeiro 2016.

ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996. 8 p.

ABNT. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento de revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001.

ABNT. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001. 5 p.

ABNT. **NBR NM 47**: Concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressométrico. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002. 23 p.

ABNT. **NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003. 6 p.

ABNT. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos - determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003. 2 p.

ABNT. **NBR NM 43**: Cimento Portland - determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003. 5 p.

ABNT. **NBR NM 65**: Cimento Portland - determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003. 4 p.

ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005. 3 p.

ABNT. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005. 4 p.

ABNT. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005. 9 p.

ABNT. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007. 9 p.

ABNT. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011. 19 p.

ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011. 9 p.

ABNT. **NBR 8522**: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011. 5 p.

ABNT. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2 - Ensaio químicos. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 9 p.

ABNT. **NBR NM 11**: Cimento Portland - análise química - determinação de óxidos principais por complexometria. Parte 2 - Método ABNT. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 17 p.

ABNT. **NBR NM 13**: Cimento Portland - análise química - determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 4 p.

ABNT. **NBR NM 15**: Cimento Portland - análise química - determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 3 p.

ABNT. **NBR NM 16**: Cimento Portland - análise química - determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 3 p.

ABNT. **NBR NM 17**: Cimento Portland - análise química - método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 4 p.

ABNT. **NBR NM 18**: Cimento Portland - análise química - determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. 4 p.

ABNT. **NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013. 8 p.

ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

AFLALO GASPERINI. Aflalo Gasperini Arquitetos, 2007. Disponível em: <<http://aflalogasperini.com.br/e-tower>>. Acesso em: 04 junho 2015.

AITCIN, P. C. **High-performance concrete**. London: E & FN Spon, 1998. 591 p.

AITCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. 1a. ed. Oxon, United Kingdom: Taylor & Francis, 2008.

AKZONOBEL. **Cembinder® for the construction industry**: Colloidal silica dispersions – uses and benefits. Netherlands: AkzoNobel and Eka Chemicals S.A., 2013. 6 p.

ALEEN, S. A. E.; HEIKAL, M.; MORSI, W. M. Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica. **Construction and Building Materials**, Fayoum, Egypt, 59, 15 march 2014. 151-160.

ANDRADE NETO, W. N. **Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência**. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2014. 87 p.

ANDRADE, D. D. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com incorporação de nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. Brasília: Qualificação de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2015.

ANDRADE, D. S.; RÊGO, J. H. S. **Avaliação do índice de desempenho com cimento Portland da nanossílica coloidal em diferentes concentrações**. 57 Congresso Brasileiro do Concreto. Bonito: IBRACON. 2015.

ANGELIM, R. R. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento de argamassas de revestimento**. Goiânia: Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2000. 146 p.

ASSMANN, A. **Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers**. Stuttgart: Doktor Thesis, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, 2013. 199 p.

ASTM. **C157**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. Philadelphia - USA: American Society for Testing and Materials, 2008. 7 p.

ASTM. **C151**: Standard test method for autoclave expansion of hydraulic cement. Philadelphia - USA: American Society for Testing and Materials, 2009. 3 p.

ASTM. **C780**: Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry. Philadelphia - USA: American Society for Testing and Materials, 2014. ISBN 14.

BAROGUEL-BOUNY, V. et al. From chemical and microstructural evolution of cement pastes to the development of autogenous deformations. **Proceedings of the ACI International Conference SP-220 on Autogenous Deformation of Concrete**, Arizona, 220, 03 january 2004. 1-22.

BELKOWITZ, J. S. et al. Impact of nanosilica size and surface area on concrete properties. **ACI Materials Journal**, 112, nº 3, May 2015. 419-428.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Composites**, Denmark, 26, 2004. 677-685.

BJÖRNSTRÖM, J. et al. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. **Chemical Physics Letters**, Göteborg, Sweden, 392, 11 June 2004. 242-248.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 534 p.

CLARO, G. P. P.; SARAIVA, L. M. **Contribuição ao estudo da retração autógena em concretos de alta resistência**. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2013. 53 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN. **Testing of mortars containing mineral binders; freshly mixed mortars containing aggregates of dense structure (heavy aggregates); determination of consistence, bulk density and air content**. Germany: DIN, 1982.

DUDZIAK, L.; MECHTCHERINE, V. Reducing the cracking potential of Ultra-High Performace Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP). **Proceedings of the international conference on Advanced Concrete Materials**, November 2010. 11-19.

EDANA. **ERT 420.2-02 Recomend test method: determination of content of respirable particles**. [S.l.]: European Disposals and Nowwovens Association, 2012.

FRIEDRICH, S. V. Superabsorbent polymers (SAP). In: MECHTCHERINE, V. **State of the art report of RILEM technical committee 225-SAP**. [S.l.]: RILEM, 2012. Cap. 3.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2a. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2007. Cap. 50, p. 1712.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. Pilares com fck = 115 MPa: Record mundial em concreto de alto desempenho. **Revista Internacional Construlink**, Lisboa, v. 1, n. 4, p. 23-31, 2003.

HARTMANN, C.; HELENE, P. Concretos de alta resistência. **Revista Pini Web**, janeiro 24 2004. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/concretos-de-alta-resistencia-79916-1.aspx>>. Acesso em: 02 junho 2015.

HASHOLT, M. T. et al. Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength? **Construction and Building Materials**, Lyngby, Denmark, 31, 25 January 2012. 226-230.

HASPARYK, N. P. et al. Deformações por retração e fluência. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2005. Cap. 22, p. 655-685.

JENSEN, O. M. Water absorption of Superabsorbent polymers in a cementitious environment. **Internacional RILEM Conference on Advances in Construction materials through Science and Engeneering**, 2011. 22-35.

- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research** 31, Aalborg, Denmark, 10 January 2001. 647-654.
- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials - II. Implementation and experimental results. **Cement and Concrete research**, 32, 2002. 973-978.
- KIATKAMJORNWONG, S. Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites. **ScienceAsia**, Bangkok, 33, december 2006. 39-43.
- KOVLER, K.; JENSEN, O. M. **Internal curing of concrete**: state of the art report of RILEM Technical committee TC 196-ICC. Springer. ed. [S.l.]: RILEM, v. 41, 2007.
- KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. Overview and feature trends of shrinkage research. **Materials and Structures**, Haifa, 39, 2006. 827-847.
- LAUSTSEN, S.; HASHOLT, M.; JENSEN, O. M. **A new technology for air entrainment of concrete**. 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Nanjing, China: [s.n.]. 2008. p. 1223-1230.
- LOPES, A. N. D. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. Porto Alegre: Tese de doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 257 p.
- LOTURCO, B. Estádios da Copa 2014. **Revista Técnica**, junho 2014. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/207/estadios-da-copa-2014-estadio-nacional-de-brasilia-313418-1.aspx>>. Acesso em: 10 fevereiro 2016.
- LURA, P. **Autogenous Deformation and internal curing of concrete**. Delft: Doctoral Thesis, Delft University of Thecnology, 2003.
- MANZANO, M. A. R. **Estudo experimental de microconcretos de alta resistência modificados com polímeros superabsorventes (PSA)**. Brasília: Qualificação de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2014. 166 p.
- MASP. Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand. **Site MASP**, 2013. Disponível em: <http://masp.art.br/masp2010/visiteomuseu_info.php>. Acesso em: 04 junho 2015.
- MECHTCHERINE, V. et al. Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test. **Materials and Structures**, Dresden, Germany, 47, 18 april 2013a. 541-562.
- MECHTCHERINE, V.; SCHROEFL, C.; GEORGES, M. **Effectiveness of various superabsorbent polymers (SAP) in mitigating autogenous shrinkage of cement-based**

materials. Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9). [S.l.]: American Society of Civil Engineers. 2013b.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3a. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MOCH, M. Fundação Oscar Niemeyer, 2010. Disponível em: <<http://www.niemeyer.org.br/obra/pro320>>. Acesso em: 04 junho 2015.

MÖNNIG, S. Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete. **Otto-Graf-Journal**, 2005. 193-202.

