



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FRANK ALBERT SOARES ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CONCRETOS
PRODUZIDOS COM MATERIAIS DA CIDADE DE MANAUS COM O USO DE
REDUTORES DE PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO**

Manaus

2020

FRANK ALBERT SOARES ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CONCRETOS
PRODUZIDOS COM MATERIAIS DA CIDADE DE MANAUS COM O USO DE
REDUTORES DE PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

Manaus

2020

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A663a Araújo, Frank Albert Soares
Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização / Frank Albert Soares Araújo . 2020
75 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Joao de Almeida Melo Filho
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. concreto. 2. durabilidade. 3. autocatrização. 4. permeabilidade. 5. cristalização. I. Melo Filho, Joao de Almeida. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

FRANK ALBERT SOARES ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CONCRETOS
PRODUZIDOS COM MATERIAIS DA CIDADE DE MANAUS COM O USO DE
REDUTORES DE PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Aprovada em 27 de novembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho
Universidade Federal do Amazonas- Orientador

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos
Universidade Federal do Amazonas- Membro Interno

Profª. Dra. Luciane Farias Ribas
Faculdade Metropolitana de Manaus- Membro externo

A minha querida e amada mãe **Sandra Araújo**
e ao meu saudoso pai **Armando Araújo** (*in
memoriam*).

A minha querida e amada esposa **Ketlem
Araújo** e aos meus filhos **Matheus Araújo** (*in
memoriam*) e **Maria Clara Araújo**.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS**, toda gratidão, toda honra e toda glória, alcançada em minha vida ontem, hoje e sempre.

A **Nossa Senhora de Nazaré**, mãe de Jesus e nossa mãe.

Ao **Prof. João Almeida Melo Filho**, pela orientação, pela enorme paciência e total apoio e pelas “puxadas de orelha” nos momentos necessários. Agradeço a Deus por colocá-lo em meu caminho.

Aos meus pais, **Armando Araújo** (*in memoriam*) e **Sandra Araújo**, minha gratidão por terem sido instrumentos de **Deus** para me conceder seu maior bem, o dom da vida, seus ensinamentos estarão sempre comigo.

À minha querida e amada esposa **Ketlem Araújo**, e aos meus filhos **Matheus** (*in memoriam*) e **Maria Clara**, pelo amor, apoio e compreensão, eu não teria conseguido sem vocês. Vocês são meu maior patrimônio.

A minha irmã **Karina Araújo** e minha sobrinha **Laura Fernanda**, por todo o apoio e vibrações positivas.

A minha querida cunhada **Auricea Arruda** e minha sobrinha **Amanda Araujo**, por todo apoio e vibrações positivas.

Aos meus queridos amigos, Professor **Francisco dos Santos Rocha**, **Domingos Sávio** e **Marcos Baia** que sempre me incentivaram neste desafio.

As amigas que adquiri durante o programa, as queridas **Eduarda Pereira**, **Sara Santarém** e **Raquel Andrade**, Professora **Luciane Ribas**, minha sincera gratidão a vocês.

A empresa **Konkrex Engenharia de Concretos** pela cessão dos insumos e do laboratório utilizado no trabalho.

A empresa **CIMENTOS MIZU**, na pessoa do Eng. civ. **Andrei**, pela cessão dos insumos utilizados neste trabalho.

Às equipes dos seguintes laboratórios: **Laboratório de Ensaio Físico-Químicos/FT/UFAM, Laboratório de Materiais de Construção/EST/UEA e Laboratório Temático de Microscopia do INPA.**

Aos colegas de mestrado, **Aedjota Matos, Eugenio Renoir, Elma Almeida, Fernanda Oikawa, Jociane Araújo, Abel Filho, Lucinaldo, Daniel**, pelas contribuições durante a realização de nossas atividades em sala de aula e laboratório.

Aos membros da banca examinadora, **Prof. Dr. Raimundo Vasconcelos e Profa. Dra. Luciane Ribas**, por terem aceitado participar e contribuir com esta pesquisa.

Por fim, a todo o corpo docente e dos técnicos administrativos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por todo o apoio disponibilizado.

“Deus é a lei e o legislador do Universo”

(Albert Einstein)

*“Quanto mais eu estudo a natureza, mais me
maravilho com a obra do Criador”*

(Louis Pasteur)

*“O analfabeto do século XXI não será aquele que
não consegue ler e escrever, mas aquele que não
consegue aprender, desaprender e reaprender”*

(Alvin Toffler)

Resumo

A durabilidade das estruturas de concreto tem se tornado umas das principais preocupações da indústria da construção civil, principalmente após a ABNT NBR 15.575: Edificações Habitacionais – Desempenho entrar em vigor. Um dos grandes gargalos das estruturas de concreto é sua baixa resistência à fissuração que colocam em risco a sua durabilidade, além de permitir que líquidos e agentes agressivos possam penetrar na matriz e causar danos. Estas fissuras podem ter suas dimensões aumentadas e expor as armaduras à ambientes agressivos e consequentemente levar ao colapso estrutural. Assim, a inspeção, manutenção e reparos constantes das estruturas são indispensáveis. Porém, por muitas vezes estes reparos são onerosos e de difícil execução. A autocicatrização das fissuras do concreto tem ganhado notoriedade como alternativa a estes fatores, que consiste em um fenômeno cujo próprio concreto apresenta a capacidade de reparação de pequenas fissuras de forma espontânea, sem nenhuma intervenção externa. O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos do ADITIVO REDUTOR DE POROSIDADE POR CRISTALIZAÇÃO - ARPC na durabilidade de concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus, por meio de pesquisa experimental, analisando a cicatrização autógena. Foram produzidos quatro concretos com relação água/cimento fixa de 0,58, adição de ARPC e cimentos, utilizou-se o CP II Z- 40-RS e o CP II E-32. Nestes concretos foram analisadas as propriedades de resistência à compressão aos 28 dias sob a carga de ruptura de 100% e 90% para a indução de microfissuras nos concretos e posterior avaliação da cicatrização aos 84 dias por meio da resistência à compressão. Também foram avaliadas as propriedades de índice de vazios, absorção total, absorção por capilaridade, migração de íons cloretos e microestrutura do concreto. Como resultado foi constatado que o ARPC apresenta melhor desempenho nos concretos produzidos com o CP II Z-40 RS, principalmente, na idade de 84 dias. Além disso, os concretos com a adição do ARPC apresentam melhor desempenho no percentual de recuperação da resistência à compressão. Nos índices de vazios e absorção total o concreto com ARPC e CP II Z-40 RS apresentou os menores valores. Na absorção por capilaridade os concretos com a adição do ARPC apresentaram menores índices de absorção e menor ascensão capilar. A microestrutura apresentou cristais típicos de concretos autocicatrizantes como etringita e carbonato de cálcio. Na migração de íons cloretos os concretos produzidos com o CP II E-32 apresentaram as menores concentrações, o que se deve ao fato da composição do cimento com a presença da escória de alto forno.

Palavras-Chave: concreto, durabilidade, autocicatrização, permeabilidade, cristalização.

ABSTRACT

The durability of concrete structures has become one of the main concerns of the construction industry, especially after ABNT NBR 15.575: Housing Buildings - Performance comes into force. One of the major bottlenecks of concrete structures is their low resistance to cracking, which jeopardizes their durability, in addition to allowing liquids and aggressive agents to penetrate the matrix and cause damage. These cracks can have their dimensions increased and expose the reinforcement to aggressive environments and consequently lead to structural collapse. Thus, constant inspection, maintenance and repairs to the structures are essential. However, these repairs are often costly and difficult to perform. The self-healing of concrete cracks has gained notoriety as an alternative to these factors, which consists of a phenomenon whose concrete itself has the ability to repair small cracks spontaneously, without any external intervention. The objective of this study is to evaluate the effects of the ADDITIVE REDUCING POROSITY BY CRYSTALLIZATION - ARPC on the durability of concretes produced with materials from the city of Manaus, through experimental research, analyzing the autogenous healing. Four concretes were produced with a fixed water / cement ratio of 0.58, addition of ARPC and cement, CII Z-40-RS and CP II E-32 were used. In these concretes, the properties of compressive strength at 28 days under 100% and 90% rupture load were analyzed for the induction of micro-cracks in concretes and subsequent evaluation of healing at 84 days by means of compressive strength. The properties of voids index, total absorption, capillarity absorption, chloride ion migration and concrete microstructure were also evaluated. As a result, it was found that ARPC performs better in concretes produced with CP II Z-40 RS, mainly at the age of 84 days. In addition, concretes with the addition of ARPC present better performance in the percentage of recovery of compressive strength. In the voids and total absorption indices, the concrete with ARPC and CP II Z-40 RS presented the lowest values. In capillarity absorption, concretes with the addition of ARPC showed lower absorption rates and lower capillary rise. The microstructure showed typical crystals of self-healing concrete such as ettringite and calcium carbonate. In the migration of chloride ions, the concretes produced with CP II E-32 showed the lowest concentrations, which is due to the fact of the cement composition with the presence of blast furnace slag.

Key-words: concrete, durability, self-healing, permeability, crystalline admixtures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Possíveis causas para a cicatrização autógena do concreto	23
Figura 2: Melhorias que podem ser promovidas na cicatrização autógena por restrição da largura da fissura (a); fornecimento de água (b) ou melhor hidratação e cristalização (c)	26
Figura 3: Ilustração do ângulo de contato	29
Figura 4: a) SAP seco, b) SAP após inchamento	33
Figura 5: Abordagens de autocorreção baseadas em cápsulas. Fuga de agente curativo das cápsulas para a fenda devido a forças gravitacionais e capilares. Reação de agente encapsulado esférico / cilíndrico (inclusões de cor escura) em contato com (a,b) umidade ou ar ou devido ao aquecimento; (c,d) a matriz cimentícia; (e,f) um segundo componente presente na matriz (inclusões pequenas de cor clara) ou (g, h) um segundo componente fornecido por cápsulas adicionais (inclusões grandes de cor clara)	35
Figura 6: Abordagens de autocicatrização com base vascular. Vazamento do agente curativo do tanque via vascular para a fissura devido a forças gravitacionais e capilares e eventual pressão (hidrostática). Sistema vascular de um canal (a) e canal múltiplo (b).....	37
Figura 7: Etapas de trabalho para desenvolvimento dos traços, produção e caracterização dos concretos.....	41
Figura 8: Curva granulométrica do CP II-Z-40-RS.....	42
Figura 9: <i>Agregados graúdo e miúdo utilizado na composição dos traços</i>	43
Figura 10: Curva granulométrica dos agregados.....	45
Figura 11: Aspecto do aditivo catalisador cristalino fornecido na forma de pó.....	46
Figura 12: Curva granulométrica do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização	46
Figura 13: <i>Aferição do abatimento (slump test)</i>	49
Figura 14: <i>Moldagem dos CPs cilíndricos</i>	50
Figura 15: Ensaio de resistência a compressão axial (RCA).....	50
Figura 16: a) Equipamento utilizado para obtenção das imagens, b) Metalização das amostras	52
Figura 17: a) Corpos de prova sob ebulição, b) Pesagem hidrostática.....	53
Figura 18: a) Esquema de montagem, b) Aparato de ensaio montado	54
Figura 19: Resistência à compressão dos concretos produzidos	55
Figura 20: Gráfico de recuperação da resistência mecânica dos concretos aos 28 dias.....	59
Figura 21: a) <i>Amostra AMI-CARPC com aproximação de 100 μm</i> e b) <i>Amostra AMI-CARPC com aproximação de 10 μm</i>	60

Figura 22: a) Amostra AM2-SARPC com aproximação de 100 μm e b) Amostra AM2-SARPC com aproximação de 10 μm	61
Figura 23: a) Amostra AM3-CARPC com aproximação de 10 μm e b) Amostra AM3-CARPC com aproximação de 2 μm	61
Figura 24: a) Amostra AM4-SARPC com aproximação de 100 μm e b) Amostra AM4-SARPC com aproximação de 10 μm	62
Figura 25: Medidas de ascensão capilar das amostras (a) AM1- CARPC; (b) AM2- SARPC	65
Figura 26: Absorção de água por capilaridade das amostras produzidas	65
Figura 27: Variação dos índices de absorção das amostras ao longo do ensaio.....	66
Figura 28: Ascensão capilar das amostras analisadas	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relatório físico dos cimentos utilizados.....	42
Tabela 2: Características dos agregados.....	44
Tabela 3: Propriedades do aditivo superplastificante.....	47
Tabela 4- Porcentagem do catalisador cristalino nas amostras.....	48
Tabela 5: Composição dos traços utilizados na pesquisa.....	48
Tabela 6: Análise ANOVA para os concretos produzidos com CP II Z- 40 RS.....	56
Tabela 7: Análise ANOVA para os concretos produzidos com CP II E- 32.....	57
Tabela 8: Análise ANOVA para os concretos produzidos com ARPC.....	57
Tabela 9: Análise ANOVA para os concretos produzidos sem ARPC.....	58
Tabela 10: Índice de vazios aos 84 dias.....	63
Tabela 11: Índice de absorção aos 84 dias.....	64
Tabela 12: Evolução da concentração de NaCl durante o ensaio.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Ensaios realizados para a caracterização dos agregados miúdos e graúdos.....	44
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ARPC- Aditivo Redutor de Permeabilidade por Cristalização
- ASTM- American Society for Testing and Materials
- CPRM- Companhia de Pesquisas dos Recursos Minerais
- IBI- Instituto Brasileiro de Impermeabilização
- IBRACON- Instituto Brasileiro de Concreto
- INPA- Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
- LTMOE- Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica
- NaCl- Cloreto de sódio
- PE- Fibras de Polietileno
- PRA- Permeability-Reducing Admixtures
- PRAH- Aditivos Redutores de Permeabilidade Sob Pressões Hidrostáticas
- PRAN- Aditivos Redutores de Permeabilidade Submetidos às Condições Não Hidrostáticas
- PVA- Fibras de Álcool Polivinílico
- SAP- Polímeros Superabsorventes
- CA²⁺ - Íons de Cálcio
- CaCO₃- Carbonato de cálcio
- CaOH₂ - Hidróxido de Cálcio
- CH- Hidróxido de Cálcio
- CO₂ - Dióxido de Carbono
- CO³⁺- Íons Carbonatos
- CSH- Silicato de Cálcio Hidratado
- HCO₃- Íons Bicarbonatos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos.....	20
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE	21
2.2	CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA	22
2.2.1	Fatores que Afetam a Cicatrização Autógena	24
2.3	MELHORIAS PARA MELHOR EFICIÊNCIA DA CURA AUTÓGENA	25
2.3.1	Restrição da Largura das Fissuras	26
2.3.2	Fornecimento de Água	27
2.3.3	Hidratação e Cristalização	27
2.4	CURA AUTÓGENA PROJETADA	27
2.4.1	Aditivos Redutores de Permeabilidade por Cicatrização.....	27
2.4.2	Adições Minerais	31
2.4.3	Polímeros Superabsorventes	32
2.5	CICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA	34
2.6	ESTRATÉGIAS DE CICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA	35
2.6.1	Cápsulas	35
2.6.2	Sistema Vascular	36
2.6.3	Bactérias	37
2.7	TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO	38
2.7.1	Microscopia.....	39
2.7.2	Imagens.....	39
2.7.3	Espectroscopia	40
3	METODOLOGIA	40
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC	41
3.1.1	Caracterização dos Materiais.....	41

3.1.1.1	Cimento Portland.....	41
3.1.1.2	Água	43
3.1.1.3	Agregados.....	43
3.1.1.4	Aditivo Redutor de Permeabilidade por Cristalização	45
3.1.1.5	Aditivo Superplastificante.....	47
3.1.2	PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS.....	47
3.1.2.1	Traços Utilizados.....	47
3.1.2.2	Produção dos Concretos	48
3.2	AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC	50
3.2.1	Ensaio de Determinação da Resistência à Compressão.....	50
3.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	51
3.3	ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC	52
3.3.1	Determinação da Absorção Total	52
3.3.2	Determinação da Absorção por Capilaridade	53
3.3.3	Migração de Íons Cloretos.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC	55
4.1.1	Resistência à Compressão.....	55
4.1.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	59
4.2	ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC	62
4.2.1	Determinação da Absorção Total	62
4.2.1.1	Índice de Vazios (%) – Idade de 84 Dias	62
4.2.1.2	Índice de Absorção (%) – Idade 84 Dias.....	63
4.2.2	Determinação da Absorção por Capilaridade	64
4.2.3	Migração de Íons Cloretos.....	67
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, principalmente, em função de suas características como a alta resistência à compressão e baixo custo, quando comparado aos demais materiais construtivos. Porém, sua baixa resistência à tração torna-o suscetível à formação de fissuras, onde estas podem ocorrer em qualquer fase de sua vida, sendo originárias de vários fatores como carregamento estrutural excessivo, retração por secagem, exposição ambiental severa, procedimentos de construção inadequados e efeitos térmicos. Tais fissuras são um dos principais obstáculos para a durabilidade do concreto, pois tornam-se portas de entrada para agentes nocivos como cloretos e sulfatos, assim como, aumentam de forma significativa sua permeabilidade.

Uma vez que as armaduras possam ser alcançadas, tornam-se suscetíveis à corrosão, o que pode levar ao colapso total da estrutura. Dessa forma, a inspeção, manutenção e reparo das fissuras no concreto são indispensáveis, porém são processos altamente dispendiosos a depender do local a ser reparado. Além dos custos diretos, há a ocorrência dos custos indiretos como a perda de produtividade ou a interdição momentânea da edificação.

A penetração de agentes agressivos nas fissuras e estrutura porosa do concreto é o principal parâmetro para prever a durabilidade de um elemento estrutural. Pesquisadores do mundo todo, cada vez mais, tem estudado novas formas de produzir concretos de microestrutura mais densa e menos permeáveis, com a utilização de técnicas como as adições minerais e o aumento no consumo de cimento Portland, porém, quando se observa o resultado ao longo do tempo muitas vezes o objetivo esperado não é alcançado na prática, pois o uso de técnicas como estas podem acarretar a formação de fissuras por retração autógena. Dentre as diversas técnicas que têm sido estudadas e desenvolvidas ao longo dos anos, na última década, destaca-se a autocicatrização. Este fenômeno ocorre de forma natural e com bastante frequência nos seres humano, animais e plantas com aspectos de cura, recuperação ou restabelecimento destes indivíduos.

Em 1994, a pesquisadora Dra. Carolyn M. Dry, da Universidade de Illinois foi a primeira a propor a introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto. Dry começou a trabalhar em um concreto autocicatrizante que pudesse ser melhorado com a adição de fibras ocas de polipropileno preenchidas com adesivo de metil metacrilato como agente cicatrizante, e conforme a propagação das fissuras, as fibras eram rompidas e liberavam o adesivo contido nas mesmas, a fim de cicatrizar as fissuras de modo ativo. Porém, apenas em 2001 foi que a pesquisa em materiais autocicatrizantes passou a atrair mais atenção com a publicação do

trabalho de White et al., (2001), sobre autocicatrização em materiais à base de polímeros.

Em 2005, inspirados nas antigas estruturas centenárias que sobreviveram por séculos em função da capacidade de colmatação natural dos aglomerantes utilizados para cimentação dos blocos destas construções, foi criado pela RILEM um comitê técnico intitulado “Fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia”. Embora nos últimos anos este assunto tenha tido maior apelo em pesquisas, segundo o RILEM 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement- Based Materials os efeitos do processo de cicatrização de fissuras e as condições necessárias para sua ocorrência ainda não são completamente entendidos, portanto, ainda não pode ser considerado como um requisito de projeto ou como parte integrante da dosagem de materiais.

A autocicatrização no concreto está relacionada com a capacidade de reparação de fissuras automaticamente, sem diagnóstico externo ou intervenção humana. As abordagens de autocicatrização podem ser divididas em cura autógena e cura autônoma, a autógena é originada naturalmente do material cimentício, enquanto a autônoma requer um gatilho para ativar o processo.

