

**DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ALTA
RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE POLÍMERO
SUPERABSORVENTE E NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA**

**CALLEBE ARAÚJO DE MEDEIROS MENDES
CAROLINA MAY DE AZAMBUJA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA
COM ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E NANO
PARTÍCULAS DE SÍLICA**

**CALLEBE ARAÚJO DE MEDEIROS MENDES
CAROLINA MAY DE AZAMBUJA**

**ORIENTADOR: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA
COORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: JULHO/2019

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

DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA
COM ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E NANO
PARTÍCULAS DE SÍLICA

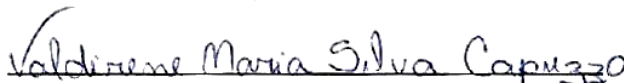
CALLEBE ARAÚJO DE MEDEIROS MENDES
CAROLINA MAY DE AZAMBUJA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

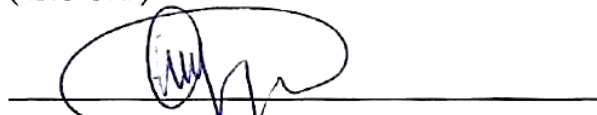
APROVADA POR:



ORIENTADORA: **PROF^ª EUGÊNIA FONSECA DA SILVA, D. Sc. (ENC-UnB)**



COORIENTADORA: **PROF^ª VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, D.Sc. (ENC-UnB)**



EXAMINADORA INTERNA: **PROF^ª CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, D.Sc. (ENC-UnB)**



EXAMINADOR EXTERNO: **ENG^ª CIVIL LÍVIA BORBA AGOSTINHO, M.Sc.**

Brasília, 04 de julho de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

MENDES, CALLEBE ARAÚJO MEDEIROS; AZAMBUJA, CAROLINA MAY
Durabilidade de concretos de alta resistência com adição de polímero
superabsorvente e nano partículas de sílica [Distrito Federal] 2019.

xvi, 107 p., 297 mm, (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. Concreto de Alta Resistência | 2. Polímero Superabsorvente |
| 3. Durabilidade | 4. Nanossílica |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (bachelor) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Mendes, C. A. M.; Azambuja, C. M. (2019). Durabilidade de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DOS AUTORES: Callebe Araújo de Medeiros Mendes e Carolina May de Azambuja.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Durabilidade concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

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

Callebe Araújo de Medeiros Mendes
SHVP chácara 13-1, Casa 11
CEP: 72005-170
Brasília / DF – Brasil

Carolina May de Azambuja
SMPW quadra 15 conjunto 2 lote 6
Casa D – CEP: 71741-502
Brasília / DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, por nos conceder esperança, fé e coragem nos momentos mais difíceis da vida.

Aos nossos pais, pelo amor imensurável e dedicação incondicional. Agradecemos por sempre acreditarem em nossos sonhos e estarem presentes em cada vitória. Pais, vocês são nossos exemplos de bondade, perseverança e amor. Hoje, deixamos aqui registrado a nossa eterna gratidão e admiração. Às nossas irmãs, pela proteção, amizade e cumplicidade desde a infância.

Peço liberdade ao Callebe para agradecer em especial, à minha irmã Marcella (in memoriam), por me ensaiar a encarar a vida com mais leveza. Obrigada por me emprestar seu riso todas as vezes em que me vem o choro.

À nossa orientadora Eugênia, pela humildade e paciência em compartilhar um pouco de seu conhecimento e nos guiar nessa estrada tortuosa da vida, com muito carinho e dedicação. Agradecemos por desde o primeiro dia confiar em nosso potencial e obrigado por sempre nos acolher em seu coração com muito amor.

À nossa co-orientadora Valdirene, nossa profunda gratidão e agradecimento pelo apoio, tempo, atenção, dedicação e confiança concedida que proporcionaram o desenvolvimento do trabalho.

Aos nossos colegas de curso, que nos acompanharam ao longo dessa caminhada, em especial, Ana Paula, Arthur, Bárbara, Carlos Eduardo, Lucas, Luísa, Luís Felipe, Mariana, Matheus, pelas conversas, trabalhos, conselhos, risadas e pelos inúmeros momentos que compartilhamos juntos. Nosso muito obrigado pelas inúmeras e valiosas contribuições acadêmicas e pessoais.

À Universidade de Brasília e todo o seu corpo docente, pela excelência em transmitir conhecimento.

RESUMO

Os Concretos de Alta Resistência (CAR) proporcionaram avanços significativos na construção civil devido à sua resistência superior, eficiência e durabilidade. No entanto, devido ao alto teor de cimento, baixa relação a/c e adições minerais, é fundamental evitar o surgimento de fissuras excessivas nos elementos estruturais causadas por tensões induzidas de tração que surgem como consequência do processo de retração autógena, podendo comprometer a durabilidade do concreto. Uma estratégia que vem sendo estudada nos últimos anos para mitigar a retração autógena nos concretos de alta resistência é o uso de polímeros superabsorvente (SAP) como agentes de cura interna. Todavia, ainda há lacunas sobre os efeitos causados por esses polímeros na durabilidade de materiais cimentícios de alta resistência. Tendo isso em vista, mais pesquisas precisam ser realizadas sobre tal assunto. Para avaliar a influência do uso do SAP na durabilidade, o programa experimental consiste em três misturas de microconcretos de alta resistência: uma contendo 0,3% de SAP; outra com 0,3% de SAP juntamente com 1% de nanossílica (NS); e, utilizando como referência um traço contendo uma relação água/cimento igual a 0,35. A análise do efeito de SAP nas várias propriedades no estado endurecido dos microconcretos deve ser feita em relação à mistura de referência contendo a mesma relação a/c em relação ao total a/c da mistura contendo SAP. O comportamento no estado endurecido foi avaliado realizando os seguintes ensaios: resistência à compressão axial simples; resistência à tração por compressão diametral; módulo de elasticidade; migração de íons cloreto; absorção por capilaridade e imersão; e resistividade elétrica superficial e volumétrica. Os resultados mostram que a adição de SAP não acarreta perda às propriedades mecânicas ou à durabilidade dos microconcretos, promovendo até um incremento nessas propriedades. Ademais, a adição da NS representa crescimento irrisório nos valores de módulo e resistência aos 28 dias, porém traz um aumento relevante na resistência à compressão nas primeiras idades. O microconcreto contendo SAP e NS é o que apresentou melhor desempenho nos ensaios de durabilidade, demonstrando que a adição da NS também não traz prejuízos à durabilidade. Assim foi verificado que a microestrutura densa, característica do CAR, é preservada mesmo na presença de poros criados pelo processo de dessorção do SAP, por serem poros maiores e desconectados em vez de poros menores e contínuos.

Palavras-chave: Concreto de Alta Resistência (CAR), Polímero Superabsorvente (SAP), Nanossílica (NS), Durabilidade.

ABSTRACT

The High Strength Concretes (HSC) provided significant advances in civil construction, due its superior strength, efficiency and durability against environmental attacks. Nevertheless, due to the high content of cement, low water/cement ratio and mineral additions, it is essential to avoid the emergence of induced tensile stresses that can generate autogenous shrinkage and consequently the cracking of structural elements and, therefore, losses in the durability of the concrete. One strategy that has been studied in recent years to mitigate autogenous shrinkage of HSC, is the use of superabsorbent polymers (SAP) as agents of internal curing. However, there are gaps about the effects caused by these polymers on the durability of high strength cementitious materials, so more research needs to be done. In order to evaluate the influence of the use of SAP in durability, the experimental program consists of four mixtures of high-strength microconcrete: one containing 0.3% of SAP, another containing 0.3% of SAP and 1% of NS; one used as reference with water/cement ration equal to 0.35. The comparative analysis of the effect of SAP in the various properties in the hardened state of the microconcretes should be made in relation to the reference mixture containing the same w/c ratio in relation to total w/c of the modified polymer admixture. The behavior of concrete in the hardened state was evaluated by performing the following tests: resistance to simple axial compression, tensile strength by diametral compression, modulus of elasticity, migration of chloride ions; absorption by capillarity and immersion; and surface and volumetric electrical resistivity. The results show that the addition of SAP does not imply loss to the mechanical properties or durability of the microconcretes, promoting an increase in these properties. Moreover, the addition of NS represents a negligible growth in modulus and resistance values at 28 days but brings a significant increase in the compressive strength at the earliest ages. The microconcrete containing SAP and NS is the one that presented the best performance in the durability tests, demonstrating that the addition of the NS also does not damage the durability. Thus, it was verified that the dense microstructure, characteristic of CAR, is preserved even in the presence of pores created by the SAP desorption process, because they are larger and disconnected pores instead of smaller and continuous pores.

Keywords: High Strength Concrete (HSC), Superabsorbent Polymers (SAP), Nanosilica (NS), Durability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	2
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 Objetivo Geral.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	5
2 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 OS CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA E DE ALTO DESEMPENHO	7
2.2 A RETRAÇÃO AUTÓGENA	10
2.3 O POLÍMERO SUPERABSORVENTE.....	12
2.3.1 Mecanismo de Absorção e Dessorção.....	14
2.3.2 Água de Cura Interna	17
2.3.3 Efeito do Polímero Superabsorvente nas Propriedades Reológicas, Mecânicas e na Retração Autógena de Materiais Cimentícios	19
2.4 NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA – NANOSSÍLICA	24
2.4.1 Efeito da Nanossílica nas Propriedades de Materiais Cimentícios.....	26
2.5 DURABILIDADE.....	29
3. METODOLOGIA	34
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
3.1.1 Variáveis de Controle e Variáveis de Resposta.....	35
3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES	36
3.2.1 Cimento Portland (CP V-ARI).....	36
3.2.2 Agregado Miúdo	37
3.2.3 Sílica Ativa.....	38
3.2.4 Superplastificante	39
3.2.5 Polímero Superabsorvente.....	39
3.2.6 Nanossílica	40
3.2.7 Água	41
3.3 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	41
3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS MICROCONCRETOS.....	42
3.5 ENSAIOS	43
3.5.1 Ensaio de Espalhamento.....	43
3.5.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	44
3.5.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade	44

3.5.4	Ensaio de Migração de Íons Cloreto	45
3.5.5	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	49
3.5.6	Ensaio de Absorção de Água por Imersão	51
3.5.7	Ensaio de Resistividade Elétrica	52
3.5.7.1	Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial	53
3.5.7.2	Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica	54
3.5.8	Resumo dos Ensaios	55
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	56
4.	ANÁLISES E RESULTADOS	59
4.1	ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....	59
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	60
4.2.1	Análise Estatística	64
4.2.2	Influência da dimensão dos corpos de prova na resistência dos microconcretos	65
4.3	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	68
4.3.1	Análise Estatística	70
4.4	ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO	71
4.4.1	Análise Estatística	73
4.5	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	74
4.5.1	Análise Estatística	77
4.6	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	78
4.6.1	Análise Estatística	80
4.7	ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	81
4.7.1	Análise Estatística	84
4.8	RESUMO DO CAPÍTULO 4.....	86
5.	CONCLUSÃO	89
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	91
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS	99

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2- 1: Obra pioneira em CAR/CAD no Brasil: Museu de arte de São Paulo – (MASP) – São Paulo SP (© GOOGLE, 2018). 8
- 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 (© GOOGLE, 2018); (b) Vista frontal do Edifício dos Plenários, com seu vão central com 67m de comprimento. (© GOOGLE, 2018). 9
- Figura 2- 3: Representação do fenômeno da retração autógena no tubo capilar. (a) capilar completamente saturado com umidade relativa interna (UR) igual a 100 %; (b) capilar parcialmente saturado, mostrando a saída de água para a reação de hidratação e $UR < 100\%$; (c) no detalhe: a região ar-água dentro do capilar e a representação das componentes da tensão superficial e conseqüente tensão induzida de tração; (d) representação da componente horizontal de tensão superficial, que faz encolher o poro, e da componente vertical, que faz encurtar o poro (SILVA et al, 2011). 11
- Figura 2- 4: Imagem de uma partícula esférica colorida de SAP com tinta azul no estado seco e saturada com água (ASSMANN, 2013). 13
- Figura 2- 5: Polímero superabsorvente no estado seco, com partículas variando de 0 a $300\mu\text{m}$. A coluna à direita mostra a transição do estado seco para inchado, caracterizado por uma mudança rápida de sólido para gel. A morfologia em ambos estados é de partículas esféricas (ESTEVEES, 2011 apud MANZANO, 2016). 14
- Figura 2- 6: Representação esquemática da evolução da hidratação (inchamento) do SAP 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 SAP alcança sua absorção final; (c) Após 7 dias – a água é liberada para a matriz cimentícia, causando redução do volume do SAP, permanecendo em seu lugar um poro praticamente vazio ((MANZANO, 2016) Adaptado, (MÖNNIG, 2009)). 16
- Figura 2- 7: Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas (QUERCIA, 2014 apud SILVA JR, 2017) 25
- Figura 3- 1: Esquema dos traços sugeridos para estudos, contendo a relação a/c básico e a/c total de cada traço e os respectivos teores de SAP e NS. 34
- Figura 3- 2: Esquema do programa experimental desenvolvido na pesquisa em microconcretos. 35
- Figura 3- 3: Curva Granulométrica e demais propriedades do agregado miúdo selecionado (SANTOS, 2016). 38
- Figura 3- 4: Pesagem dos materiais secos, (a) areia, (b) cimento e SAP. (c) Pesagem dos materiais líquidos (água, SP e nanossílica). (d) Homogeneização dos materiais na betoneira. (e) Fôrmas previamente condicionadas com desmoldante. 43
- Figura 3- 5: Medida do espalhamento com o auxílio do paquímetro. 44
- Figura 3- 6: Prensa utilizada para a realização do ensaio de Módulo de Elasticidade. ... 45

Figura 3- 7: a) Amostras posicionadas no dessecador; b) Dessecador utilizado no pré-condicionamento das amostras.	46
Figura 3- 8: a) Desenho esquemático do aparato de ensaio de migração de cloretos sugerido pela NT BUILD 492:2011; b) Vista lateral do aparato de ensaio de migração; c) Vista superior do aparato de ensaio de migração; (d) Placa inferior utilizadas para posicionar o aparato de ensaio.	47
Figura 3- 9: Ensaio de Migração de íons cloreto em andamento.	48
Figura 3- 10: Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de NT BUILD 492:2011).	48
Figura 3- 11: (a) Amostras recém aspergidas com solução de nitrato de prata. (b) Realização da medida da frente de penetração em uma amostra.	49
Figura 3- 12: (a) Amostras posicionadas sobre tiras de vidro. (b) Amostra rompida à tração por compressão diametral. (c) Distribuição da água no interior do corpo de prova.	50
Figura 3- 13: Representação do coeficiente de sorvidade e da absorção inicial (MEDEIROS et al., 2017).	51
Figura 3- 14: (a) Amostras totalmente imersas em água, à temperatura ambiente. (b) Chapa metálica aquecedora utilizada para aquecer a água até a ebulição. (c) Amostras posicionadas no interior da cuba em aquecimento.	51
Figura 3- 15: Ensaio de resistividade elétrica superficial em andamento.	53
Figura 3- 16: Ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento.	54
Figura 4- 1: Valores de espalhamento dos microconcretos estudados.	59
Figura 4- 2: Resultados médios da resistência à compressão simples dos microconcretos produzidos para as idades de 1, 7, 28 e 70 dias.	60
Figura 4- 3: Comparação, em porcentagem, da resistência à compressão simples dos microconcretos 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação ao traço de referência, para as idades de 1, 7, 28 e 70 dias.	61
Figura 4- 4: Gráfico de Pareto que permite visualizar os efeitos da idade, SAP e NS com significância na análise de variância da resistência à compressão simples.	65
Figura 4- 5: Resultados médios obtidos para a resistência à compressão simples para corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm e de 100x200 mm.	66
Figura 4- 6: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos da dimensão, SAP e NS com significância na análise de variância da resistência à compressão simples, aos 28 dias.	68
Figura 4- 7: Resultados médios de módulo de elasticidade para 28 dias.	68

Figura 4- 8: Crescimento percentual no valor do módulo para os traços 035 SAP03 e SAP03-NS1 em comparação ao valor obtido para o traço de referência.	69
Figura 4- 9: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância do módulo de elasticidade.....	70
Figura 4- 10: Resultados médios do coeficiente de difusão obtido através do ensaio de migração de íons cloretos.	71
Figura 4- 11: Comparação percentual do valor do coeficiente de difusão para os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação à referência.	71
Figura 4- 12: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da migração de íons cloreto.	73
Figura 4- 13: Resultados médios da absorção por capilaridade em função do tempo....	74
Figura 4- 14: Resultados médios obtidos para a absorção por capilaridade.....	75
Figura 4- 15: Comparação percentual da absorção por capilaridade dos microconcretos 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação à referência.	75
Figura 4- 16: Resultados médios da altura da ascensão capilar no ensaio de absorção por capilaridade.....	76
Figura 4- 17: Resultados do coeficiente de sorvidade obtidos através do ensaio de absorção por capilaridade.	77
Figura 4- 18: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da absorção por capilaridade.....	78
Figura 4- 19: Resultados médios obtidos de absorção por imersão.	79
Figura 4- 20: Comparação percentual dos valores de absorção por imersão para os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação à referência.	79
Figura 4- 21: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da absorção por imersão.	81
Figura 4- 23: Resultados médios do ensaio de resistividade elétrica superficial por traço estudado e por data de ensaio.	81
Figura 4- 24: Resultados médios do ensaio de resistividade elétrica volumétrica por traço estudado e por data de ensaio.	82
Figura 4- 25: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da resistividade elétrica superficial.....	85
Figura 4- 26: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da resistividade elétrica volumétrica.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2- 1: Comparação da resistência à compressão em cilindros do traço SAP03 com duas relações a/c diferentes.	22
Tabela 2- 2: Resultados de resistência à compressão em cilindros.	23
Tabela 3- 1: Matriz experimental da pesquisa realizada em microconcretos.	36
Tabela 3- 2: Caracterização física e mecânica do cimento CPV - ARI RS selecionado.	37
Tabela 3- 3: Características físicas e químicas da sílica ativa fornecidas pelo fabricante.	38
Tabela 3- 4: Características físicas e químicas do superplastificante fornecidas pelo fabricante.	39
Tabela 3- 5: Características físicas e químicas da NS a ser utilizada na pesquisa.	41
Tabela 3- 6: Composição dos Microconcretos.	42
Tabela 3- 7: Roteiro de Mistura dos Microconcretos.	42
Tabela 3- 8: Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos.	47
Tabela 3- 9: Classificação dos valores de resistividade elétrica volumétrica quanto à penetração de cloretos (Fonte: AASHTO TP119:2015).	55
Tabela 3- 10: Resumo dos Ensaio e volume de microconcreto por ensaio.	56
Tabela 4- 1: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP, teor de NS e idade para a resistência à compressão simples	64
Tabela 4- 2: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP, teor de NS e dimensão do corpo de prova para a resistência à compressão simples.	67
Tabela 4- 3: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para o módulo de elasticidade.	70
Tabela 4- 4: Classe de resistência à penetração dos íons cloro.	72
Tabela 4- 5: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para o coeficiente de difusão/migração de íons cloreto.	73
Tabela 4- 6: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a absorção por capilaridade.	77
Tabela 4- 7: Parâmetros obtidos através do ensaio de imersão.	80
Tabela 4- 8: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a absorção por imersão.	80

Tabela 4- 9: Valores de resistividade elétrica com indicativos da probabilidade de corrosão do concreto, segundo CEB – 192 e o boletim europeu COST 509 (Fonte: Ribeiro et al., 2014).	83
Tabela 4- 10: Classificação dos resultados do Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica quanto a risco de corrosão pelo CEB-192 e COST 509; e quanto a penetração de cloretos pela AASHTO TP 119:15.	83
Tabela 4- 11: Classificação dos resultados do Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial quanto a risco de corrosão pelo CEB-192 e COST 509.	84
Tabela 4- 12: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a resistividade elétrica superficial.....	84
Tabela 4- 13: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a resistividade elétrica volumétrica.	84
Tabela 4- 14: Resumo dos resultados médios obtidos e síntese da análise de variância realizada para cada ensaio.	88

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA, ABREVIACÕES

a/c	Relação entre água e cimento
a/c _{inc}	Relação entre água incorporada pelo SAP e cimento
A	Absorção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano do Concreto
AgNO ₃	Nitrato de Prato
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Número de Categorias
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAR	Concreto de Alta Resistência
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CEB	<i>Comité Euro-Internacional du Beton</i>
CIPLAN	Cimento Planalto
CO ₂	Gás Carbônico (Dióxido de Carbono)
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP	Corpo de Prova
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
D	Diâmetro do corpo de prova
D ₂₈	Difusão de cloretos aos 28 dias
DIN	German Institute of Standardization
DF	Distrito Federal
D _{nssm}	Coeficiente de difusão/migração de cloretos (regime não estacionário)
DTU	Universidade Técnica da Dinamarca
ELS	Estado Limite de Serviço
F	Parâmetro de Fisher
F _c	Resistência à compressão (tensão de ruptura)
H	Teor de Umidade
I	Corrente Elétrica
I ₀	Corrente Inicial

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IST	Instituto Senai de Tecnologia
K_s	Coefficiente de sorvidade
LEM/UnB	Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília
MASP	Museu de Arte de São Paulo
MPa	Mega Pascal (10^6 Pa)
M_s	Massa seca
M_{sat}	Massa após saturação
MQ	Média dos Quadrados
NaCl	Cloreto de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
NS	Nanossílica
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
PF-II	Projeto Final II
Q	Termo Quadrático
R	Resistência Elétrica
R^2	Coefficiente de Determinação
RA	Retração Autógena
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires D'Essais et Matériaux</i>
RS	Resistente a Sulfatos
SAP	Polímero Superabsorvente
SiO_2	Óxido de Silício
SP	Superplastificante
SPII	Superplastificante tipo II
SQ	Soma dos Quadrados
SQ_{total}	Soma dos Quadrados Totais
SQ_{res}	Soma dos Quadrados dos Resíduos
SSS	Saturado Superficialmente Seco
STJ	Superior Tribunal de Justiça
T_0	Tempo Zero ou Tempo de Percolação

TC	Comitê Técnico
U	Tensão aplicada
UnB	Universidade de Brasília
UR	Umidade relativa interna
V	Volts
X_d	Média da frente de penetração de cloretos
°C	Graus Celsius
α	Distância entre os eletrodos
ac	corrente alternada
cm^3	centímetros cúbicos
f_{ck}	resistência característica
g	gramas
h	hora
kg	quilogramas
kPa	quilo Pascal (10^3 Pa)
m^3	metros cúbicos
mA	mili ampère
min	minutos
ml	mililitros
mm	milímetros
nm	nanômetros
μm	micrômetros
s	segundos
p	coeficiente de significância
ρ	resistividade elétrica superficial
ρ_v	resistividade elétrica volumétrica
y_i	dados coletados para análise estatística
\bar{y}	dados coletados para análise estatística
\hat{y}_i	dados ajustados ao modelo proposto
γ	massa específica da areia na condição SSS

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos no campo dos materiais de construção civil ocorridos nas últimas décadas permitiram a utilização de concretos de alta resistência (CAR). Na década de 1970, os concretos que apresentavam 40 MPa ou mais de resistência à compressão, aos 28 dias, já eram designados como de alta resistência. Todavia, com o advento de concretos no mercado com 60 a 120 MPa, o Instituto Americano do Concreto (ACI) revisou a definição para abranger dosagens com resistências de projeto especificadas de 55 MPa ou mais. No Brasil, considera-se como CAR valores entre 55 a 100 MPa, de acordo com prescrições da norma ABNT NBR 8953:2015, que classifica o concreto para fins estruturais. Não obstante, a norma ABNT NBR 6118:2014, Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, prevê o uso de concreto de alta resistência de até 90 MPa.

O desenvolvimento do concreto de alta resistência proporcionou inúmeras avanços sobre os aspectos produtivos e econômicos para a construção civil. Dentre as vantagens, destacam-se a alta resistência à compressão, a alta durabilidade, a trabalhabilidade adequada, a construção de elementos estruturais mais resistentes e com menor secção, estruturas com grandes vãos e menor permeabilidade pela sua microestrutura mais densa (DUDZIAK e MECHTCHERINE; 2010).

O uso dos aditivos plastificantes e, posteriormente, dos superplastificantes (SP), foi possível reduzir a relação água/cimento (a/c) dos concretos alcançando resistências à compressão cada vez mais elevadas, sem prejuízo na trabalhabilidade.

Todavia, por apresentar uma microestrutura mais densa e refinada, devido à baixa relação água/cimento, e por apresentar adições minerais e um elevado consumo de cimento, este concreto é menos permeável e mais resistente aos ataques de agentes agressivos como cloretos, sulfatos e CO_2 e apresenta maior resistência à abrasão. Entretanto, por outro viés, este concreto apresenta o malefício de apresentar elevado grau de retração autógena ao qual estão suscetíveis, que podem causar quadros de fissuração que comprometem a estabilidade, durabilidade e estética da estrutura.

Para mitigar essa retração, várias soluções já foram propostas, porém a utilização da água de cura interna pelo uso de materiais porosos (como o polímero superabsorvente – SAP – ou agregados leves), vem se consolidando como a alternativa mais eficiente.

Os SAP são partículas poliméricas sintéticas superabsorventes e finas que têm a capacidade de absorver uma grande quantidade de líquido do ambiente, permitindo a formação de macroporos cheios de água na pasta de cimento, e, assim, retendo água dentro da sua estrutura, sem dissolução (JENSEN e HANSEN, 2001a). Essas características fazem com que o material seja utilizado em diversos propósitos para materiais cimentícios além da mitigação da retração autógena, cita-se: resistência ao gelo-degelo, autocicatrização e modificador de viscosidade.

Diversos autores, a partir do trabalho pioneiro de Jensen e Hansen (2001), evidenciaram a competência do SAP, cita-se dentre eles: Monnig (2005); Kiatkamjornwong (2006); Jensen e Lura (2006); Kovler E Jensen (2007); Silva (2007); Kumm (2009); Pereira e Matos (2011); Claro E Saraiva (2012); Mechtcherine (2013), Ordóñez (2013); Traldi e Aguirre (2013); Moraes e Cerqueira (2014); Neto (2014); Suarez (2015); Manzano (2016); Couto (2016); Santos (2016); Agostinho (2017); Sakata (2017); Silva Jr (2017); Wyrzykowski (2018).

Em contrapartida, concretos com adição desse tipo de polímero apresentaram prejuízos em algumas propriedades mecânicas, como a redução da resistência à compressão. Visando tentar compensar tal prejuízo, alguns pesquisadores fazem uso da nanossílica (NS), uma vez que é uma alternativa promissora para o aumento da resistência do concreto, conforme verificado por alguns pesquisadores, dentre eles: Pourjavadi et al. (2012); Zhang, Islam e Peethamparan (2012); Hou (2013); Santos (2016); Silva Jr (2017); Borges e Aidar (2017).

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

No ano de 2007, foi criado pela RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*) um comitê específico para avaliar as propriedades do SAP (*Technical Committee TC 225 – SAP*). Em 2012 foi publicado seu relatório intitulado “*Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction – State Of The Art Report*”, com 10 capítulos de diversos pesquisadores, justamente pela notoriedade desse novo material no meio técnico-científico.

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. (2013), comprovando a eficácia do SAP em mitigar a retração autógena.

As atividades do TC 225 – SAP foram encerradas 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 foi estabelecer as recomendações práticas de uso do SAP para construtores e demais envolvidos na indústria da construção civil. Recentemente, em abril de 2018, duas recomendações técnicas foram lançadas pelo comitê, sendo intituladas: “*Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage*” e “*Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (SAP) prior to implementation in cement-based materials*”.

O uso do SAP 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. E, há poucos estudos sobre a influência da adição do SAP nos parâmetros relacionados à durabilidade.

Diante do exposto, fica evidente a relevância do tema no meio técnico-científico, com pesquisas ainda em processo de consolidação; caracterizando a importância e o aspecto inovador deste trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento de um material notadamente recente, o polímero superabsorvente (SAP), como agente de cura interna para uso em concretos de alta resistência, com o propósito de mitigar a retração autógena, tornando-o também mais durável.

Como os SAP possuem uma grande capacidade de absorção, a liberação da água de cura interna, que leva ao desinchamento das partículas de polímero, causa mudanças na estrutura porosa dos materiais cimentícios. Assim, durante o processo de dessorção, deixa grandes vazios na pasta de cimento, que afetam as suas propriedades no estado endurecido, bem como as propriedades associadas à durabilidade.

Embora várias pesquisas estejam sendo desenvolvidas, ainda existem lacunas sobre os efeitos a longo prazo causados por esses polímeros na durabilidade dos materiais cimentícios de alta resistência.

Na literatura técnica ainda não há consenso se a adição de água de cura interna usando SAP causa efeitos negativos na durabilidade dos materiais cimentícios de alta resistência, pois as pesquisas são muito incipientes nesse aspecto.

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

Essa monografia está inserida na linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção”, do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), da Universidade de Brasília (UnB), na ênfase construção civil. Nesta instituição já foram publicadas dissertações e teses que estudaram propriedades no estado fresco de compostos cimentícios como concreto, argamassa e pastas de cimento. Pode-se citar 16 trabalhos que estudaram o polímero superabsorvente, dentre eles os mais recentes a dissertação de Agostinho (2017) que realizou o estudo reológico de pastas de Cimento Portland modificadas com polímero superabsorvente e nano partículas de sílica; de Couto (2016) que fez caracterização reológica de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros Superabsorventes pela técnica de reometria rotacional; de Santos (2016) intitulada “Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e Nano Partículas de Sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência”; a tese de Manzano (2016) intitulada “Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência Modificados com Polímeros Superabsorventes (SAP) Como Agentes de Cura Interna”; a tese de Silva Jr (2017) intitulada “Estudo da Estabilidade Dimensional de Concretos de Alta Resistência com Adição de Polímero Superabsorvente e Nanopartículas de Sílica”; a qualificação Reis (2018) intitulada “Previsão da Retração em Pasta de Cimento Endurecida Contendo Nano Partículas de Sílica e Polímero Superabsorvente com Abordagem Poroviscoelástica”; e o trabalho mais atual, a qualificação de Agostinho (2019) que monitorou a hidratação de pastas de Cimento Portland contendo polímero superabsorvente e nanosilica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a influência da adição de polímero superabsorvente (SAP) e da nanossílica (NS) na durabilidade de microconcretos de cimento Portland.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Mensurar a interferência da adição de polímero superabsorvente nas propriedades mecânicas de microconcretos, por intermédio dos ensaios: resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Investigar a influência da adição combinada de SAP e nanopartículas de sílica (NS) nas propriedades mecânicas de microconcretos;
- Mensurar a interferência da adição de polímero superabsorvente na durabilidade de microconcretos, por intermédio dos ensaios: migração de íons cloreto, resistividade elétrica volumétrica, resistividade elétrica superficial, absorção por capilaridade e por imersão;
- Investigar a influência da adição combinada de SAP e nanopartículas de sílica (NS) na durabilidade de microconcretos.
- Avaliar se a água de cura interna do SAP deve ser incorporada na relação a/c.

1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

O conteúdo desta monografia de projeto final está dividido em cinco capítulos, conforme é apresentado abaixo.

No capítulo 1 consta a introdução ao tema, sua importância e justificativa. São apresentados também os objetivos gerais e específicos do trabalho e sua estrutura.

Já no capítulo 2 é apresentada a revisão do estado da arte, discorrendo sobre os conceitos de concretos de alta resistência e de alto desempenho. Em seguida uma revisão da

literatura sobre o SAP e é feita uma explanação sobre seu mecanismo de absorção e desorção, a água de cura interna e os efeitos da adição do polímero às propriedades mecânicas. Na continuação discorre-se sobre a nanossílica e sua influência à microestrutura, além de se apresentar os conceitos gerais de durabilidade.

No capítulo três é apresentado o programa experimental, com a exposição das misturas utilizadas. Apresenta-se, também, os materiais selecionados para a confecção dos microconcretos e a metodologia utilizada para a sua caracterização. Descreve-se ainda, a metodologia de execução dos ensaios propostos para a determinação das propriedades de interesse na pesquisa.

No quarto capítulo são apresentados os resultados experimentais e a análise estatística do projeto experimental proposto. Foram feitas análises dos dados obtidos baseadas em bibliografias anteriores ou em resultados obtidos por outros pesquisadores.

No quinto capítulo encontram-se as considerações finais, incluindo as conclusões baseadas nos dados experimentais e sugestões para futuros trabalhos que possam dar continuidade à esta pesquisa.

Por fim, estão apresentadas as referências utilizadas no estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa é apresentado o estado da arte dos concretos de alta resistência (CAR) com adição de polímero superabsorvente como solução mitigadora para o fenômeno da retração autógena. É feita uma revisão sobre o conceito de cura interna e sobre os mecanismos de atuação dos SAP.

