



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM MATERIAIS DE REPARO A
BASE DE CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS ERODIDAS**

RAFAELA GOULART GOMES OLIVEIRA

Foz do Iguaçu
2020

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM MATERIAIS DE REPARO A BASE
DE CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS ERODIDAS**

RAFAELA GOULART GOMES OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan
Coorientador: Eng. Carlos Henrique Oliveira Rampanelli

RAFAELA GOULART GOMES OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM MATERIAIS DE REPARO A BASE
DE CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS ERODIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan
UNILA

Coorientador: Eng. Carlos Henrique Oliveira Rampanelli
UNILA

Prof. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Prof. Msc. Fábio Luiz Willrich
ITAIPU BINACIONAL

Foz do Iguaçu, 18 de dezembro de 2020.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): _____

Curso: _____

	Tipo de Documento
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: _____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, 18 de dezembro de 2020.

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho aos que me são mais
preciosos, meus pais, Wellington e Elrismar,
e meu irmão Thiago.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por estar sempre cuidando de cada detalhe ao longo dessa jornada.

À professora Elismar, minha mãe, minha inspiração, por toda ajuda nessa caminhada na pesquisa.

À Wellington, meu pai, por ser sempre um grande incentivador dos meus sonhos.

Ao meu irmão Thiago, pelos conselhos nos momentos difíceis.

À minha orientadora Edna Possan, por todas as oportunidades, incentivos e orientações.

Ao meu coorientador Carlos Rampanelli, pela amizade e contribuição na realização desse trabalho.

Ao professor Rogério Rizzi, pela atenção e apoio de sempre.

Aos colegas de curso, Ana, Deborah, Erik, João, Samanta e Werner, pela convivência, apoio, amizade, rolês e momentos divertidos, que deixaram essa caminhada mais leve e prazerosa. Em especial, Gabriel, pela dedicação e parceria em todos os momentos.

Às amigas da vida, Isabella e Heloá pela amizade e estímulo de sempre.

Aos técnicos do laboratório LADEMA da UNILA, que estavam sempre dispostos a ajudar.

À Fundação Parque Tecnológico de Itaipu, pelo financiamento do projeto de pesquisa que originou este trabalho e pela bolsa de estudos.

À ITAIPU BINACIONAL, à Universidade Estadual do Oeste do Paraná e à Coneresuper de Cascavel, pela colaboração para os ensaios da pesquisa. E à Votorantin e MC-bauchemie pela doação de materiais.

A todos, o meu muito obrigada.

“Afinal, há é que ter paciência, dar tempo ao tempo, já devíamos ter aprendido, e de uma vez pra sempre, que o destino tem de fazer muitos rodeios para chegar a qualquer parte”.

João Guimarães Rosa

OLIVEIRA, R. G. G. **Avaliação da retração por secagem em materiais de reparo a base de cimento para aplicação em estruturas erodidas**. 2020. 61p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

RESUMO

Materiais cimentícios são os mais utilizados para reparos em estruturas de concreto, tanto pela compatibilidade de propriedades como pelo baixo custo. Porém, principalmente em grandes áreas de reparo, a utilização de materiais com elevado consumo de cimento pode causar fissuras, sobretudo devido à retração volumétrica que alguns componentes do cimento sofrem durante a hidratação. Realizar a dosagem do material utilizando um método de empacotamento de partículas e adicionar polímeros à mistura podem ser alternativas para minimizar essa fissuração. Assim, neste trabalho tem-se por objetivo avaliar o desempenho à retração por secagem de materiais a base de cimento para reparo de estruturas de concreto sujeitas à erosão superficial, proporcionados com base em um método de empacotamento de partículas. Foram realizadas seis misturas variando-se o consumo de cimento, 548, 450 e 350 kg/m³, com a presença ou não de polímero EVA em dois níveis, 0% e 1,5%. As misturas produzidas foram submetidas ao ensaio de retração por secagem empregando a norma ASTM C596 (2018), até a idade de 53 dias. Também foram conduzidos ensaios estáticos para avaliação do controle tecnológico do concreto, resistência à compressão axial, à tração na flexão e módulo de elasticidade estático, aos 7 e 28 dias. Os resultados indicaram que apenas o consumo de cimento apresenta influência significativa na retração por secagem, a qual diminuiu com a redução do consumo de cimento. Diminuindo o consumo de cimento para 450 kg/m³ e 350 kg/m³ houve uma redução da retração de 35,17% e 47,62% respectivamente em relação ao consumo de 548 kg/m³. Notou-se ainda que, com exceção do traço de 350 kg/m³, a adição de polímeros aos traços levou a uma redução da retração por secagem, sendo de 16,55% para o consumo 548 kg/m³ e de 13,94 % para o consumo 450 kg/m³, porém, pela ANOVA essa redução não foi significativa. Já para a resistência à compressão a adição de polímero foi significativa. Assim, nota-se que o emprego do empacotamento de partículas associado a materiais poliméricos pode ser de interesse para o proporcionamento das misturas a base de cimento para reparo de estruturas de concreto, uma vez que apresentaram bons resultados no que diz respeito à redução da retração por secagem e/ou atendimento das propriedades mecânicas. Estudos considerando outras propriedades relevantes para o desempenho de materiais de reparo devem ser conduzidos, a fim de avaliar os benefícios do emprego da teoria de empacotamento de partículas, para proporcionamento de materiais à base de cimento mais eficientes do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Palavras-chave: Material para reparo. Contração volumétrica. Consumo de cimento. Polímero. Empacotamento de partículas.