O emprego de tecnologias autocicatrizantes engloba três conceitos principais: custo; sustentabilidade e inovação. O prolongamento da vida útil da estrutura, especialmente em condições ambientais de elevada agressividade, implica em menores intervenções e reduções de investimentos financeiros diretos e indiretos devido a falha prematura do material cimentício. Além disso, afirma valores sustentáveis, pois diminui a demanda por matérias-primas, e por consequência reduz também o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa. O processo de cicatrização é ainda mais vantajoso se estiver associado à recuperação das propriedades mecânicas. Embora os materiais com propriedades cicatrizantes demandem maiores custos iniciais, a ausência de intervenções ao longo do tempo pode resultar em custos inferiores as estruturas convencionais ou de alto desempenho.

Com a entrada em vigor da NBR 15.575:2013 Edificações Habitacionais – Desempenho da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que trata das questões relativas à durabilidade e ao desempenho das edificações, a indústria da construção civil tem dado ênfase a estes requisitos. Dentre os diversos componentes que melhoram a durabilidade das estruturas de concreto, os insumos disponíveis na região merecem atenção especial, pois o conhecimento destes é fundamental para uma dosagem racional e dos parâmetros que serão atendidos na questão da classe de agressividade, por exemplo.

Apesar dos avanços da tecnologia do concreto nas últimas décadas, ainda é um grande desafio produzir concretos menos permeáveis, mesmo em regiões do país com acesso aos mais

diversos insumos como agregados graúdos, miúdos, naturais ou artificiais, cimentos de diversas classes, além dos aditivos. No Estado do Amazonas, profissionais locais são desafiados a produzir concreto com os insumos disponíveis, uma vez que o acesso a variedades destes é restrita devido aos custos de extração, processamento e logística de transporte que por conseguinte impactam significativamente no preço final do produto. A restrição destes insumos diz respeito principalmente aos agregados, como alternativa tem sido utilizados o seixo rolado ou simplesmente seixo, extraído, em sua grande maioria, de jazidas localizadas nos rios Aripuanã, Japurá, Uatumã, Madeira, Solimões e Juruá. Esses agregados são retirados dos leitos desses rios e transportados por via fluvial até Manaus. O agregado miúdo, areia, também é extraído do leito dos rios da região e possuem características distintas de acordo com a área de exploração.

Dentre as técnicas utilizadas para reduzir a permeabilidade do concreto, têm-se a adição de materiais denominados aditivos redutores de permeabilidade, que são materiais hidrofílicos que ao reagirem com a água presente na estrutura de concreto, iniciam um processo de cristalização capilar, bloqueando os poros e fissuras existentes, ou seja, funcionando como um mecanismo de autocicatrização do concreto, devido a formação de depósitos insolúveis de carbonato de cálcio. A indústria da construção apresenta grande interesse na difusão do uso desses aditivos como estimuladores de cicatrização pois representam uma oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias de cicatrização, além disso devido à variedade de composições dos mesmos representam um vasto campo de conhecimento a ser explorado pela comunidade científica.

Os componentes reativos desses aditivos reagem com hidróxido de cálcio para formar produtos cristalinos que preenchem os poros e fissuras no concreto, que reduzem principalmente a permeabilidade à água do concreto e assim torna as estruturas estanques, é de suma importância para estruturas subterrâneas, reservatórios e barragens. Em função disso, é importante ressaltar uma iniciativa conjunta entre o Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI) e o Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), o CT-501: Comitê Técnico de Estanqueidade das Estruturas de Concreto, criado para promover debates, pesquisas e o desenvolvimento desta área.

Dessa forma, a presente pesquisa visa demonstrar a viabilidade de produção de concretos com potencial de cicatrização com uso de insumos como seixo, areia e cimento comercializados na cidade de Manaus, além da utilização de um aditivo redutor de permeabilidade por cristalização como possível estimulador de cicatrização.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o efeito do ADITIVO REDUTOR DE PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO - ARPC nas propriedades físicas e mecânicas favoráveis a cicatrização autógena de concreto produzido com materiais da cidade de Manaus.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este estudo tem como objetivos específicos para alcançar o objetivo geral:

- Caracterizar os materiais para a produção do concreto autocicatrizante, por meio de análises físicas dos materiais, identificando os parâmetros de dosagem.
- Avaliar o efeito do aditivo ARPC e do tipo de cimento na recuperação das propriedades mecânicas do concreto autocicatrizante, por meio de ensaio de resistência a compressão de concretos pré-fissurados aos 28 dias e rompidos aos 84 dias.
- Avaliar o efeito do aditivo ARPC e do tipo de cimento na durabilidade do concreto autocicatrizante, por meio de ensaio de absorção total, capilar e a migração de íons cloretos.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é produto da pesquisa estruturada nos capítulos mencionados a seguir:

Capítulo 1: compreende a introdução desta dissertação, no qual são apresentados a contextualização do tema, o problema da pesquisa, a justificativa e os objetivos a serem alcançados.

Capítulo 2: apresenta a revisão bibliográfica na qual é explanada uma visão geral dos tópicos de maior relevância para este estudo. São apresentados os conceitos básicos relacionados à cicatrização de concretos, bem como a classificação entre autônoma e autógena. Além dos mecanismos inerentes a este fenômeno, em outro momento é realizada uma abordagem sobre as técnicas para avaliação comumente utilizadas nas pesquisas sobre cicatrização de matrizes cimentícias.

Capítulo 3: são apresentados os materiais e métodos adotados na pesquisa, onde são detalhados os procedimentos do planejamento experimental como: seleção e caracterização dos materiais, preparação de amostras, moldagem de corpos de prova e descrição dos detalhes técnicos dos ensaios executados.

Capítulo 4: nele constam os resultados obtidos nos ensaios, bem como uma análise destes. Estes são apresentados de modo a possibilitar uma análise comparativa entre os traços produzidos com ou sem a utilização de aditivo cristalizante, bem como os demais insumos utilizados.

Capítulo 5: apresentam-se as conclusões acerca da pesquisa desenvolvida, além de sugestões para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cimento Portland é um dos materiais aglutinantes mais amplamente utilizados na preparação do concreto. No entanto, a produção de cimento é um processo com alto consumo de energia, a qual para sua geração contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, quando exposto a condições extremas de serviço o concreto pode ter a sua vida útil reduzida em relação àquela esperada em projeto. Quando isso ocorre, as atividades de reconstrução e manutenção de elementos de concreto tendem a ser cada vez mais onerosas com o passar do tempo. A fim de reduzir os custos e mitigar as pegadas ambientais negativas das atividades de reconstrução e manutenção de estruturas de concreto, a tecnologia de autocicatrização foi investigada no concreto para aumentar sua durabilidade.

2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE

Segundo Muhammad e Shafaghat, *et al.*, (2016), Zhang e Zheng *et al.*, (2020) o concreto autocicatrizante refere-se ao composto de concreto com a capacidade de reparação de pequenas rachaduras automaticamente, sem nenhum diagnóstico externo ou intervenção humana. De acordo com Oliveira (2019), Lev, Chen (2014) e De Rooij (2013) os seguintes conceitos são utilizados para melhor categorizar este fenômeno de cicatrização: (a) autocicatrização e autoselamento de acordo com o resultado da ação proposta; e (b) autógeno e autônomo segundo o tipo de mecanismo utilizado. Assim, para estes tem-se as seguintes definições:

- Autocicatrização: envolve a recuperação contra ações mecânicas, com restauração das propriedades após o fechamento das fissuras;
- Autosselamento: recuperação contra ações ambientais, com fechamento de fissuras;
- Autógeno: processo de recuperação que utiliza componentes genéricos ou originais da mistura;
- Autônomo: processo de recuperação que usa componentes externos ou materiais de engenharia, que não são originais da mistura.

Assim, as abordagens na autocicatrização do concreto podem ser divididas em duas classes: a cicatrização autógena e a autônoma. A cicatrização autógena é originada de forma natural no material cimentício, enquanto a cicatrização autônoma necessita de um gatilho para a ativação do processo (PANG et al., 2016; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019; TAKAGI, 2013; TANG; KARDANI; CUI, 2015; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; ZHANG et al., 2020). A eficiência destas abordagens pode variar com base nas características gerais dos materiais, da matriz cimentícia, na aplicação e finalidade da estrutura. Nos tópicos seguintes serão estas vertentes serão abordadas detalhadamente.

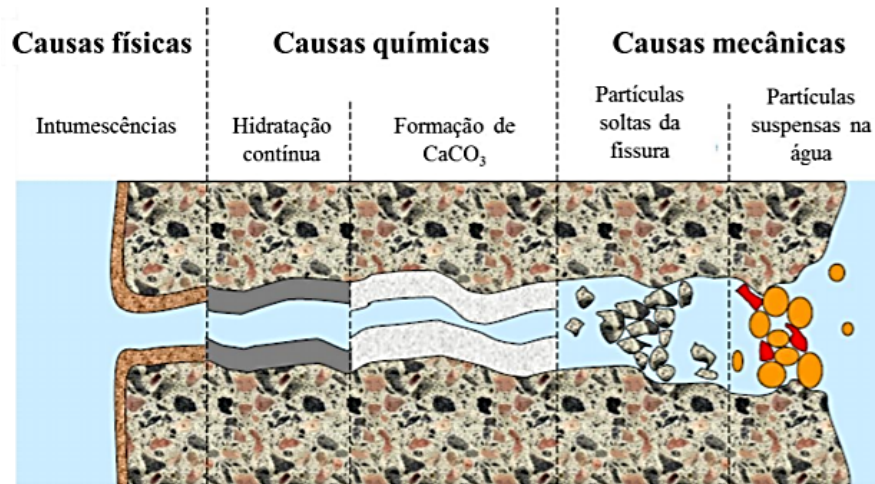
2.2 CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA

Van Tittelboom e De Belie (2013) afirmam que a cicatrização autógena é um fenômeno antigo e conhecido e que atraiu muita atenção desde que foi observado. Esta é uma das razões para que muitos edifícios e estruturas antigas permanecem de pé por tanto tempo com assistência e manutenção limitada (MOREIRA, 2016). A cicatrização autógena em compósitos à base de cimento recebeu a atenção pela primeira vez em 1836, quando membros da Academia Francesa de Ciências observaram a cicatrização de rachaduras em tubos e estruturas de retenção de água (DE BELIE et al., 2018; LV; CHEN, 2014).

A cicatrização autógena está associada às propriedades de composição física e/ou química da matriz cimentícia. Pode ser atribuída principalmente a dois mecanismos: (1) hidratação contínua de partículas de cimento não hidratadas e a (2) dissolução e subsequente carbonatação do hidróxido de cálcio (CaOH_2) (DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; HUANG et al., 2016; TANG; KARDANI; CUI, 2015; VAN TITTELBOOM et al., 2016; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; WANG et al., 2019; WU; JOHANNESSON; GEIKER, 2012; ZHANG et al., 2020). Além disso, podem resultar em cicatrização autógena, a expansão da matriz hidratada nos flancos da trinca, o bloqueio das rachaduras por impurezas na água e

partículas de concretos soltas resultantes da fragmentação da fissura (TANG; KARDANI; CUI, 2015; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; WANG et al., 2019; WU; JOHANNESSEN; GEIKER, 2012). A Figura 1 exemplifica esses processos.

Figura 1: Possíveis causas para a cicatrização autógena do concreto



Fonte: Takagi (2013)

De acordo com Van Tittelboom e De Belie (2013) o mecanismo com maior capacidade de promover a cicatrização autógena varia de acordo com a idade do concreto no momento em que ocorrer a rachadura. A hidratação contínua de partículas de cimento não hidratado exerce essa função no concreto em idades mais jovens, enquanto nas idades mais tardias é a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3). Wu e Johannesson, *et al.*, (2012) afirmam que o hidróxido de cálcio como um dos produtos de hidratação do cimento é liberado e dissipado ao longo das superfícies de fissura e em seguida, os íons de cálcio livres reagem com o dióxido de carbono dissolvido, formando cristais que crescem nas superfícies das fissuras. A recristalização do hidróxido de cálcio (CH) lixiviado do interior da pasta é um dos mecanismos relevantes, enquanto a grãos anidros de cimento podem hidratar-se imediatamente a partir da entrada de água nas fissuras, a recristalização do CH e a formação do CaCO_3 podem ocorrer mais lentamente (HUANG et al., 2016; LI et al., 2018; OLIVEIRA, 2019)

Aproximadamente de 20 a 30% do cimento em concreto convencional permanece não hidratado, portanto, à medida em que ocorrem as fissuras as partículas de cimento não hidratadas reagem com a água de entrada, então o processo de hidratação é novamente iniciado, e quando este prossegue, os produtos tendem a revestir as partículas de cimento hidratado, o que evita o acesso da água as partículas anidras. Após a ocorrência das fissuras e mediante a entrada de água, as partículas de cimento remanescentes começam a reidratar. Assim, a cicatrização das

fissuras é desencadeada pela formação de novos produtos de hidratação (DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; LI et al., 2018).

Para De Belie (2018) a cura autógena produzida pela hidratação contínua é valiosa para recuperar as propriedades do compósito cimentício, pois os novos produtos de hidratação têm força semelhante aos géis de silicato de cálcio hidratado (CSH) e podem ser superiores aos produtos de precipitação do carbonato de cálcio. Porém, os processos de nucleação e crescimentos dos produtos hidratados formados nas fissuras são distintos daqueles na pasta de cimento. Por outro lado, a carbonatação tende a ser mais eficiente na vedação de fissuras.

A precipitação do carbonato de cálcio é possível desde que íons de cálcio (Ca^{2+}) estejam disponíveis próximos às fissuras, onde a formação do $CaCO_3$ consiste na reação química desses íons originados da matriz de concreto e a água disponível na forma de íons bicarbonatos (HCO_3^-), íons carbonatos (CO_3^{2-}) ou através do dióxido de carbono (CO_2) presente no ar. A formação dos cristais ocorre inicialmente nas faces das fissuras e posteriormente, após a camada inicial de calcita ter sido formada ocorre a formação de uma camada de $CaCO_3$ mais densa, responsável pelo bloqueio de fluxo de água. Esta camada densa é formada por um processo chamado “crescimento do cristal controlado por difusão”, os íons Ca^{2+} são transportados por meio de difusão com o preenchimento dos espaços através do concreto e do $CaCO_3$ a fim de atingir a interface com a superfície da fissura a garantir a precipitação dos produtos de cicatrização (DE BELIE et al., 2018; LI et al., 2018; LV; CHEN, 2014; MIHASHI; NISHIWAKI, 2012; MOREIRA, 2016; OLIVEIRA, 2019).

Embora o principal mecanismo capaz de promover a cicatrização autógena seja motivo de debates entre os pesquisadores, há um consenso de que a presença da água é essencial em todos estes. Além deste fator limitante, a eficiência da cicatrização autógena é influenciada pela largura das fissuras presentes no concreto sendo mais eficaz nas fissuras de menor largura (HUANG et al., 2016; TAKAGI, 2013; TANG; KARDANI; CUI, 2015; TOMCZAK; JAKUBOWSKI, 2018; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; VIJAY; MURMU; DEO, 2017; WANG et al., 2019; YILDIRIM et al., 2015).

2.2.1 Fatores que Afetam a Cicatrização Autógena

Os principais fatores que exercem influência no processo de cicatrização autógena são os seguintes (DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; DE BELIE et al., 2018; HUANG et al., 2016; OLIVEIRA, 2019): as características do concreto; presença de água, além da abertura e geometria das fissuras.

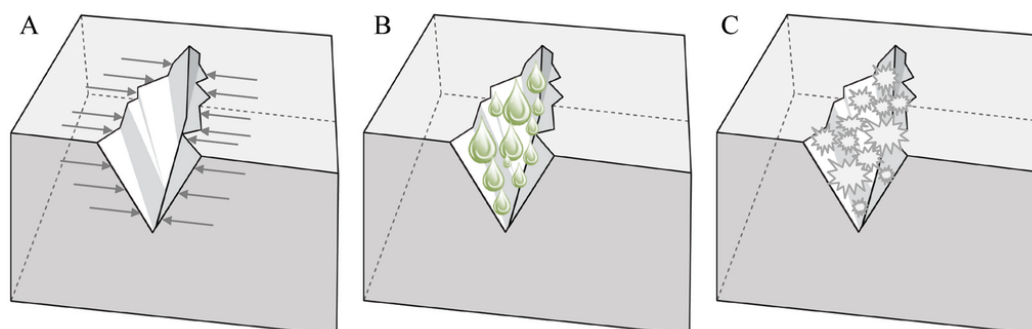
- Características do concreto: o potencial de cura natural do concreto está diretamente relacionado à sua composição. O tipo de cimento é o fator que exerce menor influência, porém o teor de clínquer é essencial para o desenvolvimento de produtos decorrentes da precipitação do carbonato de cálcio, uma vez que determina o teor de íons necessários para as reações químicas. As adições de silicatos no concreto têm efeito em função do tipo e quantidade utilizados na mistura, as reações pozolânicas e o decorrente consumo de hidróxido de cálcio fazem com a duração dos mecanismos de cicatrização sejam afetados. Além disso, o tipo de agregado utilizado determina o padrão fissuras que irão ocorrer e assim, podem influenciar a cicatrização. A classe do concreto é fator de extrema importância, pois concretos mais resistentes caracterizam-se pela baixa relação água/cimento e um maior teor de aglomerantes, fato que favorece a quantidade de grãos de cimento não hidratados no concreto, que com a hidratação contínua podem formar novos produtos hidratados. A idade do concreto exerce influência no mecanismo de cicatrização, os concretos mais jovens apresentam maior quantidade de partículas não hidratadas disponíveis para a formação dos produtos de cicatrização. Nas idades posteriores pode ocorrer uma combinação de hidratação com precipitação carbonato de cálcio.
- Presença de água: representa o fator principal para a ocorrência da cura autógena, atua nas reações química e no transporte de partículas finas, além disso, características como sua temperatura, pressão e gradiente de pressão podem influenciar na eficiência do processo. A cura autógena em exposição dos elementos é considerada limitada, a imersão em água configura-se como a melhor opção. Porém, alguns autores consideram melhor a exposição em ciclos úmido e seco do que a completa imersão em água. Estes assumem que a formação do CaCO_3 é facilitada pela disponibilidade de CO_2 no ciclo seco e pela alcalinidade da água no ciclo úmido.
- Abertura e geometria das fissuras: características como a largura, comprimento, profundidade e padrão da trinca podem exercer influência no grau de cicatrização autógena. A limitação e controle da largura das trincas podem potencializar substancialmente a cura autógena nas estruturas, quanto mais estreitas, mais eficiente é o processo.

2.3 MELHORIAS PARA MELHOR EFICIÊNCIA DA CURA AUTÓGENA

Observa-se que a cicatrização autógena possui efeito limitado no concreto, sua eficiência pode ser melhorada com adoção de medidas como a restrição da largura das fissuras (Figura 2a), como a água é sempre necessária, a retenção de água pode ser um fator de melhoria

(Figura 2b), assim como a melhoria da hidratação e cristalização contínua da matriz cimentícia (Figura 2c) (JIANG; LI; YUAN, 2015; NASIM; DEWANGAN; DEO, 2020a; TAKAGI, 2013; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Figura 2: Melhorias que podem ser promovidas na cicatrização autóloga por restrição da largura da fissura (a); fornecimento de água (b) ou melhor hidratação e cristalização (c)



Fonte: Van Tittelboom e De Belie (2013)

2.3.1 Restrição da Largura das Fissuras

A redução da largura de fissuras é considerada um processo de melhoria da cura autóloga. Li, Lim e Chan (1998) foram os primeiros pesquisadores a utilizar fibras para estes fins, utilizaram um compósito cimentício reforçado com fibras polietileno (PE) a fim de controlar a largura das fissuras, cujo resultado obtido foi redução na largura das fissuras entre 30 e 50 μm . Posteriormente estes mesmos autores passaram a utilizar fibras de álcool polivinílico (PVA), mais baratas que anteriores. Devido a ductilidade característica desses compósitos em vez de uma única fissura com grande largura, foram formadas várias fissuras com largura máxima de 60 μm (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Diversas fibras foram testadas quanto a sua eficiência em relação a cura autóloga, Homma; Mihashi; Nishiwaki (2009), Nishiwaki et al. (2012, 2014) utilizaram em seus estudos fibras de cordão de aço, polipropileno, PE e PVA. Concluíram que as fibras de aço eram menos eficientes para esta finalidade, à medida que aço começava a corroer no interior da trinca. As fibras PVA mostram-se mais eficientes, visto que as mesmas promoviam a deposição de produtos de cristalização, a estrutura química destas fibras atraía os íons de cálcio necessários nas reações químicas da cura autóloga. Mihashi e Nishiwaki (2012) combinaram as fibras PVA

com tubos quebradiços que continham em seu interior um agente de cicatrização. Este agente reagiu quimicamente com a sílica presente na matriz cimentícia para formar cristais, neste caso a cicatrização foi mais eficiente que nos casos anteriores. Porém, os melhores resultados foram obtidos para fissuras maiores de 200 μm .