Ademais, tem-se como foco analisar as consequências da adição do polímero na durabilidade do concreto, perfazendo os efeitos às propriedades mecânicas. Neste tópico também consta a revisão do estado da arte do efeito combinado da adição de SAP com nano partículas de sílica (NS).

2.1 OS CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA E DE ALTO DESEMPENHO

Na década de 80, o surgimento dos concretos de alta resistência (CAR) foi possível devido ao advento dos chamados aditivos superplastificante (SP). Os SP foram empregados com a finalidade de diminuir a relação água/cimento (a/c) para algo em torno de 0,40, e pode-se verificar que além de melhorar a trabalhabilidade do material, os concretos apresentaram outras características melhoradas, tais como a capacidade de fluxo, resistência à flexão, módulo de elasticidade, permeabilidade, resistência à abrasão e maior durabilidade. Tendo isso em vista, a expressão "concreto de alta resistência" já não descrevia adequadamente todas as melhorias nas propriedades desta nova família de concretos, surgindo, então, a denominação de "concreto de alto desempenho" (CAD). Em 1990, Mehta e Aïtcin realizam a primeira citação do CAD e estabeleceram os princípios gerais que regem esse tipo especial de concreto e as principais características que o diferenciam do, até então, denominado CAR. No entanto, a aceitação desta expressão ainda não é geral, pela dificuldade e complexidade de se definir e quantificar o que é o alto desempenho de um material (AITCIN, 1998).

Dentro desse viés, em 1991, o *American Concrete Institute* (ACI) caracterizou o CAD como sendo um material que possui uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade, que não podem ser atingidas facilmente no dia a dia com componentes usuais e práticas convencionais de mistura, lançamento e cura.

Em relação ao grau de resistência que define o que é um concreto de alto desempenho, há diferentes definições, que dependem do local, do autor e da época. Os autores Mehta e

Monteiro definem concretos com resistência a compressão maior que 40 MPa como sendo de alto desempenho (METHA e MONTEIRO, 2014). Como comentado no capítulo 1, o ACI mudou sua caracterização de CAD para abranger os concretos que ultrapassassem a resistência de 55 MPa; e, no Brasil, considera-se como CAR valores entre 55 a 100 MPa.

Os termos CAD e CAR são, por muitas vezes, utilizados como sinônimos na literatura técnica, e nessa pesquisa, tais termos serão usados dessa forma, sem divergência de significado.

Também existem algumas classificações que levam em conta a relação água/cimento, por exemplo, para Aitcin, concretos de alto desempenho são aqueles que apresentem uma relação água/cimento menor que 0,4 (AITCIN, 1998; WYRZYKOWSKI et al., 2018).

No Brasil, a primeira obra a utilizar CAR foi o edifício sede do MASP (Museu de Arte de São Paulo), que pode ser visualizado na Figura 2-1. Essa obra, projeto arquitetônico de Lina Bo Bardi e inaugurada em novembro de 1968, alcançou um recorde para a sua época, contando 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 (© GOOGLE, 2018).

Em Brasília, a primeira obra realizada com o CAD é o edifício do Superior Tribunal de Justiça (STJ), projetado pelo arquiteto Oscar Niemeyer e inaugurado em 1995. Contendo mais de 133 mil metros quadrados de área construída, dois subsolos e 6 edificações, o complexo possui uma grande quantidade de concreto armado e protendido, sendo que o CAD foi utilizado em alguns pontos estratégicos no Prédio dos Plenários (SILVA, 1996). Foram lançados cerca de 5000 m³ de CAD com f_{ck} , aos 28 dias, em torno de 70-90 MPa nos pilares em tronco-pirâmide e em algumas vigas da fachada principal. O traço foi dosado segundo o método ACI, com adição de sílica ativa importada da Noruega, aditivo químico superplastificante de base melamina e relação a/c em torno de 0,30, com consumo de cimento de 515 kg/m³.



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 (© GOOGLE, 2018); (b) Vista frontal do Edifício dos Plenários, com seu vão central com 67m de comprimento. (© GOOGLE, 2018).

Produzir os concretos supracitados, usando baixas relações água/cimento, com adequada trabalhabilidade, com o uso das superpozolanas, como a sílica ativa e o metacaulim, e elevados consumos de cimento é uma tarefa complexa que exige um grande controle dos materiais e da confecção. Isso ocorre porque com o aumento da resistência à compressão, as propriedades do concreto não são mais determinadas exclusivamente pela relação água/cimento, parâmetro importante para concretos usuais em virtude da análise da porosidade da pasta de cimento hidratado.

Nos concretos comuns, o volume de água adicionado na mistura, faz com que haja uma maior porosidade na zona de transição e essa zona irá representar o elo mais fraco da estrutura, onde o colapso mecânico começa a se desenvolver quando a estrutura é submetida a uma carga de compressão. Já no CAD, como a resistência dos hidratos da pasta de cimento aumenta, devido a uma melhoria promovida na microestrutura com o aumento do teor de finos, entre outras coisas, 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.

Assim, a dificuldade que se apresenta inerente aos CAD é que devido ao alto consumo de cimento, à baixa relação a/c e às adições minerais altamente reativas promove o refinamento dos poros devido à maior presença de produtos de hidratação. Tal refinamento do tamanho dos poros, densifica a microestrutura, aumenta a demanda de água e potencializa a autodessecação, o que resulta em maiores níveis de retração autógena e de fissuração nestes concretos (LOPES, 2011). As variações volumétricas podem trazer consequências danosas, tais como danos estruturais, estéticos e comprometer a durabilidade do material.

Outro desafio que se impõe à cadeia construtiva, em relação aos CAD, é torná-los uma opção viável economicamente para obras do cotidiano, fazendo com que o desenvolvimento que se obteve desses materiais em laboratório atravesse a barreira do mercado, tornando-se, assim, uma opção viável para as construções.

2.2 A RETRAÇÃO AUTÓGENA

Retração autógena é a redução macroscópica de volume observada nos sistemas cimentícios após atingido o patamar de percolação (transição suspensão-sólido),

provocada pelo mecanismo da autodessecação, gerando tensões capilares nos poros de água, fenômeno físico-químico dominante para seu aparecimento (SILVA, 2007).

Em concretos convencionais, a retração autógena é irrelevante ao se comparar com a deformação desencadeada pela retração por secagem. Entretanto, nos CAR, a baixa relação água/aglomerante e as adições minerais causam uma queda considerável da umidade relativa interna (UR) do microconcreto durante a hidratação, tornando a retração autógena (RA) altamente expressiva nesses tipos de concreto.

Os mecanismos que conduzem à retração autógena ainda não são plenamente esclarecidos pela comunidade científica, embora se aceite que há uma relação direta entre a RA e a variação da umidade relativa interna nos poros da pasta.

De acordo com Silva (2007), à medida que o material seca, ocorre primeiramente a criação de meniscos dentro dos capilares, seguida de uma diminuição progressiva do raio de curvatura desses meniscos, 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 se acentua à medida que a secagem se intensifica. Essa depressão do líquido deve ser globalmente equilibrada por uma retração do sólido. A intensidade da depressão capilar aumenta à medida que a hidratação avança. Primeiro porque a autodessecação progride dentro do material, atingindo os poros cada vez mais esbeltos, evidenciado por uma redução na umidade relativa interna. Segundo porque, paralelamente ao fenômeno de saída de água dos poros, a porosidade do material se refina, pela formação de hidratos.

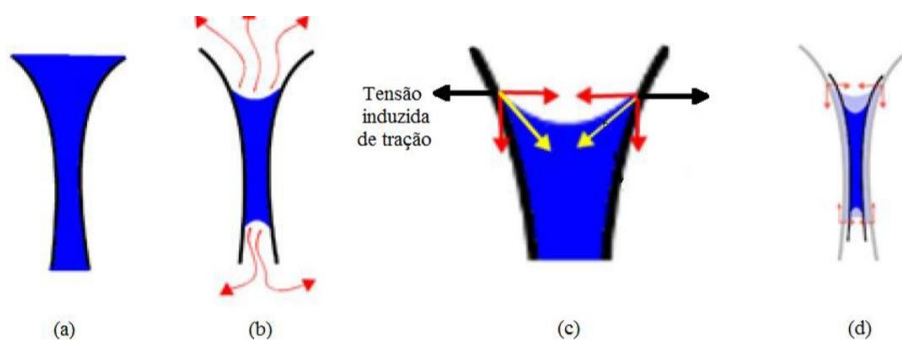


Figura 2- 3: Representação do fenômeno da retração autógena no tubo capilar. (a) capilar completamente saturado com umidade relativa interna (UR) igual a 100 %; (b) capilar parcialmente saturado, mostrando a saída de água para a reação de hidratação e UR < 100%; (c) no detalhe: a região ar-água dentro do capilar e a representação das componentes da tensão superficial e consequente tensão induzida de tração; (d) representação da componente horizontal de tensão superficial, que faz encolher o poro, e da componente vertical, que faz encurtar o poro (SILVA et al, 2011).

Isto posto, a retração autógena é mais proeminente nas primeiras idades, quando as tensões induzidas de tração não são devidamente suportadas por concretos com idades baixas, justamente pois estes ainda não adquiriram resistência suficiente para resistir aos esforços de tração induzidos (PEREIRA E MATOS, 2011).

Entende-se, portanto, que a retração autógena ocorre pelo desenvolvimento de uma rede porosa e fina, que gera tensão capilar mais elevado, ou seja, resulta no surgimento de tensões de tração no microconcreto, que pode desencadear o aparecimento de micro ou microfissuras, uma vez que as estruturas têm uma ou mais forma de restrição, prejudicando a qualidade do concreto e conseqüentemente a durabilidade da estrutura.

Assim sendo, Wyrzykowski et al. (2018) define a RA como a redução dimensional macroscópica (volumétrica ou linear) do sistema cimentício após o início da pega, onde a redução ocorre sob condições isotérmicas seladas e sem restrições.

Procedimentos de cura convencionais, como a cura úmida, tal como utilizado para mitigar a retração por secagem, não são eficazes no caso de retração autógena. A cura úmida é eficiente apenas em pequenas seções transversais, pois a entrada de água a partir da superfície externa é limitada. Diversas estratégias têm sido desenvolvidas nos últimos anos, todavia o mecanismo da cura interna é o que vem sendo mais investigado, o qual utiliza materiais porosos e/ou absorventes de forma a criar pequenos reservatórios internos.

A utilização de agregados leves e mais recentemente o uso de polímeros com grande capacidade de absorção de água mostram-se eficientes mecanismos de cura interna, uma vez que são 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 visa compensar a autodessecação e ajuda a evitar a retração autógena.

O uso do SAP 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 e até mesmo eliminar a retração autógena.

2.3 O POLÍMERO SUPERABSORVENTE

Os polímeros superabsorventes (SAP) são um dos materiais mais interessantes que vem sendo empregado nas últimas décadas na tecnologia do concreto. Desenvolvidos no início

dos anos 80, o primeiro uso desses materiais foi na produção de fraldas descartáveis (JENSEN e HANSEN, 2001; FRIEDRICH, 2012; ASSMANN, 2013). A indústria de fraldas descartáveis é, até os dias atuais, a maior consumidora de tais polímeros, porém, o SAP já apresenta outras aplicações como na: recuperação de solos; atenuação do impacto da seca; incrementação em solos aráveis, proporcionando melhores condições de germinação; combate a incêndios e na tecnologia do concreto (TRALDI e AGUIRRE, 2013).

Em publicação derivada do grupo de trabalho RILEM TC 260-RSC, Wyrzykowski et al. (2018) define os SAP como “polieletrólitos reticulados que incham em contato com água ou soluções aquosas, resultando assim na formação de um hidrogel. Estes polímeros são capazes de absorver até 1500 g de água por grama de SAP em meio aquoso. Na prática de engenharia, o SAP é baseado principalmente em ácido poliacrílico reticulado”.

Os polímeros superabsorventes pertencem ao grupo de materiais poliméricos de elevada capacidade de absorver e reter uma grande quantidade de líquido sem se dissolver, apresentando capacidade de absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso num meio aquoso. Porém, em soluções com sais diluídos, a capacidade de absorção é reduzida para algo entre 50 a 100 gramas de solução para cada grama de polímero (JENSEN e HANSEN, 2001; ASSMAN, 2013).

Os SAP podem ser encontrados em dois estados: seco (também chamado de colapsado) e inchado (JENSEN e HANSEN, 2001). Na Figura 2-4 é demonstrada a capacidade de absorção de um polímero superabsorvente, enquanto na Figura 2-5 é mostrada a transição do estado seco para o estado inchado do polímero.

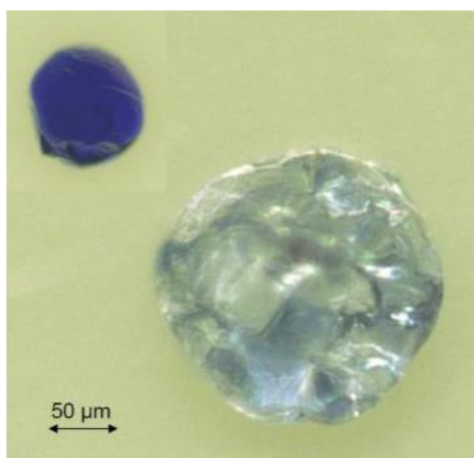


Figura 2- 4: Imagem de uma partícula esférica colorida de SAP com tinta azul no estado seco e saturada com água (ASSMANN, 2013).

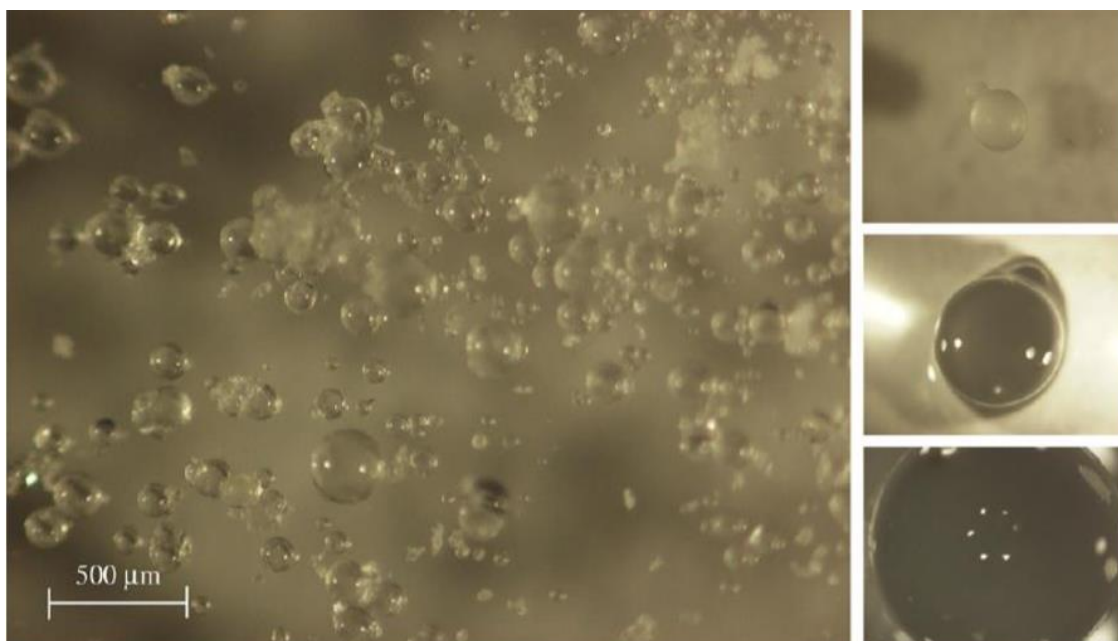


Figura 2- 5: Polímero superabsorvente no estado seco, com partículas variando de 0 a 300 μ m. A coluna à direita mostra a transição do estado seco para inchado, caracterizado por uma mudança rápida de sólido para gel. A morfologia em ambos estados é de partículas esféricas (ESTEVEES, 2011 apud MANZANO,2016)

Vários mecanismos estão envolvidos no processo de absorção do SAP e é fundamental conhecer a cinética da migração de água no interior e no exterior das partículas dos polímeros superabsorventes, para melhor compreender o uso desse material como agente de cura interna.

Os SAP se mostram mais adequados como agente de cura interna do que os agregados leves, uma vez que são adicionados na forma seca durante a mistura e seu uso permite adequá-lo da melhor maneira possível às características do concreto (JENSEN, 2001)

2.3.1 Mecanismo de Absorção e Dessorção

Segundo Jensen (2011), a propriedade fundamental do SAP é a sua capacidade de absorver grandes quantidades de substâncias do ambiente e retê-las dentro de sua estrutura. A cura interna com o uso de SAP ocorre de maneira efetiva devido à rápida absorção de água pelo polímero que depois a libera de forma gradual, com a redução da umidade interna do concreto.

No momento em que a estrutura do polímero encontra a água, há um processo de difusão das moléculas da água para o interior do polímero e, conseqüentemente, o preenchimento dos seus espaços vazios e o seu inchamento.

Um dos processos responsáveis pelo inchamento descrito acima é a pressão osmótica, a qual faz com que a água disponível no meio mais diluído se dirija para dentro da rede polimérica, sendo o ambiente mais concentrado.

Além da pressão osmótica, outros processos influenciam no inchamento e no transporte da água para o interior do polímero, são eles: a interação eletrostática, a entropia, a ação capilar e a interação de Coulomb (MÖNNING, 2009).

Para entender melhor esses processos, é importante compreender a cinética de transição da água para dentro e para fora do polímero. Quando um polímero de ligação cruzada (um dos mais utilizados na engenharia, juntamente com os copolimerizados) é colocado em contato com um meio aquoso, as unidades iônicas dissociam-se e formam uma densidade de carga ao longo das cadeias e induzem repulsões eletrostáticas que expandem o polímero e, conseqüentemente, induzem ao seu inchamento.

Além disso, a solvatação de grupos hidrófilos, que estão presentes ao longo da rede polimérica, é outro fator que contribui para o inchamento do SAP, juntamente com a dimensão dos grãos do polímero e com a salinidade da solução aquosa, pois se a concentração de íons fora do polímero for maior, a pressão osmótica será menor, acarretando uma redução no inchamento (JENSEN e HANSEN, 2001).

Como comentado anteriormente, o SAP se manifesta em duas diferentes fases: colapsado e saturado. O que caracteriza a passagem de fase é um balanço competitivo entre as forças repulsivas, aquelas que tendem a expandir a cadeia polimérica e as forças atrativas, que atuam contrariamente àquela. A matriz macromolecular de um polímero superabsorvente é um polieletrólito, um polímero com grupos ionizáveis que sofrem dissociação em solução.

Portanto, a absorção de polímeros superabsorventes (SAP) e a cinética do processo são diferentes dependendo da composição e classificação de SAP, bem como das propriedades do líquido sorvido (SNOECK et al, 2018). Segundo os autores, quando o polímero atinge seu tamanho final, ele forma inclusões estáveis cheias de água. Esta água é subsequentemente aspirada para o interior dos poros capilares menores e consumida pela hidratação do cimento.

Em relação à dessorção, o movimento de água do SAP para um meio cimentício também depende das propriedades do polímero, da cinética das reações de hidratação, da microestrutura da pasta de cimento e da interface entre o meio e o polímero. Neste caso, haverá um fluxo oposto ao explicado anteriormente, ou seja, de dentro da rede polimérica para o meio cimentício, o qual o polímero estará introduzido. Este meio encontra-se menos saturado que o interior do SAP, devido ao consumo de água pelas reações de hidratação, conforme esquematizado na Figura 2-6.

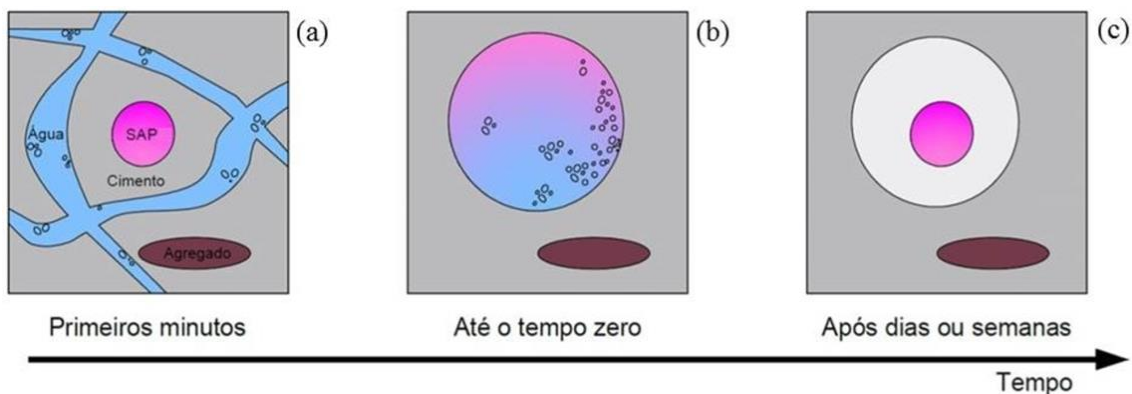


Figura 2- 6: Representação esquemática da evolução da hidratação (inchamento) do SAP em meio cimentício em função do tempo: (a) Primeiros 5 minutos – dispersão homogênea de partículas de cimento, água, polímero e agregado; (b) de 5 a 10 minutos – o SAP alcança sua absorção final; (c) Após 7 dias – a água é liberada para a matriz cimentícia, causando redução do volume do SAP, permanecendo em seu lugar um poro praticamente vazio ((MANZANO, 2016) Adaptado, (MÖNNIG, 2009)).

Em resumo, o processo de dessorção do polímero pode ser descrito como uma competição pela água entre o SAP e a pasta de cimento (MONNIG, 2009); quando a umidade relativa (UR) do SAP é maior do que a UR da pasta, a água migra do SAP para o material cimentício (AGOSTINHO, 2019).

A quantidade de água absorvida pelo SAP depende de suas próprias propriedades e do ambiente ao qual está exposto. A forma geométrica do polímero também irá influenciar a taxa de intercâmbio de água com o ambiente, enquanto a composição química influencia tanto a taxa de intercâmbio de água como a capacidade de absorção. Os parâmetros no ambiente de exposição que influenciam a absorção de água são: temperatura, pressão e composição iônica específica do líquido em exposição (JENSEN e LURA, 2006).

A granulometria das partículas também influencia na capacidade de absorção. Segundo Jensen e Hansen (2001) existe uma dimensão ótima do tamanho da partícula do polímero que é de cerca de 100µm. Dessa forma, partículas muito finas podem apresentar menor

absorção por conta da menor superfície ativa e as partículas muito grandes podem ter uma redução na eficiência pelo fato de o tempo ser insuficiente para a absorção da mistura.

Diante do exposto, a capacidade de absorção é a propriedade mais importante para a utilização de SAP em materiais cimentícios, sobretudo quando utilizados para mitigar a retração autógena em concretos de alta resistência. A capacidade de absorção do SAP em meio cimentício é fundamental para determinar a quantidade de polímero seco necessária para a incorporação da água calculada para evitar a autodessecação.

Assim sendo, é importante que as mostras de SAP sejam pré-testadas em relação à sua absorvidade, bem como a sua cinética de absorção e de desorção antes da implementação em concreto ou argamassa (SCHRFL, 2017).

2.3.2 Água de Cura Interna

Wyrzykowski et al. (2018) define água de cura interna como a água proveniente da incorporação de um agente de cura no concreto ainda fresco, servindo como um reservatório de água interno, que libera gradualmente esta água à proporção que ocorre o desenvolvimento da hidratação do concreto.

Segundo Jensen e Lura (2006), a cura interna tem como finalidade neutralizar os efeitos adversos da perda de água para o meio externo, garantindo a água suficiente para o desenvolvimento adequado das reações de hidratação.

A cura interna com SAP é recomendada em concretos que experimentam alta autodessecação e retração autógena, onde, se não forem adequadamente controladas, podem levar ao acúmulo de tensões sob condições restritas e, posteriormente, a fissuração. A retração autógena é especialmente proeminente em concretos com baixas relação água-cimento (a/c abaixo de 0,4), em particular em concretos de alto desempenho (CAD) ou em concretos de ultra-alto desempenho (WYRZYKOWSKI et al., 2018).

De acordo com Reinhardt et al. (2012), a cura interna é outro conceito de cura de concreto, que é diferente da cura aplicada externamente. No caso o polímero SAP é inserido seco durante a mistura, agindo como agente de cura interna. Agente de cura interna pode ser definido como o material que armazena água no concreto e libera-a ao longo do tempo, a fim de evitar a autodessecação no material cimentício. Assim sendo, a autodessecação é

mitigada pela movimentação da água de reserva interna para o espaço dos poros, criado pelo fato do volume dos hidratados ser menor que o volume dos reagentes. Desta forma, a formação de meniscos ar-água é minimizada e a queda de UR é reduzida ou até mesmo evitada.

Em geral, a forma como a água está presa aos sólidos está baseada em diversos princípios físicos ou químicos. Jensen e Lura (2006) propõem uma classificação para os agentes de cura interna baseada no modo como a água está armazenada. Isto posto, para o SAP, trata-se de água absorvida baseada em ligações químicas secundárias (fracamente segurada), e toda a sua água armazenada pode ser, essencialmente, considerada como água livre, útil para as reações de hidratação do composto cimentício.

Manzano (2016), estudou os efeitos combinados do SAP e da água de cura interna, no desenvolvimento das propriedades reológicas individuais ao longo do tempo. O autor compara a retração autógena da mistura contendo 0,3% de SAP com duas misturas de referência: uma com relação a/c igual a 0,30 e outra com relação a/c de 0,35. Nos resultados obtidos, o pesquisador observou que as retrações autógenas para ambas as misturas de referência foram muito próximas, em todas as idades, e notadamente superior à obtida para o microconcreto contendo SAP.

Assim sendo, a relação a/c, ao negligenciar a água armazenada no SAP, é denominada relação a/c básica (a/c_b). A relação água cimento incorporada (a/c_{inc}) refere-se à água de cura interna do SAP. Portanto, a a/c total seria o somatório da relação água/cimento básica com a relação água cimento incorporada.

Segundo Hasholt e Jensen (2015), a água de cura interna participa do processo de hidratação, aumentando o grau de hidratação da pasta. Logo, as reações de hidratação são controladas pela relação a/c total e não pela relação a/c básica inicial da pasta de cimento.

Os autores Hasholt e Jensen (2015); Farzarian et al. (2015); Ma et al. (2017); Kang, Hong e Moon (2018); Agostinho (2019) concluíram que a comparação sobre a eficácia do SAP deve basear-se na mesma relação a/c total. Ou seja, tais autores ressaltaram que para se obter uma comparação consistente entre as misturas não deve ser adicionada água extra de cura interna.

Ou seja, quando o polímero é utilizado como agente de cura interna para mitigar a retração autógena, a quantidade de água absorvida pelo SAP precisa ser considerada na relação a/c total das misturas.

O fato de o SAP se comportar como um agregado miúdo como afirma Monnig (2009) em meios cimentícios no estado fresco é importante para determinar a quantidade de líquido absorvida até o equilíbrio, visando fornecer a essas misturas, a quantidade exata de água de cura interna (a/c_{inc}), para não ocorrer a retirada de água de mistura para o inchamento do polímero (o que prejudicaria a trabalhabilidade), ou deixar mais água livre na mistura que o previsto (o que aumentaria a relação a/c) (AGOSTINHO, 2019).

Embora várias pesquisas estejam sendo desenvolvidas, ainda existem lacunas sobre os efeitos a longo prazo causados por esses polímeros na durabilidade dos materiais cimentícios de alta resistência.

2.3.3 Efeito do Polímero Superabsorvente nas Propriedades Reológicas, Mecânicas e na Retração Autógena de Materiais Cimentícios

A aplicação de polímeros superabsorventes no concreto tem a finalidade de reduzir e até mesmo eliminar a retração autógena e a autodessecação. As propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, tais como resistência à compressão e tração, trabalhabilidade e módulos de deformação devem ser consideradas ao se realizar o estudo do uso de polímeros superabsorventes no concreto, avaliando sua influência em tais propriedades. Justamente para se avaliar a efetividade da adição do polímero em um CAR.

O procedimento para utilizar o SAP na composição de microconcretos é baseado em encontrar um equilíbrio entre a mitigação da retração autógena e possíveis efeitos negativos nas propriedades do concreto (por exemplo, propriedades mecânicas, trabalhabilidade). Uma diretriz teórica é fornecida com base na compensação do volume de encolhimento químico com água de cura interna a ser absorvida pelo SAP e com base na capacidade de absorção do SAP (WYRZYKOWSKI et al., 2018)

Conforme Toledo et. al. (2012), as propriedades reológicas do concreto fresco contendo SAP podem mudar drasticamente, devido à propriedade específica dos polímeros superabsorvente que lhes permite absorver várias vezes seu próprio peso em líquidos, formando um gel.

Segundo YE et. al. (2012) a microestrutura do concreto com SAP é diferente, se comparado com a do concreto de resistência normal ou concreto de alta resistência.

Isto posto, para explicar as alterações desencadeadas na microestrutura do concreto contendo SAP, apresentam-se a seguir três possíveis explicações, conforme exposto na dissertação de mestrado de SUAREZ (2015):

“(I) não uniformidade da dispersão do SAP durante a mistura; ou seja, quando o SAP está completamente cheio de água, ele atua como um agregado leve e quando está vazio, ele atua como um vazio de ar no concreto;

(II) a absorção de água do SAP muda a relação água/cimento efetiva nas primeiras etapas da hidratação e a liberação de água do SAP afeta a hidratação adicional do cimento;

(III) a interface entre o SAP e a matriz da pasta de cimento pode introduzir poros adicionais.” (SUAREZ, 2015, p.32)

Ou seja, o efeito do SAP na estrutura de poros não é só na porosidade total, mas na distribuição do tamanho de poros. As partículas de SAP introduzem vazios aumentando a porosidade total do concreto; há uma redução da porosidade capilar na matriz, já que os vazios introduzidos pelo SAP estão distribuídos homogeneamente na mistura (YE et. al., 2012).

Santos (2016) e Manzano (2016) observaram em suas pesquisas que as misturas contendo apenas SAP houveram perda de trabalhabilidade, com diminuição do espalhamento, ocasionando uma demanda maior de aditivo superplastificante para manter a trabalhabilidade, porém tais autores adicionaram água extra, não utilizando a comparação com o a/c total.

Suárez (2015), Manzano (2016) e Santos (2016) verificaram ligeira redução no ensaio de penetração de cone, nas misturas contendo SAP em relação à de referência; fato este que está diretamente relacionado com a perda de trabalhabilidade, verificada pela diminuição do espalhamento.

Ademais, a adição de polímero superabsorvente tem grande influência no teor de ar incorporado do microconcreto. Diversos autores, entre eles Mechtcherine et al. (2013),

Suaréz (2015), Manzano (2016), Santos (2016), verificaram um aumento expressivo do teor de ar incorporado em misturas contendo SAP, em relação às respectivas misturas de referência. Esse incremento pode ser justificável pela maior presença de bolha de ar, deixadas na matriz durante o processo de liberação da água de cura pelo SAP. O aumento do teor de ar incorporado pode afetar o desenvolvimento das propriedades mecânica.

A retração autógena tem tendência a ocorrer normalmente nas primeiras horas, momento em que importantes reações de hidratação ainda estão ocorrendo e que a matriz cimentícia ainda não adquiriu resistência suficiente para se opor às deformações impostas. Assim sendo, o tempo zero (T_0) 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.

Ordoñez (2013); Manzano (2016); Moraes e Cerqueira (2014); Suárez (2015) observaram que a presença do SAP retardou a pega em relação à mistura de referência, promovendo um aumento do tempo zero. Entretanto, conforme os mesmos autores, o aumento do T_0 também foi acompanhado de um aumento no teor de aditivo superplastificante utilizado. Tais autores realizaram a comparação com o a/c básico, uma vez que adicionaram água extra nas misturas contendo SAP.

Não obstante, a finalidade de se adicionar o SAP é a redução da retração autógena. Esta característica mitigadora da retração autógena foi verificada por um grande número de pesquisadores, dentre os quais cita-se Jensen e Hansen (2002); Mönning (2009); Pereira e Matos (2011); Assmann (2013); Mechtcherine (2013); Silva et al. (2014); Suárez (2015); Manzano (2016); Santos (2016); Schrofl (2017).

Mechtcherine (2013) 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 dados dos autores revelam a eficiência de todos os tipos de SAP estudados em mitigar e até mesmo eliminar a retração autógena nos microconcretos.

Grande parte da água absorvida pelo polímero é liberada nas primeiras idades, fazendo com que haja um efeito muito pronunciado e positivo sobre a retração autógena, reduzindo-a (MANZANO, 2016).

Em relação às propriedades mecânicas, no estado da arte, de modo geral, a maior parte das publicações relatam que há uma queda na resistência à compressão de pastas, argamassas e concretos quando se faz uso do SAP. Dudziak e Mechtcherine (2010); Silva et al. (2014); Santos (2016); Schrofl (2017) indicam que a presença desse polímero na mistura prejudica a resistência uma vez que há a liberação de água (dessorção) deixando espaços livres no cimento, mudando a microestrutura da pasta de cimento e aumentando a porosidade.