OLIVEIRA, R. G. G. **Evaluation of drying shrinkage in cement-based repair materials for eroded structures**. 2020. 61p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

ABSTRACT

Cementitious materials are the most used for repairs concrete structures, due to its property's compatibility and its low cost. However, especially in large repair surfaces, the use of materials with high cement content can cause cracks, mainly due to the volumetric shrinkage that some components of the cement are subjected to during hydration. The material mix design using particle packing methods and adding polymers to the mixture can be alternatives to minimize this cracking. Thus, this work aims to evaluate the performance of shrinkage by drying cement-based materials to repair concrete structures subject to surface erosion, based on the particle packing method. Six mixtures were made, varying the cement content, 548, 450 and 350 kg/m³, and the presence or not of EVA polymer in two levels, 0% and 1.5%. The produced mixtures were subjected to the drying shrinkage test using the ASTM C596 (2018) standard, until the age of 53 days. Static tests were also carried out to evaluate the technological control of concrete, compressive strength, tensile strength, and static elastic modulus, at 7 and 28 days. The results indicated that only the cement content presents a significative influence on drying shrinkage, which decreased with the cement content reduction. By reducing the cement content to 450 kg/m³ and 350 kg/m³ shrinkage reduces 35.17% and 47.62%, respectively, compared to the content of 548 kg/m³. Except for 350 kg/m³, the polymers additions led to a reduction in drying shrinkage, being 16.55% for cement content 548 kg/m³ and 13.94% for content 450 kg/m³. However, through ANOVA, this reduction was not significative. On the other hand, for the compressive strength, the polymer addition was significative. Thus, it is noted that the use of particle packaging associated with polymeric materials may be of interest for the mix design of cement-based mixtures for the repair of concrete structures, since they have shown good results with regard to reducing drying shrinkage and/or meeting mechanical properties. Studies considering other relevant properties to the performance of repair materials should be conducted to evaluate the benefits of using particle packing theory to provide cement-based materials that are more efficient from a technical, economic and environmental point of view.

Key words: Repair material. Volumetric contraction. Cement content. Polymer. Particle packaging.

OLIVEIRA, R. G. G. **Evaluación de la contracción por secado en materiales de reparación a base de cemento para su aplicación en estructuras erosionadas.** 2020. 61p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