MÖNNIG, S. **Superabsorbing additions in concrete - applications, modelling and comparison of different internal water sources**. Stuttgart: Doktor thesis, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität, 2009. 168 p.

MORAES, B. J.; CERQUEIRA, C. M. **Determinação do tempo zero de microconcretos de alta resistência contendo polímeros superabsorventes utilizando a técnica do ultrassom**. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2014. 64 p.

MORAIS, J. F. **Aplicações da nanotecnologia na indústria da construção civil: análise experimental em produtos cimentícios com nanotubos de carbono**. Niterói: Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal Fluminense, 2012. 188 p.

MORTIMER, R. G. **Physical Chemistry**. 3a. ed. [S.l.]: Elsevier, 2008. 1385 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª Ed. ed. São Paulo: PINI, 1997.

ORDOÑEZ, S. T. L. **Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração**. Brasília: Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2013. 160 p.

PEREIRA, D. F.; MATOS, V. N. **Combate à retração autógena utilizando polímeros super absorventes**. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2011. 72 p.

POURJAVADI, A. et al. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles. **Materials and Design** **42**, Tehran, Iran, 30 May 2012. 94–101.

QING, Y. et al. A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume. **Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition**, Wuhan, China, 21, n. 3, 2008. 153-157.

QUERCIA, G.; BROUWERS, H. J. H. **Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures**. 8th fib PhD Symposium in Civil Engineering. Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark: [s.n.]. 2010.

RILEM. **Application of superabsorbent polymer (SAP) in concrete construction**: state of the art report technical committee TC-225-SAP. London: Springer, 2012. 167 p.

ROJAS, M. A. et al. **Mecanismo de atuação dos polímeros superabsorventes na hidratação de materiais cimentícios**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2014. Natal: IBRACON. outurbo 2014.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, Montreal, Canada, 38, n. Special Issue - The 12th International Congress on the Chemistry of Cement, 8 February 2008. 128–136.

SENNF, L. **Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento**. Florianópolis: Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009a. 169 p.

SENNF, L. et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building materials**, 23, n. 7, 31 julho 2009b. 2487-2491.

SILVA, E. F. **Concreto de alto desempenho**: aplicação pioneira em Brasília - Brasil. International Congress on High-Performance and Quality of Concrete Structures. Florianópolis: [s.n.]. 1996. p. 94-105.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. Rio de Janeiro: Tese de doutorado, Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. 307 p.

SILVA, E. F. et al. **Técnica da propagação de pulso ultrassônico para determinação do t₀ de concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração**. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, Moçambique: [s.n.]. 2011a.

SILVA, E. F. et al. **Técnica do ultrassom para determinar o tempo zero de microconcretos de alta resistência**. Anais 55º Congresso Brasileiro do Concreto. Gramado RS: IBRACON. 2013.

SILVA, E. F. et al. **Effects of SAP on the autogenous shrinkage and compressive strength os high strength fine-grained concrete**. International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction. Dresden, Germany: [s.n.]. 2014. p. 211-219.

SILVA, E. F.; LOPES, A. N. M.; LATIF, C. **Metodologia para determinação da retração unidirecional em concretos por captura de imagens**. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, Moçambique: [s.n.]. 2011b.

SOBOLEV, K.; SANCHEZ, F. Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**, 24, 15 maio 2010. 2060–2071.

STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. **Composities Part B: Engineering**, Greece, 43, n. 6, 5 January 2012. 2706–2710.

SUAREZ, M. L. G. **Polímeros Super Absorventes (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência**. Brasília: Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2015. 82 p.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Effect os superabsorbent polymers on the workability of concrete and mortar. In: MECHTCHERINE, V. **State of the art report of RILEM technical committee 225-SAP**. [S.l.]: RILEM, 2012. Cap. 5.

TRALDI, C. L. et al. **Polímero Superabsorvente como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos**. XXXVI Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Montevideú, Uruguai: [s.n.]. 2014.

TRALDI, C. L.; AGUIRRE, L. M. **Polímero superabsorvente (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em microconcretos de alta resistência devido à retração autógena**. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2013. 100 p.

TRTNIK, G.; GAMS, M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. **Ultrasonics**, Slovenia, n. 54, 2014. 66-75.

VAN BREUGEL, K.; VAN TUAN, N. Autogenous shrinkage of HPC and ways to mitigate it. **Key Engineering Materials**, Switzerland, 629-630, 1 october 2014. 3-20.

VANDAMME, M. **The nanogranular origin of concrete creep: a nanoindentation investigation of microstructure and fundamental properties of Calcium-Silicate-Hydrate**. Massachusetts: Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), MA-USA, 2008.

APÊNDICE A

Tabela A-1: Detalhamento da confecção dos microconcretos estudados.

DATA e local	Traço e quantidade fabricada	Materiais Secos (g/litro)						Nanossílica ®Cembinder 30 AkzoNobel			Água (g/litro)					SP ®Glenium 51 BASF		Espalhamento DIN (mm)	
		Cimento CPV-ARI CIPLAN	Sílica Ativa	Areia (LEMOS)	H areia (%)	Areia corrigida	PSA	Teor total (%)	Peso total (g/litro)	Peso pura (g/litro)	1. Água	2. Água NS (-)	3. Água PSA (+)	4. Água areia (-)	Água a final = (1) - (2) + (3) - (4)	Teor (%)	Peso (g/litro)		
MANZANO	REF	700	70	1340	-	-	-	-	-	-	210	-	-	-	-	2,6	18,2	195	
MANZANO	PSA02	700	70	1340	-	-	1,4	-	-	-	210	-	21	-	-	3	21,0	188	
MANZANO	PSA03	700	70	1340	-	-	2,1	-	-	-	210	-	31,5	-	-	3,2	22,4	180	
	NS1	700	70	1340				3,34	23,38	7	210	16,4			193,6	3	21,0	197	
LEM 18/08	17 litros	11900	1190	22777	2,64	23377,9	-		397,5		3570	278,5	0	601,3	2690,2		357,0	187	
FURNAS 23/09	45 litros	31500	3150	60291	1,06	60930,1	-		1052		9450	737,1	0	639,1	8073,8		945,0	142	
	NS2	700	70	1340				6,67	46,69	14	210	32,7			177,3	3,5	24,5	182	
LEM 17/07	17 litros	11900	1190	22777	1,97	23225,3	-		793,7		3570	555,7	0	448,7	2565,6		416,5	181	
FURNAS 17/09	40 litros	28000	2800	53592	1,08	54170,8	-		1868		8400	1307,6	0	578,8	6513,6		980,0	143	
	PSA02-NS2	700	70	1340				1,4	6,67	46,69	14	210	32,7	21		198,3	3,5	24,5	182
LEM 05/10	17 litros	11900	1190	22777	2,64	23377,9	23,8		793,7		3570	555,7	357	601,3	2770		416,5	177	
FURNAS 01/10	42 litros	29400	2940	56272	0,65	56637,4	58,8		1961		8820	1373,0	882	365,8	7963,3		1029,0	145	
	PSA03-NS2	700	70	1340				2,1	6,67	46,69	14	210	32,7	31,5		208,8	3,9	27,3	197
LEM 09/11	17 litros	11900	1190	22777	2,64	23377,9	35,7		793,7		3570	555,7	535,5	601,3	2948,5		464,1	157	
FURNAS 07/10	42 litros	29400	2940	56272	1,2	56271,6	88,2		1961		8820	1373,0	1323	675,26	8094,74		1146,6	159	
	PSA02-NS1	700	70	1340				1,4	3,34	23,38	7	210	16,4	21		214,62	3,2	22,4	188
LEM 18/01	17 litros	11900	1190	22777	1,63	23147,9	23,8		397,46		3570	278,5	357	371,26	3277,28		380,8	168	
FURNAS 15/10	42 litros	29400	2940	56272	0,97	56817,4	58,8		981,96		8820	688,0	882	545,83	8468,2		940,8	179	
	PSA03-NS1	700	70	1340				2,1	3,34	23,38	7	210	16,4	31,5		225,12	3,5	24,5	198
LEM 26/01	17 litros	11900	1190	22777	2,31	23302,7	35,7		397,46		3570	278,5	535,5	526,14	3300,90		416,5	158	
FURNAS 21/10	42 litros	29400	2940	56272	1,08	54170,8	88,2		981,96		8820	688,0	1323	578,8	8876,2		1029,0	173	

APÊNDICE B

A seguir, são apresentados os resultados individuais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de retração autógena das nove misturas estudadas.