De acordo com os estudos realizados, a resistência à compressão dos microconcretos de referência sempre foi maior, nas diversas idades, comparadas com as misturas com adição de SAP. Os teores mais elevados de SAP provocaram maior redução na resistência à compressão. Destaca-se, todavia, que as comparações foram feitas utilizando mesmo a/c básico.

Todavia, alguns autores (LURA et al., 2006; KOVLER e JENSEN, 2007; KUMAR e MARUTHACHALAM, 2013) demonstraram que seu uso não foi prejudicial ou até mesmo foi benéfico em relação à resistência à compressão dos materiais.

Manzano (2016) estudou a influência da relação a/c nas propriedades mecânicas de microconcretos contendo SAP, comparando-os com duas relações a/c total distintas: 0,30 e 0,35. A adição de 0,3% de SAP, 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 2-1. Nota-se que os valores de resistência do traço SAP03 são bem próximos da mistura de referência com relação a/c = 0,35. A diferença entre o traço SAP03 e a referência 0,35 é de apenas 8% (contra 30% de diferença entre o SAP03 e a referência 0,30), indicando que a perda de resistência pode não ser devido à adição de SAP, mas sim pelo incremento causado na relação a/c devido ao acréscimo da água de cura interna.

Tabela 2- 1: Comparação da resistência à compressão em cilindros do traço SAP03 com duas relações a/c diferentes.

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
SAP03	62,3	70,1
% traço SAP03 em relação à REF a/c =0,35	97%	92%

Fonte: (MANZANO, 2016).

Mechtcherine et al. (2013), ao estudar diferentes SAP, avaliou que a adição de no teor de 0,3% causa uma redução na resistência à compressão em cilindros. Os resultados obtidos pelos autores são mostrados na Tabela 2-2. A adição de ambos os tipos de SAP causa uma redução de aproximadamente 10% quando comparados com a mistura de referência com a/c básico igual a 0,30, sem considerar a água extra de cura interna do SAP aos 7 dias. No entanto, esta redução cai para a metade (5%) quando se compara com a mistura de referência considerando a água de cura interna na relação a/c total.

Tabela 2- 2: Resultados de resistência à compressão em cilindros.

Mistura	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
REF1 a/c = 0,30	73	102
REF2 a/c = 0,36	70	93
SAP1 0,3%	66	82
SAP2 0,3%	67	80

Fonte: (MECHTCHERINE, SCHROEFL e GEORGES, 2013).

Como comentado no tópico anterior, não há ainda um consenso entres os pesquisadores se a água adicional introduzida na mistura (água de cura interna) participa ou não do processo de hidratação. Alguns pesquisadores, justificam que as propriedades mecânicas são “mais” prejudicadas justamente porque a comparação com o traço de referência não é feita com a correta relação a/c, penalizando, desse modo, o SAP.

Isto posto, reitera-se que a comparação correta deve ser realizada com uma mistura de referência com a mesma relação a/c total da mistura contendo polímero superabsorvente (SANTOS, 2016).

Estudos realizados por Mechtcherine et al. (2013), Ordoñez (2013), Traldi et al. (2014), Santos (2016) observaram uma redução da resistência à tração na flexão após a adição de polímero superabsorvente. Essa diminuição, segundo os autores é devida ao aumento da porosidade nas misturas nas quais o SAP está presente. Entretanto, a comparação foi feita para misturas com mesmo a/c básico.

Já em relação ao módulo de deformação, segundo Kong et al. (2014) e Manzano (2016), há uma redução diretamente proporcional no seu valor com o incremento de polímero superabsorvente.

Santos(2016), em sua dissertação, conclui que uma adição de 0,3% de SAP leva a uma redução da retração autógena, causando perda de resistência mecânica de até 30%, quando comparado com uma referência com mesma a/c básico. Ou seja, a autora adicionou uma água adicional na mistura contendo SAP, aumentando a relação a/c total e penalizando a análise da influência do SAP.

Kovler e Jensen (2007) colocam que, nas idades precoces, a maioria dos trabalhos relata uma redução no módulo de elasticidade e demais propriedade mecânicas dos materiais contendo SAP.

Em geral, a resistência do concreto com SAP 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. Todavia, algumas publicações demonstram maiores resistências em idades avançadas para misturas contendo SAP, em relação às misturas de referência. Como se vê, em geral, não há um consenso na literatura sobre o efeito do SAP nas propriedades mecânicas.

Diante do exposto, nessa pesquisa foi adotado o teor de 0,3% de SAP, em relação à massa de cimento, tal teor foi estabelecido com base nos trabalhos de Pereira e Matos (2011); Mechtcherine et al. (2013); Ordóñez (2013); Moraes e Cerqueira (2014); Traldi e Aguirre (2013); Borges e Aidar (2016); Manzano (2016); Santos (2016); Agostinho (2017); Silva Jr (2017).

2.4 NANO PARTÍCULAS DE SÍLICA – NANOSSÍLICA

Nos últimos anos, é observada uma tendência, cada vez mais proeminente, na utilização de adições minerais em nano escala incorporadas ao material cimentício.

A nanossílica (NS) consiste em partículas esféricas amorfas em escala entre 1 e 100 nm compostas por dióxido de silício (SiO_2) e que apresentam estrutura não porosa.

Este material é capaz de causar influências químicas e físicas nos concretos em que ele é incorporado. O efeito químico está relacionado com a reação pozolânica, que consiste na capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, gerado durante as reações de hidratação do cimento, para a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Já os efeitos físicos se dão no aumento da densidade do concreto ocasionado pela redução da porosidade

devido ao refinamento de poros pelo preenchimento dos vazios pela nanopartículas. Estes dois efeitos juntos são capazes de propiciar uma melhora expressiva nas características do concreto, como aumento de desempenho tanto mecânico como de durabilidade (DAL MOLIN, 2005; SILVA JR, 2017). Na Figura 2-7 é mostrada uma representação esquemática da influência da nanossílica nas características de concretos e argamassas.

As partículas de micro ou nano partículas de sílica são utilizadas em adição ou substituição parcial do cimento. Tal adição aos materiais cimentícios promove uma alteração das propriedades do material no estado fresco e endurecido quando comparado aos concretos convencionais produzidos apenas com cimento comum. As mudanças nas propriedades físicas e químicas do material podem ser justificadas pela sua participação no processo global da hidratação e desenvolvimento da microestrutura (SANTOS, 2016).

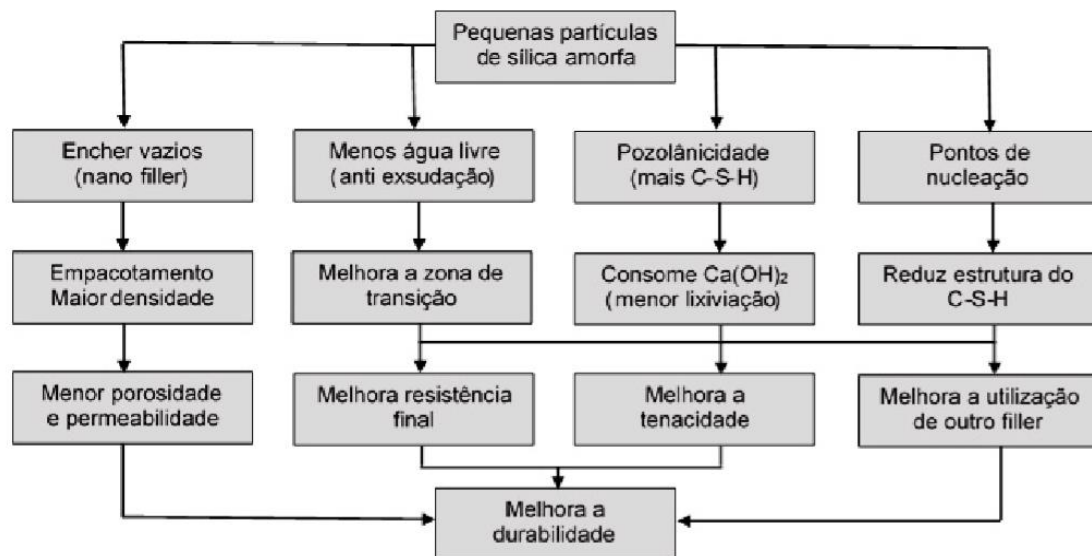


Figura 2- 7: Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas (QUERCIA, 2014 apud SILVA JR, 2017)

Segundo Morais (2012), a vantagem do uso de nano partículas é que o empacotamento das partículas é melhorado com o uso de nanossílica, o que promove 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.

De acordo com Senff et al. (2009b), as nano partículas possuem uma grande área superficial e elevada reatividade, quando comparadas com partículas com a mesma

composição química e de tamanho maior. Estas características são as responsáveis pela alteração de propriedades no estado fresco e endurecido, em comparação com as adições convencionais.

Conforme Aitcin (1998), a adição de NS atua de duas formas distintas: uma química e uma física. A ação física corresponde à atuação do material como fíler: 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. Já a ação química é explicada pela alta reatividade das partículas de NS, promovendo as chamadas reações pozolânicas. Assim sendo, as partículas de nanossílica reagem rapidamente com o hidróxido de cálcio 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.

2.4.1 Efeito da Nanossílica nas Propriedades de Materiais Cimentícios

Alguns pesquisadores (POURJAVADI et al., 2012; SANTOS, 2016) estão estudando o uso combinado do polímero superabsorvente com nano partículas de sílica como solução para compensar os prejuízos às propriedades mecânicas desencadeadas pelo uso do SAP.

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. 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. Silva Jr (2017) notou um aumento de até 26% na resistência mecânica das misturas contendo nanossílica, em comparação com a referência, e que mesmo em pequenas quantidades, (até 2%) a adição de NS aumenta a resistência à compressão em 10% e a resistência à flexão em 25%.

Entretanto, é importante destacar que os resultados contendo NS 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.

Pourjavadi et al. (2012), utilizaram a NS para melhorar as propriedades mecânicas de pastas contendo SAP, utilizando três teores de NS e, em cada um deles, variando os teores de SAP. Os autores verificaram que mesmo pequenas adições de NS podem compensar o efeito negativo do SAP na resistência à compressão.

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).

Santos (2016) estudou nove traços para analisar o efeito combinado da adição da NS e do SAP nas propriedades mecânicas e principalmente no tempo zero da mistura. Para tanto, justamente para analisar quais seriam os teores ideais ao fazer o uso combinado dos dois materiais, a autora desenvolveu quatro traços: 1% de NS e 0,2% de SAP; 1% de NS e 0,3% de SAP; 2% de NS e 0,2% de SAP; 2% de NS e 0,3% de SAP. Para analisar o efeito no estado fresco a autora analisa os seguintes aspectos: espalhamento, penetração de cone, teor de ar aprisionado, densidade, tempo zero, retração autógena; e, no estado endurecido: resistência à compressão em cilindros, resistência à compressão em cubos, resistência à tração na flexão em prismas, módulo de elasticidade. Assim, SANTOS (2016) observou, nas quatro misturas contendo adição simultânea de SAP e NS, os seguintes aspectos:

- perda de trabalhabilidade, ocasionando redução no espalhamento, sendo necessário tempo adicional de mistura para atingir o espalhamento;

- o teor de ar das misturas foi elevado, porém, os efeitos não foram somados, uma vez que o valor obtido para as misturas híbridas fora muito próximo dos valores obtidos para os traços contendo apenas adição de NS;
- 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 SAP;
- a redução proporcionada pela nanossílica com SAP no tempo zero é da mesma ordem de grandeza que os efeitos da NS pura sobre o traço de referência;
- a efetividade do SAP em reduzir a retração autógena não é prejudicada pela adição de NS, sendo até aumentada;
- a adição de NS causou um incremento na resistência mecânica, no entanto este aumento não foi suficiente para compensar toda a perda causada pelo SAP;
- o efeito da NS na resistência à compressão em cubos foi similar aos resultados obtidos por ensaio análogo em cilindros, demonstrando que a adição de NS é capaz de compensar quase na sua totalidade, a perda causada pela adição do polímero;
- já 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 SAP, atingindo valores superiores aos obtidos para misturas de referências, nas referidas idades;
- o valor do módulo de elasticidade foi superior ao valor obtido para a referência; este aumento foi mais pronunciado nas misturas com 0,2% de SAP.

Dessa forma, sintetiza-se que, de acordo com Santos (2016), a adição NS nos microconcretos contendo SAP não prejudicou a efetividade do polímero em reduzir a retração autógena e, ainda assim, promoveu ganhos de resistência quando comparadas com as misturas contendo apenas SAP. Assim, tal combinação se faz extremamente promissora, pois a retração autógena ainda é menor que a encontrada para um traço convencional, sem SAP ou NS.

A autora ainda conclui que o teor de 2% não é justificado quando utilizado em conjunto com o SAP, pois este não melhora expressivamente as propriedades mecânicas além da melhoria promovida pelo teor de 1%. Ademais, ao analisar os traços híbridos contendo 1% de nanossílica, àquele com teor de 0,3% de SAP se mostrou o mais eficiente (promovendo uma redução de 78% da retração autógena obtida para o traço de referência) ao também resultados satisfatórios em relação às propriedades mecânicas. O melhor resultado de ganho de resistência em corpos de prova cilíndricos ocorreu nas misturas contendo 0,3% de SAP e 1% de NS. Nesta mistura, a resistência à compressão foi reduzida em 16% em relação à mistura de referência, sendo que, na mistura contendo o mesmo teor do polímero, sem adição de NS, a porcentagem de redução da resistência foi o dobro, 30%. Ou seja, a adição de 1% de nanossílica foi capaz de recuperar metade da resistência mecânica perdida aos 28 dias.

Tal conclusão que o teor de 1% de NS é o mais indicado, é reiterada por Pourjavadi et al. (2012) que verificou pequenas adições (0,5 e 1% de NS) foram suficientes para compensar a perda de resistência causada pelo SAP utilizado.

Borges e Aidar (2016) estudaram traços contendo 1% e 2% de NS com 0,3% de SAP, entre outros. O traço com 1% de NS e 0,3% de SAP apresentou uma redução do tempo zero de 21% em relação ao traço de referência; e o traço com 2% de NS e 0,3% de SAP, uma redução do tempo zero de 35% em relação ao traço de referência. Portanto, eles observaram que com o aumento do teor de NS há uma redução do tempo zero, mantendo-se fixo o teor de SAP. Os efeitos dessas adições são ainda intensificados com o aumento de seus teores, ocorrendo então a superposição dos efeitos. Essa análise é reiterada pelos resultados obtidos por Santos (2016), onde a adição combinada de SAP e NS apresentou uma redução no tempo zero na ordem de 45%.

Diante do exposto, nessa pesquisa é utilizado o teor de 1% de NS, essa dosagem foi escolhida com bases nos trabalhos de Pourjavadi et al. (2012); Borges e Aidar (2016); Santos (2016); Silva Jr (2017).

2.5 DURABILIDADE

A ASTM E632-82 (1996) conceitua “durabilidade” como sendo a capacidade de um produto, componente, montagem ou construção manter-se em serviço ou em utilização,

ou de desempenhar as funções para as quais foi projetado durante um determinado período de tempo.

De forma análoga, o CIB W80/RILEM 71 – PSL (1987) refere-se ao conceito de “durabilidade” como “a capacidade que um produto, componente ou construção possui de manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender às necessidades dos usuários, em cada situação específica”.

A ABNT NBR 6118:2014, para as estruturas de concreto, define o conceito de “durabilidade” como: “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. Isto posto, entende-se por estrutura durável aquela que resiste com segurança às solicitações externas na sua combinação mais desfavorável, porém com desempenho de serviço acima do mínimo. Assim sendo, a ABNT NBR 6118:2014 estabelece um desempenho mínimo que deve ser seguido, representado a partir do conceito de Estado Limite de Serviço (ELS), como a especificação de limites de aberturas de fissuras, de deformações excessivas, entre outros.

Para se avaliar a questão da durabilidade, é necessário entender e considerar os mecanismos de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto, que de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 são elencados como: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado; além dos mecanismos preponderantes de deterioração relativos à depassivação de armadura, por ação de cloretos ou da carbonatação.

A durabilidade de uma determinada estrutura de concreto está intimamente ligada à permeabilidade da camada superficial, que deve limitar a entrada de substâncias que podem iniciar ou propagar possíveis ações deletérias tais como CO₂, cloreto, sulfato, água, oxigênio, álcalis e ácidos. Na prática, a durabilidade depende da seleção do material, da composição do concreto, bem como do controle durante a concretagem, compactação, acabamento e cura.

Em especial, a penetração do dióxido de carbono (CO₂) já citada a partir da parte externa para a interna do concreto é um processo físico-químico que progride lentamente no interior da estrutura e que acarreta o processo de carbonatação. A entrada dessa substância depende, basicamente, do processo físico que é governado pela estrutura da rede de poros (geometria, distribuição, interconectividade e tortuosidade) que controla a difusão do

CO₂. O principal efeito da carbonatação é a redução da alcalinidade do concreto que pode alterar as condições de estabilidade química da película passivante da armadura podendo iniciar seu processo corrosivo quando na presença de umidade (TAYLOR, 1997; NUNES, 2014).

Uma estrutura possui uma boa durabilidade quando consegue manter seu desempenho pelo tempo de vida útil projetado, sob a ação de fatores de degradação. É importante salientar que não existem materiais indefinidamente duráveis, visto que com as interações com o meio ambiente, as propriedades dos constituintes e a microestrutura se modificam com o passar do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Existem diversos fatores que influenciam na durabilidade de uma estrutura, o concreto é um deles, podendo-se destacar ainda a espessura do revestimento da armadura, a qualidade de execução das peças e a deformabilidade da estrutura. A durabilidade é dependente de quatro fatores: composição ou traço, compactação ou adensamento efetivo na estrutura, cura efetiva do concreto armado e revestimento ou espessura de revestimento das armaduras (HELENE, 1993). É conhecido que a definição mais adequada de durabilidade exige não só a avaliação desses fatores, mas a definição de parâmetros básicos como a agressividade do meio, características construtivas, critérios de desempenho e a vida útil desejada para a estrutura.

A principal causa de danos nas estruturas de concreto é devido a corrosão das armaduras, que pode ser provocada pela penetração de íons cloreto e/ou a carbonatação e é definida como a degradação de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo estar associada ou não a esforços mecânicos. Uma consequência da corrosão é a perda de massa, com a diminuição da seção da armadura e o surgimento de fissuras na direção paralela a esta. Os produtos da corrosão são uma série de óxidos e hidróxidos de ferro que ocupam volumes 3 a 10 vezes maiores que o aço original, provocando tensões internas que aumentam com o avanço do processo corrosivo e consequentemente fissuração do concreto (HELENE, 1993).

Algo que se busca no meio acadêmico é chegar a um conhecimento mais profundo acerca das consequências da adição dos SAP na durabilidade dos concretos de alta resistência. Existem autores que defendem a hipótese de que a introdução de polímeros

superabsorventes no concreto pode melhorar e outros que defendem que essa introdução pode prejudicar a durabilidade desse aglomerante hidráulico.

De acordo com Manzano (2016) percebe-se que em CAR contendo SAP há um aumento nos valores de absorção por imersão que pode estar associado com o aumento da porosidade devido ao desinchamento do SAP e ao aumento no teor de ar aprisionado. Tais fatos podem vir a prejudicar a durabilidade dos concretos.

Já de acordo com alguns outros autores (REINHARDT e ASSMANN, 2012; JENSEN, 2015) os polímeros superabsorventes quando introduzidos nos concretos possuem a capacidade de diminuir a permeabilidade, a penetração de íons cloretos e a carbonatação. Isso ocorre devido ao aumento do grau de hidratação do cimento gerando uma rede de poros mais tortuosa e desconectada, dificultando a intrusões de agentes que possam vir a prejudicar a armadura ou a pasta de cimento. Diante desses pontos, os polímeros superabsorventes poderiam ajudar os concretos em relação a durabilidade.

De acordo com o comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012), a adição de SAP influencia a durabilidade do concreto em vários aspectos. Apesar da resistência à compressão ser reduzida devido a adição desse polímero, a permeabilidade a água e ao oxigênio permaneceram as mesmas ou foram melhoradas. Devido a geração de poros preenchidos com ar pelo polímero superabsorvente, a resistência ao congelamento com sais de degelo é consideravelmente superior ao do concreto de referência sem o polímero. E, finalmente, a migração de cloreto pode ser reduzida dependendo do tipo de SAP que está sendo utilizado.

Ainda de acordo com o comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012), a permeabilidade a água e ao oxigênio está diretamente ligada ao tamanho das partículas de SAP que são utilizadas, sendo que quanto maior essa partícula, chegando a um determinado limite, menor será a permeabilidade dessas duas substâncias no concreto. Já os ensaios de migração de cloreto mostraram uma grande diferença no desempenho de misturas contendo SAP e dessa forma não foi possível chegar a uma conclusão, mas pode-se perceber que há uma correlação entre o raio médio dos poros e o coeficiente de migração de cloretos.

Na publicação de Jensen (2015), o autor ainda argumenta, que independente se o SAP é adicionado com ou sem água extra, a relação espaço-gel (hidratado) pode ser usada como um parâmetro-chave para vincular as proporções de idade e mistura (relação água-

cimento e dosagem de SAP) ao coeficiente de migração de cloretos resultante, uma forma de se avaliar a durabilidade do material. O autor expõe, que quanto maior o volume de gel sólido em relação ao espaço disponível para isso, menor o coeficiente de migração de cloro, porque o sistema de poros se torna mais tortuoso e a porosidade se torna menor.

Ademais, essa pesquisa visa também entender as consequências da adição da nanossílica na durabilidade e na resistência do concreto de alta resistência. Apesar de haver uma grande tendência do meio acadêmico de acreditar, por meio de inúmeros trabalhos que a nanossílica aumenta a resistência da compressão do concreto, ainda existem poucos estudos acerca dos resultados dessa adição tendo em vista a análise da durabilidade.

Fallah e Nematzadeh (2017) concluíram que adicionar nanossílica em CAR promove uma melhoria nas propriedades mecânicas e na durabilidade. Nas duas amostras feitas pelos pesquisadores, uma com adição de 2% nanossílica em relação a massa de cimento, houve um aumento na resistência a compressão do concreto em 14%, comprovando o exposto acima. Ademais, o uso de 1% de NS diminuiu em 14,4% a absorção de água e em 10% a porosidade; enquanto, o teor de 3% de NS reduz em 18% a capacidade de absorção de água e em 14,2% a porosidade.

Enfim, a partir da revisão da literatura, pode-se perceber a importância de se estudar o concreto de alta resistência e suas peculiaridades para suprir o grande crescimento da indústria da construção e a utilização crescente do concreto em obras cada vez mais arrojadas. Percebe-se, diante do supracitado, que é necessária uma maior quantidade de pesquisas para avaliar o efeito da adição do SAP e da NS na durabilidade de CAR.

3. METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo descrever o programa experimental, apresentando os materiais utilizados na produção dos microconcretos, bem como as propriedades no estado fresco e endurecido, que foram determinadas experimentalmente, e os métodos de ensaios empregados.

Assim, para atender aos objetivos desta pesquisa, foi implementado programa experimental em microconcretos de alta resistência, visando investigar o efeito da adição do polímero superabsorvente nas propriedades mecânicas e na durabilidade.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (LEM/UnB) e no Instituto Senai de Tecnologia (IST).

Foram estudados três microconcretos: 035 REF; 035 SAP03; 035 SAP03-NS1. Na Figura 3-1, mostra-se esquematicamente os traços desenvolvidos no programa experimental deste estudo; enquanto na Figura 3-2 são mostrados os ensaios realizados para a avaliação das propriedades mecânicas e da durabilidade.

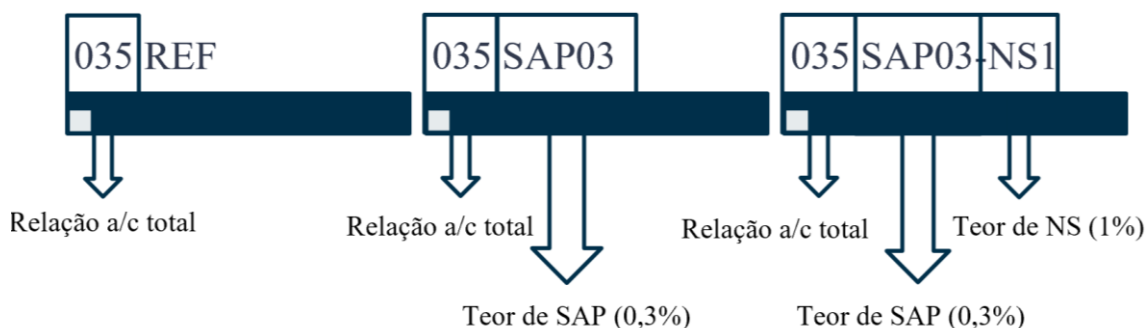


Figura 3- 1: Esquema dos traços sugeridos para estudos, contendo a relação a/c básico e a/c total de cada traço e os respectivos teores de SAP e NS.

É premissa da pesquisa manter o espalhamento fixo de (215 ± 20) mm, determinado conforme norma ABNT NBR 13276:2005, sem aplicação de golpes na mesa, e deixar variável o teor de superplastificante, a fim de se obter o espalhamento especificado.

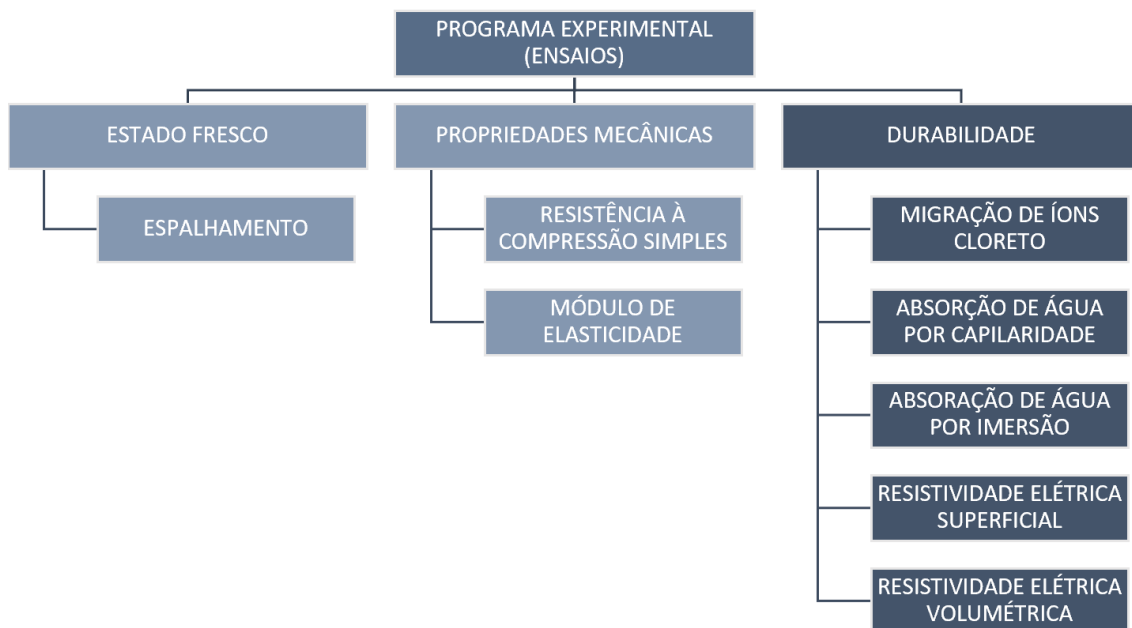


Figura 3- 2: Esquema do programa experimental desenvolvido na pesquisa em microconcretos.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1.1 Variáveis de Controle e Variáveis de Resposta

As variáveis independentes ou de controle são aquelas que podem vir a influenciar determinadas características e propriedades das misturas do estudo. As variáveis independentes dessa pesquisa são:

- Relação de água/cimento;
- Teor do polímero superabsorvente;
- Teor de adição mineral da nanossílica.

As variáveis dependentes ou de resposta são aquelas características ou propriedades relacionadas ao comportamento dos microconcretos e que podem ser determinadas experimentalmente. Essas variáveis são influenciadas pelas variáveis independentes.

As variáveis dependentes estão citadas a seguir:

- Espalhamento pelo tronco de cone;
- Resistência à compressão em cilindros;
- Módulo de elasticidade;
- Migração de íons cloretos no estado não estacionário;

- Absorção de água por capilaridade;
- Absorção de água por imersão;
- Resistividade elétrica superficial;
- Resistividade elétrica volumétrica.

Tabela 3- 1: Matriz experimental da pesquisa realizada em microconcretos.

TRAÇO	VARIÁVEIS DE CONTROLE			VARIÁVEIS DE RESPOSTA							
	a/c _{total}	Teor de SAP	Teor de NS	Propriedades Mecânicas			Durabilidade				
				Esaplhamento (Tronco de Cone)	Resistência à Compressão Simples	Módulo de Elasticidade	Migração de Íons Cloreto	Absorção de Água por Imersão	Absorção de água por Capilaridade	Resistividade Elétrica Superficial	Resistividade Elétrica Volumétrica
035 REF	0,35	0%	0%	ESTADO FRESCO	1, 7, 28 e 70 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 e 70 dias	28 e 70 dias
035 SAP03	0,35	0,30%	0%								
035 SAP03-NS1	0,35	0,30%	1%								

3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

A seleção de materiais foi realizada de acordo com a disponibilidade da região (exceto o SAP que não é comercializado no Brasil) e dos fornecedores. Os materiais foram obtidos por doações e utilizados na forma como fornecidos pelos fabricantes, ou seja, sem beneficiamento ou alteração das suas características iniciais.

3.2.1 Cimento Portland (CP V-ARI)

Nesta pesquisa, utilizou-se o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V – ARI, proveniente do mesmo lote de fabricação, como aglomerante hidráulico. O cimento CP V – ARI foi o escolhido por ter elevada empregabilidade em concretos de alta resistência e foi doado pela empresa CIPLAN.

Os ensaios de caracterização física e mecânica – ensaio de determinação da massa específica e resistência à compressão – foram realizados no LEM/UnB, os dados podem ser encontrados na Tabela 3-2.

Tabela 3- 2: Caracterização física e mecânica do cimento CPV - ARI RS selecionado.

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites NBR	Referência Normativa	
Massa específica	g/cm ³	3	-	NBR NM 23:2001	
Resistência à Compressão	1 dia	MPa	19,4	≥ 14,0	NBR 7215:1996
	3 dias	MPa	26,1	≥ 24,0	NBR 7215:1996
	7 dias	MPa	32,3	≥ 34,0	NBR 7215:1996

Como os respectivos resultados, observa-se que o material não atendeu aos requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras, uma vez que não atendeu à resistência mínima para 7 dias.

3.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado nessa pesquisa é do tipo areia de rio natural e lavada, proveniente do depósito aluvial do Rio Corumbá, na região de Pires do Rio - Goiás, aproximadamente 220 Km de Brasília, doado pela empresa *Lemos Areia e Cascalho*.

A escolha deste agregado miúdo foi realizada, uma vez que demais pesquisadores desta linha de pesquisa, como Santos (2016), Borges e Aidar (2016) utilizaram areia de mesma procedência, mesmo lote.

Assim sendo, previamente, já foi realizada por Santos (2016), no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB), o ensaio da composição granulométrica. Os resultados obtidos pela autora podem ser verificados na Figura 3-3. A autora supracitada obteve resultados para módulo de finura, absorção, dimensão máxima do agregado e massa específica na condição SSS (saturada superfície seca).

Na Figura 3-3 é mostrado que a distribuição granulométrica da amostra selecionada está dentro dos limites da zona utilizável da norma ABNT NBR 7211:2011.

Destaca-se, que durante a confecção dos microconcretos, antes da pesagem do material, os autores deste trabalho utilizaram o método do Frasco de Chapman, ABNT NBR 9775:2001, para determinar a umidade superficial da areia, conforme mostrado. Tal

medida visa corrigir os quantitativos de areia e de água, uma vez que foi usada areia na condição úmida – e a premissa da dosagem é que a areia esteja na condição SSS.