2.3.2 Fornecimento de Água

Polímeros superabsorventes (SAP) têm sido utilizado para o fornecimento de água adicional necessária para o processo de cura autógena. São polímeros reticulados que podem absorver grande quantidade de líquido e inchar de forma substancial para formar um gel macio e insolúvel. Após a hidratação, o SAP libera a água absorvida e encolhe, decorrente deste processo surgem na matriz microporos. Com o surgimento das fissuras e entrada da umidade por meio destas, o SAP tende a novamente inchar e posteriormente liberar a água contida no mesmo, de forma a estimular a cura autógena (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

2.3.3 Hidratação e Cristalização

Outras alternativas para a melhoria da cura autógena baseiam-se na adição de agentes com a capacidade de promover a deposição de cristais dentro das fendas das fissuras. Uma destas é a substituição de partes do cimento por cinzas volantes ou escórias de alto forno. Também são utilizados aditivos expansivos misturados com agentes à base de sulfo-aluminatos de cálcio e misturas cristalinas. Após a entrada da água na fissura, formam-se cristais de etringita que preenchem a mesma.

Uma desvantagem na aplicação de partículas que podem hidratar ou cristalizar está em sua limitada funcionalidade de cicatrização, visto que o próprio agente de cura é consumido ao longo do processo (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

2.4 CURA AUTÓGENA PROJETADA

A eficiência da cura autógena pode ser aumentada pela incorporação de aditivos minerais, fibras, nanopreenchimentos e agentes de cicatrização (ZHANG et al., 2020).

2.4.1 Aditivos Redutores de Permeabilidade por Cicatrização

A permeabilidade de um concreto pode ser um grande gargalo para sua durabilidade, em função disso diversas técnicas têm sido desenvolvidas para a produção de um concreto mais impermeável, como a aplicação de aditivos redutores de permeabilidade por cristalização. Estes

aditivos podem aumentar a durabilidade de materiais à base de cimento, especialmente quando estes são expostos a ambientes agressivos. Inclusive, podem influenciar na capacidade de argamassas e concretos em reduzir o transporte de água e líquidos agressivos.

Nesta pesquisa será utilizado um aditivo cristalizante como estimulante da cicatrização autógena, devido a sua disponibilidade e uso na construção civil estes aditivos tem recebido atenção especial como aditivos químicos capazes de promover a autocicatrização (DE BELIE et al., 2018; FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; ROIG-FLORES et al., 2016). De acordo com cada fabricante deste tipo de material, estes podem ser:

- Produtos químicos hidrofóbicos ou repelentes à água: proporcionam uma camada repelente a água ao longo dos poros do concreto, porém estes poros permanecem abertos. São baseados em sabões, derivados de ácidos graxos, óleos vegetais e petróleo.
- Sólidos finamente divididos: os sólidos finos atuam para densificar e restringir a passagem de água por meio dos poros do concreto. São materiais inertes e agentes de enchimento quimicamente ativos como talcos, bentonita, cal, silicatos entre outros. Alguns incluem nesta categoria os materiais cimentícios suplementares.
- Materiais cristalinos: produtos químicos de propriedades ativas, onde a natureza hidrofílica destes faz com que ocorra o aumento da densidade do C-S-H ou também geram depósitos que provocam o bloqueio dos poros do concreto para resistir à penetração da água.

Os aditivos cristalizantes classificados como um tipo especial de aditivos redutores de permeabilidade possuem a seguinte denominação no meio acadêmico Permeability-Reducing Admixtures (PRAs), segundo o Comitê ACI 212.3R (2016), dividem-se em duas categorias: aditivos redutores de permeabilidade submetidos às condições não hidrostáticas (PRAN) e aditivos redutores de permeabilidade sob pressões hidrostáticas (PRAH).

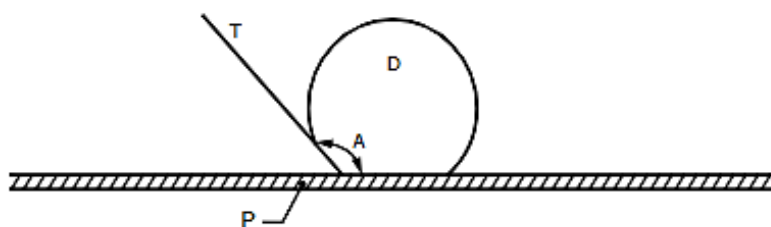
Os aditivos PRAN também são conhecidos como dampproofing admixtures e os aditivos PRAH como waterproofing admixtures (OLIVEIRA, 2019). De acordo com Oliveira (2019) os PRAH são recomendados para prevenir a passagem de água e selar fissuras. Por sua vez os aditivos PRAN são recomendados para retardar o ingresso e passagem de água pelo concreto, seja na forma líquida ou vapor, em condições de pressões menos severas por ações capilares, torna a superfície do concreto repelente à água ou pouco molhável.

Os aditivos cristalizantes encaixam-se na categoria PRAH, enquanto os produtos repelentes à água encaixam-se entre os PRAs. São hidrofílicos e reagem facilmente com a água, ao contrário dos produtos repelentes à água ou hidrofóbicos.

Para melhor entender a relação entre materiais hidrofílicos e hidrofóbicos é necessário

dar atenção ao conceito do ângulo de contato. A penetração de líquidos através dos poros do concreto é influenciada pela viscosidade do líquido, pelo raio dos poros e pelo ângulo de contato entre o líquido e o material, destes fatores apenas o ângulo de contato pode ser alterado. Quando uma gota de um determinado líquido é colocada sobre uma superfície forma-se uma interface entre o sólido, o líquido e o vapor (CAPPELARI et al., 2020; DE MEDEIROS et al., 2015). O ângulo de contato é definido pela norma D 7334 da American Society for Testing and Materials (ASTM, 2008) como o ângulo entre um plano tangente a uma gota de líquido e um plano que contém a superfície onde o líquido está depositado (Figura 3).

Figura 3: Ilustração do ângulo de contato



. Fonte: ASTM (2008)

Onde:

A = ângulo de contato

D = gota de líquido

P = superfície onde o líquido está depositado

T = tangente na superfície da amostra

Esta mesma norma estabelece que um material é hidrofílico quando confere a gota do líquido um ângulo menor que 45° , se ângulo de contato for maior que 90° o material considerado hidrofóbico, caso os valores fiquem entre 45° a 90° , o material é intermediário (ASTM, 2008).

Uma ampla gama destes materiais está inclusa no grupo de aditivos redutores de permeabilidade. A maioria dos produtos comerciais disponíveis no mercado possui constituintes próprios e formulações mantidas em sigilo. Várias publicações relatam a presença de diferentes óxidos nestes aditivos, o que pode indicar diferentes comportamentos de acordo com o material aplicado (DE BELIE et al., 2018). Existem três maneiras de utilização destes aditivos: (i) revestimento aplicado como uma pasta de cimento na superfície de estruturas de concreto existentes; (ii) aditivo adicionado ao concreto no momento da dosagem; e (iii)

aplicação a seco na superfície de concreto fresco (GARCÍA-VERA et al., 2018).

A reação dos produtos químicos do aditivo cristalino nas misturas cimentícias ocorrem na presença da umidade, em virtude na natureza hidrofílica do aditivo, o suprimento de água é fundamental para a ocorrência das reações de cristalização. De acordo com Roig-Flores (2016) e Roig-Flores *et al.*; (2015) o comportamento desses produtos ainda é parcialmente desconhecido, segundo relatório da ACI TC 212 os compostos que reagem com estes aditivos são silicatos tricálcicos, enquanto Sisomphon; Copuroglu e Koenders (2012) indicam o hidróxido de cálcio como reativo. O consenso é que destas reações são formados produtos cristalinos capazes de preencher os poros e fissuras do concreto e assim tornar o concreto menos permeável à penetração de água e outros líquidos agressivos. As formações cristalinas produzidas pelo aditivo tornam-se uma parte permanente da matriz de cimentícia (GARCÍA-VERA et al., 2018; HODUL; ŽIŽKOVÁ; BORG, 2020; OLIVEIRA, 2019; SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

A cristalização de acordo com a definição proposta pelo Comitê ACI 212.3R (2016) ocorre conforme descreve a Equação 1, em que um promotor cristalino (M_xR_x) reage com os silicatos tricálcicos e a água, isso resulta na formação de CSH mais denso e um precipitado ($M_xCaR_x-(H_2O)$) capaz de bloquear os poros da matriz. Esse processo foi estudado por diversos pesquisadores do assunto (DE BELIE et al., 2018; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; GARCÍA-VERA et al., 2018; HODUL; ŽIŽKOVÁ; BORG, 2020; OLIVEIRA, 2019; ROIG-FLORES et al., 2016).



De forma geral, os aditivos redutores de permeabilidade por cristalização são formados por produtos químicos ativos, geralmente misturados ao cimento e areia, com comportamento altamente hidrofílicos. Reagem na presença de água para formar produtos insolúveis em água, capazes de bloquear as fissuras do concreto, assim, aumentam a densidade do CSH e a resistência à penetração da água. Estes aditivos não são apenas eficientes no bloqueio de poros, como também tem a capacidade de resistir a condições hidrostáticas e selar fissuras quando ativados por umidade. Como produto de reação, formam CSH modificado e dependendo do promotor cristalino, formam um precipitado a partir de moléculas de água e cálcio (DE BELIE et al., 2018; ESCOFFRES; DESMETTRE; CHARRON, 2018; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; NASIM; DEWANGAN; DEO, 2020a). Estas características podem contribuir para a recuperação das propriedades de engenharia e mecânicas do concreto, em

função das condições e duração de exposição e dos mecanismos de cicatrização ativados (FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016).

Essa capacidade idealmente contribuiria para uma recuperação das propriedades de engenharia e mecânicas do composto, também em função das condições e durações de exposição e dos mecanismos de cicatrização ativados. As reações de “cristalização”, que se propagam através do concreto consomem a umidade presente no concreto, porém, também podem sofrer ativação retardada, à medida que o material entrar em contato com a água novamente. Este fator é importante na formação de fissuras, mesmo em idades posteriores do concreto (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014).

2.4.2 Adições Minerai

A utilização de adições minerais na construção civil tornou-se comum, sua utilização afeta a cinética de hidratação, as propriedades do material, bem como o potencial de cicatrização autógena. De Belie (2018) ressalta a importância dos fabricantes de concreto modernos aprenderem com o conhecimento dos antigos romanos a estimular propriedades de cicatrização às estruturas de concreto, uma vez que a cinza volante atual é semelhante às cinzas vulcânicas utilizadas pelos romanos.

Grande parte dos estudos a respeito dos efeitos de adições minerais na autocicatrização referem-se principalmente à escória de alto forno e as cinzas volantes, cujas suas partes reativas são geralmente de estrutura cristalina amorfa. A vantagem decorrente do uso destes materiais consiste na permanência de grandes quantidades das partículas dos mesmos não hidratadas mesmo em idades avançadas, assim é promovida a hidratação contínua (DE BELIE et al., 2018).

A reação pozolânica para adições silicosas ou aluminosas como cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto-forno, argila calcinada e outros, reforçam a hidratação contínua dos grãos de cimento em relação ao desenvolvimento de CSH a longo prazo e conseqüente a cicatrização autógena. Para autores como De Belie (2018), Huang; Ye; Damidot (2014) e Van Tittelboom *et al.* (2012) a cicatrização autógena é melhorada quando o cimento é parcialmente substituído por escória de alto-forno e cinzas volantes. Porém, é necessário um teor mínimo de hidróxido de cálcio para a reação posterior dos aditivos minerais durante o processo de cicatrização autógena.

A preferência por estudos como a escória de alto forno concentra-se em sua atividade cimentícia mista e pozolânica e pode reagir mesmo em níveis baixos de hidróxido de cálcio, ao contrário de outras pozolanas. A cinética de hidratação de materiais cimentícios com adições

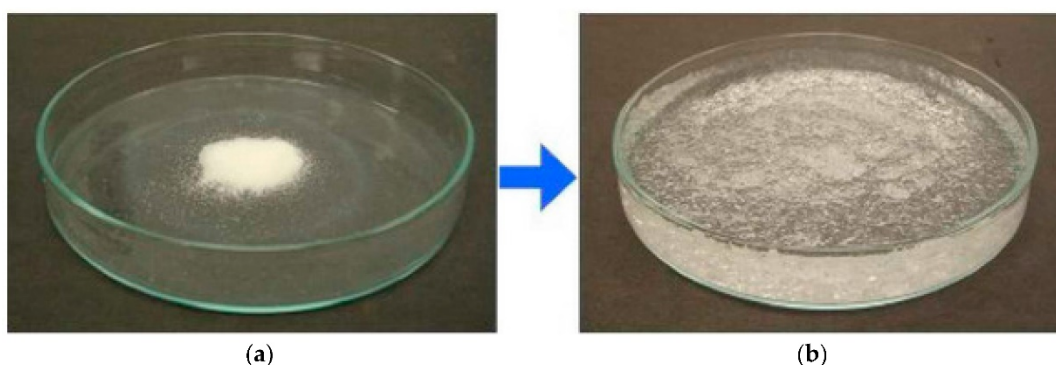
minerais pode ser considerada baixa durante as primeiras semanas. Nos últimos anos, têm sido propostos métodos para estimular e acelerar o processo de cicatrização como: a aplicação de soluções alcalinas, maior temperatura de cura e misturas de diferentes adições minerais.

2.4.3 Polímeros Superabsorventes

Segundo Tenório Filho e Mannekens *et al.*, (2020) os polímeros superabsorventes (SAPs) vem sendo amplamente utilizados como promissores agentes de cura na tecnologia do concreto. Sua ação é focada na mitigação do encolhimento autógeno e o risco de rachaduras em idade precoce. Recentemente diversos estudos têm sido realizados com a utilização destes agentes, tanto ao nível de pastas e argamassas (DE MEYST, MANNEKENS, *et al.*, 2019, KANG, HONG, *et al.*, 2017, SNOECK, JENSEN, *et al.*, 2015, SNOECK, PEL, *et al.*, 2018) quanto composições de concreto de alto desempenho. (JIANG, YANG, *et al.*, 2014, JUSTS, WYRZYKOWSKI, *et al.*, 2015, WU, FARZADNIA, *et al.*, 2017).

Os polímeros superabsorventes ou hidrogéis consistem em uma rede 3D natural ou sintética, insolúvel em água, de cadeias polimérica reticuladas por ligações físicas ou químicas. Ao entrar em contato com a água de mistura do material cimentício, possuem capacidade de reter quantidade significativa da mesma, cerca de até 500 vezes o seu próprio peso devido a pressão osmótica, a Figura 4 exemplifica esta característica. Dessa forma atuam como reservatórios de água para manter o alto nível de umidade relativa interna do sistema por um período de tempo considerável (KANG, HONG, *et al.*, 2017, 2018, LIU, SHI, *et al.*, 2017, SNOECK, JENSEN, *et al.*, 2015, SNOECK, PEL, *et al.*, 2018, TENÓRIO FILHO, MANNEKENS, *et al.*, 2020). Os SAPs são adotados cada vez mais em pesquisas com argamassas e concretos, estes foram introduzidos como agentes de cicatrização em sistemas de cimento com baixa relação água/cimento para reduzir a retração autógena decorrente do endurecimento (DE BELIE *et al.*, 2018; SNOECK *et al.*, 2014).

Figura 4: a) SAP seco, b) SAP após inchamento



Fonte: Tenório Filho et al. (2020)

Quando a umidade relativa interna cai, a água adsorvida pelos SAPs pode ser gradualmente liberada na matriz para compensar o consumo de água dentro da pasta de cimento, assim pode ser mantida a umidade em nível alto. Esse mecanismo faz com que o encolhimento autógeno das estruturas pode ser reduzido de forma efetiva (SNOECK, JENSEN, et al., 2015, WU, FARZADNIA, et al., 2017). No entanto, quando o SAP libera água, pode deixar vazios na matriz cimentícia, o que pode acarretar redução das propriedades mecânicas e a capacidade de carga estrutural do concreto. Se o SAP é colocado em contato direto com a água pura, ocorre pouca absorção na superfície, assim é necessário promover a mistura do SAP com o cimento e demais componentes antes de adicionar a água (LIU, SHI, et al., 2017).

De um ponto de vista químico, os SAPs são polieletrólitos reticulados que incham quando em contato com água ou outras soluções aquosas e resultam na formação de hidrogel. Incluem copolímero de acrilamida/ ácido acrílico e ácido poliacrílico (LIU, SHI, et al., 2017, TENÓRIO FILHO, MANNEKENS, et al., 2020). Geralmente são compostos de monômeros iônicos e precisam de baixa densidade de reticulação, para criar uma grande capacidade de absorção de fluido. SAPs podem absorver e reter soluções aquosas até várias centenas de vezes seu próprio peso (MIGNON et al., 2017). Para a aplicação em concreto, o inchaço do SAP é uma característica fundamental.

SAPs podem ser classificados de várias maneiras: com base na ausência ou presença de cargas, a aparência física, a presença de ligações covalentes ou físicas de reticulação, e o mais importante pela sua composição. Esta última divide os SAPs entre SAPs sintéticos, semi-sintéticos e naturais (MIGNON et al., 2017).

Em estudos de Van Tittelboom *et al.*, (2016) foram comparados os desempenhos de duas abordagens de cicatrização: com utilização de cápsulas e polímeros SAPs. Cujos autores concluíram que ambas as abordagens possuíam potencial de cicatrização e aplicação em larga

escala, porém, o uso de cápsulas requer mais preparos e cuidados, principalmente no que diz respeito ao preenchimento e posicionamentos das cápsulas. Além disso, verificou-se que os SAPs apresentaram maior eficiência de cicatrização com base nas medidas de redução das fissuras, outra diferença entre estas abordagens consiste no mecanismos capaz de desencadear a cicatrização, cápsulas tendem a desencadear este processo com o surgimento das fissuras, portanto, não requer água. Por outro lado, a água é necessária com o uso dos SAPs para causar o inchaço de suas partículas e posteriormente resultar na liberação de água que culmina na hidratação adicional e formação de carbonato de cálcio.

2.5 CICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA

Em pesquisas passadas grande quantidade dos estudos foi dedicada à cicatrização autógena. Porém tem sido tratada como secundária, uma vez que sua aplicação é limitada a pequenas fissuras e a sua confiabilidade é menor, pois sempre depende das possíveis reações de hidratação, no momento da formação da fissura (TAKAGI, 2013; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

A cicatrização autônoma é realizada pela adição de agentes químicos ou biológicos específicos à matriz cimentícia, (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014; PANG et al., 2016). Refere-se a mecanismos artificialmente acionadas na matriz de forma artificial, a ideia básica da cicatrização autônoma é que, após a ocorrência de rachaduras no concreto, os agentes de cicatrização possam ser liberados e reajam com alguns estímulos, e como resultado, acionam o mecanismo de cicatrização (TANG; KARDANI; CUI, 2015). Diferentemente da cura autógena, a autônoma depende de adições incorporadas à matriz e tem o potencial de reparar rachaduras maiores (ZHANG et al., 2020).