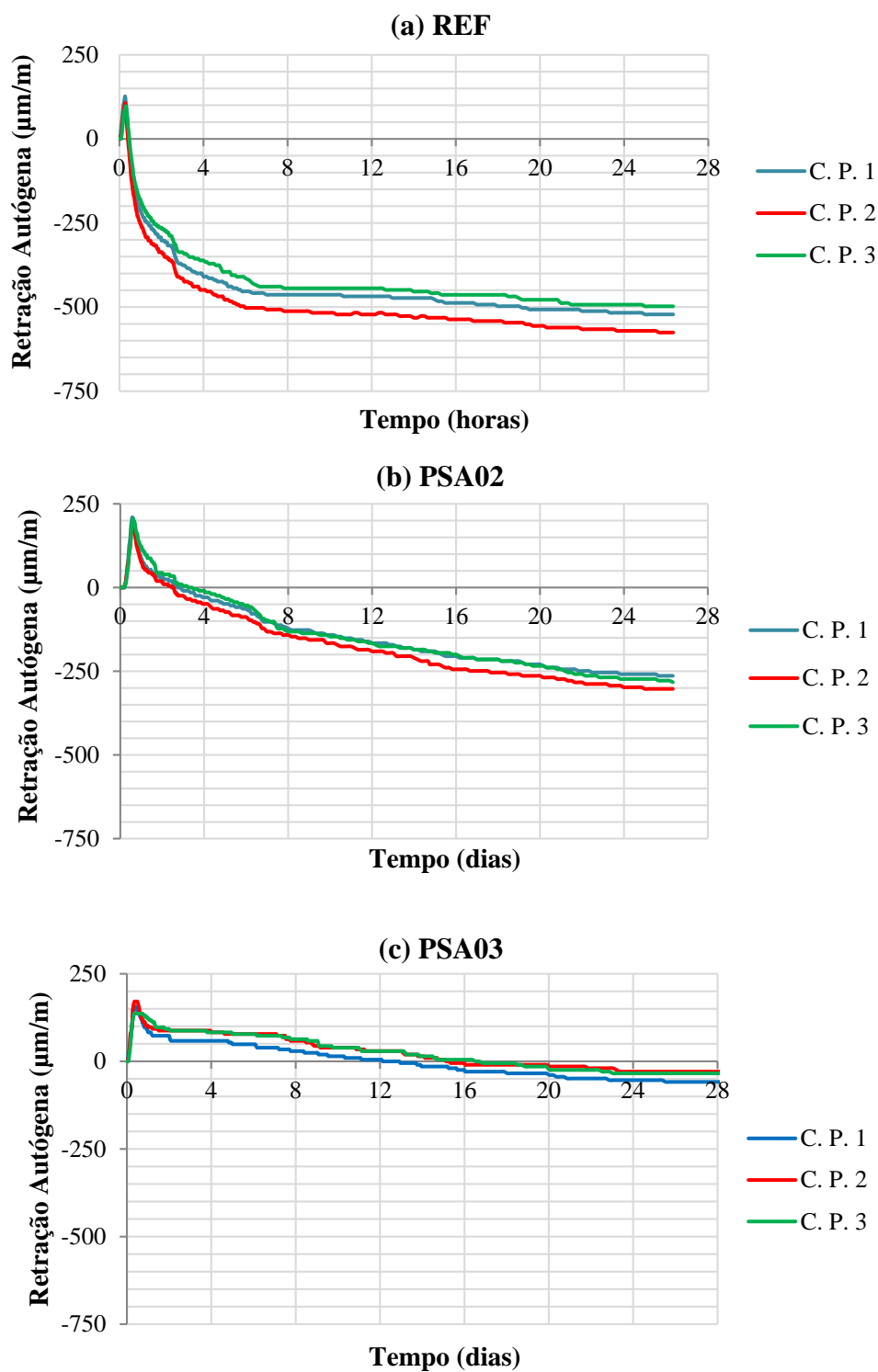


Figura B-1: Retração autógena dos corpos de prova individuais das misturas: (a) REF; (b) PSA02; (c) PSA03, de T_0 até 28 dias.

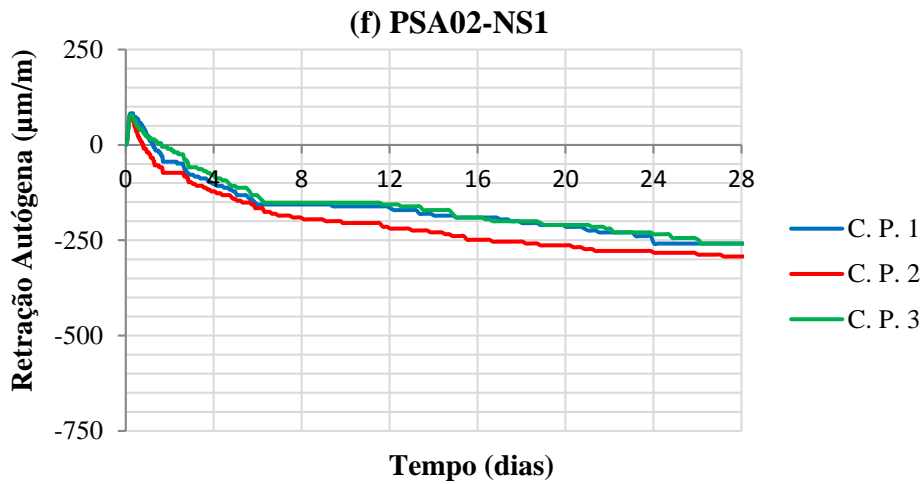
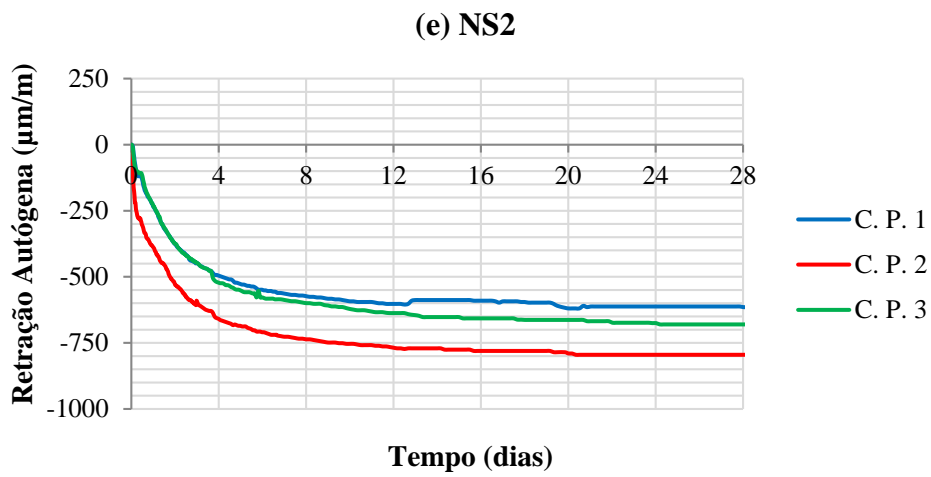
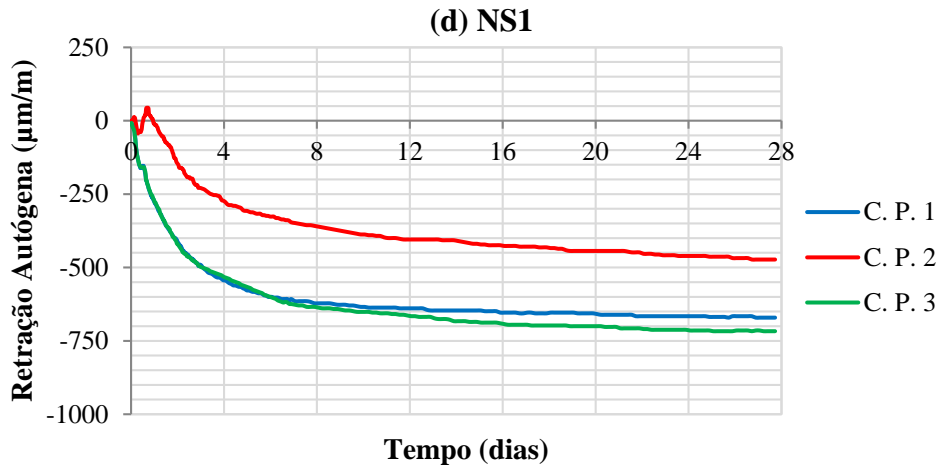


Figura B-2: Retração autógena dos corpos de prova individuais das misturas: (d) REF; (e) NS2; (f) PSA02-NS1, de T_0 até 28 dias.