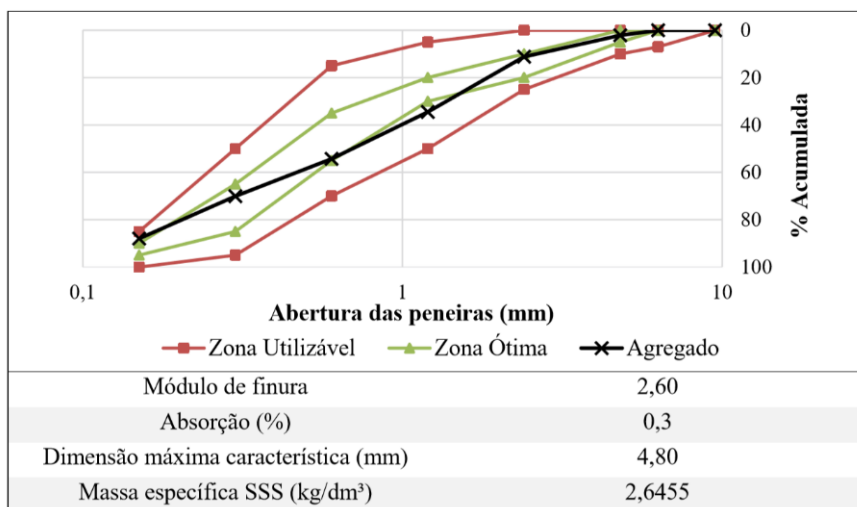


Figura 3- 3: Curva Granulométrica e demais propriedades do agregado miúdo selecionado (SANTOS, 2016).

3.2.3 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada nos microconcretos desse estudo 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 adição de 10% em relação à massa do cimento, conforme recomendação do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012).

A sílica ativa utilizada neste trabalho é proveniente da empresa DOW CHEMICAL®, considerada uma microssílica amorfa (não-cristalina), baseada em uma cadeia de polímeros de dióxido de silício (SiO₂). Na Tabela 3-3 são mostradas as propriedades físicas e químicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3- 3: Características físicas e químicas da sílica ativa fornecidas pelo fabricante.

Característica	Resultado
Estado físico	Sólido – Pó amorfo
Cor	Branca, cinza ou preta
Odor	Isento
Massa Específica (g/cm ³)	2,2 – 2,3
Ponto de Fusão/Congelamento	≥ 1500 °C (a 101,3 kPa)
Inflamabilidade	Não combustível
Propriedades Explosivas	Sem perigo de explosão
Dimensão das partículas	0,1 – 1,0 μm
Tamanho médio das partículas	0,15 μm

3.2.4 Superplastificante

Foi usado o aditivo químico GLENIUM® 51, do tipo redutor de água de grande eficiência (superplastificante tipo II – SPII-N; conforme a classificação da ABNT NBR 11768:2011). Tal aditivo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução água, tornando o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega.

Na Tabela 3-4 são apresentadas as características físico-químicas do aditivo empregado na pesquisa, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3- 4: Características físicas e químicas do superplastificante fornecidas pelo fabricante.

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

Destaca-se que foi descontada da água de amassamento, a água encontrada no SP.

3.2.5 Polímero Superabsorvente

O polímero superabsorvente utilizado no trabalho foi fornecido pelo Professor Ole Mejlhede Jensen e desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU), e é fornecido como um pó seco e branco, com partículas esféricas. 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 teor, de 0,3% de SAP, foi estabelecido baseado em pesquisas de projeto final, mestrados e doutorados realizadas anteriormente no ENC/UnB com o mesmo polímero. Esse teor de SAP foi suficiente para a mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência, não justificando um teor mais elevado, conforme exposto por Manzano (2016), Santos (2016), Borges e Aidar (2016).

O valor da absorção do SAP em meio cimentício é a propriedade de maior interesse relacionada ao SAP, pois é fundamental para o cálculo correto da quantidade de água de cura interna que será liberada para diminuir a retração autógena.

Nesta linha de pesquisa, a absorção do SAP foi determinada pelo 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 SAP, e compara 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 SAP. Para melhor entendimento sobre o ensaio de capacidade de absorção de água pelo SAP, consultar MANZANO (2016).

O objetivo deste ensaio é determinar a quantidade de água necessária para que a curva da mistura sem polímero coincida com a da mistura com polímero, situação na qual a água absorvida pelo SAP não mais contribui para o espalhamento. REIS (2018), pesquisador integrante dessa linha de pesquisa, realizou o ensaio no lote de SAP mais recente e encontrou valor de absorção do polímero de 18 g/g. Esclarece-se que o SAP utilizado nessa pesquisa é proveniente deste último lote recebido pelo grupo de pesquisa.

3.2.6 Nanossílica

A nanossílica utilizada na pesquisa é a Cembinder® 30, da fabricante AkzoNobel and Eka Chemicals S.A. O material foi escolhido devido às suas características físicas e químicas, e considerando a existência prévia de fornecedor no Brasil.

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.

O teor de NS utilizado nesta pesquisa é de 1% – em adição – em relação à massa do cimento, considerando o teor de sólidos de 30%. O teor de 1% foi determinado com base nos resultados obtidos por Pourjavadi et al. (2012), Santos (2016), Borges e Aidar (2016).

Na Tabela 3-5 são mostradas as principais características da NS fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3- 5: Características físicas e químicas da NS a ser utilizada na pesquisa.

Característica	Resultado
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 de NaO ₂ (%)	0,55

Fonte: (AKZONOBEL, 2013; SANTOS, 2016).

Destaca-se que os pesquisadores Santos (2016), Borges e Aida(2016), utilizaram os mesmos materiais constituintes que serão utilizados nesta pesquisa; e, tais autores chegaram à conclusão que o teor de 1% de NS é o que apresenta melhor comportamento, ao se analisar retração autógena e propriedades mecânicas, quando combinado com o teor de 0,3% de SAP, sem prejuízo expressivo nas propriedades reológicas (AGOSTINHO, 2017).

A nanossílica constitui uma solução aquosa de sílica coloidal com teor de sólidos de 30%, logo foi descontada da água de amassamento, a água contida na solução aquosa de NS.

3.2.7 Água

A água utilizada é a obtida pelo sistema de abastecimento público, fornecida pela CAESB. Reitera-se que deve ser descontada da água de amassamento, a água contida no SAP e na NS.

3.3 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

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. Todavia, as misturas que possuem água de cura interna apresentam relação a/c básica igual a 0,30 e relação água incorporada/cimento (a/c_{inc}) igual a 0,054, considerando valor de absorção do SAP igual a 18 g/g. Ao fazer o somatório

da relação a/c básica com a/c_{inc} se obtém valor igual a 0,354. Por isso, foi utilizado a/c total de 0,35, em ambos os traços. O detalhamento da composição dos traços se encontra na Tabela 3-6.

Tabela 3- 6: Composição dos Microconcretos.

TRAÇO	Materiais Secos (kg/m ³)				Nanossílica				Água				SP		Ar
	Cimento	Sílica Ativa	Areia	SAP	Teor Total (%)	Peso Total (kg/m ³)	Teor Puro (%)	Peso Puro (kg/m ³)	Água (valor medido)	Água de Cura Interna do SAP	Água contida na NS	Água contida no SP	Teor (%)	Peso (kg/m ³)	Teor (%)
035 REF	700	70	1265	0	0	0	0	0	240,59	0	0	4,41	0,9	6,3	0,85
035 SAP03	700	70	1265	2,1	0	0	0	0	234,22	31,5	0	10,78	2,2	15,4	0,85
035 SAP03-NS1	70	70	1265	2,1	3,3	23,4	1	7	216,35	31,5	16,4	12,25	2,5	17,5	0,85

Nos traços contendo NS, a porcentagem de solução aquosa de sílica coloidal adicionada é, respectivamente 3,34 para se obter adição de 1% nanossílica.

3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS MICROCONCRETOS

O roteiro de mistura para a produção dos microconcretos foi baseado nas recomendações discernidas pelo Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012) para realização dos ensaios. Na Tabela 3-7 é apresentada a sequência de colocação dos materiais na betoneira e os tempos de mistura.

Tabela 3- 7: Roteiro de Mistura dos Microconcretos.

Tempo (min)	Ação	Duração
-4:00 – 0:00	Homogeneização dos componentes secos (inclusive o SPA)	4 min
0:00 – 1:00	Adição de água (incluindo o SP pré-dissolvido)	1 min
1:00 – 4:00	Mistura inicial	3 min
4:00 – 5:00	Raspagem dos materiais presos nas paredes/pás do misturador	1 min
5:00 – 8:00	Mistura final	3 min

É importante salientar que, para a mistura dos microconcretos, deverá ser feita, previamente, a mistura dos materiais líquidos, ou seja, a água é misturada ao aditivo superplastificante e a nanossílica, de forma manual. O SAP deve ser pré-misturado junto com os materiais secos. A contagem do tempo é feita a partir da adição da água aos materiais secos. A Figura 3-4 mostra algumas etapas do procedimento de fabricação.

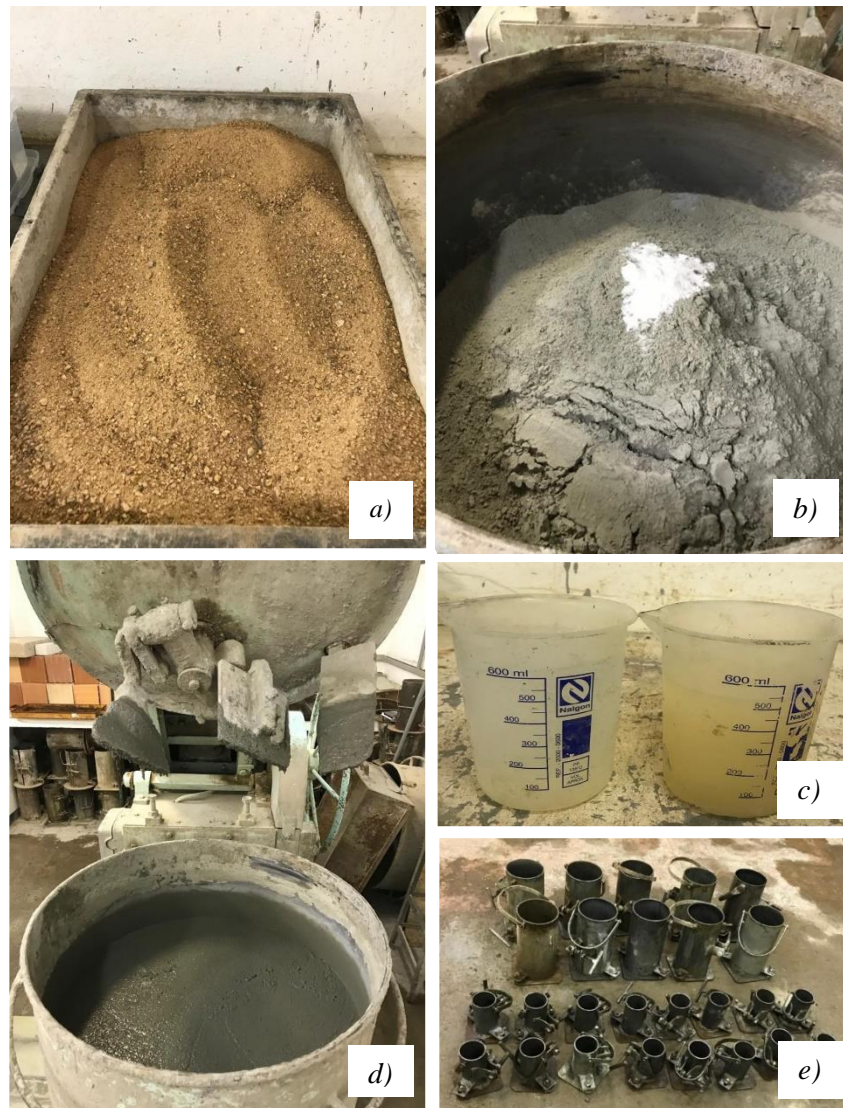


Figura 3- 4: Pesagem dos materiais secos, (a) areia, (b) cimento e SAP. (c) Pesagem dos materiais líquidos (água, SP e nanossílica). (d) Homogeneização dos materiais na betoneira. (e) Fôrmas previamente condicionadas com desmoldante.

3.5 ENSAIOS

3.5.1 Ensaio de Espalhamento

Foi adotado 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.

Feito isso, retira-se o molde lentamente e, então, o microconcreto fica livre para fluir, ou seja, se espalhar sobre a base, e que esse espalhamento é medido com o auxílio de um paquímetro em duas direções ortogonais, conforme mostrado na Figura 3-5.



Figura 3- 5: Medida do espalhamento com o auxílio do paquímetro.

3.5.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para a avaliação da resistência à compressão, foram moldados corpos de provas cilíndricos com as dimensões de 50 x 100 mm, sendo feita a regularização do topo de cada um dos corpos de prova por meio da utilização da retífica. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 5739:2018, e os corpos de prova foram ensaiados nas idades de 1, 7, 28 e 70 dias. A cura dos corpos de provas foi feita em câmara úmida até as idades determinadas para o ensaio.

3.5.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade

Os corpos de provas moldados para a determinação do módulo de elasticidade seguiram a ABNT NBR 5738:2015 para definição das dimensões e curas. O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 8522:2017.

Foram utilizados corpos de provas com dimensões de 100 x 200 mm. Inicialmente, foi determinada a tensão de ruptura (F_c) de dois corpos de prova e estabelecida uma tensão limite superior igual a 30% de F_c e um limite inferior de 0,5 MPa. Em seguida, outros três corpos de provas foram submetidos a quatro ciclos de carregamento e descarregamento a uma velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Cada etapa de carregamento e descarregamento

durou 60 segundos, ou seja, foi aplicado o carregamento e mantido a força por 60 segundos antes de aplicar o descarregamento e sempre registrar as deformações lidas com o auxílio de um extensômetros, posicionados nas duas geratrizes opostas.

O ensaio foi realizado no Instituto Senai de Tecnologias (IST), no laboratório de Construção Civil, localizado em Taguatinga-DF. Na Figura 3-6 é possível observar a prensa utilizada em tal ensaio.



Figura 3- 6: Prensa utilizada para a realização do ensaio de Módulo de Elasticidade.

3.5.4 Ensaio de Migração de Íons Cloreto

O ensaio de migração de cloreto no estado não estacionário, proposto por TANG e NILSSON (1992), permite a obtenção de um parâmetro importante para a análise da durabilidade dos concretos e os mecanismos de transporte, que é o coeficiente de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário. A metodologia de ensaio utilizada nesta pesquisa está de acordo com a NT BUILD 492:2011 - *Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*.

Para a realização do ensaio, foram moldados dois corpos de provas por traço de dimensões de 100 x 200 mm. Cada corpo de prova foi cortado em quatro partes iguais de 100 x 50 mm após os 28 dias de cura, as duas partes centrais foram aproveitadas no ensaio e as extremidades foram descartadas. Foi feita a limpeza das amostras com escova de cerdas plásticas em água corrente para a retirada de sujeiras e pós, logo após esse procedimento iniciou-se o processo de pré-condicionamento. Quando as amostras estavam secas, elas foram colocadas em um recipiente à vácuo – dessecador – com as duas faces expostas à uma pressão na faixa de 1 a 5 KPa, como pode ser observado na Figura 3-7.

O vácuo foi mantido por 3 horas e após isso, o ambiente que continha as amostras foi preenchido com uma solução de Ca(OH)_2 (dissolvendo excesso de hidróxido de cálcio em água destilada) até imergir todas as amostras. Realizado isso, o vácuo foi mantido no recipiente por mais 18 ± 2 horas a fim de garantir a saturação pela solução dos poros do microconcreto.

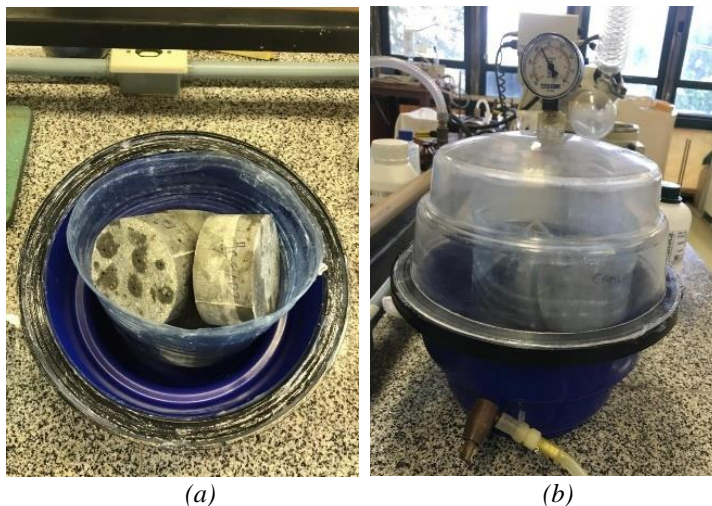


Figura 3- 7: a) Amostras posicionadas no dessecador; b) Dessecador utilizado no pré-condicionamento das amostras.

Para o prosseguimento do ensaio, posicionou-se a amostra na base de um aparato previsto pela norma e em seguida foi vedada a parte inferior e superior da amostra em contato com este aparato, com selante de silicone, para que não ocorresse vazamento pelas bordas da amostra e conseqüentemente o contato entre as duas soluções.

Após essa vedação, foram posicionadas duas placas de aço inox nas extremidades da amostra para aplicar a diferença de potencial exigida para a execução deste ensaio. A placa superior foi perfurada para permitir o contato da solução com o microconcreto, e a placa inferior possuía suportes de plástico capazes de garantir um espaço suficiente para que a solução catódica ficasse em contato com o microconcreto. Depois disso, o aparato foi posicionado em um suporte com inclinação de 30° e levado a um recipiente plástico. Na Figura 3-8 está apresentado o conjunto aparato/amostra posicionado sobre o suporte com inclinação de 30° .

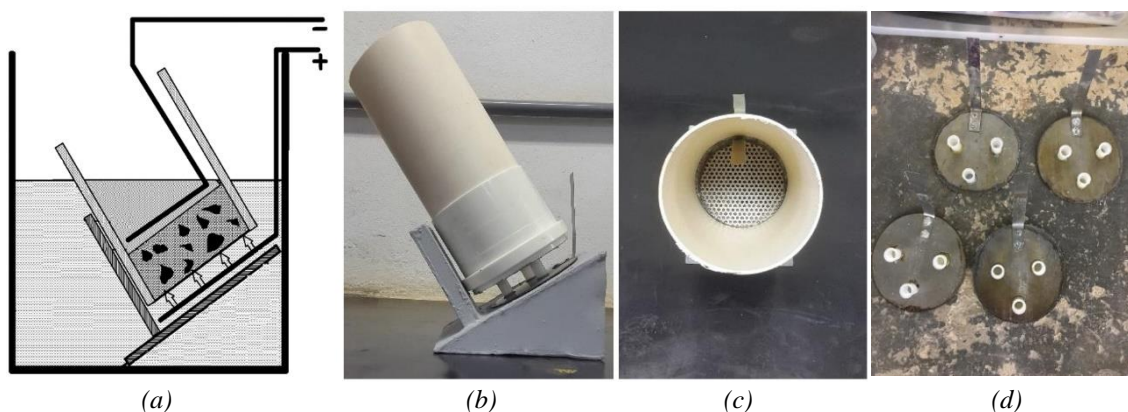


Figura 3- 8: a) Desenho esquemático do aparato de ensaio de migração de cloretos sugerido pela NT BUILD 492:2011; b) Vista lateral do aparato de ensaio de migração; c) Vista superior do aparato de ensaio de migração; (d) Placa inferior utilizadas para posicionar o aparato de ensaio.

Os recipientes de plásticos continham solução catódica de 10% de cloreto de sódio em massa de água, ou seja, 100g de NaCl para cada 900g de água. Cada aparato foi preenchido com uma solução anódica de hidróxido de sódio em água destilada (1,2g de NaOH para cada 100g de água).

A partir disso, todos os aparatos foram conectados em paralelo e inicialmente a tensão foi ajustada para 30 V. Posteriormente, o valor da corrente inicial foi medido por um multímetro. Em função do valor da corrente inicial de cada amostra, o valor da tensão pode sofrer alteração, de acordo com a Tabela 3-8.

Tabela 3- 8: Tensões e correntes de referência para o ensaio de migração de cloretos.

Corrente inicial I_{30V} (com 30V) (mA)	Tensão Aplicada U (depois do ajuste) (V)	Provável nova corrente inicial (mA)	Duração do ensaio (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: (NT BUILD 492:2011)

Assim sendo, após um eventual ajuste de tensão, é necessário que seja anotado a nova corrente e medida a temperatura da solução anódica. Ao final, é preciso anotar novamente a corrente elétrica e a temperatura da solução. A Figura 3-9 mostra o ensaio de migração de íons cloreto em andamento.



Figura 3- 9: Ensaio de Migração de íons cloreto em andamento.

Enfim, já no final do ensaio as amostras foram rompidas à tração por compressão diametral para que assim, fosse possível aspergir uma solução 0,1 molar de nitrato de prata (AgNO_3) na superfície fraturada do corpo de prova rompido. A reação química entre o nitrato de prata e o cloreto impregnado no concreto resulta no sal cloreto de prata (AgCl). A partir desse sal, que torna a superfície da amostra esbranquiçada, foi possível medir, pelo contraste visual da superfície, a penetração dos cloretos.

A norma específica que devem ser feitas sete leituras, espaçadas em 10 mm cada, da frente de penetração dos cloretos. A Figura 3-10 mostra o procedimento indicado para a realização da medição da frente de penetração de cloretos e a Figura 3-11 mostra como as medidas foram de fato realizadas.

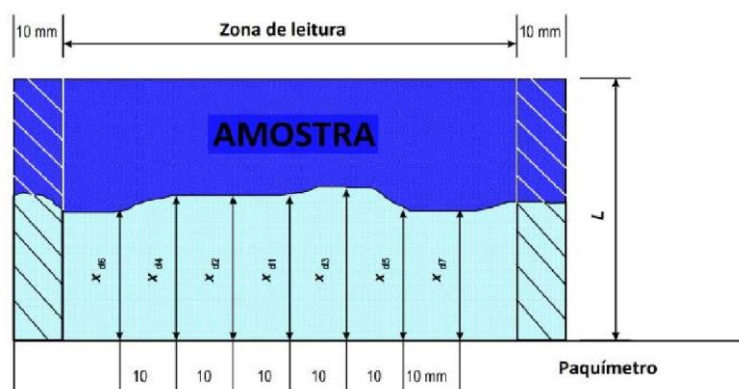


Figura 3- 10: Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de NT BUILD 492:2011).

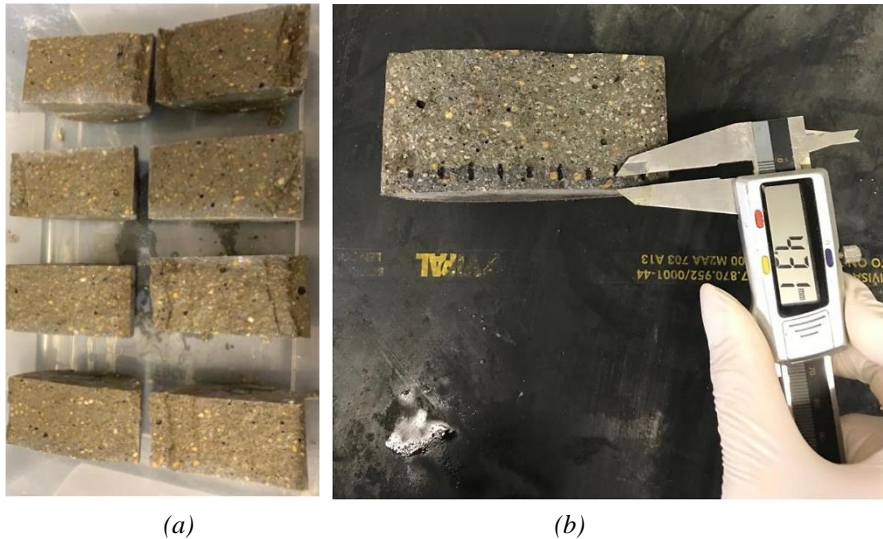


Figura 3- 11: (a) Amostras recém aspergidas com solução de nitrato de prata. (b) Realização da medida da frente de penetração em uma amostra.

Finalizando as leituras supracitadas, é possível calcular o coeficiente de difusão/migração de cloreto, no regime não estacionário por meio da Equação 1.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239*(273+T)*L}{(U-2)*t} * (X_d - 0,0238 * \sqrt{\frac{(273+T)*L*X_d}{U-2}}) \quad \text{Equação 1}$$

Tal que:

D_{nssm} é o coeficiente de difusão/migração de cloretos no regime não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U é o valor da tensão, em Volts (V);

T é a média entre as temperaturas iniciais e finais, em °C;

t é a duração do ensaio, em horas;

L é a espessura do corpo de prova, em milímetros (mm);

X_d é a média da frente de penetração de cloretos, em milímetros (mm).

3.5.5 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 9779:2012, utilizando 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 x 100 mm.

Primeiramente, após os 28 dias de cura úmida, foi determinada a massa dos corpos de provas com temperatura de 23 ± 2 °C e posteriormente foram levados para um estufa com temperatura de 105 ± 5 °C até que fosse obtido a constância de massa para posterior determinação da massa seca (m_s) de cada um deles.

Após a determinação da massa seca dos corpos de prova, estes foram depositados em um recipiente com o nível de água constante em 5 ± 1 mm. Foram determinadas as novas massas com 3, 6, 24, 48 e 72 horas contadas a partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água. Finalmente, os corpos de prova foram rompidos de acordo com a ABNT NBR 7222:2011, de forma a permitir a anotação da distribuição de água no seu interior. A Figura 3-12 mostra alguns etapas do ensaio de absorção por capilaridade.

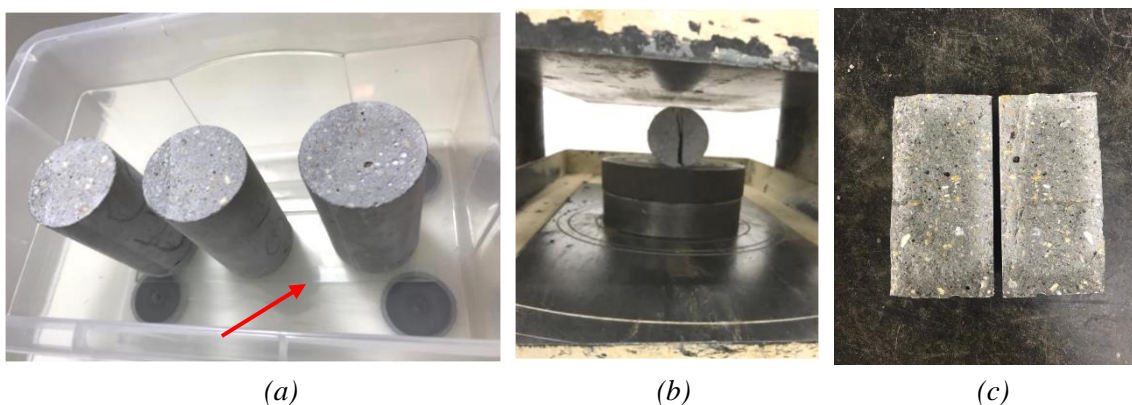


Figura 3- 12: (a) Amostras posicionadas sobre tiras de vidro. (b) Amostra rompida à tração por compressão diametral. (c) Distribuição da água no interior do corpo de prova.

A partir do ensaio de absorção por capilaridade tornou-se possível determinar o coeficiente de sorvidade dos concretos (K_s). A sorvidade é uma característica intrínseca de cada material, relacionada à absorção capilar de água, porosidade e interconexão entre poros, ou seja, trata-se do fenômeno de transporte de fluídos nos materiais porosos.

Tal coeficiente foi calculado pela linearização do gráfico de absorção capilar pelo tempo. Para promover essa linearização foi necessário que os valores no eixo das abcissas estivessem expressos na forma de raiz quadrada do tempo segundo recomendado pela RILEM TC 116-PCD. Enfim, foi obtido o coeficiente de sorvidade que é o coeficiente angular da reta obtida e a absorção inicial é o coeficiente linear, como pode ser observado na Figura 3-13.

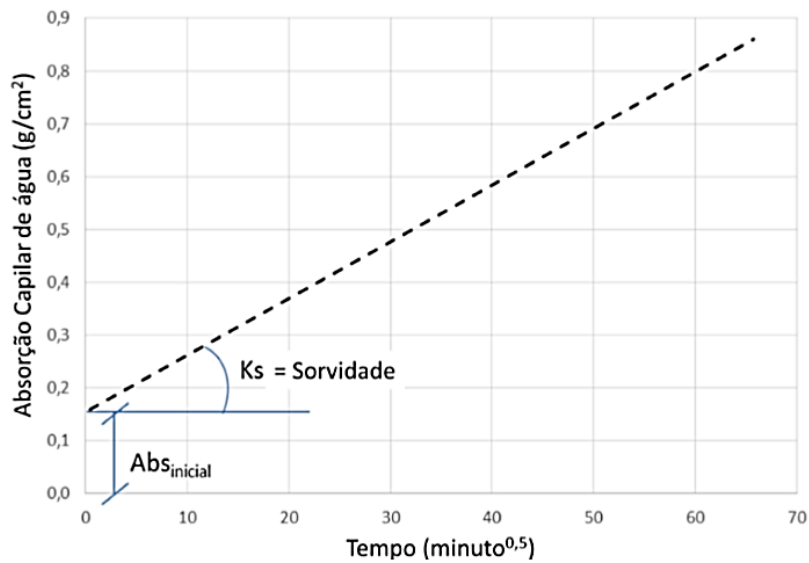


Figura 3- 13: Representação do coeficiente de sorvidade e da absorção inicial (MEDEIROS et al., 2017).

3.5.6 Ensaio de Absorção de Água por Imersão

A absorção de água por imersão é o processo no qual a água tende a conduzir e ocupar todos os poros de um corpo sólido acarretando um acréscimo de massa devido à penetração da água. Inicialmente, após a cura de 28 dias, os 3 corpos de provas de dimensões 50 mm x 100 mm foram para uma estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 72 horas para determinação das suas massas na condição seca.

Em seguida os corpos foram imersos em água, a uma temperatura de 23 ± 2 °C, por mais 72 horas. Após esse tempo, foi colocado os corpos de prova em um recipiente cheio de água, o qual foi progressivamente levado à ebulição, que começou entre 15 e 30 minutos. Este processo durou cerca de 5 horas mantendo o volume de água constante.

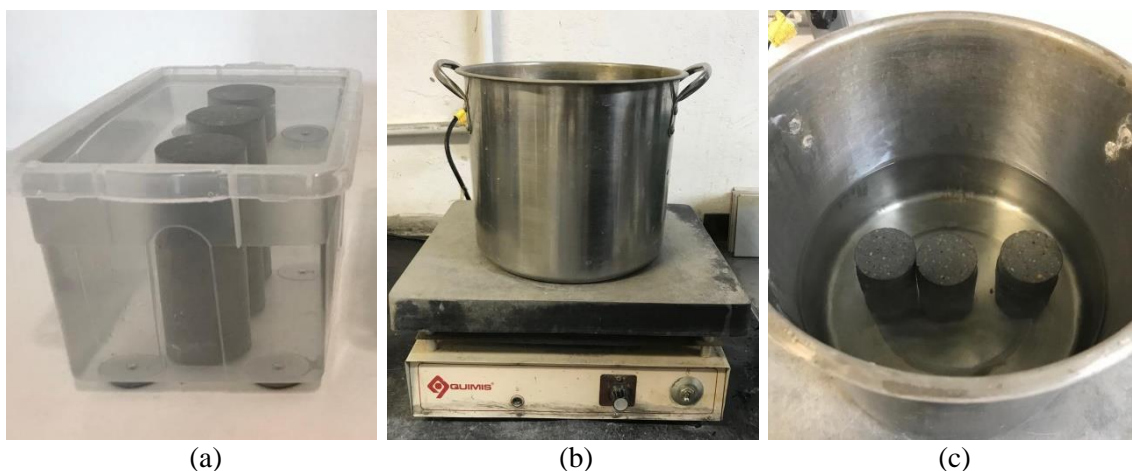


Figura 3- 14: (a) Amostras totalmente imersas em água, à temperatura ambiente. (b) Chapa metálica aquecedora utilizada para aquecer a água até a ebulição. (c) Amostras posicionadas no interior da cuba em aquecimento.

Em seguida o aparato esfriou-se naturalmente e posteriormente registrou-se a massa com uma balança hidrostática (M_s). Após este processo, a amostra foi enxugada com pano úmido e foi registrada sua massa novamente (M_{sat}), conforme explanado na ABNT NBR 9778:2005.

O cálculo da absorção (A) pode ser obtido através da Equação 2.

$$A(\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Tal que:

A é a absorção do corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

M_{sat} é a massa saturada do corpo de prova, expresso em gramas (g);

M_s é a massa seca do corpo de prova, expresso em gramas (g).

3.5.7 Ensaio de Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é de fundamental importância para o estudo da durabilidade do concreto, principalmente nos parâmetros para detecção de probabilidades de corrosão das armaduras. Porém a resistividade é uma propriedade do concreto e a sua associação com a corrosão ocorre de forma indireta por meio da condução de cargas elétricas. Essa condução se dá por meio dos poros ininterruptos e microfissuras no concreto e que estão preenchidos com água.

A disponibilidade de oxigênio, juntamente com a resistividade elétrica dos concretos controlam o processo eletroquímico de corrosão das armaduras no concreto. A resistividade é função direta da umidade, permeabilidade e propriedades eletroquímicas do concreto (CASCUDO, 1997; RIBEIRO et al., 2014).