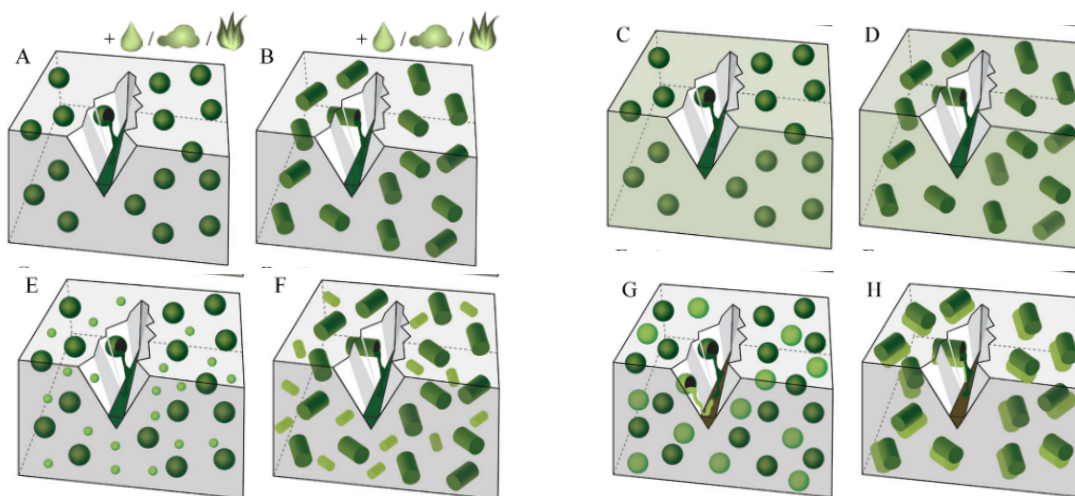
Vários são os agentes de cura autônoma utilizados, por exemplo, tem-se os em cápsulas, fibras ocas, bactérias e também polímeros. (NASIM; DEWANGAN; DEO, 2020a). Os materiais baseados em cápsulas levam os agentes curativos dentro de discretas cápsulas, quando estas são rompidas, por exemplo, por danos, o mecanismo de cicatrização é acionado através da liberação e reação do reagente na região onde ocorreu o dano. Enquanto outros agentes reagem em contato com a umidade, ar ou devido ao aquecimento, ou o contato com a própria matriz. Outros agentes reagem ao ter contato com outros componentes presentes na matriz cimentícia. Na abordagem baseada em cápsulas, estas podem ter formato esférico ou cilíndrico (TANG; KARDANI; CUI, 2015; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

2.6 ESTRATÉGIAS DE CICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA

2.6.1 Cápsulas

Como já mencionado, os materiais de cicatrização em cápsulas carregam dentro das mesmas um agente de cicatrização. Alguns destes podem reagir ao contato com a umidade ou ar ou devido ao aquecimento (Figura 5a e b) ou em contato com a própria matriz (Figura 5c e d), outros agentes reagem ao fazer contato com um segundo componente presente na matriz (Figura 5e e f) ou fornecida por cápsulas adicionais (Figura 5g e h). Estas cápsulas podem ser esféricas (Figura 5a, c, e, g) ou cilíndricas (Figuras 5b, d, f, h) (DE BELIE et al., 2018; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Figura 5: Abordagens de autocorreção baseadas em cápsulas. Fuga de agente curativo das cápsulas para a fenda devido a forças gravitacionais e capilares. Reação de agente encapsulado esférico / cilíndrico (inclusões de cor escura) em contato com (a,b) umidade ou ar ou devido ao aquecimento; (c,d) a matriz cimentícia; (e,f) um segundo componente presente na matriz (inclusões pequenas de cor clara) ou (g, h) um segundo componente fornecido por cápsulas adicionais (inclusões grandes de cor clara)



Fonte: Van Tittelboom e De Belie (2013)

A adição de microcápsulas com agentes curativos é um meio para alcançar a autocicatrização, este processo segue duas etapas: quando a microcápsula é rompida pela propagação das fissuras, os agentes de cicatrização fluem para estas, após isso, ocorre a reação química com a matriz cimentícia, o que faz a superfície da fissura unir-se. Conseqüentemente, o desenvolvimento de fissuras pode ser restringido, assim como a recuperação de propriedades como rigidez, resistência e tenacidade do concreto (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Embora o concreto autocicatrizante incorporado à microcápsula tenha sido amplamente estudado, ainda há muitas questões a serem exploradas. Inicialmente, microcápsulas eficazes

com aplicabilidade prática devem ser fabricadas. Além disso, a possibilidade de rachaduras nas microcápsulas precisa ser melhorada pelo design. Finalmente, a análise teórica, incluindo mecanismo e modelagem numérica, deve ser pesquisada em profundidade. (ZHANG; WANG; HAN, 2020).

Questões como a preparação, dosagem ideal de microcápsulas, bem como sua eficiência na cicatrização são questões bastante exploradas em estudos sobre este assunto. Estes materiais necessitam de características específicas para esta utilização como espessura e tamanho satisfatório da casca, o agente de cicatrização nela contido, viabilidade e compatibilidade com a matriz cimentícia, assim como a adesão à interface do concreto (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Apesar dos benefícios do uso de fibras ocas ou microcápsulas como agente curador, é inegável, a fraqueza delas ainda é distinta. Eles se tornarão defeitos internos ou pontos de concentração de estresse após a liberação dos agentes de cura. Além disso, as fibras ocas e as microcápsulas são materiais únicos como agentes de cura, juntamente com um custo relativamente alto; portanto, sua aplicação no concreto autocicatrizante tem sido amplamente limitada (PANG et al., 2016).

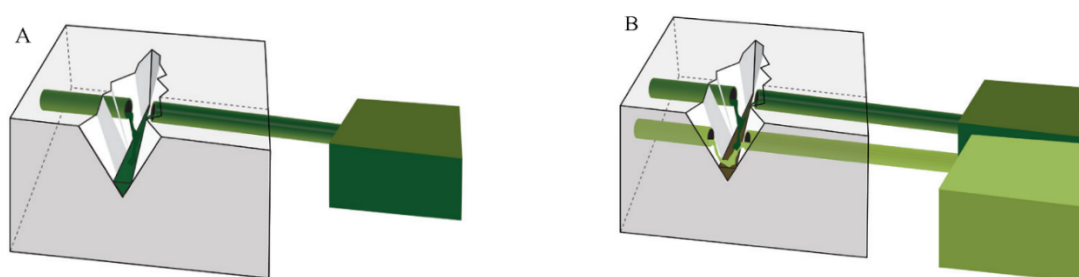
Segundo Tsangouri *et al.*, (2019) e Anglani *et al.*, (2020) foram testados vários tipos de cápsulas, com diversas formas, dimensões e materiais constituintes. Porém, para que sejam obtidos sistemas eficazes na cicatrização é necessário que diversos requisitos sejam atendidos como: a compatibilidade da cápsula tanto com a matriz cimentícia quanto o agente cicatrizante encapsulado, sensibilidade às fissuras para que seja facilitada a liberação do conteúdo nelas contido e assim preencher e reparar as fissuras formadas, devem ser resistentes ao processo de mistura e moldagem do concreto e não devem afetar significativamente as propriedades mecânicas do concreto.

2.6.2 Sistema Vascular

O conceito do sistema vascular em concreto com objetivos de autocicatrização tem uma abordagem voltada para a natureza. Um exemplo é sistema cardiovascular humano que transporta sangue pelo corpo, assim como o tecido vascular das plantas que transporta alimentos, água e minerais. De forma semelhante, este sistema em concreto pode fornecer agentes de estimuladores da cicatrização a locais danificados. Quando este agente é fornecido de uma fonte externa, teoricamente não há limite para o volume de material que será fornecido, esta é a principal vantagem em relação ao sistema com a utilização de cápsulas (DE BELIE et al., 2018).

Os materiais de autocicatrização de base vascular sequestram o agente de cura em uma rede de tubos ocultos que conectam o interior e o exterior da estrutura. Quando essa abordagem é usada em combinação com um agente de cicatrização de um componente, um sistema vascular de um canal é aplicado (Figura 6a), enquanto um sistema de múltiplos canais é usado em combinação com um agente de cicatrização de múltiplos componentes (Figura 6b).

Figura 6: Abordagens de autocicatrização com base vascular. Vazamento do agente curativo do tanque via vascular para a fissura devido a forças gravitacionais e capilares e eventual pressão (hidrostática). Sistema vascular de um canal (a) e canal múltiplo (b)



Fonte: Van Tittelboom e De Belie (2013)

2.6.3 Bactérias

A precipitação de carbonato de cálcio induzida por bactérias tem sido proposta como técnica alternativa e ambientalmente correta para o reparo de fissuras, em comparação com agentes de cicatrização como aditivos e polímeros, o biomineral proposto é mais compatível com a matriz de concreto e mais ecológico. Sob condições adequadas a maioria das bactérias é capaz de induzir a precipitação de carbonatos (KHALIQ; EHSAN, 2016; WANG et al., 2012). A ideia da autocicatrização baseada em bactérias é a sua utilização para promover a precipitação de carbonato de cálcio nas trincas. Essa precipitação pode ser causada por várias vias metabólicas como a hidrólise ureia e oxidação de ácidos orgânicos (HUANG et al., 2016; WANG et al., 2012; WU et al., 2017; ZHANG; WANG; HAN, 2020).

Essa precipitação pode ser causada por vias metabólicas como a hidrólise da ureia e a oxidação de ácidos orgânicos. A hidrólise da ureia possui vantagens pois pode ser controlado, além do potencial para produzir grande quantidade de carbonato em um curto período de tempo. Outra via metabólica para a produção de CaCO_3 é a oxidação de ácidos orgânicos, há menos impacto ambiental em comparação com a hidrólise da ureia onde ocorre a produção excessiva de amônia. Associado a isso, a precipitação do CaCO_3 por esta via metabólica produz CO_2 que

pode reagir com a portlandita (CaOH_2), um importante produto de hidratação do cimento e que contribui para a formação do carbonato de cálcio. (HUANG et al., 2016; VAN TITTELBOOM et al., 2010; WANG et al., 2012).

De acordo com Zhang e Wang *et al.*, (2020) o princípio da cicatrização por bactérias ureolíticas deve-se a carga negativa da parede celular bacteriana, assim os íons de cálcio na solução são atraídos para ela. Quando a concentração de CaCO_3 excede a solubilidade, este precipita na parede celular das bactérias, sendo este fator é determinado por fatores como: a concentração de carbono inorgânico, o pH, a concentração de íons de cálcio e a presença de locais de nucleação, onde os três primeiros fatores são fornecidos pelo metabolismo da bactéria, enquanto a parede celular da bactéria atuará como um local de nucleação.

Para a utilização de bactérias na cicatrização de rachaduras do concreto é necessário que alguns aspectos técnicos sejam levados em consideração. Torna-se importante a proteção das mesmas contra o ambiente alcalino do concreto e contra a redução da matriz a medida que a hidratação prossegue, assim que os grãos de cimento hidratam a maioria dos poros da matriz reduz a tamanhos menores que os esporos das bactérias, esse fator pode levar ao colapso da célula e reduzir a sua vida útil. Quando bactérias são utilizadas para curar fissuras no concreto, o principal fator de impedimento é o pH altamente alcalino, a seca relativa e a falta de nutrientes necessários que podem restringir o crescimento de bactérias e tornam o concreto um ambiente resistente para as mesmas (ACHAL; MUKERJEE; SUDHAKARA REDDY, 2013; HUANG et al., 2016; VAN TITTELBOOM et al., 2010; ZHANG; WANG; HAN, 2020).

Para melhor ação as bactérias têm de estar prontamente disponíveis, assim são incorporadas na fase mistura. (KHALIQ; EHSAN, 2016). Embora o cultivo e o isolamento de bactérias não sejam tecnologias desafiadoras até agora, os tipos de bactérias que podem sobreviver de forma estável em ambientes de concreto, como alta temperatura e alto valor de pH, ainda são muito limitados. Portanto, é necessário desenvolver materiais econômicos e ecológicos como agente de autocicatrização em materiais de concreto. (PANG et al., 2016). Diferentes técnicas de encapsulamento para proteger bactérias têm sido utilizadas na literatura, incluindo agregado de argila expandida, terra de diatomáceas, gel de sílica e poliuretano (PU) em tubos de vidro, microcápsulas à base de melamina e hidrogel. (GUPTA; PANG; KUA, 2017).

2.7 TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO

Um dos aspectos importantes na pesquisa de tecnologia do concreto autocicatrizante é avaliação da eficiência das abordagens utilizadas. O desempenho da autocicatrização tem sido

avaliado por diferentes técnicas, inclusive técnicas padrão para concreto. Van Tittelboom e De Belie (2013) propuseram uma classificação geral dos métodos de avaliação para a autocicatrização do concreto com base em suas propriedades avaliadas. Nas seções seguintes, os métodos de testes inclusos em cada um desses grupos são brevemente discutidos.

Essas classes de métodos incluem principalmente técnicas qualitativas para a visualização da estrutura e composição do concreto recuperado, deposição de cristais, liberação de agentes de cicatrização encapsulados e processo de fechamento das fissuras. Existem também métodos de determinação do processo de cicatrização, composição química e produtos precipitados. Os métodos de visualização comumente utilizados são microscopia, imagem e espectroscopia.

2.7.1 Microscopia

Os métodos microscópicos são amplamente utilizados em materiais cimentícios, principalmente para observação microestrutura e estrutura da amostra antes e depois da cicatrização. Nesse grupo pode-se citar os exames petrográficos, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de varredura ambiental (ESEM) (TANG; KARDANI; CUI, 2015; WIKTOR; JONKERS, 2011).

A microscopia óptica é utilizada para observar a superfície, obter detalhes de contorno, medir larguras das fissuras e mensurar produtos cristalinos. O SEM e o ESEM podem fornecer informações sobre a estrutura cristalográfica da amostra e determinar a sua morfologia, forma e tamanho dos produtos reidratados. A petrografia mais utilizada para a investigação de estrutura de rochas pode ser utilizada para a obtenção da microestrutura da amostra e visualização de rachaduras preenchidas com os agentes de cicatrização.

2.7.2 Imagens

A utilização de imagens para examinar materiais cimentícios é um método estabelecido, embora seja usado há bastante tempo a qualidade das imagens foi aprimorada com os avanços da tecnologia, as mesmas têm sido usadas para a visualização das estruturas de concreto e cicatrização. Além disso, é possível a visualização da liberação do agente de cura e também análises de quantificação. Os principais métodos considerados como imagens são a radiografia/tomografia de raios X, radiografia/tomografia de nêutrons.

2.7.3 Espectroscopia

A espectroscopia tem sido utilizada para determinar os materiais cristalinos, a composição química e produtos precipitados em uma amostra cicatrizada. Além disso, também podem fornecer detalhes do processo de cicatrização. Análises de posição da forma e intensidades dos picos nos espectros fornecem informações sobre a estrutura atômica e molecular da amostra. As principais técnicas espectroscópicas são a espectroscopia de raios X, espectroscopia de infravermelho, espectroscopia Raman e difração de raios X.

3 METODOLOGIA

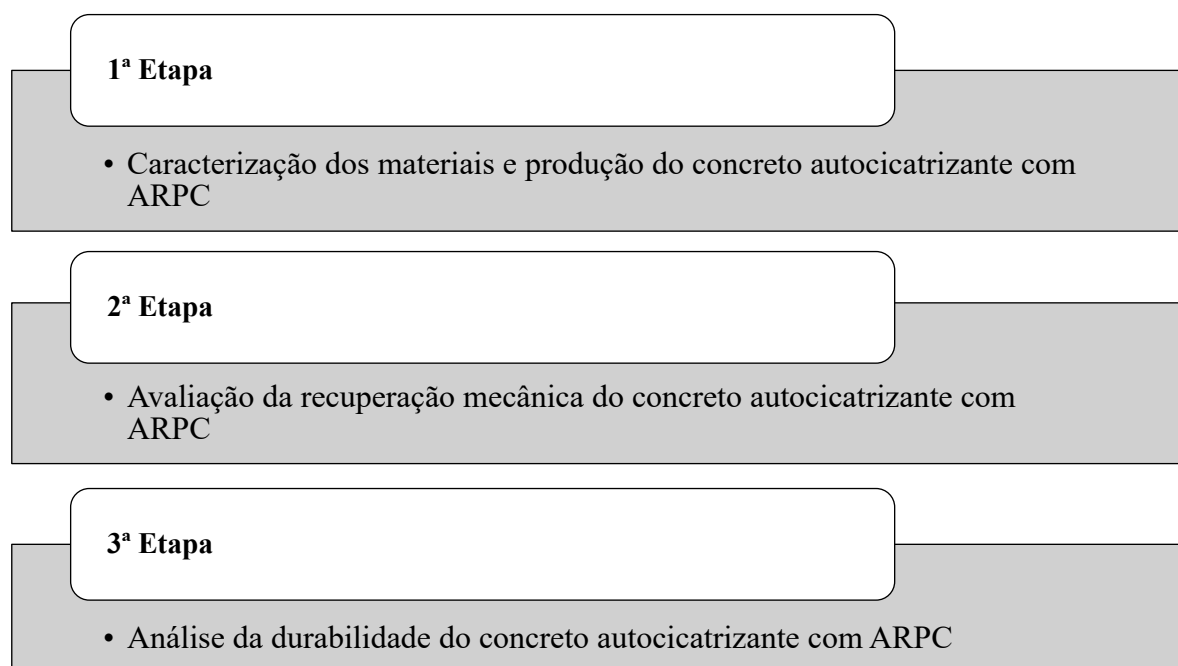
Neste capítulo é apresentado o programa experimental realizado nesta pesquisa para o objetivo de avaliar o efeito do ARPC na durabilidade de concreto produzido com materiais da cidade de Manaus, analisando a cicatrização autógena. A pesquisa é do tipo experimental, e para a sua realização o planejamento do programa experimental foi realizado em três etapas descritas a seguir e apresentadas na Figura 7.

Etapa 1: Caracterização dos materiais para a produção do concreto autocicatrizante, por meio de análises físicas dos materiais, identificando-se os parâmetros de dosagem. Nesta etapa foram moldados 84 corpos de prova padrão, de dimensões 100mm x 200mm, para utilização nos ensaios de resistência a compressão axial, absorção total e capilaridade e 16 corpos de prova padrão, de dimensões 50mm x 100mm, para utilização no ensaio de migração de íons cloretos e microscopia eletrônica por varredura - MEV.

Etapa 2: Avaliação o efeito do aditivo ARPC e do tipo de cimento na recuperação das propriedades mecânicas do concreto autocicatrizante, por meio de ensaio de resistência a compressão de concretos pré-fissurados aos 28 dias e rompidos aos 84 dias, analisando-se o desempenho em comparação ao concreto sem aditivo.

Etapa 3: Avaliação o efeito do aditivo ARPC e do tipo de cimento na durabilidade do concreto autocicatrizante, por meio de ensaio de absorção total, capilar e migração de íons cloretos, analisando-se a formação de compostos resultantes da autoregeneração por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 7: Etapas de trabalho para desenvolvimento dos traços, produção e caracterização dos concretos



Fonte: Autor (2020)

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC

3.1.1 Caracterização dos Materiais

Para a caracterização dos materiais utilizados na produção do concreto de referência sem aditivo e autocicatrizante, foram realizados os seguintes ensaios físicos, descritos a seguir:

3.1.1.1 Cimento Portland

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento Portland em função de sua disponibilidade no mercado da cidade de Manaus. Estes foram o cimento com escória de alto forno (CP II -E 32) produzido pela Votorantim Cimentos, proveniente de Porto Velho, transportado em granel e envasado em Manaus e o cimento pozolânico (CP II - Z 40 RS) produzido pela Cimentos MIZU, em sua planta localizada na capital amazonense.