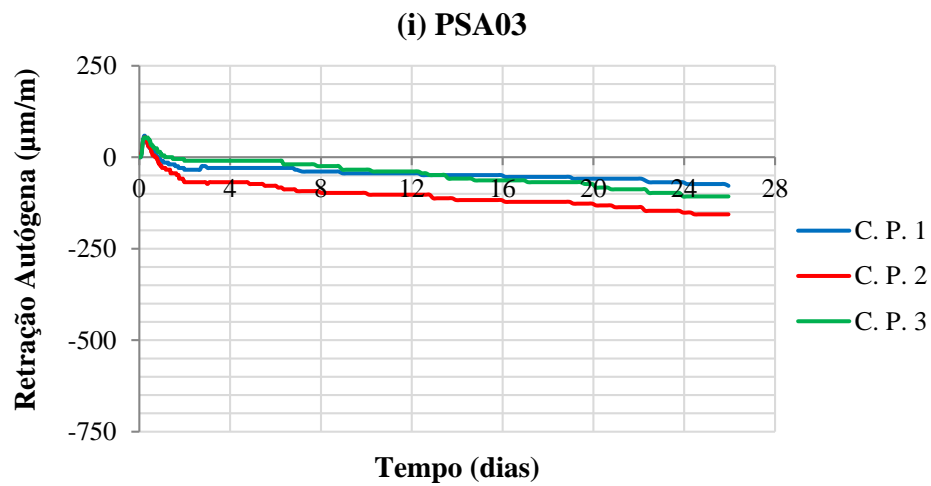
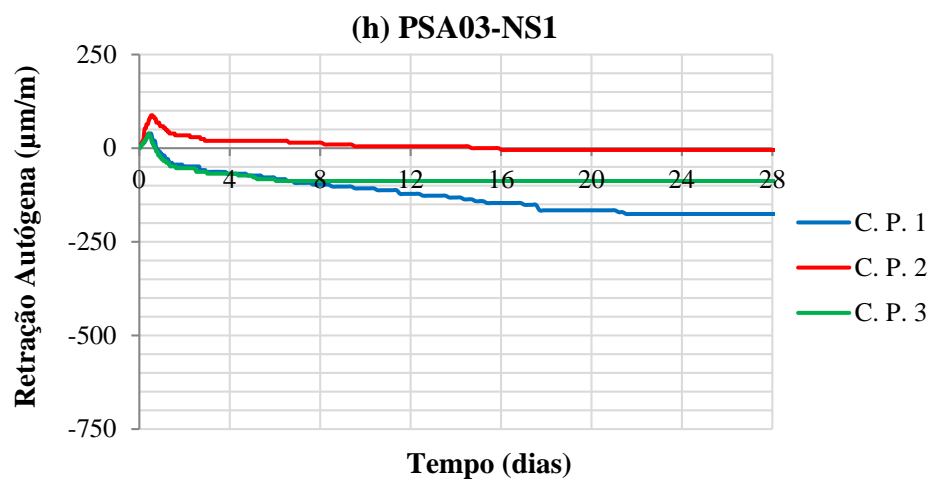
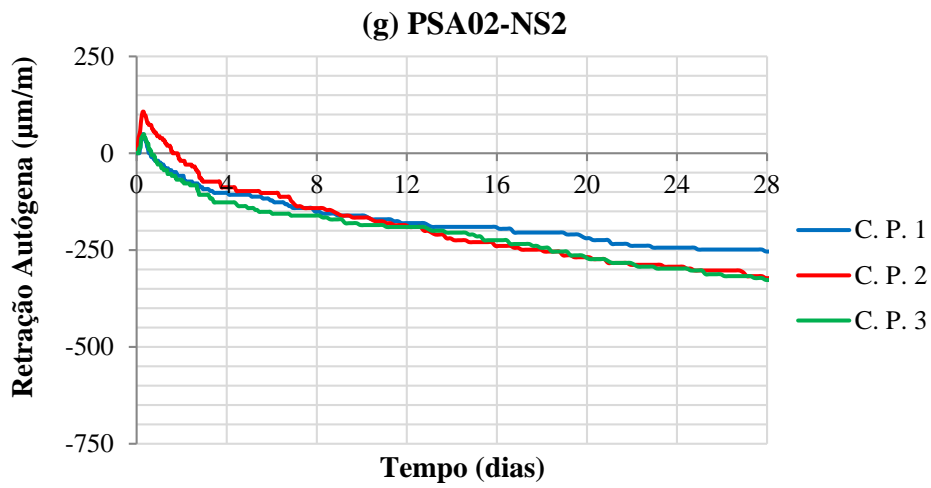


Figura B-3: Retração autóloga dos corpos de prova individuais das misturas: (g) PSA02-NS2; (h) PSA03-NS1; (i) PSA03-NS2, de T_0 até 28 dias.

APÊNDICE C

Tabela C-1: Resistências à compressão em cilindros – resultados individuais dos corpos de prova da mistura NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Corpo-de-prova			Peso (g)	CARGA (ton.)	Tensão de Ruptura (MPa)		Desvio Relativo (%)		Desvio Relativo Máximo NBR 7215:1996	Desvio Absoluto (MPa)	
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.
NS1-71	49,66	97,28	1936,9	433,25	17,18	86,93	84,5	2,9	3,6	DR ≤ 6%	2,5	3,0
NS1-72	49,62	96,29	1933,8	432,77	16,64	84,33		0,2			0,1	
NS1-73	49,75	95,5	1943,9	427,31	16,16	81,47		3,6			3,0	
NS1-74	49,88	96,67	1954,1	434,01	16,56	83,05		1,7			1,4	
NS1-75	49,88	96,94	1954,1	434,27	17,19	86,21		2,1			1,7	
NS1-76	49,93	96,91	1958,0	433,09	16,95	84,84		0,4			0,4	
NS1-281	49,80	97,26	1947,8	436,55	21,36	107,47	0,8	2,3	0,8		2,5	
NS1-282	50,40	99,52	1995,0	454,71	22,29	109,49	1,1		1,2			
NS1-283	50,24	98,34	1982,4	450,23	21,40	105,79	2,3		2,5			
NS1-284	49,97	97,47	1961,1	435,72	21,68	108,34	0,0		0,0			
NS1-285	50,05	99,02	1967,4	444,05	21,82	108,69	0,4		0,4			
NS1-286	50,13	97,79	1973,7	442,57	22,15	109,98	1,6		1,7			

Tabela C-2: Resistência à compressão em cilindros – resultados individuais dos corpos de prova da mistura NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Corpo-de-prova			Peso (g)	CARGA (ton.)	Tensão de Ruptura (MPa)		Desvio Relativo (%)		Desvio Relativo Máximo NBR 7215:1996	Desvio Absoluto (MPa)	
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.
NS2-71	49,78	97,10	1946,3	432,36	18,39	94,49	94,5	0,0	3,5	DR ≤ 6%	0,0	3,3
NS2-72	49,81	99,10	1948,6	441,42	19,05	97,76		3,5			3,3	
NS2-73	49,95	97,80	1959,6	434,00	18,12	92,47		2,1			2,0	
NS2-74	49,91	98,10	1956,4	437,17	17,95	91,75		2,9			2,7	
NS2-75	49,93	95,70	1958,0	429,40	18,41	94,02		0,5			0,4	
NS2-76	49,93	98,10	1958,0	436,18	18,84	96,22		1,9			1,8	
NS2-281	50,05	98,46	1967,0	443,80	21,89	111,28	0,7	2,1	0,8		2,3	
NS2-282	50,19	100,53	1978,6	459,30	*	*						
NS2-283	49,76	98,00	1944,9	437,80	22,25	114,40	2,1		2,3			
NS2-284	50,05	99,25	1967,4	443,30	21,88	111,21	0,8		0,9			
NS2-285	50,52	100,57	2004,4	450,50	22,45	112,01	0,1		0,1			
NS2-286	50,05	99,42	1967,6	443,70	21,93	111,45	0,6		0,6			

* falha na prensa durante o ensaio do CP NS2-282 devido à queda de energia.