A resistividade elétrica do concreto foi determinada por meio de dois métodos: resistividade elétrica volumétrica (método de dois eletrodos) e resistividade elétrica superficial (método de quatro eletrodos de Werner), conforme previsto pelas normas AASHTO TP 119- 2015 e ASTM G57:2012, respectivamente.

Para a realização dos procedimentos de ensaios, foi utilizado um transformador 220/110 Volts, o qual proporcionou a corrente alternada que era necessária conforme recomendado pelas normas. Através de multímetros digitais foi possível medir a diferença

de potencial e a variação da corrente elétrica. Ambos os ensaios foram realizados aos 28 e 70 dias de idade e foram ensaiados 3 corpos de prova por traço.

3.5.7.1 Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial

O ensaio de resistividade elétrica superficial foi feito por meio de uma sonda Wenner de 4 pontos com espaçamento entre as sondas de 50 mm, especialmente concebida para medir a resistividade elétrica do concreto por meio de um ensaio não destrutivo. Foi aplicada uma corrente alternada nos eletrodos externos e nos internos foi realizada a leitura da corrente e a variação de tensão. Variou-se a tensão nos eletrodos externos e com isso foi possível medir, para cada ponto, a variação da corrente e da tensão nos eletrodos internos.

Este ensaio se baseia na norma ASTM G57:2012 e foi realizado com 3 corpos de prova com dimensões de 100 mm x 200 mm. As medidas foram realizadas aos 28 dias e aos 70 dias. A Figura 3-15 mostra a montagem realizada para a execução do ensaio.

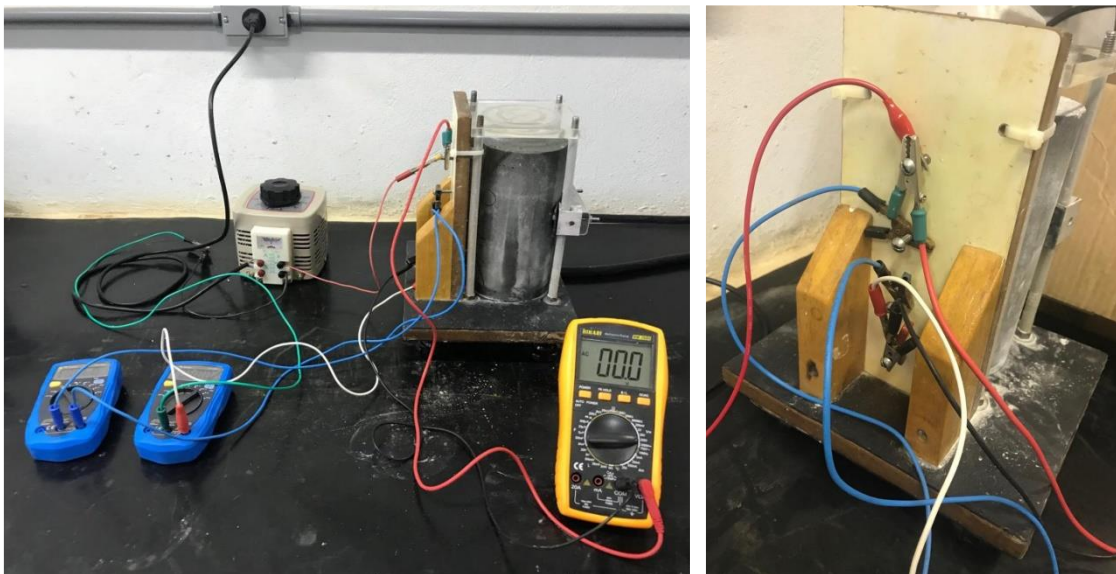


Figura 3- 15: Ensaio de resistividade elétrica superficial em andamento.

Para o cálculo do valor da resistividade elétrica do microconcreto (ρ), é possível utilizar a Equação 3 explanada na norma ASTM G57:2012. Ao final, calcula-se a média das resistividades encontradas.

$$\rho = 2 * \pi * \alpha * R$$

Equação 3

Tal que:

ρ é a resistividade elétrica do material ($\Omega.m$);

α é a distância entre os eletrodos em metros (m);

R é a resistência medida no multímetro (Ω).

3.5.7.2 Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica

O ensaio de resistividade elétrica volumétrica foi realizado com o mesmo aparato utilizado no ensaio de resistividade elétrica superficial. As recomendações para esse ensaio são feitas pela AASHTO TP 119- 2015. Neste caso, a resistividade é dita volumétrica pois representa a resistividade das camadas mais internas das amostras de microconcreto analisadas.

Almejando um bom contato elétrico entre os eletrodos e o corpo de prova foi utilizado um papel filtro saturado na mesma solução de cal hidratada que os corpos de prova se encontravam. Conforme recomendado pela norma AASHTO TP – 119-2015, a resistividade elétrica do papel filtro também foi medida, no entanto se tornou desprezível por ser muito menor do que a obtida pelas amostras de concreto.

Foi utilizado um conjunto de placas de aço inoxidável como eletrodos, entre os quais a amostra de concreto foi posicionada. Em seguida uma corrente elétrica foi aplicada entre as placas e a diferença de potencial elétrico foi medida. A Figura 3-16 mostra a montagem realizada para a execução do ensaio.

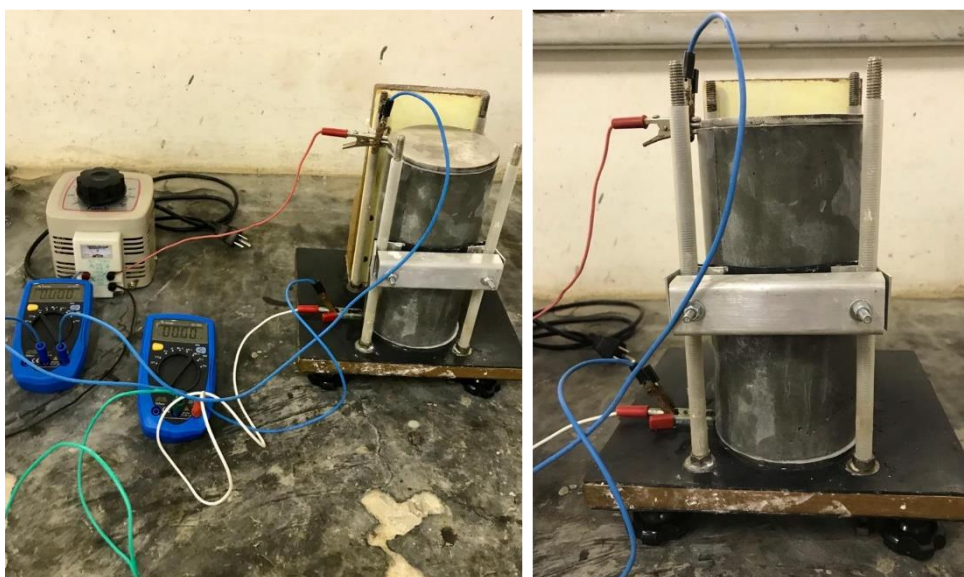


Figura 3- 16: Ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento.

Neste método são utilizados os mesmos 3 corpos de provas utilizados no ensaio de resistividade elétrica superficial com dimensões de 100 x 200 mm. Para cada ponto coletado de variação, foi calculado a resistividade elétrica pela Equação 4. Ao final, calcula-se a média das resistividades encontradas.

$$\rho_v = R_{cilindro} * \frac{A}{L} \quad \text{Equação 4}$$

Tal que:

ρ_v é a resistividade elétrica volumétrica do microconcreto ($\Omega \cdot \text{cm}$);

$R_{cilindro}$ é a resistência elétrica do concreto calculada pela Lei de Ohms (Ω);

A/L é o fator referente à geometria do corpo de prova de concreto (A =área da seção transversal – cm^2 ; L = comprimento do corpo de prova – cm). Destaca-se que no caso dessa pesquisa, a relação A/L é igual a 4.

A norma AASHTO TP 119:2015 estabeleceu uma classificação quanto a penetração de cloretos baseada nos valores da resistividade elétrica volumétrica, cujos valores estão apresentados na Tabela 3-9.

Tabela 3- 9: Classificação dos valores de resistividade elétrica volumétrica quanto à penetração de cloretos (Fonte: AASHTO TP119:2015).

Resistividade Uniaxial ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)	Classificação quanto à penetração de cloretos
> 207	Insignificante
20,8 a 207	Muito Baixa
10,4 a 20,8	Baixa
5,2 a 10,4	Moderada
< 5,2	Alta

3.5.8 Resumo dos Ensaios

Na Tabela 3-10 é apresentado um resumo dos ensaios, contendo as respectivas normas de referência, as dimensões dos corpos de prova (CP), a quantidade de CP total e por idade, a idade de realização dos ensaios e o volume necessário de mistura necessário para a realização de cada ensaio e o volume total para a execução dos microconcretos dessa pesquisa.

Tabela 3- 10: Resumo dos Ensaios e volume de microconcreto por ensaio.

ENSAIOS	NORMA	Dimensões (mm)	Volume (m ³)	CP p/ Idade	Idades (dias)	Total De CPs	Total De Volume (m ³)	
Resistência à Compressão Axial	ABNT NBR 5739:2007	50 x 100	0,00019635	3	1, 7, 28 e 70	12	0,0024	
Módulo de Elasticidade	ABNT NBR 8522:2008	100 x 200	0,0015708	3	28	5	0,0079	
Migração De Íons Cloreto	NT BUILD 492:2011	100 x 200	0,0015708	2	28	2	0,0031	
Resistividade Elétrica Superficial e Volumétrica	AASHTO TP 119:2015 ASTM G57:2012	100 x 200	0,0015708	3	28 e 70	3	0,0047	
Absorção por Capilaridade	ABNT NBR 9779:2012	50 x 100	0,00019635	3	28	3	0,006	
Absorção por Imersão	ABNT NBT 9778:2005	50 x 100	0,00019635	3	28	3	0,006	
						Total	28	0,03

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A estatística é o ramo da matemática interessado nos métodos científicos para coleta, organização, resumo, apresentação e análise de dados, bem como na obtenção de conclusões válidas (CARVALHO, 2006). Assim, a análise estatística permite descrever e compreender relações entre variáveis de forma imediata, permite a tomada de decisões melhores e mais rápidas além de facilitar essa tomada de decisão.

Análises de variância (ANOVA) são técnicas de estatísticas utilizadas para descobrir fatores que produzam mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse (FONSECA et al., 1995).

O objetivo da análise de variância é avaliar se as diferenças observadas entre as médias das amostras são estatisticamente significantes. Outrossim, essa técnica analisa se a variável independente influenciou sobre a variável dependente.

Buscando observar a influência da adição de SAP e NS nas propriedades mecânicas e nas propriedades relacionadas à durabilidade foi realizada análises de variância (ANOVA).

Essa influência é indicada por meio do Valor-p, o qual também é denominado de probabilidade significativa. Cada hipótese foi testada a um nível de significância (p) de 0,05, possuindo um nível de confiança de 95%.

Dessa forma, ao realizar a análise de variância, quando o Valor-p foi inferior a 0,05, o efeito foi considerado significativo sobre a variável dependente, ou seja, teve influência

sobre esta. Por outro lado, quando o Valor-p foi igual ou superior a 0,05, o efeito não foi considerado significativo.

Uma análise do coeficiente de determinação (R^2) é frequentemente usada para julgar a adequação de um modelo de regressão. Normalmente refere-se a R^2 como a quantidade de variabilidade nos dados explicada ou considerada pelo modelo de regressão (MONTGOMERY.; RUNGER, 2003). O coeficiente de determinação é calculado por meio de uma relação entre a soma dos quadrados totais (SQ_{tot}) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQ_{res}). O primeiro deles, mostra o quão próximo os dados estão da média aritmética e o segundo mostra o quão próximo os dados se encontram do modelo que foi adotado para descrevê-los. Isso pode ser verificado pelas equações 5 e 6.

$$SQ_{Tot} = \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Equação 5}$$

Tal que:

y_i representa os dados coletados;

\bar{y} representa a média dos dados coletados.

$$SQ_{Res} = \sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Equação 6}$$

Tal que:

y_i representa os dados coletados;

\hat{y}_i representa os dados ajustados ao modelo proposto.

A partir do exposto acima, pode-se calcular o valor de R^2 por meio da Equação 7 expressa abaixo.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \text{Equação 7}$$

Se todos os dados se encontram exatamente sobre a linha de regressão, ou seja, do modelo proposto, o valor da soma dos quadrados dos resíduos será próximo de 0 e com isso o valor de R^2 será próximo de 1. Isso indicará que o modelo proposto se adequa e que 100% da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes no modelo.

Logo, quanto R^2 mais próximo de 1, significa que há uma menor variabilidade entre os dados.

A presença dos espúrios pode aumentar o desvio padrão, deslocar a média e conseqüentemente gerar problemas de exatidão. O espúrio é um valor que não se enquadra na distribuição do restante dos dados, portanto deve ser analisado com cuidado antes de ser excluído (AGOSTINHO, 2017).

Para a devida retirada de dados espúrios, realiza-se testes de hipóteses como por exemplo o teste de Dixon ou o teste T (unilateral), normatizado pela ASTM E178:2008.

Assim sendo, partir dos resultados obtidos na realização dos ensaios, primeiramente foi realizado o teste de Dixon e posteriormente a análise de variância (ANOVA) utilizando o software *Statistica 10*® da empresa *Statsoft*.

Para os ensaios de resistência e resistividade, apenas o teste de Dixon não foi suficiente para a retirada dos espúrios de forma adequada, apresentando um R^2 muito baixo, ou seja, apresentando uma alta variabilidade entre os dados coletados. Por esta razão, foi realizado o teste de hipótese T (unilateral), que a própria norma expõe que é um teste mais adequado para o caso de único-discrepante.

4. ANÁLISES E RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE ESPALHAMENTO

Os valores de espalhamento pela Norma Brasileira ABNT NBR 13276:2005, sem golpes da mesa, ficaram dentro do intervalo estipulado no programa experimental (215 ± 20 mm), em todas as misturas, valores estes alcançados por meio da variação do teor de aditivo superplastificante e são apresentados no gráfico da Figura 4-1.

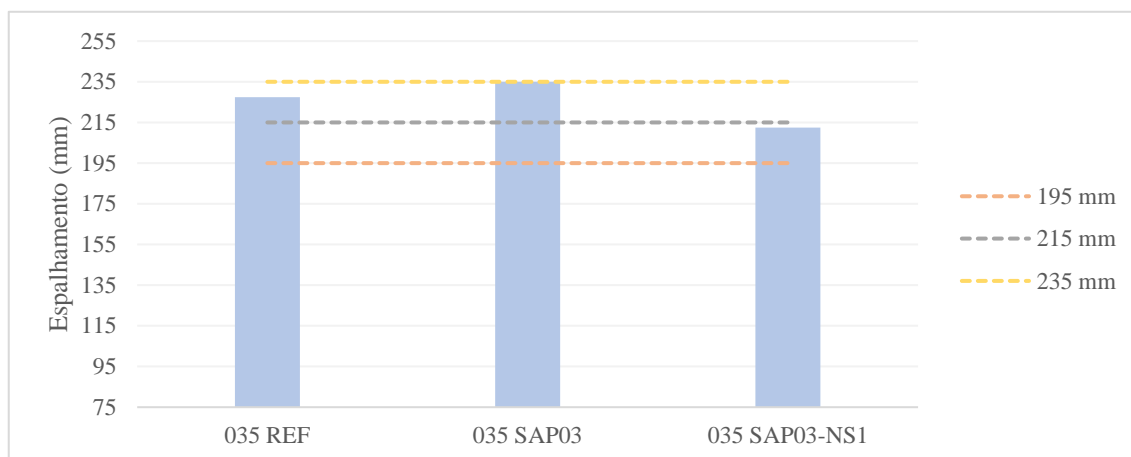


Figura 4- 1: Valores de espalhamento dos microconcretos estudados.

Na mistura contendo apenas SAP, em relação ao traço de referência, houve uma demanda muito superior de aditivo superplastificante. Na mistura de referência utilizou apenas 0,9% de SP, que está dentro dos limites propostos pelo fabricante, enquanto na mistura com SAP utilizou-se 2,2% de aditivo. Ou seja, foi necessário pouco mais que dobrar a quantidade de superplastificante.

Tal fato corrobora a hipótese de que o SAP tem influência na reologia dos microconcretos, conforme colocado por Manzano (2014), Santos (2016), Agostinho (2017).

Entretanto, é importante destacar, que é possível diminuir a quantidade de aditivo utilizada nessa mistura, pois o espalhamento alcançado foi igual ao limite superior estipulado como premissa dessa pesquisa. Por conseguinte, há ainda uma variação considerável no espalhamento que representa diretamente uma menor demanda de superplastificante.

Em relação ao traço contendo 0,3% de SAP e 1% de NS, foi necessário utilizar 2,5% de aditivo superplastificante para alcançar o espalhamento especificado, ou seja, 14% a mais de aditivo em comparação a quantidade utilizada na mistura contendo apenas o SAP.

Segundo Moraes (2012), quando a nanossílica é incorporada na mistura, esta exerce influência direta na demanda de água, pois aumenta o empacotamento das partículas e pela elevada área superficial que adsorve água em sua superfície. Como a relação a/c total de água foi fixada em todas as misturas, era esperado que houvesse uma demanda maior de aditivo superplastificante nos traços contendo esta adição.

É importante salientar que nas duas misturas contendo SAP e NS, o teor de superplastificante utilizado está muito acima do especificado pelo fabricante, porém destaca-se que nenhuma das misturas exudaram.

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão simples dos microconcretos foi determinada seguindo as recomendações da ABNT NBR 5739:2007, nas idades de 1, 7, 28 e 70 dias. O comportamento dos microconcretos em relação a essa propriedade pode ser visualizado no gráfico da Figura 4-2, o qual apresenta a evolução da resistência à compressão simples no decorrer dos dias, por traço. Os dados individuais de cada corpo de prova podem ser encontrados no apêndice A, Tabela A-1. Foi aplicado o teste do T-unilateral para a eliminação dos dados espúrios.

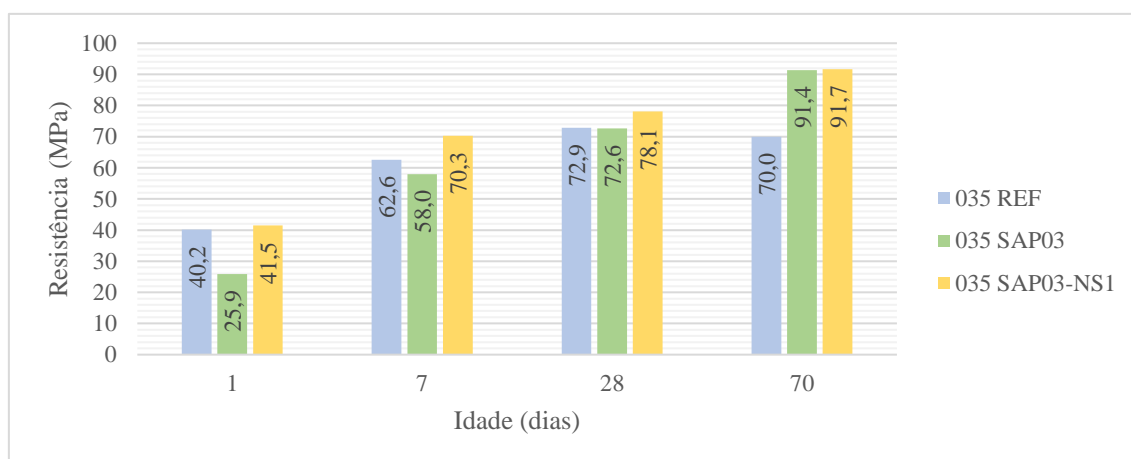


Figura 4- 2: Resultados médios da resistência à compressão simples dos microconcretos produzidos para as idades de 1, 7, 28 e 70 dias.

A partir dos dados obtidos, é possível observar um ganho de resistência, em todas as idades, ao se adicionar a nanossílica. Nas idades iniciais, 1 e 7 dias, o SAP desencadeou uma queda na resistência à compressão. Já na idade de 28 dias, a mistura contendo SAP recuperou a resistência perdida inicialmente, alcançando a resistência observada no traço de referência. Para a idade de 70 dias, o SAP promoveu um ganho considerável na resistência (31%).

Na Figura 4-3 são representados o crescimento em porcentagem em função do traço, para cada idade. Assim sendo, observa-se que para 1 dia, o SAP representou uma queda de 35% na resistência, ao comparar com o valor de referência. Ao se adicionar a nanossílica, o valor observado (41,5 MPa) foi praticamente igual ao valor de referência (40,2 MPa), sendo apenas 3% maior. Todavia, ao se confrontar o resultado de resistência encontrado para a mistura contendo NS com a mistura contendo apenas SAP, a adição de nanossílica representou um aumento de 60%.

Assim sendo, esse aumento de 60% na resistência para a idade de 1 dia causado ao se adicionar 1% NS é importante pois nas primeiras idades é quando a retração autógena é mais crítica, pois o microconcreto ainda não apresentaria resistência suficiente para resistir às tensões induzidas de tração, promovendo as microfissurações. Logo, a NS demonstra-se como uma estratégia que pode ajudar a mitigar a retração autógena, contribuindo para o desempenho mecânico do microconcreto.

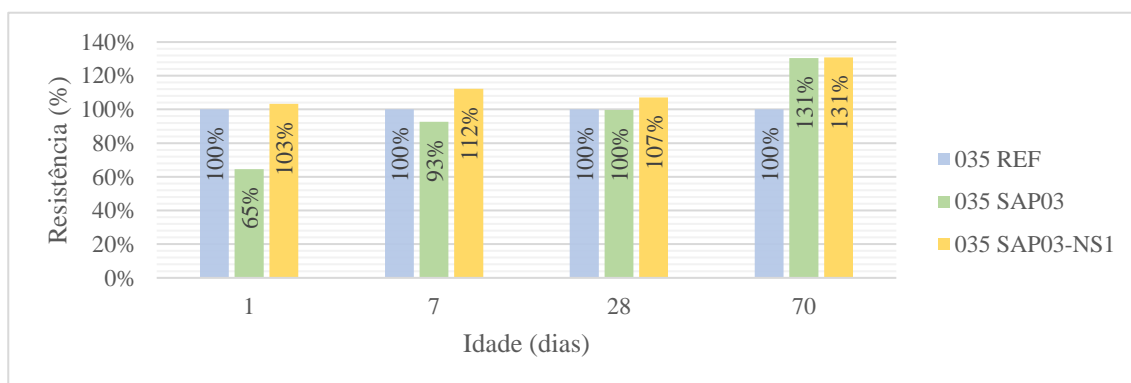


Figura 4- 3: Comparação, em porcentagem, da resistência à compressão simples dos microconcretos 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação ao traço de referência, para as idades de 1, 7, 28 e 70 dias.

Para a idade de 7 dias, a adição do SAP representou uma ligeira redução na resistência (7%). O efeito no aumento da resistência ao se adicionar a nanossílica, foi mais pronunciado; o valor observado (70,3 MPa) foi 12% superior ao valor obtido para o traço de referência (62,6 MPa), e 21% superior ao valor obtido para o traço contendo apenas SAP (58,0 MPa).

Ao analisar os efeitos da adição do polímero superabsorvente, para a idade de 28 dias, conclui-se que o polímero não afetou a resistência, uma vez que os valores encontrados para a mistura de referência e para a mistura contendo SAP foram muito próximos, respectivamente, 72,9 e 72,6 MPa, o que representa uma diferença de apenas 0,4%, ou seja, insignificante, dentro da margem de erro de execução do próprio ensaio. A

nanossílica, para essa idade, representou um aumento de 7% em relação à resistência à compressão do microconcreto de referência.

Assim, pode-se concluir que com 28 dias de cura, o uso do SAP não desencadeou perda de resistência, quando comparado com uma mistura de referência com a mesma relação a/c total. Ou seja, o prejuízo à resistência desencadeada pela adição do SAP, é totalmente compensada aos 28 dias, não justificando a adição da nanossílica nessa idade. Porém, destaca-se mais uma vez que a adição da NS é relevante nas primeiras idades e sob a ótica de mitigar a retração autógena, é mais importante o aumento na resistência nas primeiras idade do que aos 28 dias.

Já para a idade de 70 dias, o traço contendo apenas o polímero alcança a mesma resistência observada para o microconcreto contendo também a nanossílica, a diferença entre os dois valores observados – 91,4 e 91,7 MPa – é de menos de 0,4%, o que não pode ser considerada uma redução.

Ao se confrontar os resultados de resistência encontrados para a mistura contendo NS com a mistura contendo apenas SAP, representou um aumento de 60%, 21%, 7% e 0,4% para as idades de 1, 7, 28 e 70 dias, respectivamente.

Ademais, como os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1, contém o mesmo teor de SAP e apresentaram o mesmo aumento na resistência, na magnitude de 31%; conclui-se que, em idades avançadas, a adição da nanossílica não interfere mais nessa propriedade mecânica. Por ser muito fina e rica em SiO₂, a atividade pozolânica parece ter ocorrido já para 1 dia.

É importante ressaltar que diversos estudos relatam a perda de resistência mecânica causada pelo SAP, dentre eles cita-se Lura, (2003); Dudziak e Mechtcherine (2010); Silva (2014); Ordoñez (2013) E Santos (2016). Todavia, todos os autores supracitados adicionaram, nas misturas contendo SAP, água extra; logo, realizaram a comparação entre traços com mesmo a/c básico, o que penaliza o polímero.

Entretanto, os resultados obtidos nessa pesquisa corroboram a teoria que de fato a água de cura interna do SAP faz parte do processo de hidratação. Assim sendo, a redução inicialmente observada na resistência provavelmente se deve a um incremento da porosidade dos microconcretos devido à introdução de partículas de SAP, uma vez que ao entrarem em contato com água, incham e aumentam de volume.

Porém, à medida que a hidratação avança, há a desSORÇÃO da partícula de polímero. Durante a hidratação do cimento, quando a umidade relativa externa se torna menor do que no interior do polímero, o SAP libera a água que se encontra em seu interior para o meio cimentício e reduz de volume.

Todavia, de acordo com os resultados obtidos, os vazios deixados pelo processo de desSORÇÃO do SAP não acarretam perda à propriedade mecânica do microconcreto aos 28 dias. Aos 28 dias a resistência da mistura com SAP já se iguala à resistência do traço de referência e aos 70 dias já a supera; demonstrando, portanto, que a comparação mais correta é de fato utilizando uma composição de referência com mesma a/c total, como realizado nessa pesquisa.

Os resultados obtidos nessa pesquisa reiteram o que foi verificado por Lura et al. (2006); Kovler e Jensen (2007); Kumar e Maruthachalam (2013), que também observaram que o uso do SAP não foi prejudicial (ou até mesmo foi benéfico) em relação à resistência à compressão dos materiais.

Em relação à nanossílica, vários estudos demonstraram que a aplicação de NS em sistemas de cimento aumenta o desenvolvimento de resistência, especialmente na fase inicial de hidratação. Fato este que é corroborado por essa pesquisa, uma vez que a incorporação da nanossílica representa um aumento inicial na resistência de 60% (em relação à mistura contendo apenas SAP), e esse incremento vai diminuindo ao longo do tempo, chegando a praticamente nenhuma influência (0,7%) aos 70 dias.

Pourjavadi et al. (2012), utilizaram a NS em pó para melhorar as propriedades mecânicas de pastas contendo SAP; no estudo, os autores verificaram que pequenas adições de NS podem compensar o efeito negativo do polímero na resistência à compressão.

Nessa pesquisa, a melhoria promovida pela adição de NS foi suficiente para compensar toda a perda proporcionada pelo polímero nas idades de iniciais (1 e 7 dias). Assim sendo, o teor de 1% só se justifica quando houver necessidade de ganho de resistência nas primeiras idades. Porém, deve-se antes confrontar com os resultados de retração autógena para avaliar o custo benefício.

Segundo Aleen, Heikal e Morsi (2014), o ganho de resistência proporcionado pela NS ocorre devido à sua hidratação contínua e à 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 de a NS comportar-se não só como material de enchimento para melhorar a macroestrutura, mas também funcionando como pontos de nucleação para o C-S-H, como ativador para acelerar a reação pozolânica do compósito (SCRIVENER e KIRKPATRICK, 2008).

4.2.1 Análise Estatística

A influência da Idade, teor de SAP e teor de NS na resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (50x100 mm) foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados na Tabela 4.1. O coeficiente de determinação do modelo (R^2_{mod}) foi igual a 0,84266, mostrando um bom ajuste do modelo adotado.

A análise de variância (ANOVA) visa determinar a quantidade de variabilidade dos grupos que o efeito do tratamento acumula da variabilidade total e na distribuição de Fisher (F). Admite-se como hipótese básica a igualdade entre os valores médios das diferentes situações. Os valores calculados de F são comparados com os valores tabelados, em função dos graus de liberdade do tratamento avaliado e do resíduo (erro). O objetivo é testar hipóteses apropriadas sobre médias de tratamentos. Para testar essas hipóteses os erros aleatórios são assumidos ser uma variável aleatória independente normalmente (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Tabela 4- 1: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP, teor de NS e idade para a resistência à compressão simples

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	78,846	1	78,846	0,93802	0,346364	Não significativo
Teor de NS	67,727	1	67,727	0,80575	0,381916	Não significativo
Idade	2529,871	1	2529,871	30,09761	0,000040	Significativo
Idade (Q)	977,7131	1	977,713	11,63175	0,003330	Significativo
SAP x Idade	665,121	1	665,121	7,91288	0,011973	Significativo
NS x Idade	140,782	1	140,782	1,67487	0,212912	Não significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; (Q) = termo quadrático.

Diante da análise de variância realizada, observa-se que o teor de SAP, o teor de NS e a interação da Idade e NS não tem significância em relação à resistência. Porém, os fatores da Idade, além da interação entre Idade e SAP, foram significativos.

O gráfico de Pareto mostra de forma rápida e clara os efeitos que exercem maior influência. Aqueles fatores cujos valores que estão à esquerda da linha ($p = 0,05$) podem ser desconsiderados no modelo matemático, sendo considerados não significantes.

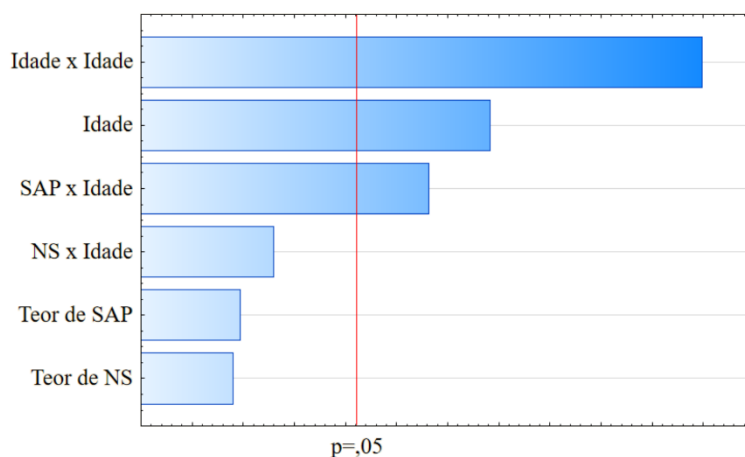


Figura 4- 4: Gráfico de Pareto que permite visualizar os efeitos da idade, SAP e NS com significância na análise de variância da resistência à compressão simples.

Diante da Figura 4-4, entende-se que os teores usados de SAP e NS não foram relevantes ao se analisar as idades isoladas. Porém, na comparação ao longo do tempo, a incorporação do SAP tem influência significativa nos valores obtidos de resistência e a NS não tem relevância. Por fim, com a ANOVA foi possível observar que a idade do corpo de prova foi o que mais afetou na resistência à compressão.

A análise estatística em relação à resistência à compressão corrobora com a análise inicial exposta que a NS não tem influência significativa nessa propriedade mecânica, mesmo em diferentes idades, não justificando sua incorporação ao analisar apenas esse ensaio.

4.2.2 Influência da dimensão dos corpos de prova na resistência dos microconcretos

Após a realização do ensaio de módulo de elasticidade, por recomendações normativas, recomenda-se romper os corpos de prova ensaiados à compressão axial simples. Assim sendo, foi possível comparar a resistência à compressão obtida com o ensaio padrão de avaliação da resistência aos 28 dias, utilizando corpos de prova de 50x100 mm, com a

resistência obtida, para a mesma idade, com corpos de prova maiores, 100x200 mm. Os dados obtidos estão apresentados na Figura 4-5,

A partir do gráfico apresentado na Figura 4-5, foi possível avaliar uma ligeira queda na resistência, máximo de 7%, ao se utilizar corpos de prova cilindros de 100x200 mm. A diminuição observada foi de 5% para a mistura de referência, 3,5% para a mistura contendo apenas SAP e 7% para a mistura contendo SAP e NS.