A Tabela 1 apresenta as características físicas dos cimentos utilizados com base nas informações fornecidas pelo fabricante, de acordo com a ABNT NBR 16697:2018 Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018).

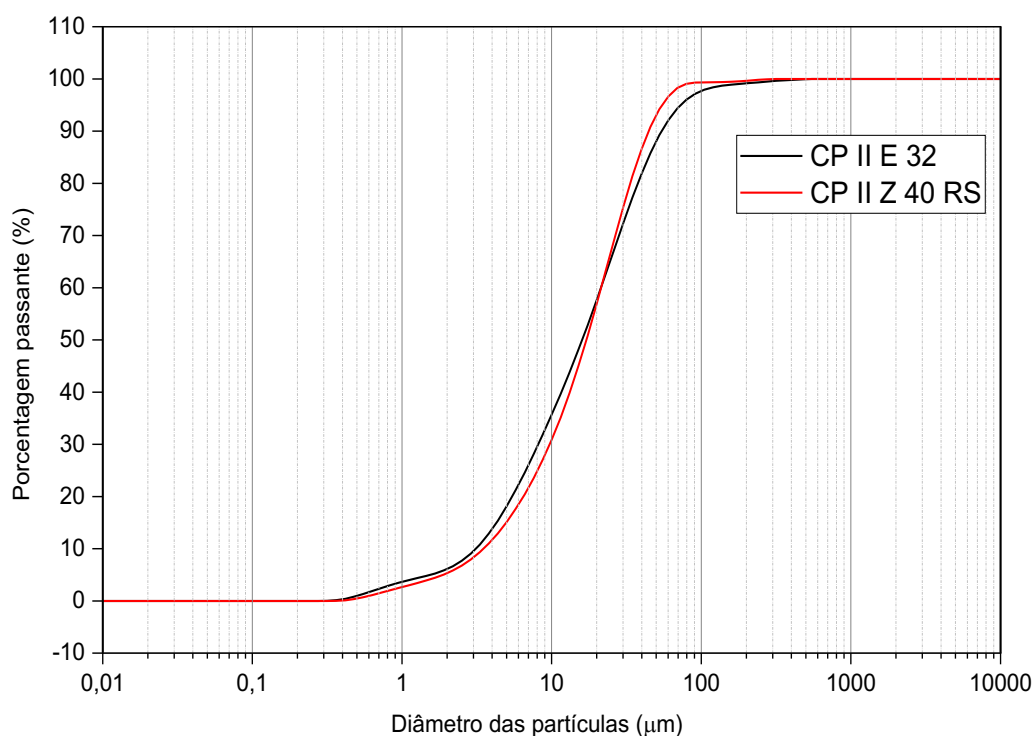
Tabela 1- Relatório físico dos cimentos utilizados

CIMENTO CP II Z – 40 RS	LIMITES DA NORMA NBR 16.697:2018	CP II Z-40 RS	LIMITES DA NORMA NBR 16.697:2018	CP II E-32
Início de pega (H:min)	≥ 1h	3:25	≥ 1h	02:05
Resistência – 3 dias (MPa)	≥ 15 MPa	21,9	≥ 10 MPa	21,5
Resistência – 7 dias (MPa)	≥ 25 MPa	30,7	≥ 20 MPa	30,3
Resistência – 28 dias (MPa)	≥ 40 MPa	33,5	≥ 32 MPa	36,0-
Resíduo na peneira 75µm (g)	≤ 10	0,5	≤ 12	0,6

Fonte: Fabricante, 2019

A Figura 8 apresenta a distribuição de partículas dos cimentos utilizados, onde é possível observar a semelhança entre as curvas granulométricas o que é confirmado por meio da comparação entre os índices D10, D50 e D90 dos cimentos, para os quais foram obtidos os valores: D10 de 3,12 e 3,51 µm, D50 de 16,00 e 17,08 µm e D90 de 54,24 e 44,43 µm, respectivamente, para o CP II-E-32 e CP II Z-40 RS. Observa-se que os valores de D10 e D50 do CII Z-40 RS são maiores cerca de 12,50% e 6,75%, respectivamente em relação a amostra de CP II E-32, e para D90 houve uma redução de 18,09%.

Figura 8: Curva granulométrica do CP II-Z-40-RS



3.1.1.2 Água

Foi utilizada água potável extraída de poço artesiano tubular existente nas dependências da empresa fornecedora de concreto, onde foram realizados os ensaios.

3.1.1.3 Agregados

Nesta pesquisa os agregados graúdos e miúdos utilizados foram a areia e seixo rolado provenientes do Rio Japurá, adquiridos em comércios da cidade de Manaus. A escolha pelo seixo como agregado graúdo deve-se a sua maior disponibilidade no mercado em relação as britas.

De acordo com Rebelo (2019) o seixo proveniente do Rio Japurá é composto de 95% de quartzo e feldspatos, apresentando granulação fina que pode estar relacionada com a distância do ponto de origem e sua formação, que colabora para as frações finas e superfície lisa dos grãos, além da influência do processo extração como a dragagem em suas características. A caracterização dos agregados graúdos e miúdos (Figura 9) foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da empresa Konkrex Engenharia de Concretos, segundo as prescrições das normas descritas no Quadro 1.

Figura 9: Agregados graúdo e miúdo utilizado na composição dos traços



Fonte: Autor (2020)

Quadro 1: Ensaios realizados para a caracterização dos agregados miúdos e graúdos

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	
Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248:2003
Determinação da massa específica	NBR NM 52:2009
Determinação da massa específica	NBR NM 53:2009
Determinação da absorção	NBR NM 53:2009
Determinação da massa unitária	NBR NM 45:2006
Determinação do teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46:2003

Fonte: Autor (2020)

As características dos agregados miúdos (areia) e graúdos (seixo) são apresentadas na Tabela 2.

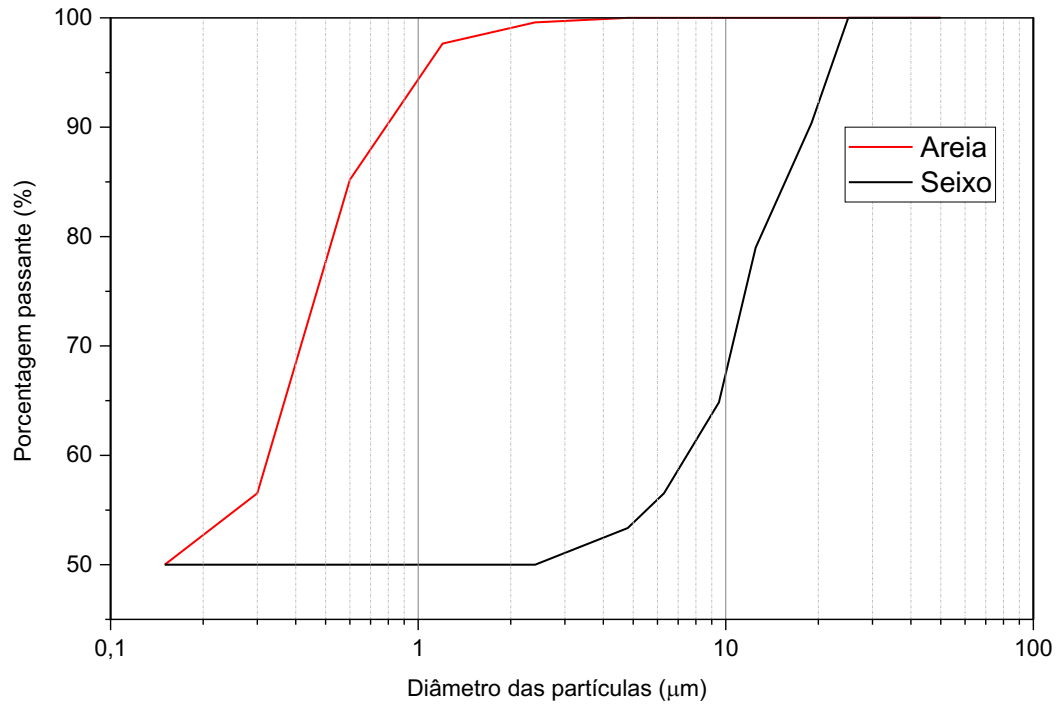
Tabela 2: Características dos agregados

DADOS OBTIDOS	AGREGADO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
Módulo de finura	2,18	6,18
Dimensão máxima (mm)	1,20	19,0
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,60
Massa unitária solta (kg/cm ³)	-	1970
Massa unitária compactada (kg/cm ³)	-	2010
Teor de materiais pulverulentos (%)	-	0,23%
Absorção (%)	-	1,08%

Fonte: Autor (2020)

A Figura 10 apresenta a curva granulométrica dos agregados utilizados.

Figura 10: Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Autor (2020)

3.1.1.4 Aditivo Redutor de Permeabilidade por Cristalização

O redutor de permeabilidade por cristalização utilizado na pesquisa é à base de cimento Portland e compostos químicos com propriedades ativas, que atua como agente cristalizante. É alcalino e não-tóxico. Quando misturado com a água de amassamento dá uma coloração “amarelo-fluorescente” no concreto, devido a existência de um rastreador químico existente em sua composição, sensível a radiação ultravioleta. Em função da patente do fabricante o nome do produto e algumas de suas características não poderão ser divulgadas.

O material é comercializado em forma de pó (Figura 11) e foi adquirido em revenda autorizada do fabricante na cidade de Manaus.

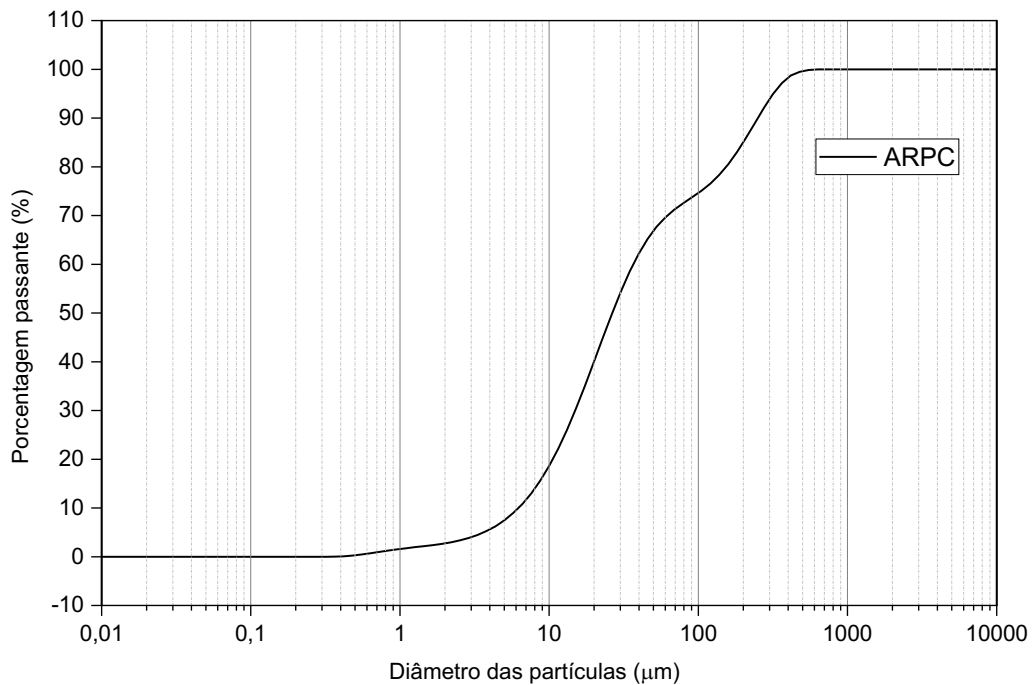
Figura 11: Aspecto do aditivo catalisador cristalino fornecido na forma de pó



Fonte: Autor (2020)

O ensaio de granulometria a laser do ARPC, realizado na Companhia de Pesquisas dos Recursos Minerais (CPRM), apresentou os resultados observados na Figura 12. Onde foi obtido um D10 de 6,23 μm , D50 de 26,46 μm e D90 de 250,18 μm . Estes parâmetros são definidos como os tamanhos de partícula abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% da massa do material, respectivamente. A partir desses dados observa-se que o aditivo catalisador cristalino possui granulometria mais grossa em relação aos grãos de cimento descritos no item 3.1.1.

Figura 12: Curva granulométrica do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização



Fonte: Autor (2020)

3.1.1.5 Aditivo Superplastificante

Na composição do traço de concreto foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilato com o intuito de melhorar a trabalhabilidade do concreto. O aditivo usado na pesquisa é fabricado pela empresa GCP Technologies, conhecido comercialmente pelo nome ADVA e segue as prescrições de classificação da ABNT NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland: requisitos (ABNT, 2019) (Tabela 3).

Tabela 3: Propriedades do aditivo superplastificante

ADVA™ CAST 525	
Massa Específica - g/cm ³	1,04 – 1,06
pH	3,0 – 5,5
Teor de Sólidos %	25,39

Fonte: Fabricante, 2019.

3.1.2 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS

3.1.2.1 Traços Utilizados

Através de pesquisa de mercado e, também, junto as concreteiras, verificou-se que os concretos, mais comercializados e utilizados na cidade de Manaus, são os de resistência a compressão com Fck, entre 25 e 30 MPa, sendo que o segundo é o mais utilizado pelas concreteiras e o primeiro pelo público em geral, desta forma optou-se por utilizar o de resistência, Fck 25 MPa. A partir de então, utilizou-se os parâmetros da ABCP, para desenvolvimento do traço desta pesquisa.

A Tabela 4 apresenta as porcentagens de ARPC sobre a massa de cimento utilizada nas amostras produzidas. Convém observar que as variáveis na composição dos traços de concreto são o tipo de cimento e a adição do catalisador. Os traços de concreto, constantes na Tabela 4 foram definidos pelo autor seguindo os procedimentos de dosagem de concreto recomendados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) de acordo com as características dos materiais utilizados.

Foram fixados os seguintes parâmetros: resistência a compressão axial de 25 MPa, um consumo de cimento de 314,0 kg/m³; relação água/cimento fixa de 0,55, abatimento de 140mm ± 20mm, em acordo com a ABCP e dosagem de 0,8% do aditivo redutor de permeabilidade sobre a massa de cimento segundo as recomendações do fabricante, além disso pesquisadores como Moreira (2016) utilizaram este teor de aditivo. A partir da definição dos percentuais do

catalisador cristalino foram estabelecidos 4 diferentes traços, em função do tipo de cimento e da utilização do redutor de permeabilidade.

Tabela 4- Porcentagem do catalisador cristalino nas amostras

CONCRETOS	Tipo de cimento	% de catalisador cristalino
AM 1 – CARPC	CP II Z – 40RS	0,8 %
AM 2 – SARPC	CP II Z – 40RS	0 %
AM 3 – CARPC	CP II E – 32	0,8 %
AM 4 – SARPC	CP II E – 32	0 %

Fonte: Autor (2020)

A composição padrão destes traços é apresentada na Tabela 5, cuja coluna relativa ao concreto de referência trata-se da dosagem para 1m³ de concreto e a coluna de concreto para ensaios trata-se do quantitativo utilizado para produção dos concretos utilizados em ensaios laboratoriais.

Tabela 5: Composição dos traços utilizados na pesquisa

MATERIAIS	CONSUMO (Kg/m ³)	
	Concreto de referência	Concreto com aditivo
Cimento (CP II - 40RS e CP II E - 32)	314,0	314,0
Água	173,0	173,0
Agregado miúdo (areia)	701,0	701,0
Agregado graúdo (seixo)	1.195,0	1.195,0
Aditivo superplastificante	2,50	2,50
Redutor de permeabilidade por cristalização	0,0	2,50

Fonte: Autor (2020)

3.1.2.2 Produção dos Concretos

Os concretos foram produzidos em sala climatizada a 23°C ± 1°C, utilizando uma betoneira com capacidade de trabalho de 100 litros. Para a produção dos concretos foram adotados os seguintes procedimentos: Primeiramente, antes da introdução dos materiais, procedeu-se a limpeza do balão da betoneira, retirando qualquer excesso de água que poderia alterar as propriedades do concreto. Em seguida, foi adicionado o agregado graúdo (seixo), o

agregado miúdo (areia) e efetuou-se uma breve mistura. Na sequência foi adicionado metade da água de amassamento e promoveu-se a mistura. Por último, adicionou-se o cimento e o catalisador cristalino com o restante da água de amassamento, de modo que a pasta de catalisador cristalino se espalhasse sobre a superfície do agregado graúdo e consequentemente na interface pasta/agregado.

Após a mistura, foi executado o ensaio reológico. Na Figura 13 verifica-se a consistência do concreto determinada através do ensaio ABNT NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone de 1998 (ABNT, 1998). O abatimento médio para os traços ficaram em 150mm para a AM1CARP, 160mm, para AM2SARP, 160mm para AM3CARP e 150mm para AM4SARP.

Figura 13: Aferição do abatimento (*slump test*)



Fonte: Autor (2020)

Após a medição do abatimento, executou-se a moldagem dos corpos de prova cilíndricos em acordo com a ABNT NBR 5738 (ABNT, 2019) (ver figura 14). O adensamento do concreto foi realizado de forma manual com haste metálica com 12 golpes em 2 camadas. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos por uma manta úmida para impedir a perda de água para o meio externo. Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e transferidos para um tanque onde foram mantidos em cura até a idade de realização.

Figura 14: *Moldagem dos CPs cilíndricos*



Fonte: Autor (2020)

3.2 AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC

Nesta seção estão apresentados os procedimentos adotados para a produção dos concretos estudados.

3.2.1 Ensaio de Determinação da Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório da empresa Konkrex Engenharia de Concretos seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2018), com a utilização de corpos-de-prova de $\varnothing 100 \times 200$ mm, os corpos de prova tiveram suas superfícies capeadas com enxofre para que a carga fosse uniformemente distribuída e permaneceram em cura úmida até a idade de ensaio (Figura 15). A prensa utilizada, foi da marca EMIC, modelo PC 200 CS, com capacidade máxima de 2000 KN e taxa de carregamento de 500mm/min.

Figura 15: Ensaio de resistência a compressão axial (RCA)



Fonte: Autor (2020)

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) foi realizado em três grupos distintos. O primeiro consistiu no ensaio de resistência à compressão axial com 100% da carga de ruptura aos 28 dias de cura dos concretos produzidos. O segundo consistiu no ensaio de resistência à compressão axial com carregamento, aos 28 dias estes concretos foram pré-carregados com 90% da carga de ruptura média obtida para o primeiro grupo, de modo a gerar uma rede de microfissuras, e posteriormente submetidos à cura em tanque de água pelo período de 56 dias para ativar o mecanismo de cicatrização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização e serem submetidos a um terceiro ensaio de resistência à compressão axial desta pesquisa, com 100% da carga aos 84 dias de idade. Este procedimento de pré-fissuração dos concretos foi utilizadas em pesquisas de Moreira (2016), Takagi, Lima e Helene (2014) e Takagi (2013). De acordo com Moreira (2016) este método utilizado no terceiro lote de ensaios tem a finalidade de avaliar o percentual de recuperação mecânica dos concretos a partir do mecanismo de autocicatrização do ARPC. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada concreto ensaiado.