RESUMEN

Los materiales cementosos son los más utilizados para la reparación de estructuras de hormigón, tanto por la compatibilidad de sus propiedades como por su bajo costo. Sin embargo, especialmente en grandes áreas de reparación, el uso de materiales con alto consumo de cemento puede ocasionar grietas, principalmente debido a la contracción volumétrica que sufren algunos componentes del cemento durante la hidratación. Dosificar el material mediante el método de empaquetamiento de partículas y agregar polímeros a la mezcla pueden ser alternativas para minimizar estas grietas. Así, este trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la contracción mediante el secado de materiales a base de cemento para reparar estructuras de hormigón sujetas a erosión superficial, basado en el método de empaque de partículas. Se realizaron seis mezclas, variando el consumo de cemento 548, 450 y 350 kg / m³ y la presencia o no de polímero EVA en dos niveles 0% y 1,5%. Las mezclas producidas fueron sometidas a la prueba de contracción por secado utilizando la norma ASTM C596 (2018), hasta la edad de 53 días. También se realizaron ensayos estáticos para evaluar el control tecnológico del hormigón, resistencia a la compresión axial, flexión a tracción y módulo elástico estático, a los 7 y 28 días. Los resultados indicaron que solo el consumo de cemento influye en la contracción por secado, que disminuye con la reducción del consumo de cemento. Al reducir el consumo de cemento a 450 kg/m³ y 350 kg / m³ se nota una reducción en la retracción del 35,17% y 47,62% respectivamente con relación al consumo de 548 kg / m³. También se observó que, a excepción de la mezcla de 350 kg / m³, la adición de polímeros a la mezcla condujo a una reducción de la contracción por secado, siendo 16,55% para consumo 548 kg / m³ y 13,94% para consumo 450 kg / m³ de contracción por secado, sin embargo, por ANOVA esta reducción no fue significativa. Así, se observa que el uso de empaquetamiento de partículas asociados a materiales poliméricos puede ser de interés para la provisión de mezclas a base de cemento para la reparación de estructuras de hormigón, ya que han mostrado buenos resultados en cuanto a reducción de contracciones por secado y/o cumplimiento de las propiedades mecánicas. Se deben realizar estudios que consideren otras propiedades relevantes para el desempeño de los materiales de reparación a fin de evaluar los beneficios de usar la teoría del empaquetamiento de partículas para proporcionar materiales a base de cemento que sean más eficientes desde un punto de vista técnico, económico y ambiental.

Palabras clave: Empaquetamiento de partículas. Consumo de cemento. Polímero. Material de reparación. Contracción volumétrica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curvas Granulométricas dos materiais particulados	21
Figura 2 – Arquivo “.txt”	23
Figura 3 – Legenda de informações “.txt”	24
Figura 4 – Simulador MECFOR.....	25
Figura 5 – Resultado “.pro”	26
Figura 6 – Ensaio de índice de consistência.....	28
Figura 7 – Ensaio de massa específica	28
Figura 8 – Amostras de uma mistura moldada	29
Figura 9 – Amostras de retração na sala de ensaio.....	29
Figura 10 – Ensaios mecânicos: (a) resistência à compressão, (b) resistência à tração na flexão e (c) módulo de elasticidade estático.....	29
Figura 11 – Equipamento ensaio de retração por secagem: (a) leitura barra padrão (b) leitura do corpo de prova.....	30
Figura 12 – Esquema ensaio de retração por secagem	30
Figura 13 – Retração por secagem dos materiais em estudo em função do consumo de cimento.....	35
Figura 14 – Influência do consumo de cimento na retração por secagem	37
Figura 15 – Resistência à compressão (fc) x retração por secagem (RS).....	39
Figura 16 – Resistência à tração (ft) x retração por secagem (RS)	40
Figura 17 – Módulo de elasticidade (EE) x retração por secagem (RS)	40
Figura 18 – Retração por secagem x custos.....	43
Figura 19 – Retração por secagem x Emissões de CO ₂	44
Figura 20 – Avaliação global dos indicadores considerados	45
Figura 21 – Ensaio Granulometria à Laser	55
Figura 22 – Resultado da TG e DTG	56
Figura 23 – Ensaio ponto de saturação do aditivo	56
Figura 24 – Ensaio demanda de água	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dosagem base para a produção de 1 m ³ de argamassa para reparo	19
Tabela 2 – Análise da composição química dos materiais por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)	20
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais	21
Tabela 4 – Especificações Polímero EVA	22
Tabela 5 – Especificações Fibra de Polipropileno	22
Tabela 6 – Frações Volumétricas das misturas de referência e simuladas	25
Tabela 7 – Materiais para a produção de 1 m ³ de argamassa para reparo	27
Tabela 8 – Ensaios no estado fresco	27
Tabela 9 – Informações de compra e custo dos materiais	32
Tabela 10 – Emissões de CO ₂ dos materiais constituintes das misturas em estudo	33
Tabela 11 – Retração por secagem (%)	35
Tabela 12 – Anova para os parâmetros analisados para a retração por secagem	37
Tabela 13 – Propriedades mecânicas das misturas	38
Tabela 14 – Anova para os parâmetros analisados para as propriedades mecânicas	38
Tabela 15 – Comparativo de indicadores de desempenho	39
Tabela 16 – Requisitos sistema substrato x material de reparo	41
Tabela 17 – Custo do m ³ de cada mistura	43
Tabela 18 – Emissões de CO ₂ por mistura	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.2 CONTEXTO E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 DESGASTE EROSIVO	15
2.2 MATERIAIS DE REPARO A BASE DE CIMENTO	15
2.3 RETRAÇÃO EM MATERIAIS DE REPARO	16
2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	18
3 METODOLOGIA	19
3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL	19
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	20
3.3 PROPORCIONAMENTO E PRODUÇÃO DAS MISTURAS.....	23
3.3.1 Proporcionamento das misturas	23
3.3.2 Produção das Amostras	27
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E RETRAÇÃO	29
3.4.1 Caracterização mecânica das amostras	29
3.4.2 Ensaio de retração por secagem	29
3.5 ANÁLISE DE RESULTADOS (INDICADORES DE DESEMPENHO)	31
3.5.1 Análise de Indicador Técnico – Retração e propriedades mecânicas	31
3.5.2 Análise de Indicador Econômico - Custo do material.....	31
3.5.3 Análise de Indicador Ambiental - Emissão de CO ₂	32
3.5.4 Avaliação Global dos Indicadores.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 ANÁLISE DE INDICADOR TÉCNICO	35
4.1.1 Análise Gráfica dos Dados Experimentais	35
4.1.2 Análise de Variância (ANOVA) - Retração por Secagem	36
4.1.3 Análise de Variância (ANOVA) - Propriedades Mecânicas.....	37
4.1.4 Análise de Requisitos de Durabilidade.....	38
4.2 ANÁLISE DE INDICADOR ECONÔMICO (CUSTO DO MATERIAL).....	42
4.3 ANÁLISE DE INDICADOR AMBIENTAL (EMISSÃO DE CO ₂)	43
4.4 AVALIAÇÃO GLOBAL DOS INDICADORES CONSIDERADOS.....	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47