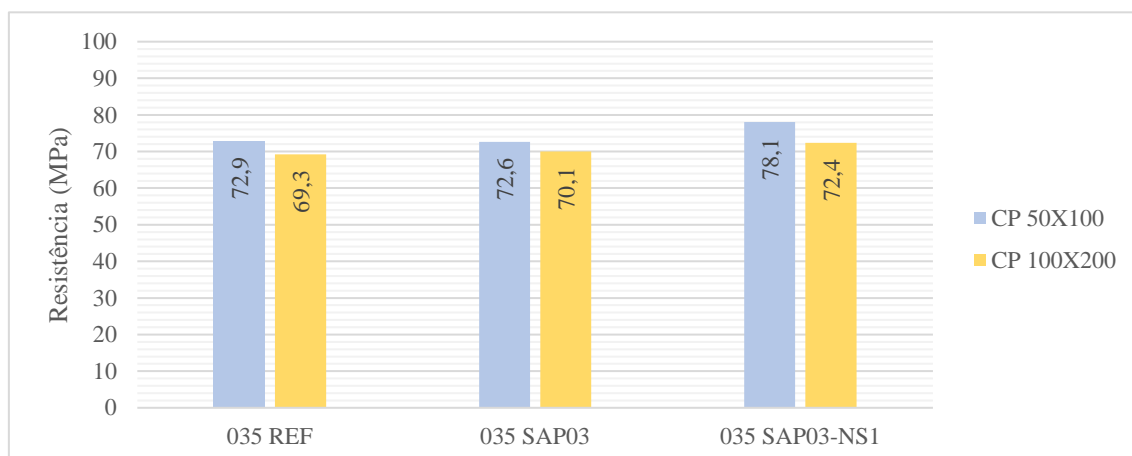


Figura 4- 5: Resultados médios obtidos para a resistência à compressão simples para corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm e de 100x200 mm.

Tais resultados vão em concordância ao que foi observado por KIM et al. (1999). Os autores estudaram o efeito escala sobre a resistência à compressão axial do concreto variando a dimensão de corpos-de-prova cilíndricos, onde foi observado que ocorre uma redução da tensão nominal com o aumento da dimensão da estrutura.

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), para corpos de prova cilíndricos mantendo-se a razão altura-diâmetro igual a 2, a resistência diminui à medida que o diâmetro do corpo de prova aumenta.

Segundo COURA (2006), o “efeito escala” é a influência das dimensões dos corpos-de-prova sobre as propriedades mecânicas dos materiais. Ocorre que na análise dimensional os parâmetros que são ignorados no corpo de prova grande, por exercerem pequena influência, no corpo pequeno passam a exercer grande influência.

A influência do tamanho dos corpos de prova está relacionada ao fato de que a resistência do concreto se encontra ligada às diferentes resistências dos seus elementos constituintes. Logo, é razoável esperar que a chance de apresentar um material menos resistente

aumenta nas amostras de maiores dimensões e que estatisticamente o número de fissuras e de defeitos em corpos de prova pequenos são menores que nos grandes, resultando em uma densidade maior (COUTINHO e GONÇALVES, 1994). Todavia, BARBOSA et al. (1998) e COURA (2006) expõem que esse efeito é desconsiderado em microconcretos.

YI et al (2006) estudaram concretos e 20, 30, 40, 60 e 80 MPa para analisar o formato e dimensões dos corpos de provas. Foram considerados corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm, 100 x 200 mm, 150 x 300 mm e 200 x 400 mm, além de prismas e cubos. Os autores então observaram que as diferenças, entre as resistências para as diversas dimensões de corpos de prova, se atenuam com o aumento das resistências. Ou seja, a influência na variação do tamanho e da forma dos corpos de prova é menor para concretos de alta resistência do que para concreto normais.

Também foi realizada a análise estatística (ANOVA) com os dados obtidos de resistência à compressão para a idade de 28 dias, envolvendo agora a dimensão do corpo de prova como outro fator de análise. Os dados são encontrados na Tabela 4-2.

Tabela 4- 2: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP, teor de NS e dimensão do corpo de prova para a resistência à compressão simples.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Dimensão	0,02420	1	0,02420	0,005382	0,943905	Não significativo
Teor de SAP	0,13781	1	0,13781	0,030647	0,866790	Não significativo
Teor de NS	0,90451	1	0,90451	0,201144	0,669541	Não significativo
Dimensão x SAP	0,57781	1	0,57781	0,128493	0,732275	Não significativo
Dimensão x NS	17,67151	1	17,67151	3,929761	0,094713	Não significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; (Q) = termo quadrático.

A partir do gráfico de Pareto, Figura 4-6, é evidente que todos os dados são estatisticamente iguais. Ou seja, nenhum fator está tendo influência significativa para essa propriedade mecânica do microconcreto, aos 28 dias. Em outras palavras, apesar de ser verificado uma redução de até 7% ao se utilizar corpos de prova cilíndricos 100x200 mm, essa queda não pode ser considerada relevante. Dessa forma, os dados obtidos experimental indicam que não houve prejuízo à análise da resistência ao se utilizar corpo de prova de menor dimensão 50x100 mm.

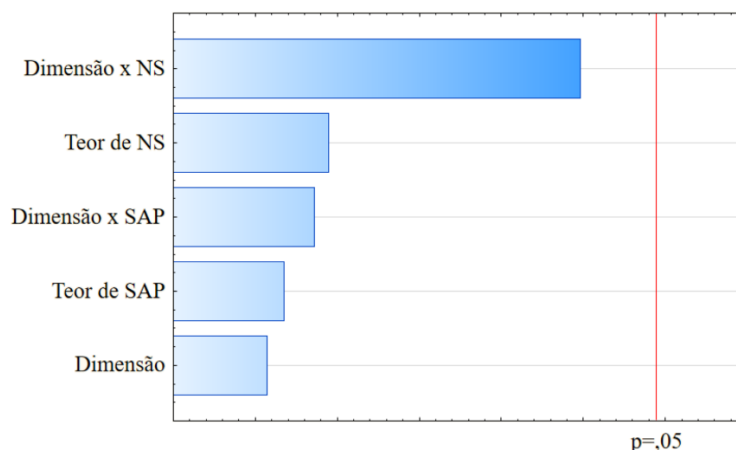


Figura 4- 6: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos da dimensão, SAP e NS com significância na análise de variância da resistência à compressão simples, aos 28 dias.

4.3 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Figura 4-7 são representados os resultados médios de módulo de elasticidade para os microconcretos produzidos nessa pesquisa, aos 28 dias. Já na Figura 4-8 é apresentado o crescimento percentual no valor do módulo encontrado para os traços contendo SAP e NS em comparação ao valor obtido no traço de referência. Os dados individuais de cada corpo de prova podem ser encontrados no apêndice A, Tabela A-3. Foi aplicado o teste de Dixon para a eliminação dos dados espúrios.

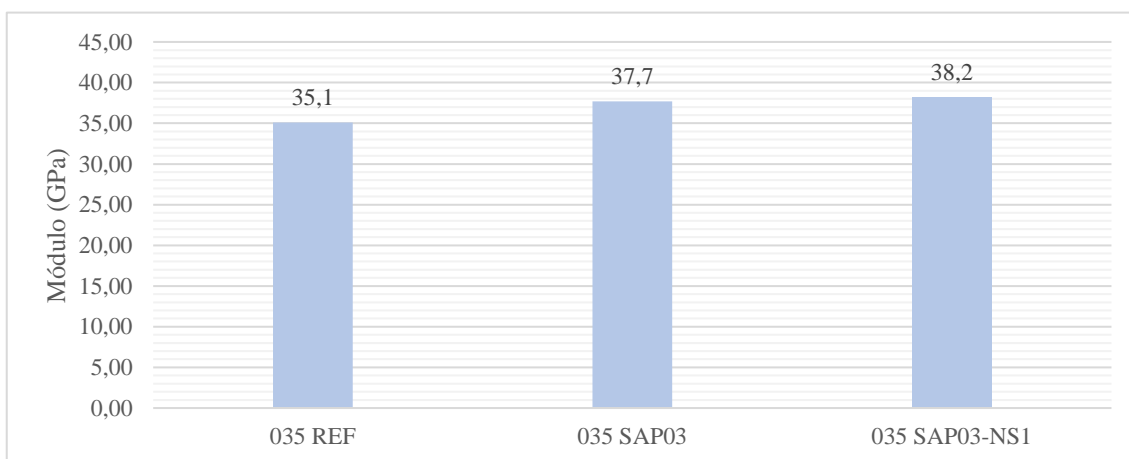


Figura 4- 7: Resultados médios de módulo de elasticidade para 28 dias.

Através da Figura 4-8, é possível observar que o uso do SAP desencadeou um aumento de 7% em relação ao microconcreto de referência (35,1 GPa). Já o traço contendo 0,3% de SAP e 1% de NS apresentou valor igual a 38,2 GPa, o que representa um aumento de 9% em relação à mistura de referência.

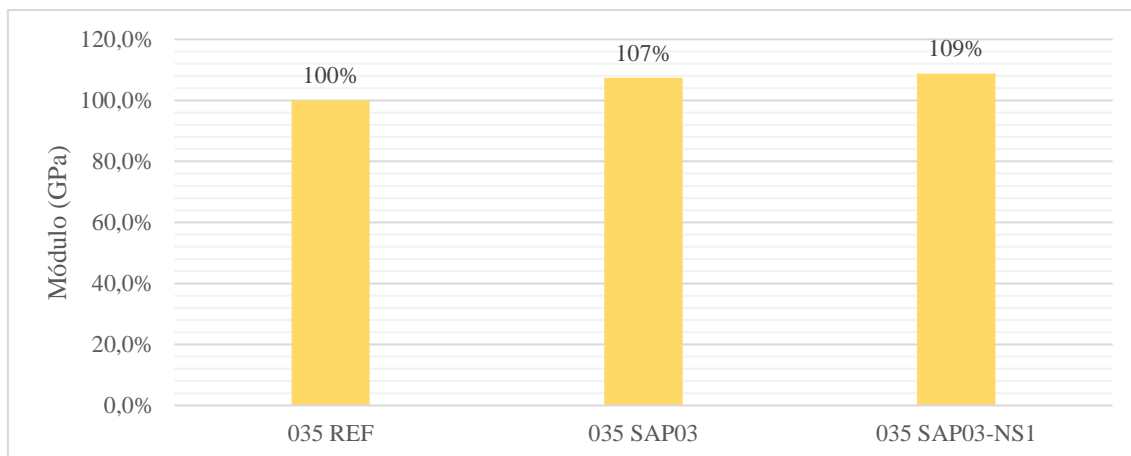


Figura 4- 8: Crescimento percentual no valor do módulo para os traços 035 SAP03 e SAP03-NS1 em comparação ao valor obtido para o traço de referência.

Ao realizar a comparação dos valores obtidos com as misturas contendo apenas SAP e contendo também NS (37,7 e 38,2 GPa), observa-se um aumento 0,1%, ou seja, insignificante. Dessa forma, pode-se concluir que a adição da nanossílica não apresentou acréscimo ao valor de módulo, aos 28 dias.

O desempenho mecânico de um concreto contendo SAP 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 às reações pozolânica do cimento, que pode compensar a redução na resistência causada pela elevada porosidade deixada pelo polímero (SANTOS, 2016).

Esse comportamento explicado por Santos (2016) é corroborado pelos resultados obtidos nessa pesquisa. Tanto no ensaio de resistência à compressão, quanto no ensaio de módulo de elasticidade, o uso do SAP não trouxe dano ao desenvolvimento das propriedades mecânicas aos 28 dias. No ensaio de módulo de elasticidade, o uso do polímero ainda representou uma melhora nessa propriedade, promovendo um acréscimo no valor observado.

Ademais, a adição de 1% de NS combinada com o efeito do SAP não representa incremento às propriedades mecânicas (módulo e resistência) aos 28 dias que justifique a sua incorporação à matriz cimentícia.

4.3.1 Análise Estatística

A influência do teor de SAP e teor de NS no módulo de elasticidade de microconcretos de alta resistência foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados nas Tabela 4-3. O modelo mostrou um bom ajuste dos dados, tendo em vista o valor resultante de R^2_{mod} igual a 0,98506.

Com base na análise de variância realizada, observa-se que o teor de SAP tem significância em relação ao módulo de elasticidade. Todavia, fato inverso foi observado para a NS; sua adição é não significativa.

Tabela 4- 3: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para o módulo de elasticidade.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	6,760000	1	6,760000	139,8621	0,0013	Significativo
Teor de NS	0,022500	1	0,022500	0,4655	0,544016	Não significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não..

O gráfico de Pareto, Figura 4-9, mostra de forma visual que o teor de SAP é relevante para o modelo adotado e o teor de NS não é significativo. A análise estatística em relação ao módulo de elasticidade reitera o que já foi previamente concluído que a NS não tem influência significativa nas propriedades mecânicas aos 28 dias. Logo, diante dos resultados obtidos para módulo e resistência e das análises estatísticas até aqui realizadas, realmente não foi relevante qualitativamente a adição de 1% de NS, sob a ótica de melhoria ao desempenho mecânico dos microconcretos aos 28 dias.

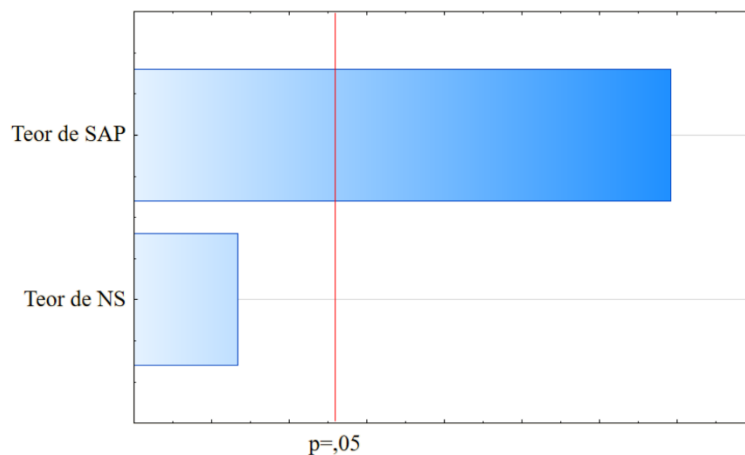


Figura 4- 9: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância do módulo de elasticidade.

4.4 ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

A migração de cloretos no estado não estacionário foi realizada objetivando determinar os coeficientes de difusão de cloretos, sendo este dado bastante representativo no que se refere ao real mecanismo de transporte de cloretos no concreto. É válido destacar que quanto maior o valor do coeficiente de difusão, pior é o desempenho do concreto. Na Figura 4-10 são representados os resultados médios do coeficiente de difusão/migração de íons cloreto. Os resultados individuais de coeficiente de difusão são encontrados no Apêndice A, Tabela A-4.

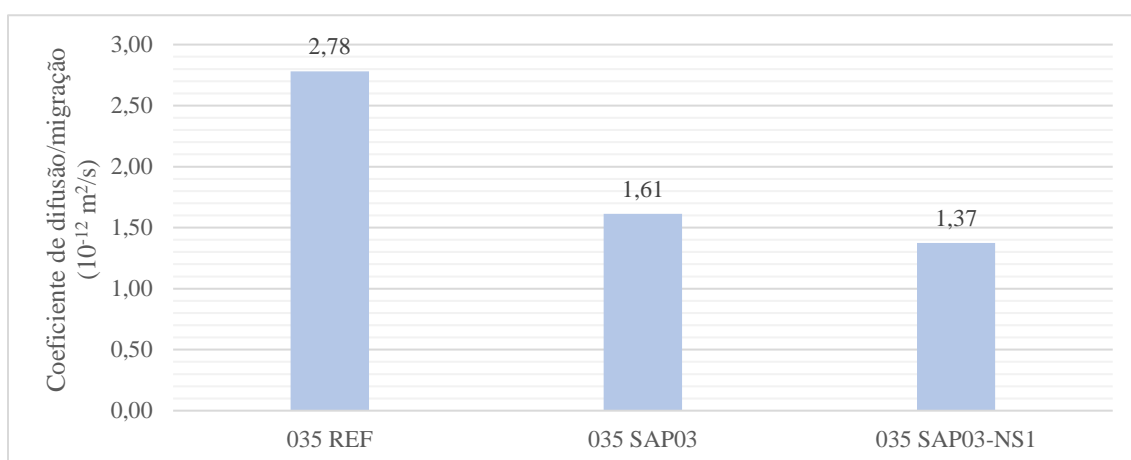


Figura 4- 10: Resultados médios do coeficiente de difusão obtido através do ensaio de migração de íons cloretos.

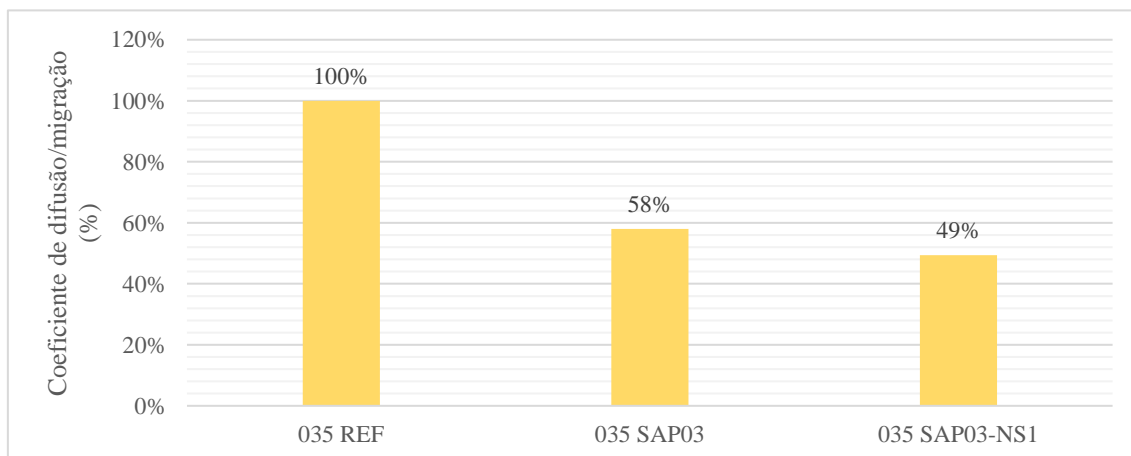


Figura 4- 11: Comparação percentual do valor do coeficiente de difusão para os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação à referência.

A mistura de referência obteve valor de coeficiente de migração igual a 2,78 e a mistura contendo SAP, valor igual a 1,61. Dessa forma, o valor encontrado na mistura contendo SAP é 42% menor que o valor encontrado para o microconcreto de referência. Quando se adiciona a nanossílica, o coeficiente de difusão é 51% menor que o valor de referência.

A partir dos valores encontrados para o coeficiente de difusão/migração de cloretos no regime não estacionário, Nilsson, Ngo e Gjörv (1998) *apud* Negredo (2018) apresenta uma classificação, por meio da Tabela 4-4, da resistência à penetração de cloretos em função do coeficiente de difusão/migração.

Tabela 4- 4: Classe de resistência à penetração dos íons cloro.

Difusão de cloretos ($D_{28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Resistência à penetração de cloretos
> 15	Baixa
10 – 15	Moderada
5 – 10	Alta
2,5 – 5	Muito alta
< 2,5	Extremamente alta

Fonte: (NILSSON; NGO; GJÖRV, 1998 *apud* NEGREDO,2018).

Diante da Tabela 4-4, conclui-se que o microconcreto de referência apresenta uma resistência à penetração de cloretos muito alta. Demonstrando que a relação água/cimento igual a 0,35 já promove um refinamento dos poros e uma microestrutura mais densa, justamente por ser um concreto de alta resistência. Esse refinamento dos poros pode ser explicado devido ao alto consumo de cimento, à baixa relação a/c e às adições minerais altamente reativas que desencadeiam maior presença de produtos de hidratação.

É notável que quando se adiciona o SAP à mistura, há uma diminuição do coeficiente de difusão de cloretos, tornado o microconcreto mais resistente à penetração de agente deletérios e, portanto, mais durável. A resistência à penetração de íons cloretos passa de muito alta para extremamente alta.

Observa-se, portanto, que microestrutura densa, característica do CAR, foi preservada mesmo na presença de poros criados pelo uso do SAP, possivelmente sendo poros maiores e desconectados em vez de poros menores e contínuos.

MA et al (2017) afirma que a formação da camada de difusão de hidratação refina o vazio causado pelo SAP reduzindo o efeito negativo do SAP na resistência e na permeabilidade. Os autores ainda observaram que para uma mesma relação a/c total, o SAP melhorou a estrutura dos poros da superfície e a impermeabilidade.

Ao analisar o efeito combinado do SAP com a NS, observa-se uma redução no coeficiente de difusão de íons cloreto. Observa-se uma redução de 49% em relação ao valor obtido ao REF e de 15% em relação ao traço contendo apenas SAP. Apesar de haver uma

diminuição no valor do coeficiente, não é possível afirmar que houve uma melhora na durabilidade desse microncreto, uma vez que a mistura contendo apenas SAP já apresentava penetração de íons cloretos extremamente alta.

4.4.1 Análise Estatística

A influência do teor de SAP e teor de NS no coeficiente de difusão de íons cloreto foi submetida a análise de variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados nas Tabela 4-5. O modelo mostrou um bom ajuste dos dados, tendo em vista o valor resultante do coeficiente de determinação do modelo (R^2_{mod}) igual a 0,96928.

Tabela 4- 5: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para o coeficiente de difusão/migração de íons cloreto.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	1,372817	1	1,372817	45,38237	0,021332	Significativo
Teor de NS	0,036100	1	0,036100	1,19339	0,388685	Não significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

Pelo gráfico de Pareto, Figura 4-12, e pela ANOVA, mais uma vez observa-se que o SAP tem influência na migração de íons cloreto, enquanto a adição de NS não é significativa.

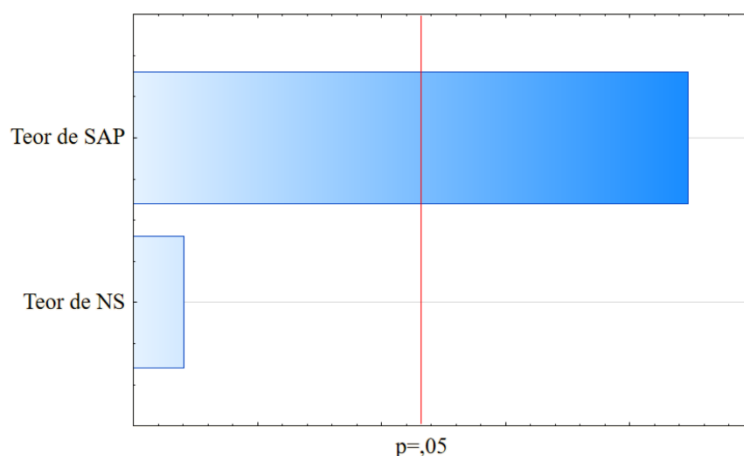


Figura 4- 12: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da migração de íons cloreto.

Isto posto, os resultados coletados em relação ao ensaio de migração para os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 são estatisticamente iguais. Outrossim, não se justifica a adição da nanossílica sob a ótica da durabilidade com base no ensaio de migração de íons cloreto. Por sua vez, a adição do SAP já é significativa para a melhora do compósito sobre esse aspecto da durabilidade.

4.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em três corpos de provas cilíndricos por traço, de 50 x 100 mm, após 28 dias de cura na câmara úmida. Na Figura 4-13 estão apresentados os resultados médios dos traços estudados. No Apêndice A, Tabela A-5, encontram-se os resultados individuais da absorção de água por capilaridade.

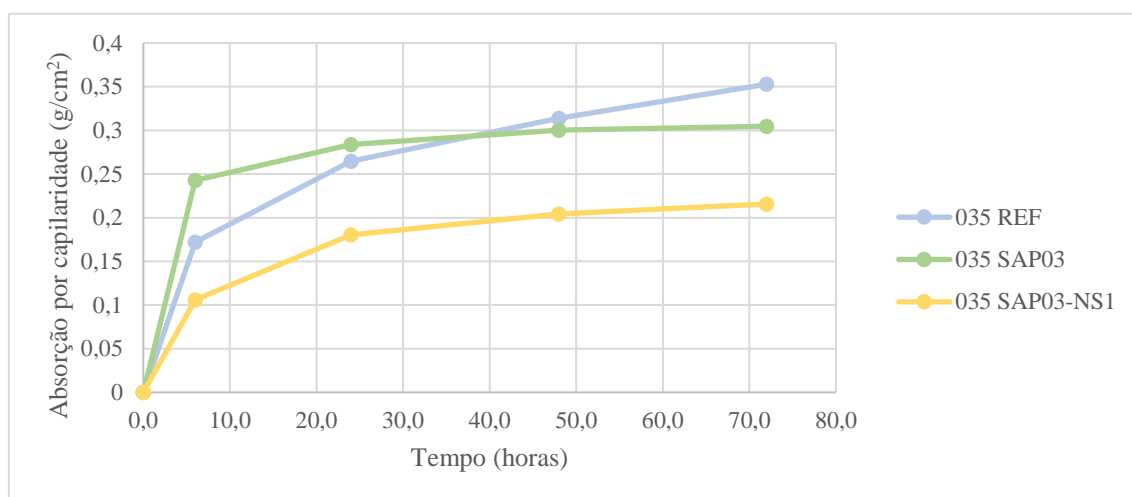


Figura 4- 13: Resultados médios da absorção por capilaridade em função do tempo.

Percebe-se que nas primeiras horas de ensaio, o traço contendo apenas SAP teve valores maiores de absorção que as demais misturas. Com o decorrer do ensaio, no entanto, o traço de referência (REF) atingiu absorções superiores. Assim, a mistura de referência é a qual apresenta o maior valor absorção por capilaridade (após finalização do ensaio) e, logo, apresentando menor desempenho nessa propriedade, como é possível verificar na Figura 4-14.

Conforme demonstrado na Figura 4-15, o traço 035 SAP03, em comparação com o traço de REF, apresentou um valor de absorção 12% menor. O traço contendo SAP e NS apresentou um valor de absorção 37% menor que o valor de referência e 30% menor em relação ao traço só com SAP.

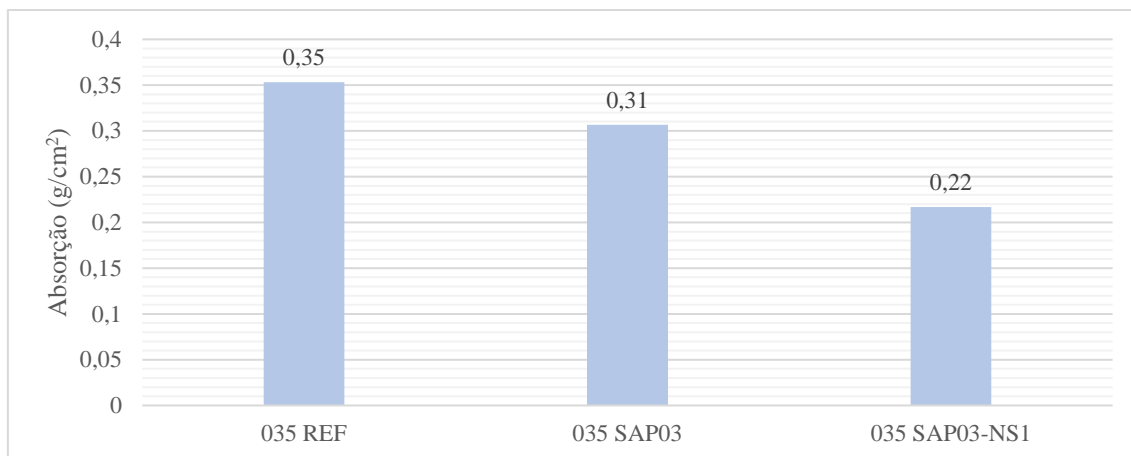


Figura 4- 14: Resultados médios obtidos para a absorção por capilaridade.

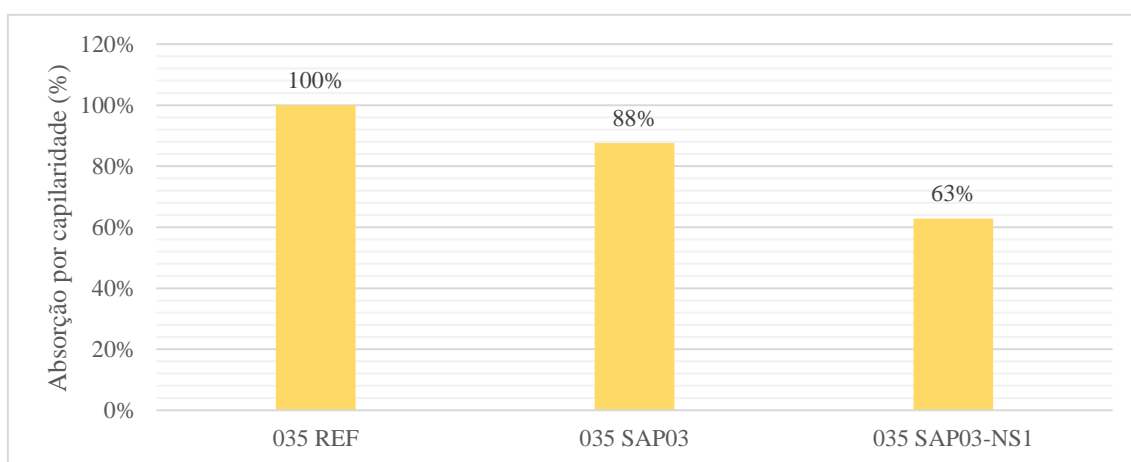


Figura 4- 15: Comparação percentual da absorção por capilaridade dos microconcretos 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação à referência.

O traço 035 SAP03-NS1 obteve valores de absorção durante todo o ensaio menores que os demais traços analisados, isso ocorreu provavelmente pela mudança da porosidade devido à presença de nanopartículas de sílica. Dessa forma, a quantidade de água absorvida pelo concreto tende a ser menor.

Para explicar uma menor absorção do traço 035 SAP03 quando comparado com o traço de referência duas hipóteses são levantadas. A primeira delas é que a porosidade adicional causada pelo desinchamento do polímero é pouco interconectada influenciando positivamente à propriedade de absorção, ou seja, diminuindo-a ao criar uma rede tortuosa e desconectada. A segunda hipótese está relacionada com a redução da autodessecação devido a adição do polímero superabsorvente, reduzindo por consequência a microfissuração do compósito e, assim, criando uma matriz cimentícia mais íntegra e, assim, apresentando uma menor capacidade de absorção.

Ma et al (2017) observaram que para uma mesma relação a/c total, o SAP reduziu a perda de massa de secagem e, melhorou a estrutura dos poros da superfície e a impermeabilidade. Ao mesmo tempo, a formação da camada de difusão de hidratação refina o vazio causado pelo polímero reduzindo o efeito negativo do SAP na permeabilidade.

Outro ponto interessante a se analisar, em relação a esse ensaio, é a altura de ascensão capilar no decorrer do ensaio. Na Figura 4-16, estão apresentados os resultados médios obtidos para as misturas realizadas, os dados individuais são apresentados no Apêndice A, Tabela A-6. Nota-se que de uma maneira geral, a ascensão capilar de todos foi bastante semelhante, sendo que o traço 035 SAP03-NS1 obteve uma maior ascensão capilar apesar de ter tido um menor valor de absorção de água por capilaridade.

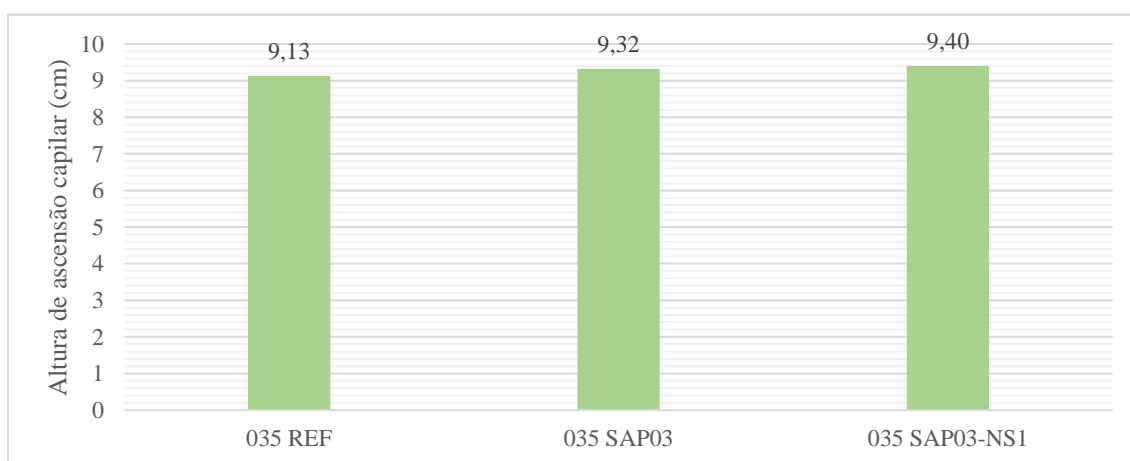


Figura 4- 16: Resultados médios da altura da ascensão capilar no ensaio de absorção por capilaridade.