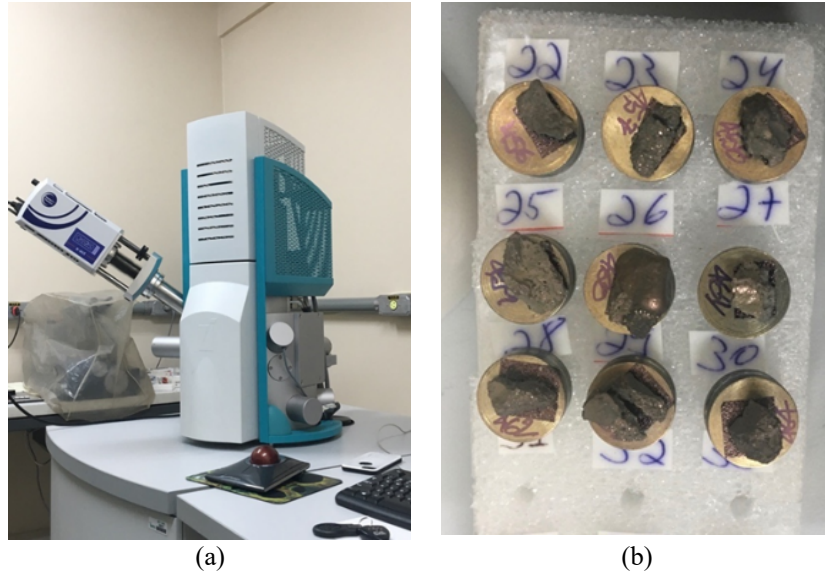
3.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens por microscopia eletrônica de varredura foram obtidas no Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica (LTMOE) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) com a utilização de um equipamento modelo Vega3 SEM®, da Tescan, à uma tensão de aceleração de 15 kV (Figuras 16a).

As amostras foram obtidas a partir de fragmentos da parte interna das amostras submetidas ao ensaio de resistência à compressão aos 84 dias de idade e rompidas com 100%

da carga estimada, em seguida passaram pelo processo de metalização onde receberam uma fina camada de ouro na superfície a ser observada (Figura 16b). Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar o processo de autocicatrização do concreto no estado endurecido.

Figura 16: a) Equipamento utilizado para obtenção das imagens, b) Metalização das amostras



Fonte: Autor (2020)

3.3 ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC

3.3.1 Determinação da Absorção Total

O ensaio de absorção total foi realizado em amostras com a idade de 84 dias, no Laboratório de Materiais da Universidade do Estado do Amazonas- UEA, foram seguidos os procedimentos descritos na ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Foram utilizados 3 corpos de prova por amostra.

Após a retirada do tanque de cura e retirado o excesso de umidade com um pano seco, as amostras foram colocadas em estufa por 72 horas a temperatura de 105 ± 5 °C, com seu peso sendo aferido a cada 24 horas com o objetivo de verificar a constância da massa das amostras.

Concluída a etapa anterior as amostras foram imersas em água a uma temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$ e foram mantidas durante 72 h nessa condição, sendo suas massas aferidas a cada 24 horas para verificação da constância de peso.

Completada a etapa de saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$, as amostras

foram colocadas em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levado à ebulição, conforme figura 17a. A ebulição foi mantida por um período de 5 h, onde manteve-se aproximadamente constante o volume da água. Ao final deixou-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$. Posteriormente foi realizada a determinação da massa com auxílio de balança hidrostática (mi), conforme figura 17b.

Figura 17: a) Corpos de prova sob ebulição, b) Pesagem hidrostática



(a)

(b)

Fonte: Autor (2020)

3.3.2 Determinação da Absorção por Capilaridade

O ensaio de determinação da absorção de água dos corpos-de-prova por meio da ascensão capilar foi realizado no laboratório da empresa Konkrex Engenharia de Concretos e seguiu os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 9779 (ABNT, 2012) na idade de 84 dias.

Após retirados do tanque de cura, os corpos de prova secaram ao ar e em seguida foram depositados para secagem em estufa à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até constância de massa (ms).

Concluída a etapa de secagem em estufa, os mesmos foram pesados e posicionados em um recipiente preenchido com água, de modo que o nível de água permanecesse constante a (5 ± 1) mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies.

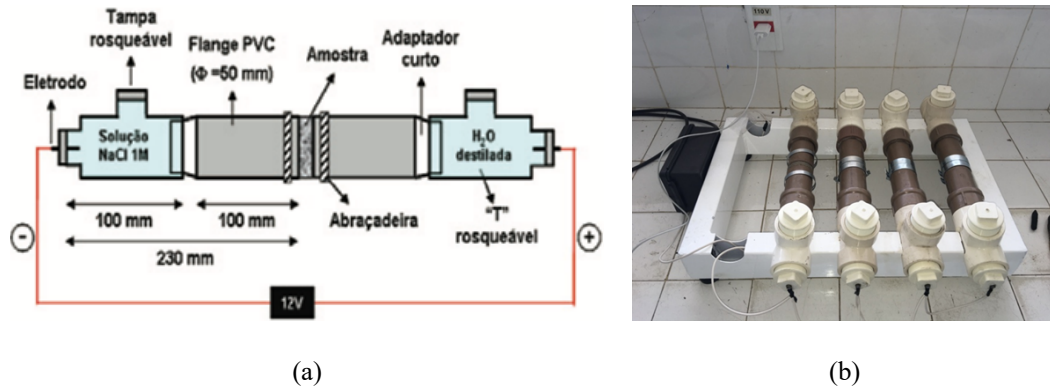
A massa saturada (msat) dos corpos de prova foi determinada com 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, contados a partir do contato com a água. Após este período, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, anotando-se a altura da ascensão da água no seu interior e calculado o parâmetro de absorção em g/cm^2 , conforme prescrito na norma.

3.3.3 Migração de Íons Cloretos

O ensaio de migração de íons cloretos teve como princípio a aplicação de uma diferença de potencial de 12V entre duas células: uma contendo solução de cloretos (catódica) e a outra contendo água destilada (anódica), entre as quais é colocada a amostra do concreto a ser

estudado. O potencial elétrico externo força a passagem dos íons cloretos através da amostra de concreto da primeira para a segunda célula. O aparato utilizado foi adaptado da pesquisa de Santos (2006) (Figura 18).

Figura 18: a) Esquema de montagem, b) Aparato de ensaio montado



Fonte: Autor (2020)

A célula anódica foi preenchida com água destilada para evitar a corrosão pela deposição do cloro. A solução utilizada na célula catódica foi composta por cloreto de sódio (NaCl) a uma concentração de 1 M. Foram utilizadas células de PVC constituídas por um flange de 100 mm, um “T” rosqueável, com uma tampa superior para realização de medidas e uma lateral, contendo o eletrodo, devidamente selada para evitar a perda da solução. Os corpos de prova foram colocados na interface das duas células, sendo também colados com adesivo à base de silicone e auxílio de um par de abraçadeiras. Assim, a troca iônica entre as células deu-se somente por meio da área exposta da superfície do corpo de prova. O esquema do ensaio e sua realização foram apresentados nas Figuras 18a e 18b, respectivamente. A tensão de 12 Volts foi aplicada ao sistema por meio de eletrodos posicionados nas extremidades do sistema, que estavam conectados a fios de cobre provenientes de uma fonte de tensão controlada.

A condutividade elétrica da solução da célula anódica, inicialmente sem cloretos, foi analisada diariamente durante todo o ensaio. Assim, obteve-se a evolução da condutividade elétrica da solução utilizando o Condutivímetro Digital Portátil tipo caneta modelo CD- 880 da marca Instrutemp e, em seguida, estes valores de condutividade obtidos foram convertidos em quantidade de NaCl em mol (M). A condutividade foi verificada a uma temperatura de 25° C, e uma variação de 2% nos valores deve ser considerada para uma variação de 1° C.

Os corpos de prova utilizados foram os de dimensões 50mm x 100mm, que foram fixados em um torno e seccionados em “bolachas” de 10mm de espessura. Após cortados, tiveram suas laterais impermeabilizadas com silicone, a fim de, impedir a migração da umidade

para o exterior do aparato, o que poderia prejudicar o desempenho do ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios listados no programa experimental.

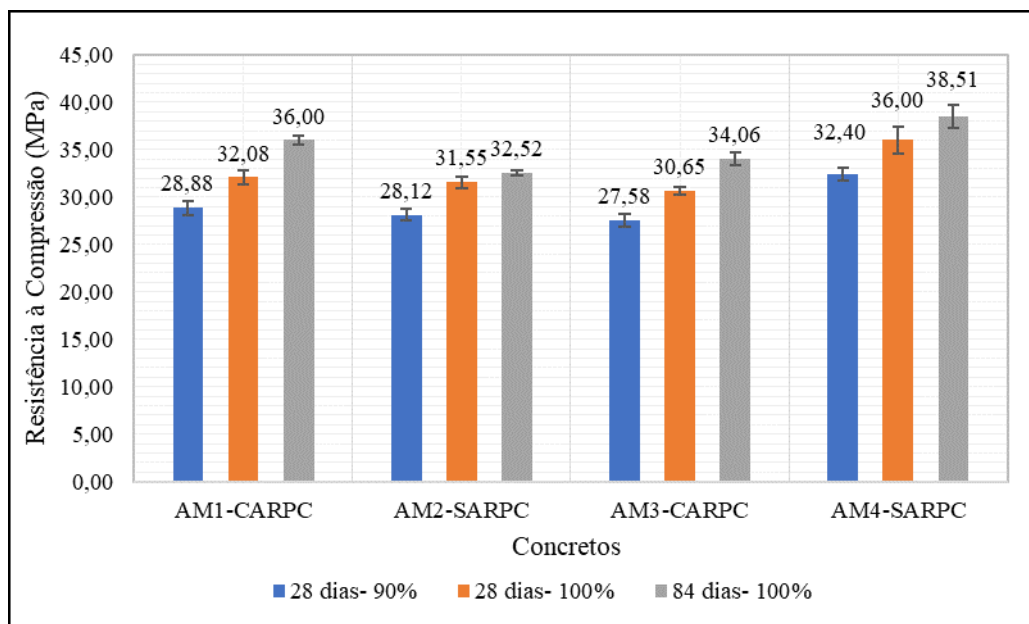
3.4 AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC

3.4.1 Resistência à Compressão

Na Figura 19 são apresentados os valores de resistência à compressão determinada nas idades de 28 e 84 dias para os concretos produzidos e seus respectivos desvios padrão, nela constam 3 séries de dados que correspondem as seguintes características do concreto:

- 28-90%: concreto com idade de 28 dias, pré-carregado com 90% da carga de ruptura estimada para a criação de uma rede de microfissuras;
- 28-100%: concreto com idade de 28 dias, submetido a 100% da carga de ruptura
- 84-100%: concreto com idade de 84 dias, pré-fissurado com 90% da carga de ruptura aos 28 dias e rompido com 100% da carga aos 84 dias.

Figura 19: Resistência à compressão dos concretos produzidos



Fonte: Autor (2020)

Para análise da qualidade dos lotes de concreto produzidos foi utilizado o coeficiente de variação dos concretos, onde foram obtidos os valores entre 0,90% e 4,18%. De acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) a avaliação da eficiência de operações de ensaio é realizada em função do coeficiente de variação, os concretos com este fator menor que 3% são considerados excelentes e entre 3 e 4% são considerados muito bons, estes são os valores predominantes nos concretos produzidos. Exceto na amostra AM4-SARPC aos 28 dias de idade e 100% da carga de ruptura que atingiu o valor de 4,18%, com o conceito de bom de acordo com a referida norma.

Os resultados apresentados na Figura 19 foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA) para um nível de significância de 5%. Foram realizadas 4 análises comparativas, a primeira comparando-se os concretos produzidos com o CP II Z- 40 RS, a segunda com o CP II E -32. A terceira realizou-se a comparação entre concretos contendo o ARPC e na quarta foram comparados os concretos sem a adição do ARPC.

Para a análise estatística da resistência à compressão dos concretos foi adotado um nível de significância de (α) de 5% no teste de hipóteses, considera-se primeiramente a hipótese nula de que todas as médias são iguais e a hipótese alternativa de que pelo menos uma média é diferente das demais. Portanto, se $p\text{-valor} < \alpha$ a hipótese nula deve ser rejeitada.

Na Tabela 6 apresenta-se a análise para as misturas AM1-CARPC e AM2-SARPC nas idades e modos de carregamento utilizados.

Tabela 6: Análise ANOVA para os concretos produzidos com CP II Z- 40 RS

Concretos	Resistência à compressão aos 28 dias (90% da carga)	Resistência à compressão aos 28 dias (100% da carga)	Resistência à compressão aos 84 dias (100% da carga)
AM1- CARPC	29,30	32,47	36,48
AM2- SARPC	28,56	32,19	32,83
<i>Valor-p</i>	0,2510	0,61141	0,00034

Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados na tabela 6 mostram que aos 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura os concretos são estatisticamente iguais. Verifica-se que aos 84 dias ocorre diferença entre os dois concretos, pois $p\text{-valor} (0,00034) < 0,05$.

Dessa forma, para identificar o concreto que apresenta diferença foi utilizado o teste de Tukey. Verificou-se que a amostra AM2-SARPC difere da amostra AM1-CARPC, sendo a resistência a compressão desta 10% menor em relação ao concreto com a adição de ARPC.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para os concretos produzidos com o CP II E-32, observa-se que p-valor é menor que o nível de significância em todas as idades e condições de ensaio, assim há diferença estatística significativa nestes concretos. Por meio do Teste de Tukey foi possível verificar que a amostra sem ARPC, AM4-SARPC possui resistência à compressão elevada em relação a AM3-CARPC, cerca de 17,82% aos 28 dias com 90% da carga e 13% para a mesma idade com a carga em 100%. Além disso, aos 84 dias esta diferença entre os concretos chega a aproximadamente 8%.

Tabela 7: Análise ANOVA para os concretos produzidos com CP II E- 32

Concretos	Resistência à compressão aos 28 dias (90% da carga)	Resistência à compressão aos 28 dias (100% da carga)	Resistência à compressão aos 84 dias (100% da carga)
AM3- CARPC	28,29	31,12	34,78
AM4- SARPC	33,18	35,15	37,54
<i>Valor-p</i>	0,00091	0,00996	0,02848

Fonte: Autor (2020)

Foi obtida a Tabela 8 para as análises realizadas com os dois concretos produzidos com a adição de ARPC e os dois tipos de cimento da pesquisa. Aos 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura não foram observadas diferenças significativas entre estes concretos, estatisticamente são iguais. Porém, observa-se que aos 84 dias a resistência à compressão do concreto AM1-CARPC, produzido com a CP II Z- 40 RS é cerca de 5% maior em relação a amostra AM3-CARPC, produzido com o CP II-E 32.

Tabela 8: Análise ANOVA para os concretos produzidos com ARPC

Concretos	Resistência à compressão aos 28 dias (90% da carga)	Resistência à compressão aos 28 dias (100% da carga)	Resistência à compressão aos 84 dias (100% da carga)
AM1- CARPC	29,30	32,47	36,48
AM3- CARPC	28,29	31,12	34,78
<i>Valor-p</i>	0,15395	0,05463	0,02095

Fonte: Autor (2020)

Nos concretos produzidos sem o ARPC foram identificadas diferenças significativas em todas as idades e condições de ensaio, conforme Tabela 9. A amostra AM4-SARPC destaca-se da amostra AM2-SARPC, cerca de 16,18%, 9,20% e 14,35% maior para as idades de 28 dias

com 90% e 100% da carga de ruptura e 84 dias com 100% da carga, respectivamente.

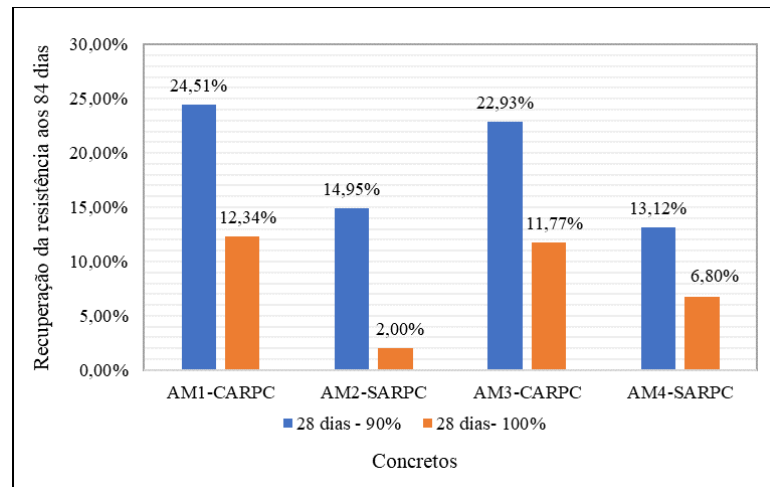
Tabela 9: Análise ANOVA para os concretos produzidos sem ARPC

Concretos	Resistência à compressão aos 28 dias (90% da carga)	Resistência à compressão aos 28 dias (100% da carga)	Resistência à compressão aos 84 dias (100% da carga)
AM2- SARPC	28,56	32,19	32,83
AM4- SARPC	33,18	35,15	37,54
<i>Valor-p</i>	0,00995	0,03031	0,00334

Fonte: Autor (2020)

Ao analisar os concretos produzidos com os tipos de cimento utilizados, para o CP II Z-40 RS foi possível verificar que o ARPC conferiu maior resistência à compressão ao concreto, ao contrário do ocorrido com o CP II E-32, uma vez que o concreto sem o ARPC apresentou maior resistência. Nas análises dos efeitos do ARPC nos concretos com os dois tipos de cimento utilizados, o concreto produzido com o CP II Z-40 RS apresentou maior resistência em relação ao CP II E-32. Já para as amostras sem o ARPC destaca-se o CP II E-32. Além disso, observou-se que para todas as amostras aos 84 dias houve ganho de resistência mesmo com a indução prévia de fissuras nos concretos. Este fato pode indicar a possibilidade de atuação do ARPC da recuperação da resistência à compressão dos concretos, nas amostras sem o ARPC este fator deve-se a cicatrização natural das estruturas de concreto, porém de forma mais lenta que em concretos com o ARPC. A Figura 20 apresenta o percentual de ganho de resistência para cada concreto aos 84 dias em relação aos resultados obtidos aos 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura. Observa-se que para ambos os casos as amostras com a adição do ARPC, AM1-CARPC e AM3-CARPC, apresentam maior percentual de ganho de resistência em relação aos concretos sem adição do ARPC. Além disso, verifica-se que o concreto produzido com o CP II Z-40 RS apresenta maior percentual em relação ao CP II E-32.

Figura 20: Gráfico de recuperação da resistência mecânica dos concretos aos 28 dias.