Tabela C-3: Resistência à compressão em cilindros – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA02-NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Corpo-de-prova			Peso (g)	CARGA (ton.)	Tensão de Ruptura (MPa)		Desvio Relativo (%)		Nova Média	Desvio Relativo (%)		Desvio Relativo Máximo NBR 7215:1996	Desvio Absoluto (MPa)	
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.
PSA02-NS1-71	50,14	96,09	1974,5	426,60	14,84	73,65	72,3	1,9	10,7	73,8	0,2	4,9	DR ≤ 6%	0,2	3,6
PSA02-NS1-72	50,08	97,48	1969,8	430,10	12,98	64,58		10,7							
PSA02-NS1-73	49,88	96,36	1954,1	426,70	15,07	75,58		4,5			2,4			1,7	
PSA02-NS1-74	49,85	96,98	1951,7	427,60	13,99	70,25		2,8			4,9			3,6	
PSA02-NS1-75	49,84	98,27	1950,9	432,00	15,28	76,75		6,2			4,0			2,9	
PSA02-NS1-76	49,93	96,24	1958,0	427,40	14,57	72,92		0,9			1,2			0,9	
PSA02-NS1-281	49,66	98,06	1936,9	438,6	17,09	86,47	85,3	1,4	3,1			DR ≤ 6%	1,2	2,6	
PSA02-NS1-282	49,90	98,48	1955,6	438,4	16,79	84,14		1,3			1,1				
PSA02-NS1-283	49,64	98,26	1935,3	430,3	17,36	87,91		3,1			2,6				
PSA02-NS1-284	49,53	97,56	1926,8	433,3	16,40	83,41		2,2			1,8				
PSA02-NS1-285	49,64	97,17	1935,3	431,8	16,43	83,20		2,4			2,1				
PSA02-NS1-286	49,40	97,47	1916,7	434,1	16,91	86,46		1,4			1,2				
NOTA: A NBR 7215:1996 permite eliminação de 2 corpos de prova.													Legenda:	CP Eliminado	

Tabela C-4: Resistência à compressão em cilindros – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA02-NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Corpo-de-prova			Peso (g)	CARGA (ton.)	Tensão de Ruptura (MPa)		Desvio Relativo (%)		Desvio Relativo Máximo NBR 7215:1996	Desvio Absoluto (MPa)	
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.
PSA02-NS2-71	50,01	97,8	1964,3	431,69	14,85	74,09	73,6	0,6	3,8	DR ≤ 6%	0,5	2,8
PSA02-NS2-72	49,38	97,67	1915,1	428,95	14,93	76,40		3,8			2,8	
PSA02-NS2-73	49,73	98,11	1942,3	428,73	14,56	73,46		0,2			0,2	
PSA02-NS2-74	49,94	98,67	1958,8	430,54	14,38	71,94		2,3			1,7	
PSA02-NS2-75	49,68	98,5	1938,4	433,49	14,49	73,26		0,5			0,4	
PSA02-NS2-76	49,78	98,07	1946,3	441,02	14,42	72,61		1,4			1,0	
PSA02-NS2-281	49,85	99,85	1951,7	441,13	17,93	90,03	90,1	0,1	3,2	DR ≤ 6%	0,1	2,9
PSA02-NS2-282	49,91	98,13	1956,4	431,8	17,52	87,76		2,7			2,4	
PSA02-NS2-283	49,98	99,48	1961,9	438,45	18,09	90,36		0,2			0,2	
PSA02-NS2-284	49,77	99,11	1945,5	435,41	17,99	90,62		0,5			0,5	
PSA02-NS2-285	50,02	99,57	1965,1	436,73	17,87	89,12		1,1			1,0	
PSA02-NS2-286	49,55	99,34	1928,3	435,66	18,3	93,00		3,2			2,9	

Tabela C-5: Resistência à compressão em cilindros – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA03-NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Corpo-de-prova			Peso (g)	CARGA (ton.)	Tensão de Ruptura (MPa)		Desvio Relativo (%)		Desvio Relativo Máximo NBR 7215:1996	Desvio Absoluto (MPa)		
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.	
													CP
PSA03-NS1-71	49,96	98,26	1960,4	434,21	13,16	65,79	66,0	4,8	0,3	DR ≤ 6%	0,2	3,2	
PSA03-NS1-72	50,00	96,7	1963,5	428,61	13,45	67,13					1,7		1,1
PSA03-NS1-73	49,92	97,25	1957,2	431,51	12,55	62,84					4,8		3,2
PSA03-NS1-74	49,95	97,49	1959,6	434,08	13,69	68,47					3,7		2,5
PSA03-NS1-75	50,07	98,67	1969,0	436,57	12,98	64,60					2,1		1,4
PSA03-NS1-76	50,15	98,39	1975,3	434,38	13,54	67,18					1,8		1,2
PSA03-NS1-281	49,83	98,68	1950,2	432,56	16,7	83,92	84,0	6,0	0,1		0,1	5,0	
PSA03-NS1-282	49,92	97,89	1957,2	438,98	16,38	82,02					2,4		2,0
PSA03-NS1-283	50,06	97,56	1968,2	426,56	17,88	89,03					6,0		5,0
PSA03-NS1-284	49,38	98,23	1915,1	439,12	16,56	84,74					0,9		0,7
PSA03-NS1-285	49,77	98,72	1945,5	425,87	16,44	82,81					1,4		1,2
PSA03-NS1-286	50,12	97,55	1972,9	431,21	16,42	81,56					2,9		2,5

Tabela C-6: Resistência à compressão em cilindros – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA03-NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Corpo-de-prova			Peso (g)	CARGA (ton.)	Tensão de Ruptura (MPa)		Desvio Relativo (%)		Desvio Relativo Máximo NBR 7215:1996	Desvio Absoluto (MPa)		
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.	
													CP
PSA03-NS2-71	50,01	99,19	1964,3	430,9	13,57	67,70	68,6	3,4	1,3	DR ≤ 6%	0,9	2,4	
PSA03-NS2-72	49,95	99,42	1959,6	429,3	13,87	69,37					1,1		0,8
PSA03-NS2-73	50,17	97,81	1976,9	429,6	13,36	66,23					3,4		2,4
PSA03-NS2-74	49,97	97,39	1961,1	425,6	14,02	70,06					2,1		1,5
PSA03-NS2-75	49,79	97,49	1947,0	426,8	13,42	67,55					1,5		1,0
PSA03-NS2-76	49,99	97,86	1962,7	427	14,15	70,65					3,0		2,1
PSA03-NS2-281	50,11	99,23	1972,1	436,36	17,22	85,57	84,7	2,6	1,1		0,9	2,2	
PSA03-NS2-282	49,93	97,19	1958,0	426,38	16,84	84,29					0,4		0,4
PSA03-NS2-283	50,01	98,96	1964,3	433,54	16,66	83,12					1,8		1,5
PSA03-NS2-284	49,97	98,38	1961,1	430,03	17,01	85,00					0,4		0,3
PSA03-NS2-285	49,63	98,86	1934,5	431,98	17,15	86,88					2,6		2,2
PSA03-NS2-286	50,12	99,61	1972,9	432,81	16,72	83,05					1,9		1,6