Tal fato observado no traço 035 SAP03-NS1, pode ser explicado pelo preenchimento dos vazios devido ao refinamento dos poros ocasionado pela adição da nanossílica. Por causa desse preenchimento dos vazios tem-se que uma menor quantidade de água consegue penetrar dentro do concreto, mas com a redução dos meniscos formados e do aumento da tensão nesses meniscos, consequência também do refinamento dos poros, a água consegue obter uma maior ascensão capilar dentro dos concretos. Esse fenômeno dos meniscos foi explicado no item 2.2 deste trabalho.

O coeficiente de sorvidade (K_s) é uma forma de analisar comparativamente materiais de composições diferentes, uma vez que se trata de uma característica intrínseca do material (MEDEIROS et al., 2017). No gráfico da Figura 4-17 podem ser vistos os coeficientes de sorvidade dos concretos, obtidos por meio do procedimento descrito no item 3.5.5.

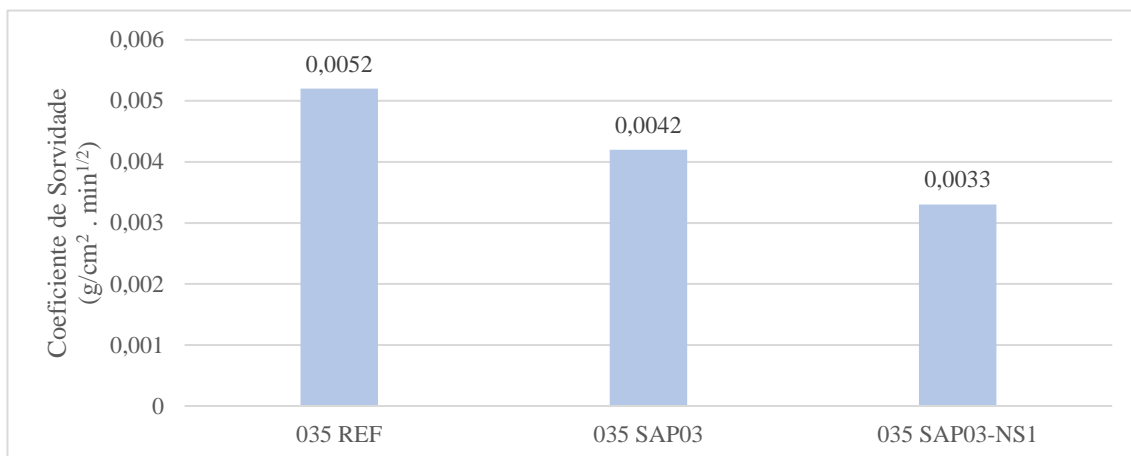


Figura 4- 17: Resultados do coeficiente de sorvidade obtidos através do ensaio de absorção por capilaridade.

O concreto de referência possui o maior valor de Ks. O traço 035 SAP03 possui um valor de Ks inferior em 19% quando comparado com o Ks do traço de referência (0,0052), e o traço 035 SAP03-NS1 possui um valor de Ks inferior em 21% quando comparado com o traço 035 SAP03 (0,0042) e inferior em 37% quando comparado com o traço de referência (0,0052). Dessa forma, percebe-se que a composição que possui o melhor desempenho em relação a absorção por capilaridade é o traço contendo SAP e NS.

4.5.1 Análise Estatística

A influência do teor de SAP e do teor de NS na absorção por capilaridade foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados nas Tabela 4-6. O valor resultante de R^2_{mod} foi igual a 0,78405. Foi aplicado o teste de Dixon para a eliminação dos dados espúrios.

Tabela 4- 6: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a absorção por capilaridade.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	0,001875	1	0,001875	1,48189	0,269181	Não significativo
Teor de NS	0,017430	1	0,017430	13,77544	0,009952	Significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

Dessa forma, pela a análise estatística, o teor de NS é significativo para o ensaio de absorção por capilaridade. Assim, o efeito de refinamento dos poros causada pela nanossílica, foi influente para a absorção do corpo de prova. Já os valores de absorção por capilaridade dos traços 035 REF e 035 SAP03, são estatisticamente iguais. A partir

do gráfico de Pareto da Figura 4-18, é possível visualmente verificar a significância da adição da NS.

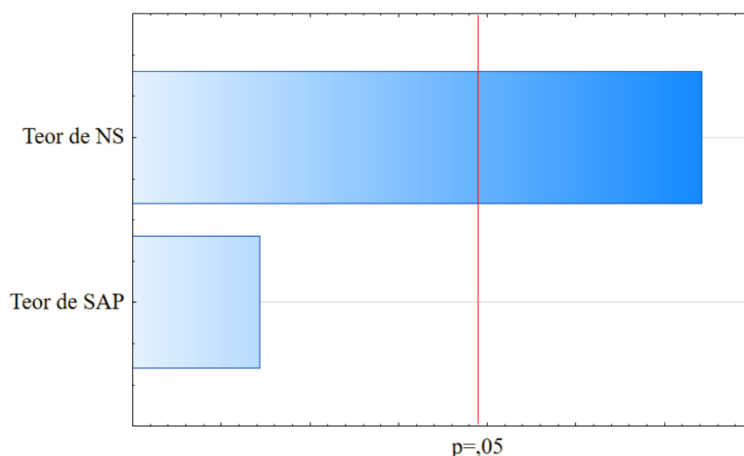


Figura 4- 18: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da absorção por capilaridade.

Os valores obtidos de altura da ascensão capilar também foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Todavia, o valor encontrado para o R^2_{mod} foi igual a 0,62805, este valor é considerado baixo (espera-se encontrar valores de R^2_{mod} acima de 0,70), não demonstrando uma boa comparação estatística. Por conseguinte, recomenda-se a repetição desse ensaio em mais corpos de prova.

De qualquer forma, o SAP diminuiu a absorção por capilaridade aos 28 dias de idade e a adição em conjunto do SAP com a NS promoveu ainda uma melhora no desempenho, por diminuir ainda mais o valor de absorção encontrada ao final do ensaio.

4.6 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado em três corpos de provas cilíndricos de 50 x 100 mm, após 28 dias de cura na câmara umida. Na Figura 4-19, estão apresentados os resultados médios dos traços estudados. Destaca-se que os valores de absorção nesse ensaio é representado em porcentagem. Foi aplicado o teste de Dixon para a eliminação dos dados espúrios. No apêndice A, Tabela A-7, encontram-se todos os resultados individuais obtidos para esse ensaio.

De forma semelhante ao ensaio de absorção por capilaridade, o traço de referência apresentou uma maior absorção por imersão que o restante dos traços analisados e o traço contendo SAP e NS foi o que apresentou a menor valor de absorção nesse ensaio.

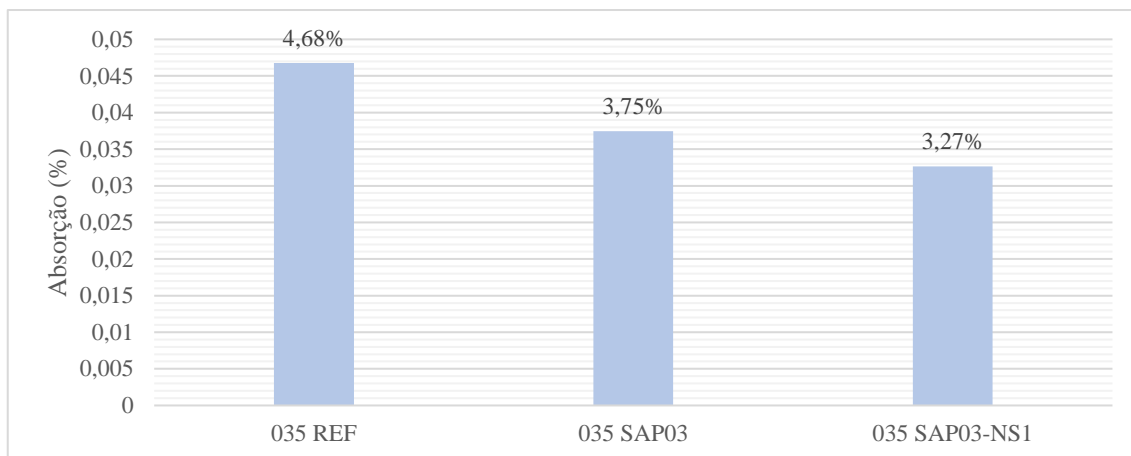


Figura 4- 19: Resultados médios obtidos de absorção por imersão.

Na Figura 4-20 é apresentada uma comparação entre os valores de absorção obtidos em relação ao valor encontrado para a mistura de referência. Nota-se que a absorção do traço 035 SAP03 representa apenas 80% do valor de absorção do traço 035 REF. A absorção do 035 SAP03-NS1, de forma semelhante ao ensaio anterior, foi a menor, representando apenas 70% do traço 035 REF e 87% do traço 035 SAP03.

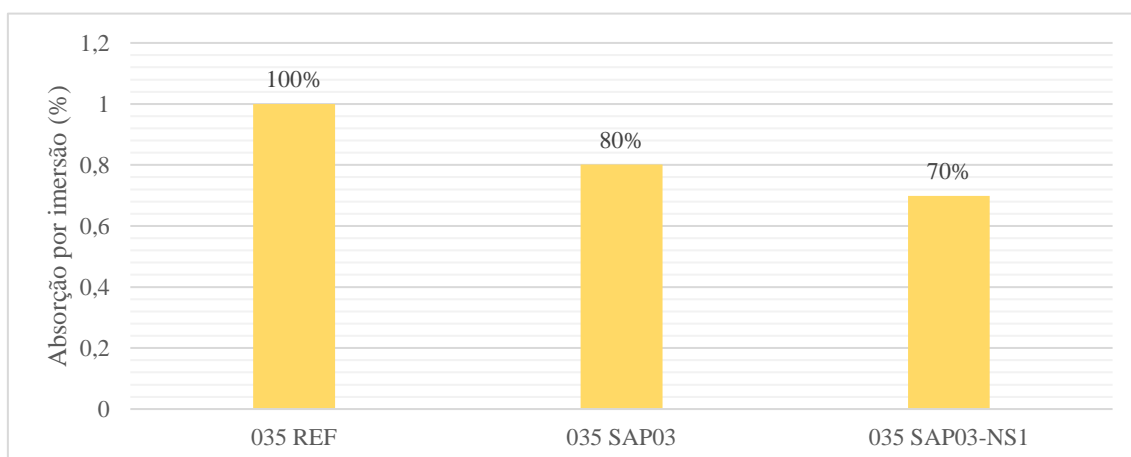


Figura 4- 20: Comparação percentual dos valores de absorção por imersão para os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1 em relação à referência.

Além dos valores de absorção, o ensaio em questão permite o cálculo de alguns outros parâmetros relacionados ao traço do concreto em estudo, dentre eles estão: índice de vazios, massa específica seca, massa específica saturada e a massa específica real. Na Tabela 4-7 são apresentados os parâmetros citados para as misturas realizadas.

O traço 035 SAP03-NS1 possui um menor valor de índice de vazios, resultado esperado por ser o traço com o menor valor de absorção por imersão. O menor valor encontrado para o terceiro traço pode ser explicado pelo refinamento dos poros do concreto, devido a presença da nanossílica.

Outro ponto extremamente relevante é que o índice de vazios do 035 SAP03 é menor que o traço de referência, resultado este corrobora para os valores inferiores de absorção encontrados, sendo que a explicação para isso está nas hipóteses já citadas: diminuição das microfissuras e a baixa interconectividade dos poros deixados pelo polímero após o processo de dessorção.

Tabela 4- 7: Parâmetros obtidos através do ensaio de imersão.

Parâmetros	035 REF	035 SAP03	035 SAP03-NS1
Índice de Vazios (%)	10,32	8,32	7,14
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,21	2,22	2,19
Massa Específica Saturada (g/cm ³)	2,31	2,30	2,26
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,46	2,42	2,36

4.6.1 Análise Estatística

A influência do teor de SAP e do teor de NS na absorção por imersão em corpos de prova cilíndricos (50x100 mm) foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados nas Tabela 4-8. O coeficiente de determinação do modelo (R^2_{mod}) foi a 0,73492.

Tabela 4- 8: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a absorção por imersão.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	0,000051	1	0,000051	3,698199	0,102827	Não significativo
Teor de NS	0,000093	1	0,000093	6,776063	0,040494	Significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

O gráfico de Pareto da Figura 4-21 mostra que a adição da NS é estatisticamente importante, ou seja, significativa para o fenômeno de absorção quando os corpos de prova estão totalmente imersos. Fato este que corrobora ao verificado pela análise similar para a propriedade de absorção por capilaridade. Demonstrando uma consistência e validação dos dados encontrados para os dois ensaios de absorção que a nanossílica interfere na propriedade absorção de modo geral, e conseqüentemente, promovendo uma melhora no desempenho do compósito em relação à durabilidade.

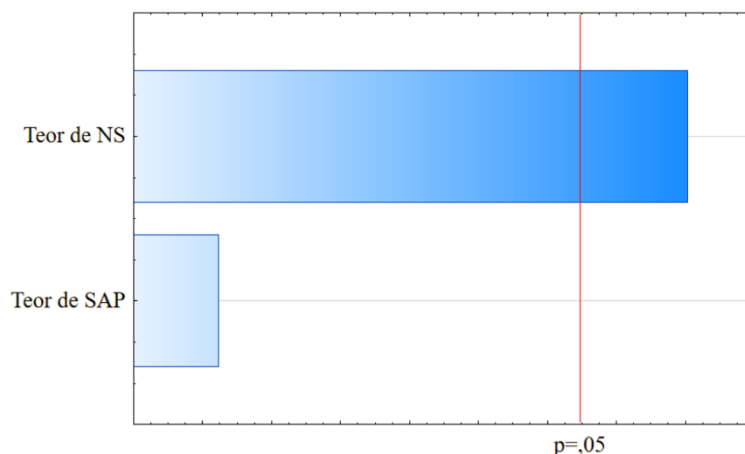


Figura 4- 21: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da absorção por imersão.

4.7 ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O ensaio de resistividade elétrica superficial e volumétrica foram realizados com três corpos de provas por traço, com as dimensões de 100 x 200 mm, nas idades de 28 e 70 dias. No gráfico da Figura 4-23, pode-se verificar os valores médios encontrados para o ensaio de resistividade elétrica superficial para as idades de 28 e 70 dias por traço estudado. Os dados individuais podem ser encontrados no Apêndice A, Tabelas A-8, A-9 e A-10. Foi aplicado o teste do T-unilateral para a eliminação dos dados espúrios.

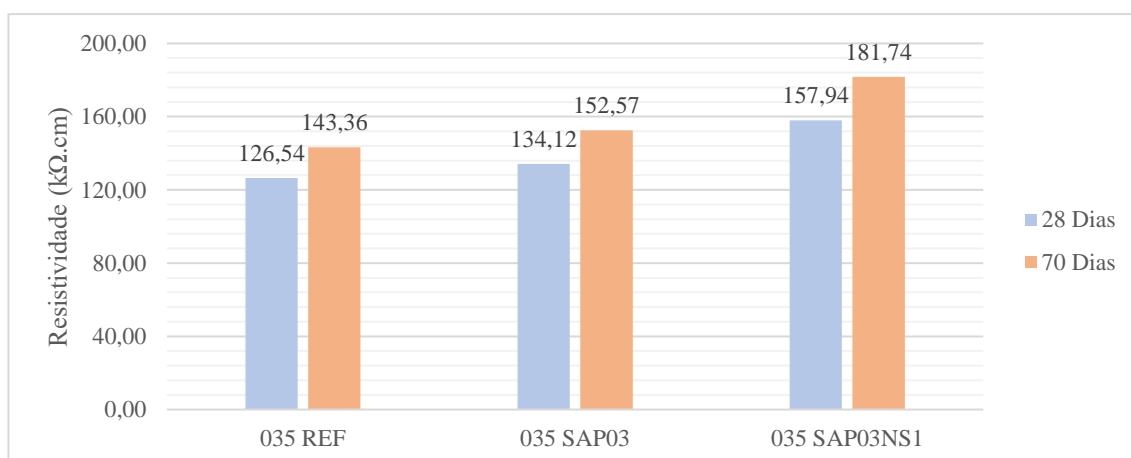


Figura 4- 22: Resultados médios do ensaio de resistividade elétrica superficial por traço estudado e por data de ensaio.

O traço 035 SAP03-NS1 apresentou maiores valores de resistividade elétrica superficial. A resistividade elétrica está relacionada à permeabilidade do concreto a fluidos e a difusividade de íons através da porosidade do material. Quanto maior a resistividade elétrica, melhor é a durabilidade do concreto. Dessa forma, o microconcreto composto

por SAP e NS apresenta um melhor desempenho em relação à durabilidade, tendo uma menor possibilidade de sofrer corrosão na armadura.

Outro ponto interessante a se observar é que a resistividade dos traços em 70 dias é sempre maior que em 28 dias. Isso é justificável pelo processo de hidratação do cimento. A resistividade elétrica do concreto depende do grau de hidratação do cimento e eleva-se com o aumento deste devido a diminuição da condução iônica por meio da água que estava presente para o processo de hidratação, conforme colocado por HELENE (1993).

No gráfico da Figura 4-24, são apresentados os valores encontrados para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica para as idades de 28 e 70 dias por traço estudado.

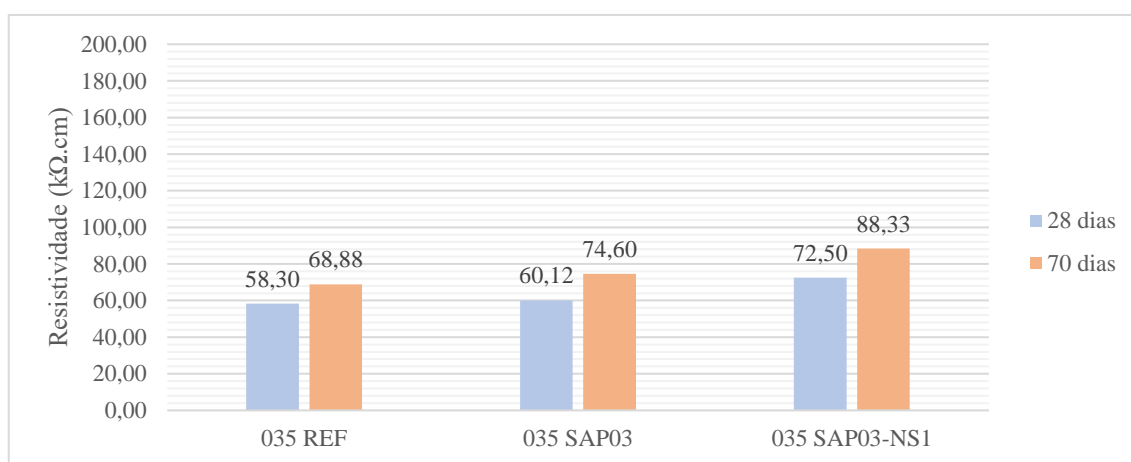


Figura 4- 23: Resultados médios do ensaio de resistividade elétrica volumétrica por traço estudado e por data de ensaio.

Nota-se que o traço 035 SAP03-NS1 obteve um maior valor de resistividade tanto para 28 dias quanto para 70 dias. De forma semelhante ao ensaio anterior, os resultados obtidos em 70 dias para cada traço são sempre superiores aos obtidos para 28 dias. O aumento do valor da resistividade volumétrica para a idade de 70 dias também é explicado pela maior hidratação do cimento nessa idade.

Na Tabela 4-9, são apresentados os valores de resistividade elétrica indicativos da probabilidade de corrosão nas estruturas de concreto, baseados no CEB – 192 e no COST 509.

Tabela 4- 9: Valores de resistividade elétrica com indicativos da probabilidade de corrosão do concreto, segundo CEB – 192 e o boletim europeu COST 509 (Fonte: Ribeiro et al., 2014).

Resistividade (kΩ.cm)		Risco de Corrosão
CEB – 192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
-	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	-	Muito Alto

De posse dos resultados a 28 dias de resistividade volumétrica apresentados, foi realizada a classificação dos concretos quanto ao risco de corrosão e à penetração de cloretos, conforme apresentado na Tabela 4-10.

Tabela 4- 10: Classificação dos resultados do Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica quanto a risco de corrosão pelo CEB-192 e COST 509; e quanto a penetração de cloretos pela AASHTO TP 119:15.

Traço	Risco de Corrosão		Classificação quanto à penetração de cloretos
	CEB-192	COST 509	AASHTO TP 119:15
035 REF	Desprezível	Baixo	Muito Baixa
035 SAP03	Desprezível	Baixo	Muito Baixa
035 SAP03-NS1	Desprezível	Baixo	Muito Baixa

Observa-se que o traço 035 REF foi classificado com risco de corrosão desprezível (CEB – 192) e baixo (COST 509 e AASHTO TP 119:15). O mesmo se repetiu para os traços 035 SAP03 e 035 SAP03-NS1.

Na classificação proposta pela AASHTO TP 119:15, as três misturas avaliadas apresentam mesma classe: muito baixa penetração de íons cloreto. Todavia, ao analisar os resultados obtidos com o ensaio de migração de íons cloreto, o traço 035 REF é classificado como resistência alta à penetração de íons e os demais traços com resistência extremamente alta. Assim sendo, ao comparar os resultados dos dois ensaios, observa-se que há uma coerência entre eles – em ambos os ensaios as três misturas tem um bom desempenho – porém, o ensaio de resistividade não identifica a melhora ao se adicionar o SAP e NS.

Os valores de resistividade elétrica superficial também foram classificados quanto ao risco de corrosão. A classificação está apresentada na Tabela 4-11. Em relação a resistividade elétrica superficial, o risco de corrosão é desprezível ou baixo.

Tabela 4- 11: Classificação dos resultados do Ensaio de Resistividade Elétrica Superficial quanto a risco de corrosão pelo CEB-192 e COST 509.

Traço	Risco de Corrosão	
	CEB-192	COST 509
035 REF	Desprezível	Desprezível
035 SAP03	Desprezível	Desprezível
035 SAP03-NS1	Desprezível	Desprezível

Nota-se que para ambos os ensaios, resistividade elétrica superficial e volumétrica, não se justifica qualitativamente a adição de nanossílica e nem do polímero superabsorvente, pois as classificações continuaram as mesmas para todos as misturas.

Isto posto, diante dos critérios analisados, o SAP nem a NS representam uma melhora quanto ao risco de corrosão, logo, não representam um incremento à durabilidade dos microconcretos. Pontua-se que tais conclusões tem como base os resultados obtidos à condição de cura controlada, as microfissuras podem mudar essa tendência.

4.7.1 Análise Estatística

A influência do teor de SAP e do teor de NS no ensaio de resistividade elétrica em corpos de prova cilíndricos (100x200 mm) foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e os resultados para a resistividade elétrica superficial e volumétrica estão apresentados nas Tabela 4-12 e Tabela 4-13 respectivamente. A ANOVA mostrou um bom ajuste do modelo, tendo em vista o valor resultante de R^2_{mod} igual a 0,9565.

Tabela 4- 12: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a resistividade elétrica superficial.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	1305,83	1	1305,83	5,87759	0,016658	Significativo
Teor de NS	11890,48	1	11890,48	53,51956	0,000001	Significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

Tabela 4- 13: Análise da variância (ANOVA) realizada para os dados de teor de SAP e teor de NS para a resistividade elétrica volumétrica.

Fator	SQ	C	MQ	F	p	Resultado
Teor de SAP	3216,373	1	3216,373	1736,152	0,000001	Significativo
Teor de NS	69,262	1	69,262	38,388	0,000001	Significativo

Nota: SQ = soma dos quadrados; C = número de categorias; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

A partir dos gráficos de Pareto, Figuras 4-25 e 4-26, observa-se de maneira bem visual que tanto o SAP quanto a NS são significativos para a resistividade do microconcreto, independente se o ensaio é feito de forma volumétrica ou superficial.

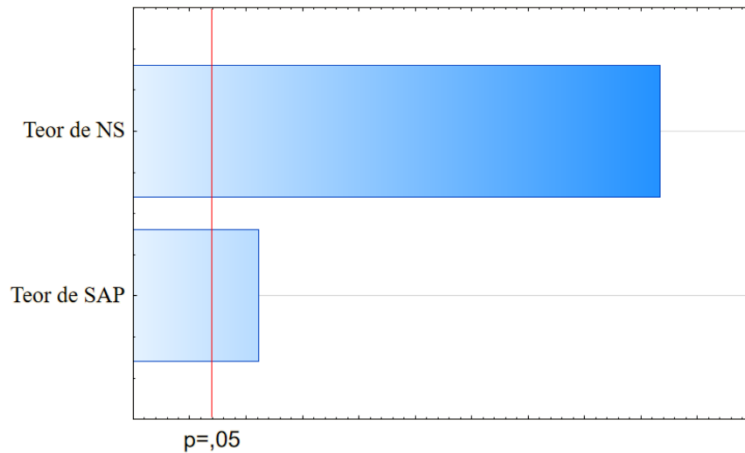


Figura 4- 24: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da resistividade elétrica superficial.

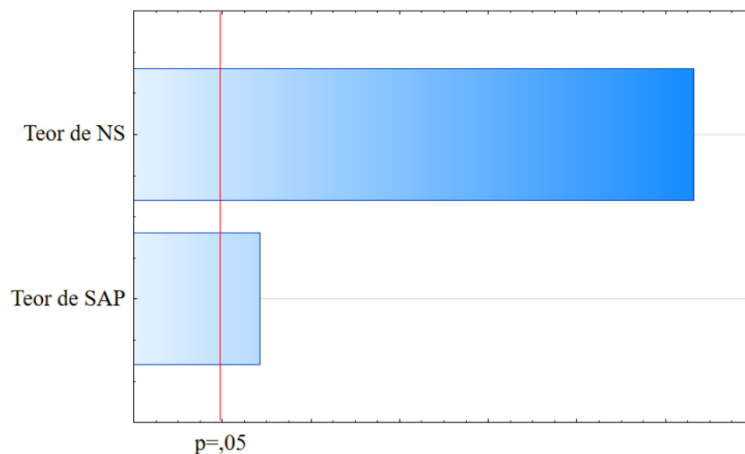


Figura 4- 25: Gráfico de Pareto que permite analisar os efeitos do teor de SAP e NS com significância na análise de variância da resistividade elétrica volumétrica.

Outrossim, como já foi exposto anteriormente, o traço de referência possui níveis baixos ou desprezíveis de corrosão e quando adicionamos os percentuais de nanossílica (1%) e polímero superabsorvente (0,3%) os níveis continuaram nas mesmas classificações. Isto posto, observa-se que os teores de adições citados não possuem relevância para a propriedade de resistividade dos concretos sob análise qualitativa e prática.

Todavia, é importante destacar que a análise estatística realizada foi para um pequeno número de amostras, em todos os ensaios; e, para uma maior validação de dados e uma análise de variância mais consistente deve-se considerar um maior número de amostras.

4.8 RESUMO DO CAPÍTULO 4

Em relação ao ensaio de espalhamento, observou-se que tanto o SAP quanto a NS afetam a reologia do microconcreto, e por isso houve a necessidade de utilizar diferentes teores de superplastificante para obter o mesmo espalhamento especificado.

A partir dos dados obtidos de resistência à compressão simples, nota-se um ganho de resistência, em todas as idades, ao se adicionar a nanossílica. Nas idades iniciais, 1 e 7 dias, o SAP desencadeou uma queda na resistência à compressão (35% e 7% respectivamente). Já na idade de 28 dias, a mistura contendo SAP recuperou a resistência perdida inicialmente, alcançando a resistência observada no traço de referência. Para a idade de 70 dias, o SAP promoveu um ganho considerável na resistência (31%).

É importante ressaltar que a adição de NS promove grandes ganhos de resistência nas primeiras idades (aumento de até 60% em relação ao traço 035 SAP03); logo, sua incorporação na matriz cimentícia seria recomendada quando se deseja resistência elevadas nas idades iniciais.

Uma vez que a resistência para o traço REF e SAP é a mesma na idade (para 28 dias), pode-se concluir que a comparação mais correta é de fato utilizando uma composição de referência com mesma a/c total, como realizado nessa pesquisa, comprovando que a água de cura interna participa do processo de hidratação e deve ser considerada na relação a/c total.

Ademais, a redução nas primeiras idades (1 dia) observada na resistência, no traço contendo SAP, provavelmente se deve a um incremento da porosidade dos microconcretos devido à introdução de partículas do polímero, uma vez que ao entrarem em contato com água, incham absorvendo água e aumentam de volume, deixando vazios na matriz cimentícia.

A adição de 0,3% de SAP representou um aumento de 7% no módulo de elasticidade, enquanto o uso desse teor de SAP combinado com 1% de NS promoveu um aumento em 9% valor de módulo de elasticidade obtido em relação à referência.

Observou-se que ao se utilizar corpos de prova de dimensões de 100x200 mm os valores de resistência à compressão foram reduzidos em até 7% em comparação aos resultados encontrados ao fazer uso de corpo de prova de dimensões 50x100 mm.

A análise estatística demonstrou que de fato a dimensão do corpo de prova não é um fator significativo para a resistência aos 28 dias. Logo, os dados obtidos experimentalmente indicam que não há prejuízo à análise da resistência à compressão simples ao se utilizar corpo de prova de menor, 50x100 mm.

No ensaio de migração de íons cloreto, foi possível observar que ao se adicionar o SAP à mistura, há uma diminuição em 42% do coeficiente de difusão de cloretos. Ao se adicionar o SAP, a resistência à penetração de íons cloreto passa de muito alta para extremamente alta, demonstrando uma melhora não só quantitativa, mas qualitativa também. Com base na análise estatística dos coeficientes de difusão encontrados e pela classificação proposta pela norma, conclui-se que a adição de 1% de NS não é significativa quando utilizada com 0,3% de SAP para a melhora na resistência à penetração de íons cloreto.

Nos ensaios de absorção por capilaridade e absorção por imersão o traço de referência apresentou um menor desempenho, ou seja, apresentou valores maiores de absorção para ambos os ensaios. O traço 035 SAP03, obteve um valor de absorção menor que o traço de referência em 13% e 20% respectivamente. Essa redução parece ser devido à pequena interconexão entre os poros deixados pelo polímero superabsorvente e a redução da autodessecação do traço contendo SAP, reduzindo por consequência a microfissuração e a absorção desse traço de concreto.

O traço contendo nanossílica apresentou os menores valores de absorção para ambos os ensaios. Para o ensaio de absorção por capilaridade o resultado do 035 SAP03-NS1 foi 39% menor que o traço de referência e 29% menor que o traço 035 SAP03. Para o ensaio de absorção por imersão o resultado do 035 SAP03-NS1 foi 30% menor que o traço de referência e 13% menor que o traço 035 SAP03. Essa redução pode ser explicada pelo refinamento dos poros do concreto pelo preenchimento dos vazios devido a presença das nanopartículas de sílica.

Em contrapartida ao ensaio de absorção capilar, o traço contendo NS apresentou a maior ascensão capilar após o ensaio de absorção de água por capilaridade. Esse resultado pode ser explicado também pelo processo de refinamento dos poros ocasionado pela adição de nanossílica, porque apesar de diminuir a porosidade do concreto, esse processo diminui o tamanho dos meniscos formados, aumentando a tensão capilar, fazendo com que a água

que está presente dentro do concreto, mesmo que em menor quantidade, consiga alcançar maiores alturas de ascensão capilar.

No ensaio de resistividade elétrica superficial e volumétrica nota-se que os resultados para 70 dias foram sempre superiores que os resultados encontrados para 28 dias. Além disso, foi possível perceber que qualitativamente a adição dos teores utilizados na pesquisa, tanto para NS quanto para o SAP, não se justifica para os ensaios de resistividade, uma vez que os riscos de corrosão e de penetração de cloretos continuaram “Desprezíveis” ou “Baixos” tanto para o traço de referência quanto para os traços com adição.

Na Tabela 4-14 é apresentado um resumo dos resultados experimentais obtidos nessa pesquisa e uma síntese da análise de variância (ANOVA) realizada para cada ensaio.

Tabela 4- 14: Resumo dos resultados médios obtidos e síntese da análise de variância realizada para cada ensaio.