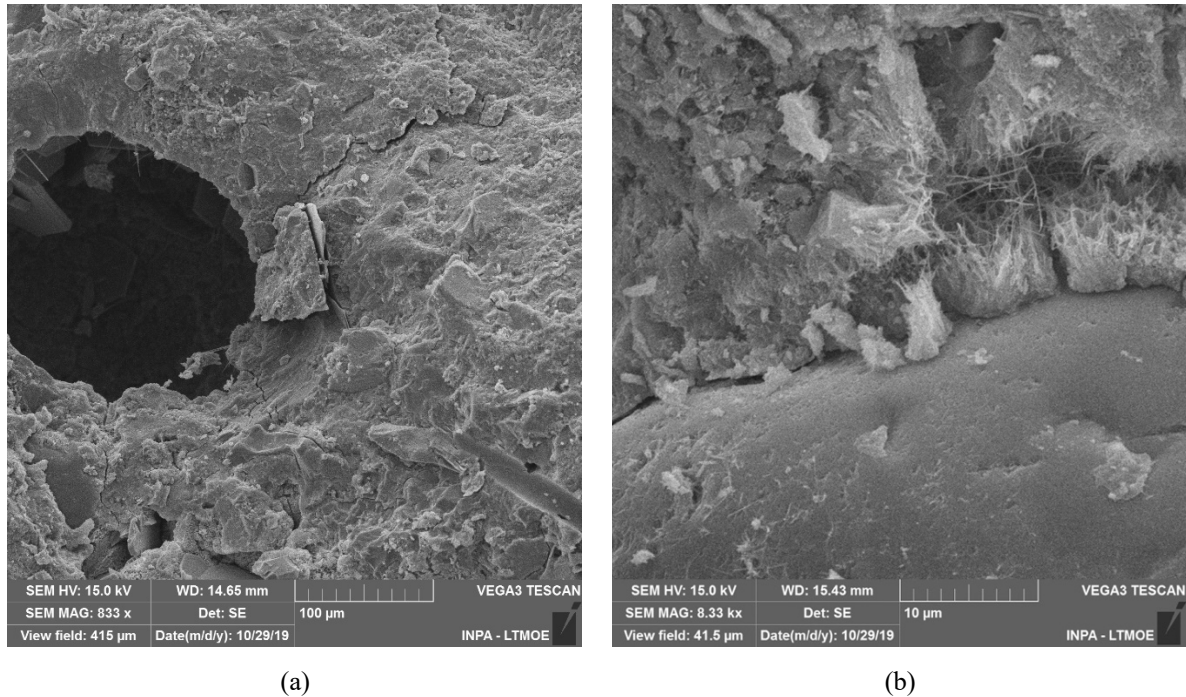
Fonte: Autor (2020)

O aumento na resistência pode ser atribuído à cicatrização das fissuras pré-existentes e evidenciam o potencial da cicatrização de fissuras do ARPC devido à hidratação das partículas anidras do cimento e principalmente pelo efeito ativador do aditivo cristalino, nas superfícies dessas microfissuras. Esta capacidade de cicatrização dos materiais dependerá não apenas da quantidade de cicatrização das fissuras, mas também dos mecanismos de cicatrização, sejam impulsionados pela hidratação contínua produzindo cristais de CSH mais fortes ou pela carbonatação que resulta em cristais de CaCO_3 mais fracos, pela idade dos produtos de cicatrização (KRELANI; KRELANI; MORETTI, 2016).

3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As figuras 21a e 21b apresentam a morfologia da matriz cimentícia da amostra AM1-CARPC, onde pode-se observar que a superfície fraturada é coberta por produtos fibrosos finos. A morfologia desses produtos é compatível com a estrutura cristalina de produtos típicos de cicatrização. Observa-se que estes produtos sugerem a presença de etringita. Estes cristais podem preencher os poros nas amostras e tornar a estrutura mais compacta, razão pela qual o aditivo redutor de permeabilidade por cristalização aumenta a resistência à compressão e reduz a permeabilidade das matrizes cimentícias (LI et al., 2019).

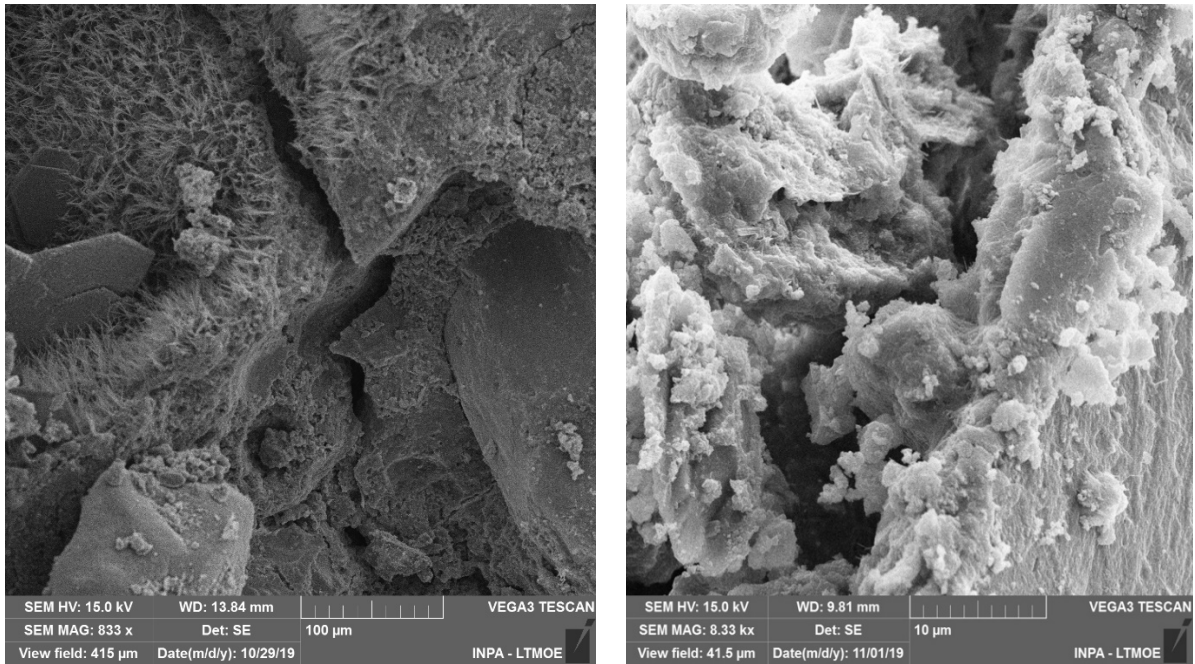
Figura 21: Amostra AMI-CARPC com aproximação em ordem de grandeza (a) de 100 μm e b) de 10 μm



Fonte: Autor (2020)

As figuras 22a e 22b apresentam a morfologia do concreto AM2-SARPC, é possível observar pelas imagens a presença do carbonato de cálcio nas bordas das fissuras, ressalta-se que as amostras não contêm aditivos e conforme descrito por Ferrara; Krelani e Carsana ⁽²⁰¹⁴⁾ mesmo concretos comuns podem ter alguma capacidade de cicatrização quando expostos a imersão em água durante a cura, caso das amostras analisadas. Nas Figuras 23a a 23b podem ser observados produtos fibrosos que indicam a presença de CSH e partículas com formato hexagonal indicando a presença do hidróxido de cálcio.

Figura 22: Amostra AM2-SARPC com aproximação em ordem de grandeza (a) de 100 μm e (b) de 10 μm

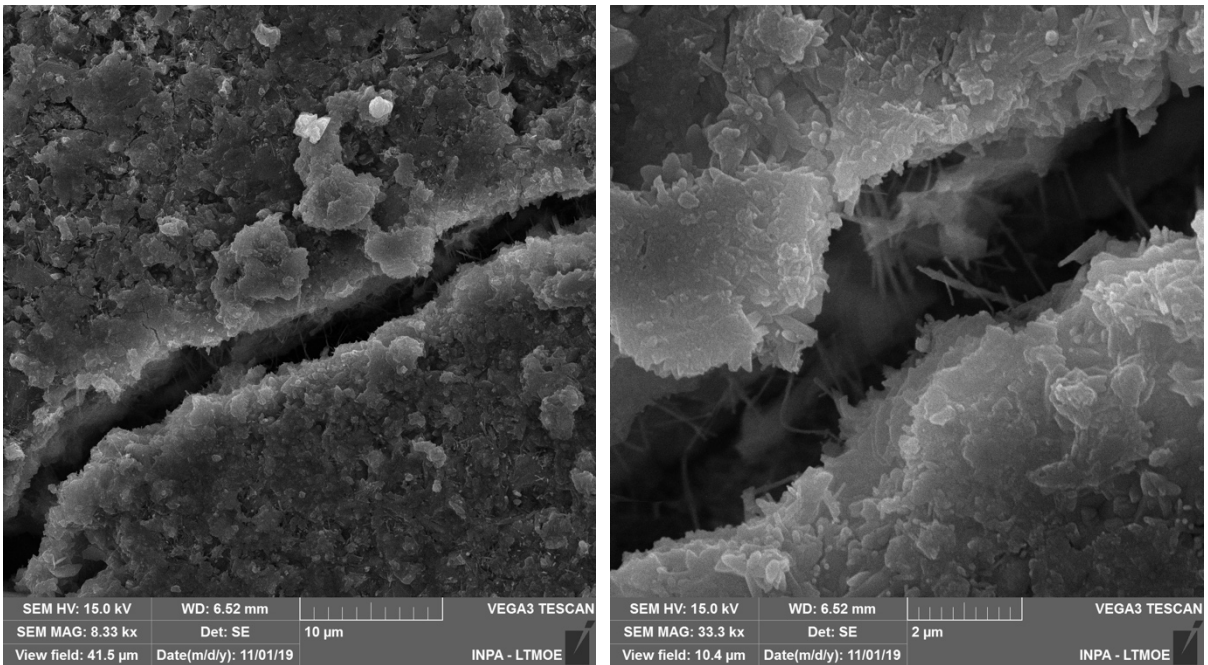


(a)

(b)

Fonte: Autor (2020)

Figura 23: a) Amostra AM3-CARPC com aproximação de 10 μm e b) Amostra AM3-CARPC com aproximação de 2 μm



(a)

(b)

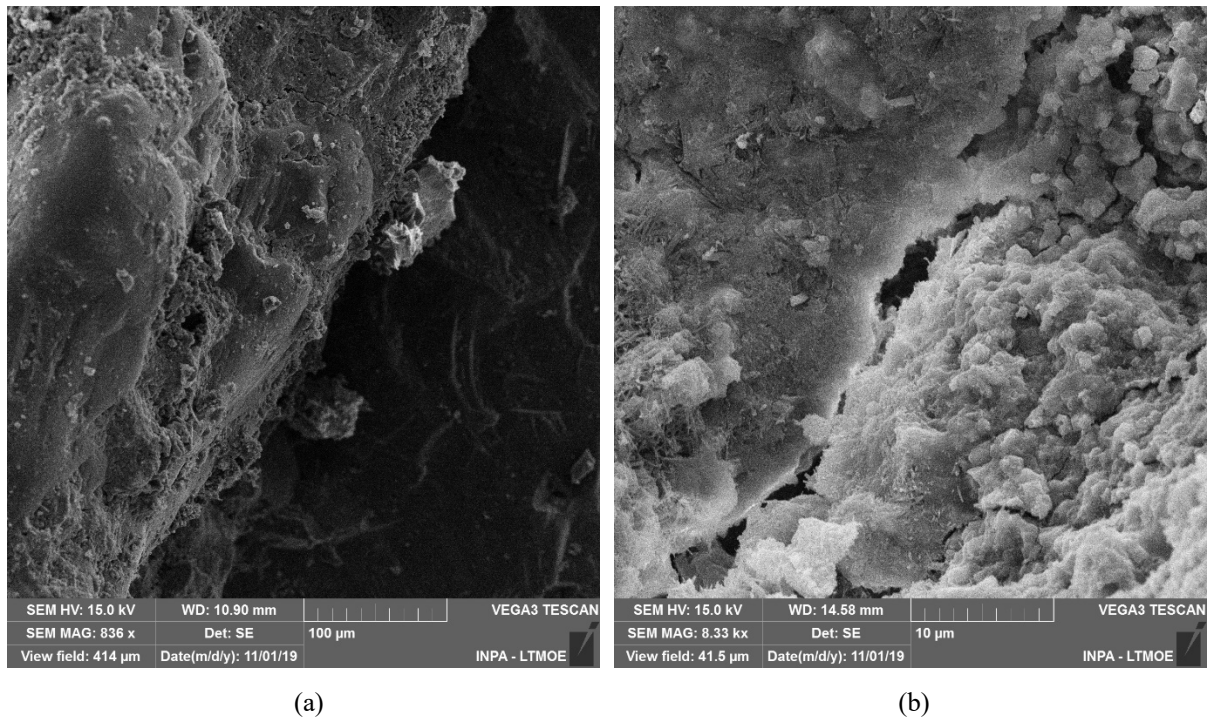
Fonte: Autor (2020)

As figuras 23a e 23b mostram as bordas de uma fissura presente na amostra AM3-CARPC cuja mesma são preenchidas por cristais de carbonato de cálcio, a presença deste é

comuns para compostos com a presença de aditivos cristalinos (ESCOFFRES; DESMETTRE; CHARRON, 2018; ROIG-FLORES et al., 2016). Observa-se também ao fundo das fissuras cristais em formato de agulha que indicam a presença de etringita. De acordo com Nasim; Dewangan e Deo (2020b) que cristais em formato de agulha podem ser observados em concretos autocicatrizantes e podem estar relacionados com a recuperação das propriedades mecânicas.

Nas Figuras 24a e 24b apresentam a morfologia do concreto AM4-SARPC, observa-se na Figura 24b a precipitação do carbonato de cálcio na borda da fissura, além de cristais de CSH e etringita.

Figura 24: Amostra AM4-SARPC com aproximação em ordem de grandeza (a) de 100 μm e (b) de 10 μm



3.5 ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ARPC

3.5.1 Determinação da Absorção Total

3.5.1.1 Índice de Vazios (%) – Idade de 84 Dias

Na tabela 10 estão apresentados os resultados obtidos para o índice de vazios presente nos concretos estudados aos 84 dias de idade. Foi utilizada a análise de variância Anova para o tratamento dos dados, sendo realizados 4 comparativos. O primeiro e segundo entre o mesmo tipo de cimento com ou sem adição de ARPC, o terceiro e quarto comparativo estão

relacionados a presença ou não do ARPC no concreto com os cimentos utilizados.

Com o nível de significância de 95% os resultados obtidos mostram por meio de valor-p que não houve diferença significativa entre as comparações com a adição do ARPC nos concretos produzidos com CP II E-32, além disso os resultados de AM1-CARPC e AM3-ARPC produzidos com CP I Z-40 RS e CP II E-32 são estatisticamente iguais, o tipo de cimento não influenciou no índice de vazios nos concretos com adição do ARPC. O mesmo comportamento é observado na comparação entre AM 2-SARPC e AM4-SARPC pois são iguais do ponto de vista estatístico.

Foi observada diferença entre as amostras AM1-CARPC e AM2-SARPC, uma vez que o índice de vazios obtido no primeiro concreto é cerca de 15% menor em relação ao concreto sem adição do ARPC. Este fato indica que para este caso houve o selamento das fissuras pré-impostas e assim a redução do índice de vazios.

Tabela 10: Índice de vazios aos 84 dias

Amostra	Tipo de aglomerante	Índice de vazios (%)	Desvio Padrão (%)	Valor-p
		84 dias		
AM1 – CARPC	Cimento CP II Z - 40 RS + ARPC	6,98	0,83	0,012224676
AM2 – SARPC	Cimento CP II Z - 40 RS	8,19	0,10	
AM3 - CARPC	Cimento CP II E – 32 + ARPC	6,77	0,69	0,281182285
AM4 – SARPC	Cimento CP II E – 32	7,35	0,97	
AM1 – CARPC	Cimento CP II Z - 40 RS + ARPC	6,98	0,83	0,653033296
AM3 - CARPC	Cimento CP II E – 32 + ARPC	6,77	0,69	
AM2 – SARPC	Cimento CP II Z - 40 RS	8,19	0,10	0,080491795
AM4 – SARPC	Cimento CP II E – 32	7,35	0,97	

Fonte: Autor (2020)

3.5.1.2 Índice de Absorção (%) – Idade 84 Dias

Para os dados de índice de absorção aos 84 dias foi utilizada a análise de variância ANOVA nas comparações utilizadas, os dados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Índice de absorção aos 84 dias

Amostra	Tipo de aglomerante	Índice de absorção (%)	Desvio Padrão (%)	Valor-p
		84 dias		
AM1 – CARPC	Cimento CP II Z - 40 RS + ARPC	4,81	0,62	0,017441782
AM2 – SARPC	Cimento CP II Z - 40 RS	5,67	0,18	
AM3 - CARPC	Cimento CP II E – 32 + ARPC	4,66	0,49	0,20767019
AM4 – SARPC	Cimento CP II E – 32	5,16	0,72	
AM1 – CARPC	Cimento CP II Z - 40 RS + ARPC	4,81	0,62	0,642076527
AM3 - CARPC	Cimento CP II E – 32 + ARPC	4,66	0,49	
AM2 – SARPC	Cimento CP II Z - 40 RS	5,67	0,18	0,144459224
AM4 – SARPC	Cimento CP II E – 32	5,16	0,72	

Fonte: Autor (2020)

Por meio dos dados de valor-p, com um nível de significância de 95% as comparações realizadas entre os concretos produzidos com o CP II E-32 com e sem ARPC, nas comparações entre os concretos produzidos com os dois tipos de cimento com e sem a presença do ARPC foram obtidos dados estatisticamente iguais. Sem diferença significativa entre estes.

O ARPC não influenciou o índice de absorção na comparação entre AM3-CARPC e AM4-SARPC. Nas comparações entre AM1-CARPC e AM3-CARPC, AM2-SARPC e AM4-SARPC o tipo de cimento e a presença do ARPC não influenciaram de forma significativa o índice de absorção.

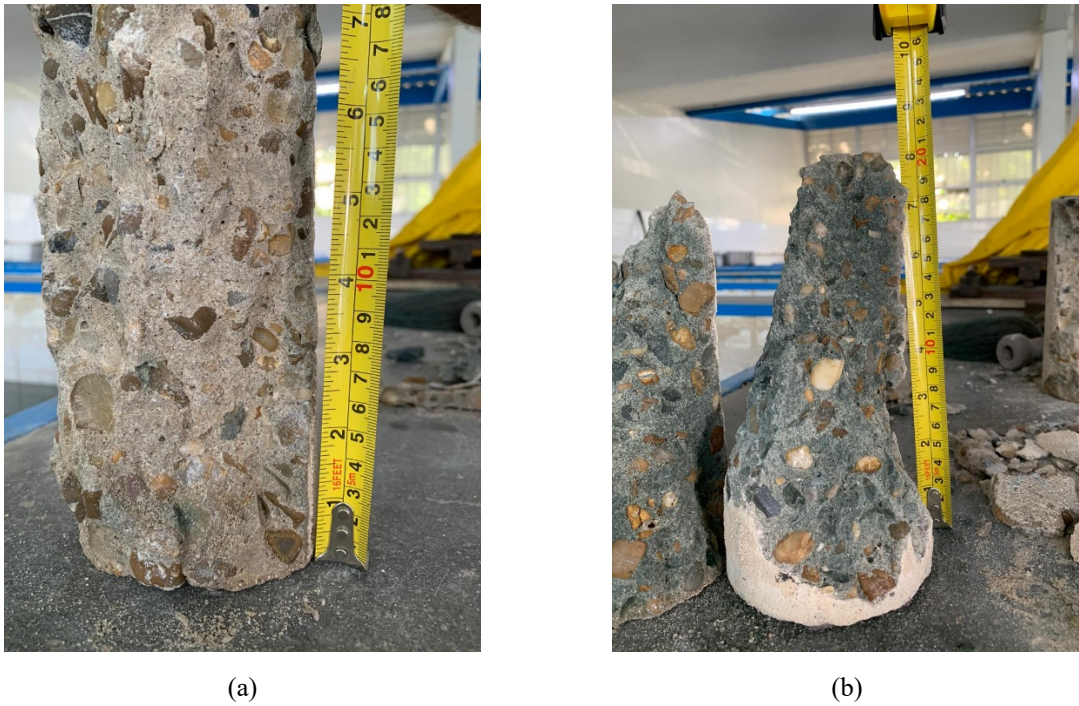
Verifica que na comparação entre AM1-CARPC e AM2-CARPC, ambos produzidos com o CP II Z- 40 RS há diferença estatística, tendo o primeiro concreto um índice de absorção cerca de 15% menor em relação ao concreto sem adição do ARPC.

3.5.2 Determinação da Absorção por Capilaridade

Com o objetivo de avaliar, de forma indireta, o volume de poros nos concretos com e sem aditivo, de acordo com o tipo de cimento, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade.

As Figuras 25a e 25b evidenciam o comportamento da absorção capilar dos concretos em relação as amostras com e sem adição do ARPC.