Tabela C-7: Resistência à compressão em cubos – resultados individuais dos corpos de prova da mistura NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Área (cm ²)	CARGA (ton.)	Tensão (MPa)		Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
NS1-71	16	15,69	98,06	97,58	0,48	3,46	97,90	0,16	3,34	98,23	0,17	3,61	98,63	0,57	3,76	99,10	1,04	1,52	DA ≤ 0,5 MPa
NS1-72		15,13	94,56		3,02			3,34			0,17			0,57			1,04		
NS1-73		15,14	94,63		2,96			3,27			3,61			0,57			1,04		
NS1-74		15,69	98,06		0,48			0,16			0,17			0,57			1,04		
NS1-75		16,10	100,63		3,04			2,73			2,39			1,99			1,52		
NS1-76		15,69	98,06		0,48			0,16			0,17			0,57			1,04		
		15,06	94,13		3,46														
		15,88	99,25		1,67			1,35			1,02			0,62			0,15		
		15,18	94,88		2,71			3,02			3,36			3,76					
		15,97	99,81		2,23			1,91			1,58			1,18			0,71		
		16,02	100,13		2,54			2,23			1,89			1,49			1,02		
		15,81	98,81		1,23			0,91			0,58			0,18			0,29		
NS1-281	16	18,89	118,06	117,38	0,69	3,44	117,09	0,98	3,15	117,40	0,66	2,84	117,72	0,35	1,85	117,48	0,58	1,61	DA ≤ 0,5 MPa
NS1-282		18,97	118,56		1,19			1,48			1,16			0,85			1,08		
NS1-283		18,33	114,56		2,81			2,52			2,84								
NS1-284		18,23	113,94		3,44			3,15											
NS1-285		18,72	117,00		0,38			0,09			0,40			0,72			0,48		
NS1-286		19,03	118,94		1,56			1,85			1,54			1,22			1,45		
		19,29	120,56		3,19														
		19,02	118,88		1,50			1,79			1,47			1,16			1,39		
		18,54	115,88		1,50			1,21			1,53			1,84			1,61		
		18,60	116,25		1,12			0,84			1,15			1,47			1,23		
		19,13	119,56		2,19			2,48			2,16			1,85					
		18,61	116,31		1,06			0,77			1,09			1,40			1,17		
NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 4 corpos de prova.																	Legenda:	CP Eliminado	

Tabela C-8: Resistência à compressão em cubos – resultados individuais dos corpos de prova da mistura NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Área (cm ²)	CARGA (ton.)	Tensão (MPa)		Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005	
			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		
NS2-71	16	15,68	98,00	100,11	2,11	6,89	99,48	5,33	98,95	2,95	99,85	3,47	99,64	2,45	1,64	2,45	DA ≤ 0,5 MPa			
NS2-72		15,80	98,75		1,36										0,73			0,20	1,10	0,89
NS2-73		16,01	100,06		0,05										0,58			1,11	0,22	0,42
NS2-74		16,03	100,19		0,08										0,70			1,24	0,34	0,55
NS2-75		16,24	101,50		1,39										2,02			2,55	1,65	1,86
NS2-76		15,55	97,19		2,92										2,30			1,76	2,66	2,45
		15,42	96,38		3,73										3,11			2,58	3,47	
		15,36	96,00		4,11										3,48			2,95		
		16,01	100,06		0,05										0,58			1,11	0,22	0,42
		16,22	101,38		1,27										1,89			2,42	1,53	1,73
		17,12	107,00		6,89															
		16,77	104,81		4,70										5,33					
NS2-281	16	19,27	120,44	120,39	0,05	3,61	120,06	2,94	119,76	3,18	119,41	3,40	118,98	3,77	1,45	3,77	DA ≤ 0,5 MPa			
NS2-282		19,67	122,94		2,55										2,88			3,18		
NS2-283		18,88	118,00		2,39										2,06			1,76	1,41	0,98
NS2-284		18,97	118,56		1,82										1,49			1,20	0,85	0,42
NS2-285		18,78	117,38		3,01										2,68			2,39	2,03	1,61
NS2-286		19,65	122,81		2,43										2,76			3,05	3,40	
		18,89	118,06		2,32										1,99			1,70	1,35	0,92
		19,68	123,00		2,61										2,94					
		19,64	122,75		2,36										2,69			2,99	3,34	3,77
		18,92	118,25		2,14										1,81			1,51	1,16	0,73
		18,95	118,44		1,95										1,62			1,33	0,97	0,55
		19,84	124,00		3,61															

NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 4 corpos de prova.

Legenda:

CP Eliminado

Tabela C-9: Resistência à compressão em cubos – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA02-NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Área (cm ²)	CARGA (ton.)	Tensão (MPa)		Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
PSA02-NS1-71	16	13,56	84,75	84,82	0,07	4,51	85,23	0,48	2,77	84,95	0,20	2,74	84,97	0,22	2,41	84,91	0,16	1,59	DA ≤ 0,5 MPa
PSA02-NS1-72		13,21	82,56		2,26			2,66			2,39			2,41					
PSA02-NS1-73		13,38	83,63		1,19			1,60			1,33			1,35					
PSA02-NS1-74		12,85	80,31		4,51														
PSA02-NS1-75		13,68	85,50		0,68			0,27			0,55			0,53					
PSA02-NS1-76		13,33	83,31		1,51			1,91			1,64			1,66					
		13,55	84,69		0,13			0,54			0,26			0,28					
		13,76	86,00		1,18			0,77			1,05			1,03					
		14,08	88,00		3,18			2,77											
		13,81	86,31		1,49			1,09			1,36			1,34					
		14,03	87,69		2,87			2,46			2,74								
		13,61	85,06		0,24			0,16			0,11			0,09					
PSA02-NS1-281	16	16,70	104,38	104,56	0,19	5,19	104,09	0,28	4,22	104,51	0,14	3,14	104,86	0,49	2,08	104,60	0,23	1,16	DA ≤ 0,5 MPa
PSA02-NS1-282		16,72	104,50		0,06			0,41			0,01			0,36					
PSA02-NS1-283		16,22	101,38		3,19			2,72			3,14								
PSA02-NS1-284		16,81	105,06		0,50			0,97			0,55			0,20					
PSA02-NS1-285		15,98	99,88		4,69			4,22											
PSA02-NS1-286		16,83	105,19		0,62			1,10			0,67			0,33					
		17,11	106,94		2,38			2,85			2,43			2,08					
		16,58	103,63		0,94			0,47			0,89			1,24					
		16,55	103,44		1,13			0,65			1,08			1,42					
		17,56	109,75		5,19														
		16,92	105,75		1,19			1,66			1,24			0,89					
		16,78	104,88		0,31			0,78			0,36			0,01					

NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 4 corpos de prova. Legenda: CP Eliminado