REFERÊNCIAS49

ANEXO A55

1 INTRODUÇÃO

Recebendo manutenções periódicas corretamente, as estruturas de concreto apresentam uma boa durabilidade (HELENE,1992). Ainda assim, não é raro apresentarem algum grau de deterioração ao longo da vida útil (GALLETTO, 2005). Dentre os fatores físicos que levam à deterioração do concreto, tem-se a fissuração e o desgaste superficial. A fissuração pode ocorrer por variação volumétrica, carregamento estrutural ou acidental e exposição da estrutura a extremos de temperatura. Já a deterioração por desgaste superficial pode ocorrer devido à cavitação, abrasão e erosão (MEHTA; GERWICK, 1982).

Em estruturas hidráulicas geralmente tem-se a ocorrência de cavitação e erosão, sendo comum o desgaste superficial do concreto pela ação do fluxo de água em alta velocidade, observado nas calhas de vertedouros de usinas hidrelétricas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Considerando que essas manifestações patológicas podem causar desde danos estéticos até danos à capacidade resistente da estrutura (HELENE, 1992), em estruturas hidráulicas que possuem alto valor econômico para serem desativadas ou substituídas, é conveniente o uso de reparos (ROHR, 2018), para reestabelecer propriedades originais dos concretos degradados (GALLETTO, 2005).

Dentre os materiais de reparo tem-se em geral, poliméricos, cimentícios e mistos, que são cimentícios com adição de polímeros (QIAN, 2014; MOMAYEZ, 2005; LUKOVIC, 2012). Os materiais cimentícios como, argamassas e concretos, com e sem adição de polímero, são os mais utilizados para reparos em estruturas de concreto (SOUZA, 2018b). Embora existam outros materiais, os cimentícios são vantajosos, pois possuem propriedades mecânicas semelhantes a grande parte dos substratos de concreto (QIAN, 2014; MOMAYEZ, 2005; LUKOVIC, 2012).

O material de reparo deve ser compatível com o substrato, apresentar durabilidade, resistência, trabalhabilidade, aderência ao substrato, além de impermeabilidade e baixa retração (SOUZA, 2018a). No entanto, em materiais de reparo com elevado consumo de cimento e realizados em grandes superfícies, a retração tende a ser elevada. Segundo Mehta e Monteiro (2014), com o aumento da quantidade de cimento tem-se um maior volume de pasta e, conseqüentemente, menor quantidade de agregados, que são responsáveis por restringir a retração por secagem. Além disso, de acordo com Silva (2016), elementos com elevada área superficial em relação ao volume perdem umidade mais rapidamente para o ambiente, o que eleva à retração por secagem.