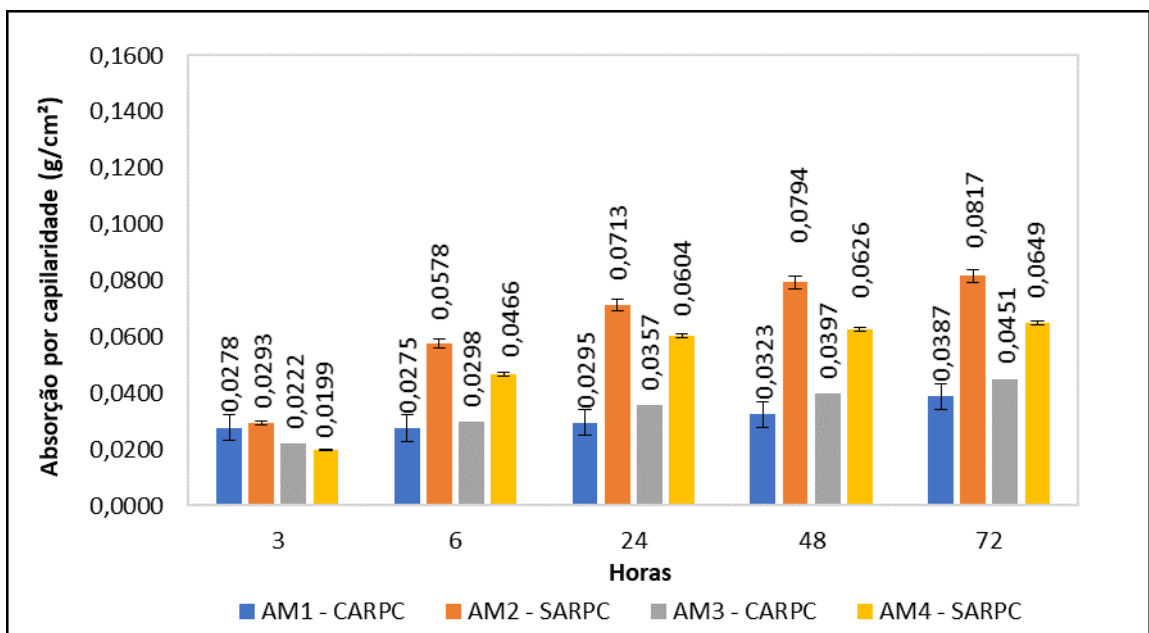
Figura 25: Medidas de ascensão capilar das amostras (a) AM1- CARPC; (b) AM2- SARPC



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 26 estão apresentados os resultados individuais os concretos.

Figura 26: Absorção de água por capilaridade das amostras produzidas



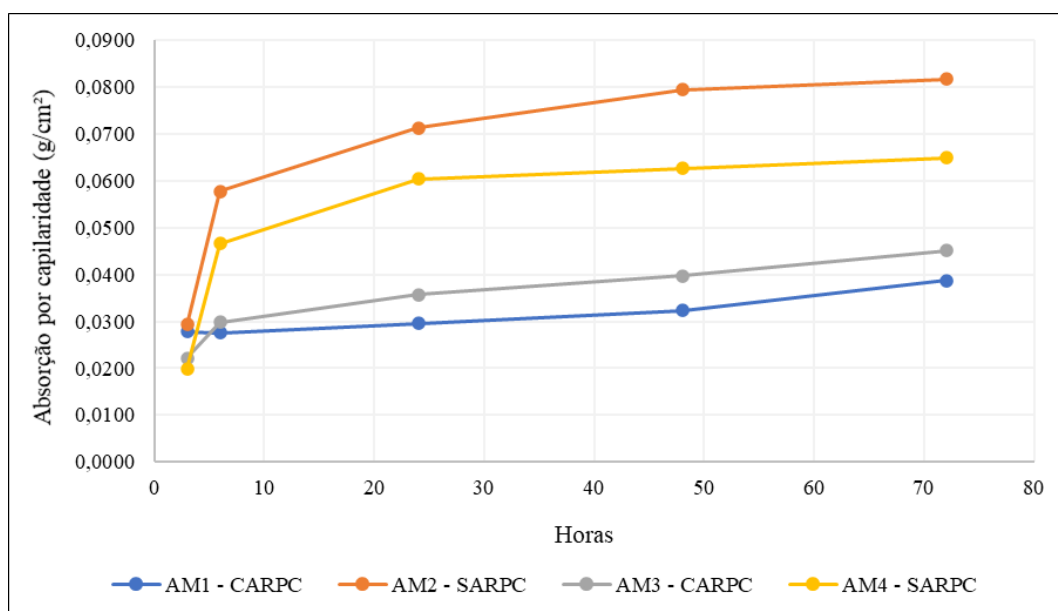
Fonte: Autor (2020)

Observa-se uma baixa porcentagem de absorção de água nos concretos estudados, menor que 0,09% mesmo para as amostras sem adição do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização. De modo geral, verifica-se que os traços sem aditivo, AM2-SARPC e AM4-SARPC, apresentam valores de absorção capilar maiores que os demais que contém o aditivo. Destes destaca-se a amostra AM2-SARPC com os maiores valores, ressalta-se que esta amostra utiliza o cimento CP II Z-40-RS.

Por sua vez, os traços AM1-CARPC e AM3-CARPC apresentam valores próximos mesmo com diferentes tipos de cimento em sua composição. Observa-se que estes não sofrem grandes variações com o passar das medições no decorrer da execução do ensaio. O que indica a ação do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização nestas amostras, uma vez foram ensaiadas aos 84 dias. Este comportamento não é observado nas amostras sem o aditivo, verifica-se variações ao longo das medições, especialmente para a amostra AM2-SARPC.

Nota-se que as misturas com o ARPC possuem grande capacidade em limitar a penetração da água e microfissuras do concreto, sempre com os menores índices ao longo do ensaio. A Figura 27 auxilia na melhor visualização destas variações de acordo com a amostra.

Figura 27: Variação dos índices de absorção das amostras ao longo do ensaio

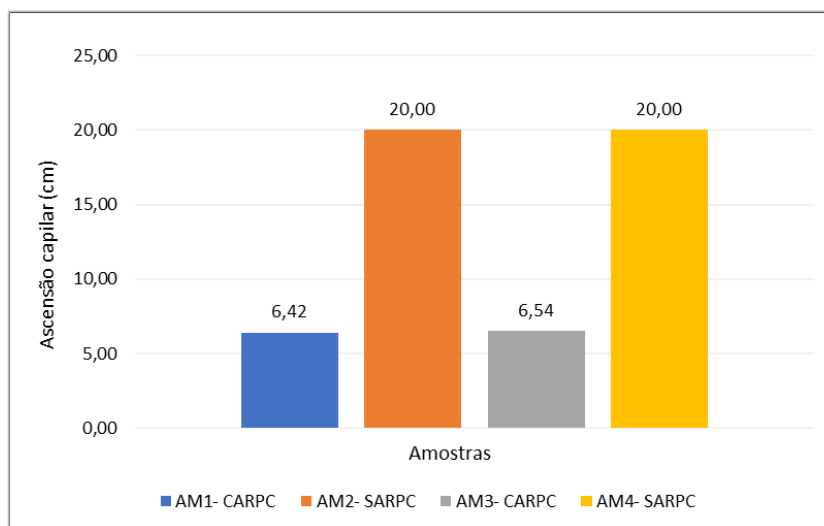


Fonte: Autor (2020)

Na Figura 28, são apresentadas as alturas obtidas de ascensão capilar para as amostras analisadas. Nota-se que as amostras com adição do ARPC resultam em menor ascensão capilar, atenta-se ao fato dos valores próximos, da mesma forma que os índices de absorção. Por outro lado, as amostras sem o ARPC resultaram em uma ascensão capilar completa ao longo da seção

longitudinal do corpo-de-prova.

Figura 28: Ascensão capilar das amostras analisadas



Fonte: Autor (2020)

3.5.3 Migração de Íons Cloretos

O ensaio de migração de cloretos permite mensurar a capacidade do concreto em proteger a armadura dos agentes agressivos. Utiliza-se de condutividade elétrica medidos ao longo da execução do ensaio de migração de íons cloretos para definição da concentração de íons cloretos.

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados da variação da concentração de NaCl da célula anódica medidos durante a realização do ensaio.

Tabela 12: Evolução da concentração de NaCl durante o ensaio

Tempo (h)	Concentração de NaCl (M)				Desvio Padrão
	AM1- CARPC	AM2- SARPC	AM3- CARPC	AM4- SARPC	
24	1,49	1,73	0,72	1,36	0,43
48	1,40	1,74	0,84	1,36	0,37
72	2,50	3,28	1,13	2,24	0,89
96	3,73	5,06	1,27	2,95	1,58
120	4,97	6,83	1,41	3,67	2,28

Fonte: Autor (2020)

Observa-se que a concentração de íons cloretos aumenta com o tempo para todos os concretos estudados, que a tensão elétrica é aplicada, forçando estes íons a migrarem em direção ao pólo positivo do sistema.

A durabilidade das estruturas de concreto é muitas vezes reduzida pela corrosão das armaduras, que pode ser induzida pela penetração dos íons cloretos. Estes podem estar presentes nos componentes da mistura do concreto como agregados ou água. Observa-se na Tabela 12 que os concretos produzidos com o CP II Z- 40 RS apresentaram maior concentração de cloretos em relação aos concretos produzidos com o CP II E-32. Medeiros (2014) afirma que para concretos produzidos com diferentes tipos de cimento e com relação a/c fixada, é possível verificar que a composição do cimento influencia na capacidade de migração de íons cloretos.

A menor concentração de cloretos nos concretos produzidos com o CP II E-32 pode ser explicada em função da presença da escória de alto forno na composição do referido cimento, sendo este indicado para utilização em ambientes agressivos.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na pesquisa apresentado ao longo deste trabalho, pode-se concluir que nos resultados de resistência à compressão o ARPC para concretos produzidos com o CP II Z-40 RS exerce influência nas idades mais avançadas, aos 28 dias não houve diferença entre os concretos com ou sem o ARPC. Nos concretos produzidos com CP II E-32 o ARPC não exerceu influência na resistência à compressão, sendo esta de menor valor em todas as idades ensaiadas em relação ao concreto sem adição do mesmo.

No comparativo entre os concretos com o ARPC produzidos com os 2 cimentos utilizados o CP II Z-40 RS apresentou melhores resultados aos 84 dias, isso evidencia o potencial de autocicatrização dos concretos com a adição do ARPC, na idade de 28 dias com 90% e 100% da carga de ruptura não foi observada diferença. Nos concretos sem o ARPC com os dois tipos de cimento, o CP II E-32 apresentou melhor desempenho, possivelmente devido este tipo de cimento utilizar escória de alto forno, em sua composição. Nos percentuais de recuperação da resistência aos 84 dias em relação as amostras de 28 dias com 90% e 100% da carga os concretos com a adição do ARPC apresentaram maior recuperação comparando-se aos produzidos sem a adição do mesmo.

Na morfologia das amostras analisadas é possível comprovar a formação da cristalização com a presença de produtos fibrosos finos na superfície fraturada, como a etringita e do carbonato de cálcio nas bordas das fissuras. Além destes, foram encontrados o CSH e CH nos concretos. Estes cristais em formato de agulha são característicos de concretos

autocicatrizantes e podem estar relacionados com recuperação das propriedades mecânicas.

Com relação ao índice de vazios dos concretos aos 84 dias, o ARPC exerceu influência apenas no concreto produzido com o CP II Z-32 apresentando índice de vazios 15% menor em relação ao concreto com o mesmo tipo de cimento, porém sem a adição do ARPC. Nos demais concretos não foram observadas diferenças significativas tanto com relação a presença ou não do ARPC quanto do tipo de cimento utilizado. Este mesmo comportamento foi observado para os dados de absorção total, o concreto que apresentou melhor desempenho e apresentou menor absorção foi o AM1-CARPC, produzido com o CP II Z- 40 RS e adição ARPC.

Para a absorção por capilaridade os concretos AM1-CARPC e AM3-CARPC produzidos com os diferentes cimentos utilizados e com a adição do ARPC apresentam menores índices de absorção em relação aos concretos sem adição do mesmo. Além disso, os concretos com o ARPC apresentam menor ascensão capilar cerca de 3 vezes menor quando comparadas aos concretos sem ARPC. Para estes concretos a ascensão capilar vai ao longo de toda a altura do corpo-de-prova. Na migração de íons cloretos os concretos produzidos com o CP II E-32 apresentam menor concentração de cloretos, o que pode estar atrelado a composição cimento com a escória de alto forno.

Estes resultados reforçam o potencial do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização para atuar na cicatrização de fissuras e selamento dos poros do concreto. Como sugestões para trabalhos futuros analisar a química que envolve as reações de hidratação contínua seria uma grande contribuição para a pesquisa, com a utilização de técnicas como FRX, DRX, TG, FTIR para melhor entender a cristalização e cicatrização que ocorre no concreto.

Uma comparação entre amostras pré-carregadas, com a utilização de fibras de polipropileno nos concretos e sem a utilização das mesmas, pode identificar a melhor forma de obter o controle sobre esta etapa da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHAL, V.; MUKERJEE, A.; SUDHAKARA REDDY, M. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1–5, 1 nov. 2013.

ANGLANI, G. et al. Sealing efficiency of cement-based materials containing extruded cementitious capsules. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 119039, 10 ago. 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnica – ABNT. **NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica**, 8 págs., Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT. **NBR NM 45 – Agregado em Estado solto - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**, 8 págs., Rio de Janeiro, 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnica – ABNT. **NBR NM 46 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 mm, por lavagem**, 6 págs., Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnica – ABNT. **NBR NM 53 – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**, 8 págs., Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland: Requisitos**, 27 págs. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 11768-3: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland: Ensaios de caracterização**, 16 págs. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 16697: Cimento- Requisitos**, 12 págs. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova**, 9 págs. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 5739: Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto**, 9 págs. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, 4 págs. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção por capilaridade**, 3 págs. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR NM 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, 6 págs. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**, 8 págs. Rio de Janeiro, 1998.

ASTM, A. S. F. T. A. M. **Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement**. West Conshohocken: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.copyright.com/>>. Acesso em: 8 out. 2020.

CAPPELARI, E. et al. Influence of concretes compressive strength on superficial wettability. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

DANISH, A.; MOSABERPANAH, M. A.; SALIM, M. U. Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 6883–6899, 1 maio 2020.

DE BELIE, N. et al. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, p. 1800074, 7 set. 2018.

DE MEDEIROS, M. H. F. et al. Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: Absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato. **Revista Materia**, v. 20, n. 1, p. 145–159, 2015.

DE ROOIJ, M. et al. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. 1. ed. [s.l.] Springer Netherlands, 2013.

ESCOFFRES, P.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J. P. Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 763–774, 10 jun. 2018.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 535–551, 15 out. 2014.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; MORETTI, F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: From porosity reducers to promoters of self healing. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 8, p. 084002, 15 jul. 2016.

GARCÍA-VERA, V. et al. Influence of Crystalline Admixtures on the Short-Term Behaviour of Mortars Exposed to Sulphuric Acid. **Materials**, v. 12, n. 1, p. 82, 27 dez. 2018.

GUPTA, S.; PANG, S. D.; KUA, H. W. **Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 15 ago. 2017.

HODUL, J.; ŽIŽKOVÁ, N.; BORG, R. P. The influence of crystalline admixtures on the properties and microstructure of mortar containing by-products. **Buildings**, v. 10, n. 9, p. 146, 1 set. 2020.

HOMMA, D.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 7, n. 2, p. 217–228, 30 jun. 2009.

HUANG, H. et al. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials and Design**, v. 92, p. 499–511, 15 fev. 2016.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 60, p. 68–82, 1 jun. 2014.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 57, p. 116–127, 1 mar. 2015.

KHALIQ, W.; EHSAN, M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 349–357, 15 jan. 2016.

LI, L. et al. **Bacterial technology-enabled cementitious composites: A review** *Composite Structures* Elsevier Ltd, , 1 out. 2019.

LI, V. C.; LIM, Y. M.; CHAN, Y. W. Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. **Composites Part B: Engineering**, v. 29, n. 6, p. 819–827, 1 nov. 1998.

LI, W. et al. Recent Advances in Intrinsic Self-Healing Cementitious Materials. **Advanced Materials**, v. 30, n. 17, p. 1705679, 25 abr. 2018.

LV, Z.; CHEN, D. **Overview of recent work on self-healing in cementitious materials** *Materiales de Construccion* Inst. de Ciencias de la Construccion Eduardo Torroja, , 1 out. 2014. Disponível em: <<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1633>>. Acesso em: 22 set. 2020

MEDEIROS JUNIOR, R.A. **Estudo da resistividade do concreto para a proposta de modelagem de vida útil- corrosão das armaduras devido a penetração de íons cloretos**. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura de Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2014.

MIGNON, A. et al. **Crack mitigation in concrete: Superabsorbent polymers as key to success?** *Materials* MDPI AG, , 28 fev. 2017. Disponível em: <www.mdpi.com/journal/materials>. Acesso em: 1 out. 2020

MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. **Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-state-of-the-art report** *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2012.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland- contribuição aos processos de autocicatrização**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2016.

MUHAMMAD, N. Z. et al. **Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 1 jun. 2016.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. Autonomous healing in concrete by crystalline admixture: A review. **Materials Today: Proceedings**, 3 abr. 2020a.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete. **Materials Today: Proceedings**, 25 abr. 2020b.

NISHIWAKI, T. et al. Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC Using Different Types of Synthetic Fibers. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 10, n. 6, p. 195–206, 21 jun. 2012.

NISHIWAKI, T. et al. Self-healing capability of fiber-reinforced cementitious composites for recovery of watertightness and mechanical properties. **Materials**, v. 7, n. 3, p. 2141–2154, 2014.

OLIVEIRA, A. DE S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. [s.l.] UFRJ, 2019.

PANG, B. et al. Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 191–202, 15 mar. 2016.

REBELO, F. H. D. S. **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS GRAÚDOS DE ALGUMAS REGIÕES DO ESTADO DO AMAZONAS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2019.

ROIG-FLORES, M. et al. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 447–457, 1 jul. 2016.

ROIG-FLORES, M. et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 1–11, 1 jul. 2015.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. **Is concrete healing really efficient? A review** **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 30 abr. 2019.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 566–574, 1 abr. 2012.

SNOECK, D. et al. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 25, n. 1, p. 13–24, 15 jan. 2014.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M.; HELENE, P. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. **Revista Concreto & Construções**, p. 75–79, 2014.

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 15 abr. 2015.

TENÓRIO FILHO, J. R. et al. Assessment of the potential of superabsorbent polymers as internal curing agents in concrete by means of optical fiber sensors. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117751, 30 mar. 2020.

TOMCZAK, K.; JAKUBOWSKI, J. The effects of age, cement content, and healing time on the self-healing ability of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 149–159, 30 out. 2018.

TSANGOURI, E. et al. Feasibility study on real-scale, self-healing concrete slab by developing a smart capsules network and assessed by a plethora of advanced monitoring techniques. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116780, 20 dez. 2019.

VAN TITTELBOOM, K. et al. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 125–137, 15 mar. 2016.

VAN TITTELBOOM, K. et al. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 349–359, 1 dez. 2012.

VAN TITTELBOOM, K. et al. Use of bacteria to repair cracks in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 1, p. 157–166, 1 jan. 2010.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 27 maio 2013.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. **Bacteria based self healing concrete – A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 15 out. 2017.

WANG, J. et al. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 532–540, 1 jan. 2012.

WANG, X. F. et al. **Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials – its methods and future development: A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 10 jul. 2019.

WHITE, S. R. et al. **Autonomic healing of polymer composites** *Nature* Nature Publishing Group, , 15 fev. 2001. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/35057232>>. Acesso em: 24 set. 2020

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 763–770, 1 ago. 2011.

WU, L. et al. **Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 15 set. 2017.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. **A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material** *Construction and Building Materials* Elsevier, , 1 mar. 2012.

YILDIRIM, G. et al. **A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 30 dez. 2015.

ZHANG, W. et al. **Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review** *Composites Part B: Engineering* Elsevier Ltd, , 15 maio 2020.

ZHANG, W.; WANG, D.; HAN, B. Self-healing concrete-based composites. In: **Self-Healing Composite Materials**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 259–284.