Tabela C-10: Resistência à compressão em cubos – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA02-NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Área (cm ²)	CARGA (ton.)	Tensão (MPa)		Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005		
			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.			
PSA02-NS2-71	16	13,61	85,06	86,08	1,02	5,15	86,55	4,01	86,15	3,10	85,81	3,32	85,39	0,74	2,17	2,02	0,33	DA ≤ 0,5 MPa			
PSA02-NS2-72	16	14,28	89,25		3,17									1,49					2,70	3,10	0,74
PSA02-NS2-73	16	13,34	83,38		2,71									3,18					2,78	2,43	2,02
PSA02-NS2-74	16	12,95	80,94		5,15																
PSA02-NS2-75	16	14,26	89,13		3,04									2,57					2,97	3,32	
PSA02-NS2-76	16	13,92	87,00		0,92									0,45					0,85	1,19	1,61
	16	13,69	85,56		0,52									0,99					0,59	0,24	0,17
	16	14,49	90,56		4,48									4,01							
	16	13,46	84,13		1,96									2,43					2,03	1,68	1,27
	16	13,58	84,88		1,21									1,68					1,28	0,93	0,52
	16	14,01	87,56	1,48	1,01	1,41	1,76	2,17													
	16	13,69	85,56	0,52	0,99	0,59	0,24	0,17													
PSA02-NS2-281	16	15,75	98,44	106,07	7,64	7,64	106,77	4,23	106,34	2,97	106,01	2,08	106,27		2,02	0,85	DA ≤ 0,5 MPa				
PSA02-NS2-282	16	16,96	106,00		0,07									0,77				0,34	0,01	0,27	
PSA02-NS2-283	16	17,49	109,31		3,24									2,55				2,97			
PSA02-NS2-284	16	16,76	104,75		1,32									2,02				1,59	1,26	1,52	
PSA02-NS2-285	16	17,24	107,75		1,68									0,98				1,41	1,74	1,48	
PSA02-NS2-286	16	17,14	107,13		1,05									0,36				0,78	1,11	0,85	
	16	16,63	103,94		2,14									2,83				2,41	2,08		
	16	17,19	107,44		1,36									0,67				1,09	1,42	1,16	
	16	16,99	106,19		0,11									0,58				0,16	0,17	0,09	
	16	17,76	111,00		4,93									4,23							
	16	17,07	106,69	0,61	0,08	0,34	0,67	0,41													
	16	16,68	104,25	1,82	2,52	2,09	1,76	2,02													

NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 4 corpos de prova.

Legenda:

CP Eliminado

Tabela C-11: Resistência à compressão em cubos – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA03-NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Área (cm ²)	CARGA (ton.)	Tensão (MPa)		Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
PSA03-NS2-71	16	13,10	81,88	81,99	0,15	2,52	81,81	0,07	1,51	81,66	0,22	1,16	81,78	0,09	1,10	81,92	0,05	0,86	DA ≤ 0,5 MPa
PSA03-NS2-72		13,18	82,38		0,46			0,57			0,72			0,59			0,45		
PSA03-NS2-73		13,33	83,31		1,61			1,51											
PSA03-NS2-74		12,97	81,06		1,14			0,74			0,59			0,72			0,86		
PSA03-NS2-75		13,45	84,06		2,52														
PSA03-NS2-76		13,22	82,63		0,77			0,82			0,97			0,84			0,70		
		13,19	82,44		0,54			0,63			0,78			0,65			0,52		
		13,08	81,75		0,30			0,06			0,09			0,03			0,17		
		13,11	81,94		0,07			0,13			0,28			0,15			0,02		
		12,91	80,69		1,59			1,12			0,97			1,10					
		13,01	81,31		0,83			0,49			0,34			0,47			0,61		
		12,88	80,50		1,82			1,31			1,16								
PSA03-NS2-281	16	16,44	102,75	104,84	2,09	4,91	104,40	1,65	4,66	103,93	1,18	3,01	103,60	0,85	2,78	103,25	0,50	2,25	DA ≤ 0,5 MPa
PSA03-NS2-282		17,11	106,94		2,09			2,54			3,01								
PSA03-NS2-283		16,88	105,50		0,66			1,10			1,57			1,90			2,25		
PSA03-NS2-284		16,32	102,00		2,84			2,40			1,93			1,60			1,25		
PSA03-NS2-285		16,61	103,81		1,03			0,59			0,12			0,22			0,56		
PSA03-NS2-286		17,56	109,75		4,91														
		17,45	109,06		4,22			4,66											
		16,50	103,13		1,72			1,27			0,81			0,47			0,13		
		16,43	102,69		2,16			1,71			1,24			0,91			0,56		
		16,32	102,00		2,84			2,40			1,93			1,60			1,25		
		17,02	106,38		1,53			1,98			2,44			2,78					
		16,66	104,13		0,72			0,27			0,19			0,53			0,88		

NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 4 corpos de prova.

Legenda:

CP Eliminado

Tabela C-12: Resistência à compressão em cubos – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA03-NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Área (cm ²)	CARGA (ton.)	Tensão (MPa)		Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
			CP	Média	CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
PSA03-NS2-71	16	13,82	86,38	83,84	2,53	2,72	84,09	2,28	2,28	83,86	0,61	2,05	84,09	0,84	1,84	84,32	1,07	1,82	DA ≤ 0,5 MPa
PSA03-NS2-72	16	13,32	83,25		0,59			0,84			0,61			0,84			1,07		
PSA03-NS2-73	16	13,64	85,25		1,41			1,16			1,39			1,16			0,93		
PSA03-NS2-74	16	13,16	82,25		1,59			1,84			1,61			1,84					
PSA03-NS2-75	16	13,38	83,63		0,22			0,47			0,24			0,47			0,70		
PSA03-NS2-76	16	13,66	85,38		1,53			1,28			1,51			1,28			1,05		
	16	13,57	84,81		0,97			0,72			0,95			0,72			0,49		
	16	12,98	81,13		2,72														
	16	13,45	84,06		0,22			0,03			0,20			0,03			0,26		
	16	13,20	82,50		1,34			1,59			1,36			1,59			1,82		
	16	13,09	81,81		2,03			2,28			2,05								
	16	13,71	85,69		1,84			1,60			1,83			1,60			1,37		
PSA03-NS2-281	16	16,45	102,81	103,52	0,71	25,40	105,83	3,02	3,02	106,14	1,74	1,88	106,34	1,53	1,53	106,54	1,34	1,34	
PSA03-NS2-282	16	17,26	107,88		4,35			2,04			1,74			1,53			1,34		
PSA03-NS2-283	16	17,03	106,44		2,91			0,60			0,30			0,09			0,10		
PSA03-NS2-284	16	16,91	105,69		2,16			0,15			0,45			0,66			0,85		
PSA03-NS2-285	16	17,04	106,50		2,98			0,67			0,37			0,16			0,04		
PSA03-NS2-286	16	17,14	107,13		3,60			1,29			0,99			0,78			0,59		
	16	16,85	105,31		1,79			0,52			0,82			1,03			1,22		
	16	16,77	104,81		1,29			1,02			1,32			1,53					
	16	12,50	78,13		25,40														
	16	17,07	106,66		3,14			0,83			0,53			0,32			0,13		
	16	17,07	106,69		3,16			0,85			0,55			0,34			0,15		
	16	16,68	104,25		0,73			1,58			1,88								

NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 4 corpos de prova.

Legenda:

CP Eliminado

Tabela C-13: Resistência à tração na flexão – resultados individuais dos corpos de prova da mistura NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Dimensões (mm)			Peso (g)	Carga (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
	Comprimento	Largura	Altura					CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
NS1-71	160,51	40,17	40,04	589,2	6580	15,42	15,8	0,36	0,36	15,8	0,29					DA ≤ 0,3 MPa
NS1-72	160,44	40,16	39,95	583,5	6820	15,98		0,21								
NS1-73	160,73	40,08	40,05	591,5	6730	15,77		0,00								
NS1-74	160,62	40,25	39,73	583,3	6870	16,10		0,32								
NS1-75	160,69	40,18	39,72	586,8	6750	15,82		0,04								
NS1-76	160,71	40,14	39,95	592,7	6640	15,56		0,21								
NS1-281	161,73	40,52	39,85	594,5	7060	16,55	16,4	0,18	0,24							
NS1-282	161,87	40,22	40,10	591,3	6940	16,27		0,10								
NS1-283	161,79	40,44	39,70	590,8	6980	16,36		0,00								
NS1-284	161,26	40,18	39,96	598,0	6950	16,29		0,07								
NS1-285	161,20	40,08	40,02	589,8	7080	16,59		0,23								
NS1-286	161,04	40,32	40,19	597,1	6880	16,13		0,24								
NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 2 corpos de prova.														Legenda:	CP Eliminado	