Uma das alternativas para a redução do consumo de cimento é a utilização de métodos de empacotamento de partículas (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017), que buscam reduzir os vazios intragranulares, preenchendo-os com partículas de menores dimensões (BARANHUK, 2014), com objetivo de melhorar a compacidade da mistura (FURNAS, 1931; ROQUIER, 2019; CAMPOS *et al.*, 2020). Assim, no presente trabalho pretende-se avaliar a influência da redução do consumo de cimento proporcionada por um método de empacotamento de partículas na retração por secagem de materiais cimentícios de reparo com e sem presença de polímeros, para aplicação em grandes áreas de reparo de estruturas erodidas.

1.1 OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo avaliar a retração por secagem de materiais cimentícios de reparo, com e sem adição de polímero EVA (Vinil acetado etileno), para aplicação em estruturas erodidas, proporcionados por um método de empacotamento de partículas.

Em decorrência do objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a influência da redução do consumo de cimento proporcionada por um método de empacotamento de partículas na retração por secagem do material cimentício de reparo.
- b) Analisar o efeito da adição de polímero EVA na retração por secagem do material cimentício de reparo.
- c) Verificar as possíveis vantagens econômicas e ambientais na redução do consumo de cimento pela utilização de um método de empacotamento de partículas.

1.2 CONTEXTO E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa surgiu a partir do projeto da pesquisa “Estudos experimentais para caracterização do desempenho de materiais para reparo de estruturas sujeitas ao desgaste superficial”, desenvolvido no Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB) e financiado pela Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (PTI). São

desenvolvidos vários trabalhos na graduação e na pós-graduação a respeito da temática dessa pesquisa, vinculados a esse projeto tanto de ordem experimental quanto numérica.

Neste estudo foram realizados apenas ensaios de módulo de elasticidade estático, resistência à tração e compressão e retração por secagem, não sendo avaliadas outras propriedades relevantes para o desempenho de materiais de reparo, como coeficiente de dilatação térmica, resistência ao arrancamento e abrasão e erosão hidráulica.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema e justificativa da pesquisa, bem como seus objetivos e limitações, e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão de literatura a respeito de estruturas sujeitas à erosão hidráulica, materiais de reparo à base de cimento, mecanismos de retração, em especial a retração por secagem, tema desta pesquisa. A revisão trata também a respeito da utilização das adições poliméricas e de um método de empacotamento de partículas como alternativas para a redução de retração de materiais à base de cimento.

O Capítulo 3 traz a metodologia adotada no trabalho, que abrange a definição do projeto experimental, caracterização dos materiais, proporcionamento e produção das misturas, ensaios de caracterização mecânica e de retração e análise de indicadores de desempenho.

No Capítulo 4, é realizada toda a análise e discussão dos resultados da pesquisa. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DESGASTE EROSIVO

Um dos fatores de deterioração física do concreto é o desgaste superficial. Em estruturas hidráulicas, esse processo pode ser causado por abrasão, cavitação ou erosão. No caso da abrasão a deterioração é ocasionada pelo choque de fragmentos contidos na água na superfície da estrutura. Já a cavitação ocorre pela implosão, próxima à superfície de concreto, de bolhas de vapor formadas devido à redução da pressão em locais com elevação da velocidade de escoamento, respectivamente (KORMANN, 2002). Na erosão o desgaste da superfície acontece pelo impacto direto do fluxo de água em velocidade elevada (MOMBER; KOVACEVIC; YE, 1995).

A porosidade e a resistência do concreto, bem como a velocidade de transporte das partículas em suspensão, influenciam na taxa de erosão. Para minimizar o desgaste por erosão hidráulica é interessante garantir que o concreto de superfície tenha uma adequada resistência ao desgaste. Nos casos em que a estrutura está sujeita a um desgaste erosivo acentuado, recomenda-se a utilização de concreto com agregados de dureza elevada, com resistência à compressão superior a 41 MPa aos 28 dias e submetido à cura eficiente (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Ao sofrer desgaste por processos erosivos, as estruturas devem passar por procedimentos de reparo, para recuperação do desempenho da estrutura, garantindo a manutenção de sua durabilidade (SOUZA; RIPPER, 2009).

2.2 MATERIAIS DE REPARO A BASE DE CIMENTO

Os materiais de reparo à base de cimento consistem basicamente de argamassa ou concreto convencional (cimento Portland, água e agregados), que geralmente contêm aditivos e adições como sílica ativa e polímeros (DEHWAH *et al.*, 1994; BASUNBUL; DEHWAH; MASLEHUDDIN, 1994).