ENSAIOS	Idade (dias)	035 REF	035 SAP03	035 SAP03-NS1	Teor de SAP	Teor de NS
Resistência à Compressão Axial (MPa)	1	40,2	25,9	41,5	Não Significativo	Não Significativo
	7	62,6	58,0	70,3		
	28	72,9	72,6	78,1		
	70	70,0	91,4	91,7		
Módulo de Elasticidade (GPa)	28	35,1	37,7	38,2	Significativo	Não Significativo
Migração De Íons Cloreto ($10^{-12}m^2/s$)	28	2,78	1,61	1,37	Significativo	Não Significativo
Classe de resistência à penetração dos íons cloro.		Muito Alta	Extremamente Alta	Extremamente Alta		
Absorção por Capilaridade (g/cm^2)	28	0,35	0,31	0,22	Não Significativo	Significativo
Absorção por Imersão (%)	28	4,68	3,75	3,27	Não Significativo	Significativo
Resistividade Elétrica Superficial ($K\Omega.cm$)	28	126,54	134,12	157,94	Significativo	Significativo
	70	143,36	152,57	181,74		
Risco de Corrosão CEB-192		Desprezível	Desprezível	Desprezível		
Risco de Corrosão COST 509		Desprezível	Desprezível	Desprezível		
Resistividade Elétrica Volumétrica ($K\Omega.cm$)	28	58,30	60,1	72,50	Significativo	Significativo
	70	68,88	74,60	88,33		
Risco de Corrosão CEB-192		Desprezível	Desprezível	Desprezível		
Risco de Corrosão COST 509		Baixo	Baixo	Baixo		
Classificação quanto à penetração de cloretos AASHTO TP 119:15		Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa		

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relacionadas à pesquisa desenvolvida, a qual teve como enfoque a avaliação da durabilidade de microconcretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica. Foram avaliados os efeitos da adição de 0,3% de SAP e da ação combinada de 0,3% de SAP com 1% de NS nas propriedades mecânicas e na durabilidade. A premissa da pesquisa foi manter fixo o espalhamento e o teor de SP variável. Todos os três traços apresentaram relação a/c total igual a 0,35.

- Com base nos resultados de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, conclui-se que o SAP não traz prejuízo às propriedades mecânicas, promovendo até mesmo uma melhora nas propriedades, quando comparado com uma mistura de referência com a mesma relação a/c total;
- Em relação à resistência, o prejuízo à resistência desencadeada pela adição do SAP nas primeiras idades (redução de até 35%), é totalmente compensada aos 28 dias. Observa-se até mesmo incremento nessa propriedade (aumento em 31%) aos 70 dias. Já em relação ao módulo de elasticidade, a adição de 0,3% de SAP promoveu um aumento de 7%;
- Ao analisar o efeito combinado da adição de SAP e NS nas propriedades mecânicas, observa-se que para 1 dia a nanossílica representou um acréscimo de 60% no valor da resistência à compressão. Tal crescimento pode ser muito relevante para a melhora do desempenho mecânico de concretos de alta resistência, pois nas primeiras idades é quando a retração autógena é mais crítica, uma vez que o microconcreto ainda não apresenta resistência suficiente para resistir às tensões induzidas de tração. Logo, a NS demonstra-se como uma estratégia que pode ajudar a mitigar a retração autógena, contribuindo para o desempenho mecânico do microconcreto;
- A adição de 1% de NS com 0,3% de SAP não representa melhora das propriedades mecânicas aos 28 dias pois o crescimento é irrisório nos valores resistência e módulo (7% e 0,1%, respectivamente) nessa idade, quando comparado com o traço contendo apenas SAP;

- Ao se utilizar corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, os valores resistência à compressão são ligeiramente menores, a redução observada varia de 3% a 7%, porém essa redução não é representativa estatisticamente;
- Dos 5 ensaios realizados para análise da durabilidade, o SAP demonstrou em todos uma melhora quantitativa nos resultados em relação à referência. Porém, o SAP só foi relevante qualitativamente e estatisticamente, em um deles (ensaio de migração de íons cloreto). Logo, o SAP não traz prejuízo à durabilidade dos microconcretos, promovendo até uma certa melhora, que deve ser mais investigada e avaliada se é realmente significativa ou não;
- O traço contendo 0,3% de SAP combinado com 1% de NS é o que apresentou melhor desempenho nos 5 ensaios relacionados à durabilidade, demonstrando que a adição da NS não traz prejuízos à durabilidade;
- Todavia, como o traço de referência apresentou um desempenho em relação à durabilidade já muito elevado, pode-se concluir que a baixa relação a/c total (0,35) utilizada nessa pesquisa é suficiente para a manutenção da durabilidade ao já apresentar uma microestrutura muito densa e conseqüentemente menos porosa e mais resistente à entrada de agentes deletérios.
- A água de cura interna participa do processo de hidratação e precisa ser incorporada na relação água/cimento. Assim sendo, a correta comparação de traços envolvendo polímeros superabsorvente é com a relação a/c total, na qual está inclusa a quantidade de água a ser absorvida pelo polímero nas idades iniciais.

Diante do exposto, a adição de SAP não acarreta perda à propriedade mecânica ou à durabilidade dos microconcretos, promovendo até um incremento nessas propriedades. Os resultados indicam que a microestrutura densa, característica do CAR, é preservada mesmo na presença de poros criados pelo processo de dessorção do SAP, por serem poros maiores e desconectados em vez de poros menores e contínuos.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Uma vez que os teores de superplastificante se encontram acima do permitido pelo fabricante, pode-se optar pelo uso de concretos com relação a/c superior a 0,35, por apresentarem maior trabalhabilidade;
- Realizar a análise da durabilidade com outros teores de SAP e NS;
- Analisar se há interferência do tamanho dos corpos de prova nos resultados de absorção, por isso, recomenda-se repetir os ensaios de absorção por capilaridade e por imersão para corpos de prova 100x200, para avaliar o efeito escala sob a ótica da capacidade de absorção;
- Repetir o ensaio de absorção de capilaridade com mais espécimes e até em outras idades, uma vez que a análise estatística do coeficiente de absorção e da altura da ascensão calcular foi inconclusiva, já que para a altura de ascensão capilar o SAP é significativo e para absorção capilar não;
- Recomenda-se para as próximas pesquisas, ensaiar mais espécimes por ensaio, para uma mesma idade, para que seja possível uma avaliação estatística mais consistente;
- Sugere-se a investigar a microestrutura, realizando o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia por varredura eletrônica para conhecer as dimensões e distribuições dos poros na matriz cimentícia;
- Propõe-se realizar o ensaio de carbonatação acelerada como mais um critério para a avaliação da durabilidade;
- É interessante a análise da durabilidade em prazos mais longos, por isso recomenda-se a repetição dos ensaios de migração e de absorção para a idade de 70 dias também.

REFERÊNCIAS

- AİTCIN, P.C. **Curing high performance concrete to minimize shrinkage: High-performance concrete Series 5**. 1 ed. E. & FN Spon, 1998.
- AİTCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. 1a. ed. Oxon, United Kingdom: Taylor & Francis, 2008.
- AGOSTINHO, L. B. **Estudo reológico de pastas de cimento contendo polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p. 2017.
- AGOSTINHO, L. B. **Monitoramento da Hidratação de Pastas de Cimento Portland contendo Polímero Superabsorvente e Nanosilica**. Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 116p. 2019.
- ASSMANN, A. **Physical Properties of Concrete Modified with superabsorbent polymers**. Tese doutorado, Universidade de Stuttgart, Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. Stuttgart - Alemanha, 213p. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953, Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 3p. 2015.
- _____. **NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 6p. 2015.
- _____. **NBR 5739, Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 9p. 2018.
- _____. **NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 238p. 2014.
- _____. **NBR 11768, Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 19p. 2011.
- _____. **NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 3p. 2011.
- _____. **NBR 7215, Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 8p. 1996.
- _____. **NBR 7222, Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 5p. 2011.
- _____. **NBR 7211: Agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011. 9 p.
- _____. **NBR 8522, Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 16p. 2017.

_____. **NBR 9778, Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 4p. 2005.

_____. **NBR 9779, Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 3p. 2012.

_____. **NBR 9204, Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 12p. 2012.

_____. **NBR 8953, Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 3p. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G57:2012 - Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.**, 2012.

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

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o Statística** 1a edição ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2003.

CARVALHO, S. **Estatística básica.** Rio de Janeiro: Campus-Elsevier, 2006. 464p.

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, Brasília, DF 2012.

COURA, C. V. G. **Estudo da influência da dimensão do agregado e do corpo-de-prova na resistência axial do concreto.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niteroi, RJ, 2006.

COUTO, P. B. **Caracterização reológica de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** Ed. G. C. Isaia, IBRACON, Cap. 12, pp.345-379, São Paulo, 2005

DIN 18555-2, **Testing Of Mortars Containing Mineral Binders - Freshly Mixed Mortars Containing Aggregates Of Dense Structure (heavy Aggregates) - Determination Of Consistence, Bulk Density And Air Content.** 1982.

DUDZIAK, L. e MECHTCHERINE, V. **Enhancing early-age resistance to cracking in highstrength cement-based materials by means of internal curing using superabsorbent polymers.** In: Brameshuber W (ed) Additions improving properties of concrete, RILEM Proceedings PRO 77, pp 129–139. 2010.

ESTEVEZ L.P. **Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid.** Cement and Concrete Composites. Vol. 33(7), p. 717–724, 2011.

FALLAH, S.; NEMATZADEH, M. **Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica-fume.** Elsevier. Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Construction and Building Materials 132, Babolsar, Iran. 2017.

FRIEDRICH, S.V. **Superabsorbent Polymers (SAP).** In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 3, 2012.

GJØRV, O. E. **Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** FIGUEIREDO, E. P. HELENE, P. (Edição traduzida) São Paulo. Editora Oficina de Textos. 238 p., 2015.

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-altaresistencia-79916-1.aspx>>. Acesso em: 13 de outubro de 2018.

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.

HASHOLT, M. T.; JENSEN, O.M. **Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers.** Elsevier. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Building 118, Brovej, DK-2800 Lyngby, 2015.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOU, P.; KAWASHIMA, S.; DAVID, J.; QUIAN, J.; SHAH, S. P. **Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash–cement mortar.** Elsevier. Cement & Concrete Composites, 2013.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920-12:2015 – Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method.** Geneva, Switzerland.

JENSEN, O. M. **Water Absorption of Superabsorbent Polymers in a Cementitious Environment.** In: International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering, Hong Kong, China. RILEM Pro079, pp. 22-35, 2011.

JENSEN, O. M. e HANSEN, P.F. **Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background.** In: Cement and Concrete Research, v. 31, n. 6, p. 647-654, 2001a.

JENSEN, O. M. e LURA, P. **Techniques and materials for internal water curing of concrete.** In: Materials and Structures, No. 39, pp. 817-825, 2006.

KIATKAMJORNWONG, S. **Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites**. ScienceAsia, Bangkok, 33, december 2006. 39-43.

KLEMM, A.; SIKORA K. **Superabsorbent polymers in cementitious composites**. **Construction Materials and Structures**, 57 – 67, 2012.

KONG, X.M.; ZHANG, Z.L.; LU, Z.C. **Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete**. In: Materials and Structures, Vol. 48, Nro. 9, p. 27412758. 2014.

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.

KUMAR, M. M.; MARUTHACHALAM, D. **Experimental Investigation on Self-curing Concrete**. International Journal of Advanced Scientific and Technical Research Issue 3, volume 2, March-April, 2013

KUMM, T.C. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 159p. 2009.

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**. Tese de doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 257 p. 2011.

LURA, P., DURAND, F., JENSEN, O. M. **Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers**. Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. RILEM Proceedings PRO 52, O. M. Jensen et al. (eds.), RILEM Publications S.A.R.L., 2006. PP. 57-66.

MANZANO, M. A. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como Agentes de Cura Interna**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 324 p. 2016.

MATINS, D. G. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia – Go**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Goiás, Escola de Engenharia, Goiânia, GO, 2008.

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.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3a. ed. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2014.

MIRANDA, L. R. M. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e

Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p. 2018.

MÖNNIG, S. **Superabsorbing additions in concrete – applications, modelling and comparison of different internal water sources**. Tese doutorado, Universidade de Stuttgart, Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. Stuttgart - Alemanha, 164pp, 2009.

MONNIG, S. **Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete**. In: Otto-Graf-Journal 16, pp. 193-202, 2005.

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, Brasília, DF, 64p. 2014.

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. 188p.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo, 5ª ed., Pini. 2016.

NETO, W. N. A; **Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação de retração autógena em microconcretos de alta resistência**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106 p. 2014.

NORTHERN TERRITORY LEGISLATIVE ASSEMBLY. NT BUILD. **492:2011 - Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.**, 2011.

NUNES, D. G. **Carbonatação Acelerada em Concretos Compostos Com Cinza de Casca de Arroz de Diferentes Teores de Carbono Grafítico**. Dissertação. Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 148p. 2014.

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, Brasília, DF, 160p. 2013.

QUERCIA, G. **Application of nano-silica in concrete**. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 2014

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

POURJAVADI, A. FAKOORPOOR, S. M.; KHALOO, A.; HOSSEINI, P. **Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles**. Materials and Design, v. 42, p. 94–101, 2012.

REIS, P. F. O. **Previsão da Retração em Pasta de Cimento Endurecida contendo Nano Partículas de Sílica e Polímero Superabsorvente com Abordagem Poroviscoelástica**. Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p.181, 2018.

REINHARDT, H. W., ASSMANN, A. **Effect of Superabsorbent Polymers on durability of concrete**. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP, Springer, Heidelberg (Germany), 2012

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análises**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014

RILEM. **State-of-the-art report of the Rilem Technical Committee 196-ICC: Internal curing of concrete**. Ed. Springer, 2007.

RILEM. **State-of-the-art report of the Rilem Technical Committee 225-SAP: Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction**. Mechtcherine, V. & Reinhardt, H.W. (Eds.). London: Ed. Springer, 2012.

SAKATA, R. D. **Estudo da durabilidade de concretos autoadensáveis de alto desempenho com aditivos mitigadores de retração**. Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 151p. 2017.

SANTOS, T. A. C. E. **Estudo da adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p. 2016.

SENEFF, L. LABRINCHA, J.A., FERREIRA, V.M., HOTZA, D., REPETTE, W.L. **Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 7, p. 2487–2491, 2009.

SILVA, E. F. **Concreto de alto desempenho: aplicação pioneira em Brasília - Brasil**. In: 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.; LOPES, A. N. M.; CHATER, L. **Metodologia para determinação da retração autógena unidirecional em concretos por capturas de imagens**. In: Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, Moçambique. 2011.

SILVA, E. F.; MANZANO, M. A. R. LOPES, A. N. M.; TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of SAP on the Autogenous Shrinkage and Compressive Strength of High-Strength Fine-Grained Concrete**. In: International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction, 2014,

Dresden. International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction, p. 211-219, 2014.

SILVA JR, P. F. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 368p. 2017.

SNOECK, D., SCHROFL, C., MECHTERINE, V. **Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (SAP) prior to implementation in cement-based materials**. RILEM TC 260-RSCSAP, Ghent University, Ghent, Belgium. 2018.

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

SUAREZ., M. L. G. **Polímeros Super Absorventes (PSA) como Agente de Cura Interna para Prevenir Fissuração em Concretos de Alta Resistência**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75p. 2015.

TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry**. 2 ed. Londres. Thomas Telford

TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, E. F.; LOPES, A. N. M.; MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L. **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.; AGUIRRE, L. M. **Polímero superabsorvente (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em microconcretos de alta resistência devido à retração autógena**. Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 100p. 2013.

YE, G., BREUGEL, K., LURA, P., MECHTCHERINE, V. **Effect of Superabsorbent Polymers on hardening process of binder paste and microstructure development**. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225SAP, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

YI, S.; YANG, E. I.; CHOI, J. C. **Effect of specimen sizes, specimen shapes and placement directions on compressive strength of concrete**. Nuclear Engineering and Design, v. 236, p. 115-127, 2006.

ZHANG, M. H.; ISLAM, J.; PEETHAMPARAN, S. **Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag**. Elsevier, Cement & Concrete Composites. 2012.

WYRZYKOWSKI, M., IGARASHI, S., LURA, P., MECHTCHERINE, V. **Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage**. RILEM TC 260-RSCSAP, Dubendorf, Switzerland. 2018.

APÊNCIDE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS

Tabela A-1: Resultados individuais obtidos para a resistência à compressão simples para os corpos de prova 50x100 mm.

Traço	Idade	Resistência (MPa)	Teste T (unilateral)	Média (MPa)
035 REF	1	30,6	Retirar	40,2
		40,1	OK	
		40,3	OK	
	7	55,0	Retirar	62,6
		60,9	OK	
		64,2	OK	
	28	72,4	OK	72,9
		73,4	OK	
		77,3	Retirar	
	70	68,9	Retirar	70,0
		69,8	OK	
		70,3	OK	
035 SAP03	1	21,8	Retirar	25,9
		25,8	OK	
		26,1	OK	
	7	57,2	OK	57,3
		57,3	OK	
		63,6	Retirar	
	28	69,0	Retirar	72,6
		72,0	OK	
		73,2	OK	
	70	90,4	OK	91,4
		92,4	OK	
		97,5	Retirar	
035 SAP03-NS1	1	31,3	Retirar	41,5
		39,3	OK	
		43,7	OK	
	7	57,7	Retirar	70,3
		70,2	OK	
		70,4	OK	
	28	65,6	Retirar	78,1
		72,3	OK	
		83,9	OK	
	70	77,9	Retirar	91,7
		90,3	OK	
		93,1	OK	

Tabela A-2: Resultados individuais obtidos para a resistência à compressão simples para os corpos de prova 100x200 mm, rompidos após o ensaio de módulo (28 dias).

Traço	Idade	Resistência (MPa)	Teste T (unilateral)	Nova Média (MPa)
035 REF	28	69,2	OK	69,25
		69,3	OK	
		64,7	Retirar	
035 SAP03	28	53,5	Retirar	70,05
		71,4	OK	
		68,7	OK	
035 SAP03-NS1	28	72,1	Retirar	72,35
		72,3	OK	
		72,4	OK	

Tabela A-3: Resultados individuais obtidos para o módulo de elasticidade.

Traço	Módulo (GPa)	Teste de Dixon	Média (GPa)
035 REF	35,1	OK	35,1
	35,1	OK	
	34,5	Retirar	
035 SAP03	37,6	OK	37,7
	37,8	OK	
	39,0	Retirar	
035 SAP03-NS1	37,6	OK	38,2
	38,1	OK	
	38,9	Retirar	

Tabela A-4: Resultados individuais obtidos para o coeficiente de difusão/migração de íons cloreto.

Traço	Migração ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Teste de Dixon	Média ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
035 REF	2,76	OK	2,78
	2,49	OK	
	3,09	OK	
035 SAP03	1,27	OK	1,61
	1,38	OK	
	2,19	OK	
035 SAP03-NS1	0,97	OK	1,37
	1,3	OK	
	1,85	OK	

Tabela A-5: Resultados individuais obtidos para a absorção por capilaridade.

Traço	Absorção (g/ cm²)	Teste de Dixon	Média (g/cm²)
035 REF	0,35	OK	0,35
	0,36	Retirar	
	0,35	OK	
035 SAP03	0,37	OK	0,31
	0,27	OK	
	0,28	OK	
035 SAP03-NS1	0,22	OK	0,22
	0,21	Retirar	
	0,22	OK	

Tabela A-6: Resultados individuais obtidos para a altura de ascensão capilar.

Traço	Altura (cm)	Teste de Dixon	Altura (cm)
035 REF	8,98	OK	9,13
	9,25	OK	
	8,96	OK	
	9,25	OK	
	9,23	OK	
	9,12	OK	
035 SAP03	9,34	OK	9,32
	9,33	OK	
	9,33	OK	
	9,31	OK	
	9,30	OK	
	9,14	Retirar	
035 SAP03-NS1	9,29	Retirar	9,40
	9,50	OK	
	9,48	OK	
	9,30	OK	
	9,36	OK	
	9,34	OK	

Tabela A-7: Resultados individuais obtidos para a absorção por imersão.

Traço	Absorção (%)	Teste de Dixon	Média (%)
035 REF	4,68	OK	4,68
	4,57	OK	
	4,78	OK	
035 SAP03	3,67	OK	3,75
	3,78	OK	
	3,79	OK	
035 SAP03-NS1	3,29	OK	3,27
	3,33	OK	
	3,18	OK	

Tabela A-8: Resultados individuais obtidos para a resistividade elétrica superficial e volumétrica para o traço 035 REF.

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)
REF-6	28	173,14	Retirar	123,87	62,50	Retirar	57,95
		143,03	OK		59,70	OK	
		132,84	OK		58,82	OK	
		128,81	OK		57,35	OK	
		125,14	OK		57,42	OK	
		124,32	OK		57,42	OK	
		121,09	OK		57,97	OK	
		120,00	OK		57,83	OK	
		119,98	OK		58,06	OK	
		119,82	OK		57,80	OK	
		119,29	OK		57,59	OK	
		118,90	OK		57,76	OK	
		118,86	OK		58,04	OK	
		118,29	OK		57,71	OK	
	70	220,75	Retirar	140,90	74,07	Retirar	68,86
		173,75	OK		70,18	OK	
		159,80	OK		69,36	OK	
		151,83	OK		68,38	OK	
		145,21	OK		68,26	OK	
		143,40	OK		68,77	OK	
140,36		OK	68,29		OK		
136,58		OK	68,67		OK		
136,31		OK	68,83		OK		
135,61		OK	68,61		OK		
136,10		OK	68,64		OK		
134,69		OK	68,77		OK		
134,77		OK	69,06		OK		
134,77		OK	69,05		OK		
134,10		OK	69,20		OK		
135,05		OK					
134,44	OK						
134,70	OK						
134,71	OK						
REF-5	28	165,49	Retirar	130,12	63,13	Retirar	58,57
		142,42	OK		60,15	OK	
		140,18	OK		59,41	OK	
		133,77	OK		58,39	OK	
		128,89	OK		58,14	OK	
		128,87	OK		58,35	OK	
		127,07	OK		58,33	OK	
		127,11	OK		57,35	OK	
		126,58	OK		58,44	OK	
		126,00	OK		58,39	OK	
		125,97	OK		58,51	OK	
		124,41	OK		58,56	OK	
					58,62	OK	
					58,82	OK	
		58,54	OK				

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)
REF-5	70	255,10	Retirar	146,01	73,15	Retirar	68,48
		189,75	OK		70,18	OK	
		165,88	OK		69,77	OK	
		157,08	OK		68,07	OK	
		155,82	OK		67,84	OK	
		148,55	OK		67,94	OK	
		146,61	OK		68,09	OK	
		145,82	OK		68,09	OK	
		142,42	OK		67,95	OK	
		142,69	OK		68,26	OK	
		137,73	OK		68,32	OK	
		137,92	OK		68,47	OK	
		138,09	OK		68,42	OK	
		137,06	OK		68,63	OK	
		137,26	OK		68,65	OK	
					137,21	OK	
		136,01	OK				
		136,52	OK				
		135,68	OK				
REF-4	28	178,44	Retirar	125,63	61,54	Retirar	58,39
		156,09	OK		60,15	OK	
		134,66	OK		59,11	OK	
		130,81	OK		58,61	OK	
		128,89	OK		58,31	OK	
		124,89	OK		57,55	OK	
		126,01	OK		58,33	OK	
		122,67	OK		58,39	OK	
		120,95	OK		58,16	OK	
		121,16	OK		58,06	OK	
		120,08	OK		58,20	OK	
		119,77	OK		58,32	OK	
		119,84	OK		57,97	OK	
		119,55	OK		58,09	OK	
		119,30	OK		58,14	OK	
		119,79	OK		58,04	OK	
REF-4	70	251,33	Retirar	143,17	74,48	Retirar	69,31
		187,24	OK		71,79	OK	
		160,85	OK		70,62	OK	
		149,54	OK		69,26	OK	
		149,29	OK		68,87	OK	
		145,04	OK		68,88	OK	
		139,66	OK		68,97	OK	
		136,77	OK		68,52	OK	
		135,77	OK		68,83	OK	
		144,96	OK		68,97	OK	
		144,31	OK		68,75	OK	
		140,96	OK		69,06	OK	
		136,91	OK		69,15	OK	
		137,00	OK		69,14	OK	
		135,66	OK		69,52	OK	
		135,66					
135,66							
133,44							
132,56							
131,48							

Tabela A-9: Resultados individuais obtidos para a resistividade elétrica superficial e volumétrica para o traço 035 SAP03.

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)
REF-6	28	185,98	Retirar	134,63	61,54	Retirar	58,77
		153,94	OK		60,54	OK	
		146,04	OK		59,33	OK	
		141,93	OK		58,26	OK	
		138,81	OK		58,48	OK	
		134,57	OK		58,39	OK	
		132,77	OK		58,42	OK	
		131,83	OK		58,50	OK	
		130,69	OK		58,57	OK	
		130,77	OK		58,62	OK	
		130,14	OK		58,62	OK	
		129,43	OK		58,68	OK	
		129,73	OK		58,79	OK	
		129,56	OK		58,76	OK	
	130,08	OK	58,82	OK			
	129,19	OK					
	70	245,04	Retirar	165,73	80,08	Retirar	74,06
		198,55	OK		77,33	OK	
		183,69	OK		76,20	OK	
		176,16	OK		75,33	OK	
		171,58	OK		73,68	OK	
		169,77	OK		74,09	OK	
		167,55	OK		73,98	OK	
		162,22	OK		73,49	OK	
		163,02	OK		73,47	OK	
		161,83	OK		73,41	OK	
		161,69	OK		73,59	OK	
		159,17	OK		73,35	OK	
159,49		OK	73,65		OK		
159,32		OK	73,39		OK		
159,17	OK	73,62	OK				
157,60	OK	73,56	OK				
158,16	OK	73,67	OK				
157,00	OK	73,62	OK				
157,16	OK	73,64	OK				
REF-5	28	189,33	Retirar	130,44	62,42	Retirar	59,00
		149,70	OK		60,48	OK	
		140,32	OK		60,00	OK	
		139,28	OK		58,61	OK	
		134,34	OK		58,43	OK	
		132,20	OK		58,69	OK	
		129,38	OK		58,71	OK	
		127,39	OK		58,75	OK	
		127,43	OK		58,86	OK	
		126,45	OK		58,88	OK	
		125,66	OK		58,96	OK	
		125,66	OK		58,92	OK	
		125,06	OK		58,91	OK	
		124,97	OK		58,87	OK	
124,50	OK	58,98	OK				
124,33	OK						

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)
REF-5	70	208,24	Retirar	153,96	81,71	Retirar	75,72
		175,49	OK		77,33	OK	
		170,80	OK		76,69	OK	
		162,93	OK		76,04	OK	
		158,06	OK		75,62	OK	
		158,01	OK		75,25	OK	
		155,78	OK		75,58	OK	
		151,14	OK		76,29	OK	
		149,89	OK		75,63	OK	
		150,52	OK		75,34	OK	
		150,80	OK		75,48	OK	
		149,87	OK		75,54	OK	
		149,08	OK		75,36	OK	
		149,59	OK		75,57	OK	
		148,53	OK		75,28	OK	
		147,21	OK		75,38	OK	
		148,21	OK		75,47	OK	
147,84	OK	75,63	OK				
147,52	OK	75,55	OK				
REF-4	28	223,26	Retirar	137,29	63,56	OK	62,59
		166,50	OK		66,02	Retirar	
		152,73	OK		64,39	OK	
		144,16	OK		63,22	OK	
		142,87	OK		62,24	OK	
		138,27	OK		62,38	OK	
		126,01	OK		62,17	OK	
		134,49	OK		62,21	OK	
		133,54	OK		61,75	OK	
		132,42	OK		62,43	OK	
		132,56	OK		62,35	OK	
		131,45	OK		62,49	OK	
		131,38	OK		62,35	OK	
		131,90	OK		62,43	OK	
130,44	OK	62,24	OK				
130,66	OK		OK				
REF-4	70	209,44	Retirar	138,01	77,00	OK	74,01
		161,52	OK		77,33	Retirar	
		156,59	OK		75,25	OK	
		148,75	OK		74,98	OK	
		143,93	OK		73,68	OK	
		140,99	OK		73,87	OK	
		137,77	OK		73,98	OK	
		136,66	OK		73,49	OK	
		134,48	OK		73,47	OK	
		134,43	OK		73,14	OK	
		133,26	OK		73,96	OK	
		132,54	OK		73,35	OK	
		132,38	OK		73,55	OK	
		132,50	OK		73,78	OK	
		132,18	OK		73,44	OK	
131,73	OK	73,82	OK				
131,46	OK	73,91	OK				
131,30	OK	73,92	OK				
131,70	OK	73,64	OK				

Tabela A-10: Resultados individuais obtidos para a resistividade elétrica superficial e volumétrica para o traço 035 SAP03-NS1.

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)				
REF-6	28	248,31	Retirar	150,33	75,47	Retirar	71,40				
		186,76	OK		73,75	OK					
		172,94	OK		73,80	OK					
		158,50	OK		71,47	OK					
		157,87	OK		70,67	OK					
		155,28	OK		71,22	OK					
		150,80	OK		70,81	OK					
		146,48	OK		70,33	OK					
		146,90	OK		70,75	OK					
		144,51	OK		70,87	OK					
		145,08	OK		70,98	OK					
		144,32	OK		70,80	OK					
		143,14	OK		71,57	OK					
		143,01	OK		71,31	OK					
		142,90	OK		71,34	OK					
		142,29	OK								
		141,03	OK								
		141,85	OK								
		REF-6	70		284,84	Retirar		184,16	93,95	Retirar	88,33
					259,29	OK			91,78	OK	
213,17	OK			88,89	OK						
205,92	OK			88,89	OK						
201,06	OK			88,46	OK						
190,28	OK			88,35	OK						
183,99	OK			87,60	OK						
184,38	OK			87,87	OK						
181,02	OK			88,02	OK						
177,45	OK			87,32	OK						
176,40	OK			87,54	OK						
174,41	OK			87,49	OK						
174,47	OK			88,11	OK						
168,35	OK			88,36	OK						
166,32	OK			88,24	OK						
166,85	OK			88,15	OK						
164,33	OK			87,97	OK						
164,59	OK	88,45	OK								
162,64	OK	88,37	OK								
REF-5	28	325,05	Retirar	155,13	76,30	Retirar	72,45				
		209,72	OK		75,33	OK					
		176,71	OK		73,62	OK					
		171,36	OK		73,06	OK					
		159,90	OK		72,00	OK					
		159,13	OK		71,57	OK					
		153,43	OK		72,29	OK					
		154,46	OK		72,25	OK					
		151,02	OK		71,87	OK					
		150,84	OK		71,76	OK					
		146,73	OK		72,16	OK					
		145,77	OK		72,08	OK					
		145,52	OK		71,83	OK					
		146,17	OK		72,12	OK					
		145,45	OK		72,34	OK					
144,08	OK										

Corpo de prova	Idade (dias)	Resistividade Superficial (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	Teste T-Unilateral	Média (kΩ.cm)
REF-5	28	143,98	OK	155,13			72,45
		144,12	OK				
REF-5	70	374,48	Retirar	186,10	93,95	Retirar	87,03
		242,11	OK		92,81	OK	
		215,47	OK		88,24	OK	
		186,44	OK		85,11	OK	
		198,07	OK		86,55	OK	
		193,52	OK		86,45	OK	
		193,38	OK		85,73	OK	
		188,20	OK		87,39	OK	
		182,21	OK		86,33	OK	
		182,21	OK		86,19	OK	
		176,77	OK		87,19	OK	
		176,31	OK		86,70	OK	
		175,93	OK		86,50	OK	
		175,28	OK		87,00	OK	
		174,16	OK		87,08	OK	
		173,20	OK		86,84	OK	
		172,85	OK		86,51	OK	
		172,82	OK		87,06	OK	
170,81	OK	86,86	OK				
REF-4	28	353,12	Retirar	168,36	84,80	Retirar	73,63
		251,33	Retirar		75,47	OK	
		211,34	OK		74,07	OK	
		184,50	OK		73,39	OK	
		180,50	OK		73,41	OK	
		173,06	OK		73,52	OK	
		166,25	OK		72,94	OK	
		162,48	OK		73,08	OK	
		158,60	OK		74,11	OK	
		164,33	OK		73,26	OK	
		160,46	OK		73,28	OK	
		156,69	OK		73,40	OK	
		155,90	OK		73,24	OK	
		154,82	OK		73,49	OK	
		151,74	OK		74,22	OK	
		152,27	OK				
		151,90	OK				
		148,44	OK				
REF-4	70	290,91	Retirar	174,95	106,32	Retirar	89,62
		229,21	Retirar		97,18	OK	
		197,37	OK		88,89	OK	
		189,92	OK		89,39	OK	
		182,55	OK		88,85	OK	
		180,33	OK		89,67	OK	
		177,25	OK		88,71	OK	
		173,21	OK		89,58	OK	
		171,17	OK		89,11	OK	
		167,82	OK		89,07	OK	
		167,80	OK		88,77	OK	
		165,54	OK		89,28	OK	
		164,90	OK		89,32	OK	
		164,63	OK		89,35	OK	
		164,15	OK		88,89	OK	
164,22	OK	89,14	OK				
163,13	OK	89,24	OK				