Tabela C-14: Resistência à tração na flexão – resultados individuais dos corpos de prova da mistura NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Dimensões (mm)			Peso (g)	Carga (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
	Comprimento	Largura	Altura					Individual	Máx.		Individual	Máx.		Individual	Máx.	
NS2-71	160,84	40,06	40,08	590,30	7010	16,43	15,9	0,50	0,95	16,12	0,39	16,21	0,28	0,22	DA ≤ 0,3 MPa	
NS2-72	160,92	40,05	40,59	594,20	6930	16,24		0,32								
NS2-73	161,06	40,20	40,08	591,00	6390	14,98		0,95								
NS2-74	161,02	39,98	39,98	585,50	6930	16,24		0,32								
NS2-75	160,62	40,08	40,08	590,10	6710	15,73		0,20								
NS2-76	161,10	39,98	39,98	591,70	6800	15,94		0,01								
NS2-281	161,72	39,30	40,35	584,00	8110	19,01	18,8	0,23	0,42	18,86	0,15					
NS2-282	161,45	39,32	40,34	585,90	7830	18,35		0,42								
NS2-283	161,85	39,83	40,05	587,30	8060	18,89		0,12								
NS2-284	162,18	40,34	40,27	603,70	8010	18,77		0,00								
NS2-285	161,96	40,17	40,05	597,70	7980	18,70		0,07								
NS2-286	161,85	40,33	40,21	598,90	8070	18,91		0,14								
NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 2 corpos de prova.														Legenda:	CP Eliminado	

Tabela C-15: Resistência à tração na flexão – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA02-NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Dimensões (mm)			Peso (g)	Carga (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
	Comprimento	Largura	Altura					CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
PSA02-NS1-71	160,04	40,14	40,07	583,40	6160	14,44	14,76	0,32	0,36	14,69	0,25	0,36	14,60	0,16	DA ≤ 0,3 MPa	
PSA02-NS1-72	160,11	40,29	40,65	593,90	6450	15,12		0,36			0,18					
PSA02-NS1-73	160,44	40,19	40,11	580,30	6420	15,05		0,29			0,11					
PSA02-NS1-74	160,38	40,13	40,13	579,10	6190	14,51		0,25			0,17					
PSA02-NS1-75	160,51	40,02	40,18	575,90	6220	14,58		0,18			0,26					
PSA02-NS1-76	160,56	40,07	40,40	589,70	6340	14,86		0,10			0,31					
PSA02-NS1-281	161,61	40,19	40,51	587,70	6500	15,23	15,96	0,73	1,05	15,75	0,52	0,84	15,54	0,24		
PSA02-NS1-282	161,34	40,29	40,22	590,40	7080	16,59		0,63			0,42					
PSA02-NS1-283	161,46	40,08	40,97	583,30	6530	15,30		0,66			0,13					
PSA02-NS1-284	161,53	40,07	40,10	591,60	6810	15,96		0,00								
PSA02-NS1-285	161,35	40,01	40,86	598,70	7260	17,02		1,05								
PSA02-NS1-286	161,88	40,66	40,10	589,10	6690	15,68		0,29			0,07					
NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 2 corpos de prova.														Legenda:	CP Eliminado	

Tabela C-16: Resistência à tração na flexão – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA02-NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Dimensões (mm)			Peso (g)	Carga (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo NBR 13.279:2005
	Comprimento	Largura	Altura					CP	Máx.		CP	Máx.		CP	Máx.	
PSA02-NS2-71	161,01	40,06	40,03	584,25	6100	14,30	14,47	0,17	0,29						DA ≤ 0,3 MPa	
PSA02-NS2-72	160,81	40,16	40,13	573,94	6050	14,18		0,29								
PSA02-NS2-73	160,89	40,27	40,02	578,27	6220	14,58		0,11								
PSA02-NS2-74	161,60	40,15	39,68	576,16	6210	14,55		0,09								
PSA02-NS2-75	161,47	40,62	39,92	575,52	6190	14,51		0,04								
PSA02-NS2-76	161,57	40,28	40,18	583,12	6270	14,70		0,23								
PSA02-NS2-281	160,63	39,47	39,74	570,48	7120	16,69	16,2	0,50	0,75	16,0	0,65	0,65	15,88	0,13		
PSA02-NS2-282	160,87	39,92	40,04	582,05	7230	16,95		0,75			0,41					
PSA02-NS2-283	160,74	39,55	39,82	572,28	6720	15,75		0,44			0,36					
PSA02-NS2-284	161,17	39,33	40,08	569,02	6950	16,29		0,10			0,08					
PSA02-NS2-285	161,19	39,18	39,86	569,11	6620	15,52		0,68								
PSA02-NS2-286	161,13	39,41	40,01	569,59	6810	15,96		0,23			0,08					
NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 2 corpos de prova.														Legenda:	CP Eliminado	

Tabela C-17: Resistência à tração na flexão – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA03-NS1, para as duas idades estudadas.

Nome	Dimensões (mm)			Peso (g)	Carga (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Nova Média	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo permitido NBR 13.279:2005	
	Comprimento	Largura	Altura					CP	Máx.		CP	Máx.		CPI	Máx.		
PSA03-NS1-71	160,36	39,97	40,29	582,30	6010	14,09	13,6	0,54	0,54	13,44	0,18	0,18				DA ≤ 0,3 MPa	
PSA03-NS1-72	160,88	40,23	40,49	584,60	5740	13,45		0,10									0,01
PSA03-NS1-73	160,57	40,22	40,27	585,80	5660	13,27		0,29									0,18
PSA03-NS1-74	160,93	40,11	40,56	576,80	5800	13,59		0,04									0,15
PSA03-NS1-75	160,42	40,01	40,27	581,20	5780	13,55		0,00									0,10
PSA03-NS1-76	160,85	40,14	40,35	581,90	5700	13,36		0,19									0,08
PSA03-NS1-281	161,22	40,10	40,26	588,70	6230	14,60	14,6	0,01	0,72	14,47	0,21	0,21					
PSA03-NS1-282	160,70	40,16	40,55	580,30	6540	15,33		0,72							0,14		
PSA03-NS1-283	161,02	40,06	40,23	579,20	6130	14,37		0,24							0,10		
PSA03-NS1-284	160,20	39,95	40,28	582,40	6090	14,27		0,34							0,19		
PSA03-NS1-285	160,33	40,05	40,02	586,30	6260	14,67		0,06							0,21		
PSA03-NS1-286	160,89	40,12	40,13	581,60	6150	14,41		0,20							0,05		
NOTA: A NBR 13.279:2005 permite eliminação de 2 corpos de prova.															Legenda:		CP Eliminado

Tabela C-18: Resistência à tração na flexão – resultados individuais dos corpos de prova da mistura PSA03-NS2, para as duas idades estudadas.

Nome	Dimensões (mm)			Peso (g)	Carga (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)		Desvio Absoluto Máximo permitido NBR 13.279:2005
	Comprimento	Largura	Altura					CP	Máx.	
PSA03-NS2-71	160,55	40,35	41,20	587,30	6020	14,11	14,1	0,01	0,29	DA ≤ 0,3 MPa
PSA03-NS2-72	160,34	40,19	40,77	589,10	6110	14,32		0,20		
PSA03-NS2-73	160,49	40,03	40,28	582,00	5900	13,83		0,29		
PSA03-NS2-74	161,45	40,40	39,70	575,60	5990	14,04		0,08		
PSA03-NS2-75	161,18	40,24	39,87	573,70	6090	14,27		0,15		
PSA03-NS2-76	161,22	40,11	40,03	576,40	6040	14,16		0,04		
PSA03-NS2-281	161,19	40,12	40,20	580,30	6440	15,09	15,1	0,00	0,30	
PSA03-NS2-282	160,64	39,96	40,22	580,40	6570	15,40		0,30		
PSA03-NS2-283	160,26	40,09	40,19	583,40	6320	14,81		0,29		
PSA03-NS2-284	161,83	40,18	39,43	571,50	6410	15,02		0,07		
PSA03-NS2-285	161,56	40,19	39,92	576,40	6540	15,33		0,23		
PSA03-NS2-286	161,63	40,06	39,77	572,50	6370	14,93		0,17		