As argamassas de reparo são materiais que após o endurecimento desenvolvem características bastante próximas às da superfície danificada (KUDLANVEC JUNIOR, 2017). Para executar sua finalidade, que é recuperar elementos, essa deve apresentar resistências iniciais elevadas, baixa de retração e adequada aderência ao substrato, para alcançar tais

propriedades, normalmente utilizam-se aditivos e adições (HELENE, 1992) como, por exemplo, de materiais poliméricos (SOUZA, 2018b).

A fim de ter uma boa aderência e durabilidade, o material de reparo deve possuir características compatíveis com o substrato e com o meio onde será aplicado (GALVÃO, 2010). A conservação do reparo é dependente da compatibilidade eletroquímica, química, de permeabilidade e dimensional. A compatibilidade dimensional é a principal, no que diz respeito ao reparo de estruturas de concreto, e está relacionada com propriedades como, coeficiente de dilatação térmica, fluência, módulo de elasticidade, geometria e retração (MORGAN, 1996).

A conexão substrato/material de reparo é complexa, pois a união de diferentes materiais propicia o surgimento de tensões internas, devido a variações dimensionais em volume como, por exemplo, a retração. Consequentemente, há o surgimento de fissuras e demais defeitos que levam à deterioração da estrutura e perda de aderência do reparo feito, podendo ocasionar o seu deslocamento (GALVÃO, 2010). Entre os principais fatores do descolamento do reparo estão a área e o formato do reparo, a incapacidade de absorção de esforços e deformações, bem como o elevado índice de retração (MORGAN, 1996).

2.3 RETRAÇÃO EM MATERIAIS DE REPARO

A retração é caracterizada por uma contração volumétrica devido à perda de água, embora seja uma deformação tridimensional, normalmente é medida linearmente (mm/mm) (AÏTCIN et al., 1997). Segundo Kumm (2009), existem diversos tipos de retração em materiais cimentícios: plástica, por carbonatação, térmica, autógena e por secagem.

A retração plástica é causada pela evaporação da água de amassamento da mistura no estado fresco, quando a exsudação é inferior a essa evaporação. Essa retração é influenciada por fatores como umidade do ambiente, temperatura e velocidade do vento (KUMM, 2009).

A retração por carbonatação ocorre devido a uma reação entre o CO_2 , a umidade do ar e os produtos de hidratação do cimento (CLARK, 2009).

A retração térmica se dá pela ocorrência de variações de temperatura. Tanto nas idades iniciais como nas mais avançadas. Sendo que nas idades iniciais, a retração

ocorre devido à diminuição da temperatura após a dissipação do calor de hidratação (CLARK, 2009). E nas mais avançadas, devido às variações da temperatura do ambiente de exposição do material (KUMM, 2009).

Já a retração autógena decorre de uma contração volumétrica devido aos produtos de hidratação do cimento apresentarem um volume menor do que os anidros de cimento e a água da reação de hidratação (KUMM, 2009).

A retração por secagem, tema desse trabalho, pode ser entendida como uma contração volumétrica devido à perda de água da pasta de cimento hidratada para o ambiente em que o concreto está exposto, quando esse apresenta umidade menor do que a inicialmente existente no concreto (IDIART 2009). A contração volumétrica devido à perda de água pode levar à ocorrência de fissuras (WEERACHART; CHAI, 2010).

A retração por secagem sofre influência de fatores internos e externos. No que diz respeito aos fatores externos tem-se, segundo Lenart (2015) que a taxa de retração é função da temperatura, da velocidade do vento e da umidade do ambiente, que atuam de maneira direta na evaporação da água. Logo, na escolha do material de reparo deve-se levar em conta as condições do ambiente em que se encontra a estrutura a ser reparada.

Dentre os fatores internos que afetam a retração por secagem estão o teor de água, as adições e o consumo de cimento (SILVA, 2016). Em relação ao teor de água, tem-se que quanto maior o teor de água presente na mistura, maior será o teor de água evaporável, o que aumenta a chance de ocorrência de retração por secagem (SILVA, 2016).

A adição de materiais poliméricos na mistura tem influência em propriedades como aderência, resistência à abrasão, resistência à compressão, compatibilidade térmica e fissuração por retração nos materiais de reparo (SOUZA, 2018b). Dentre os tipos de polímeros utilizados nas argamassas modificadas por polímeros, tem-se os em pó redispersíveis, de emulsão, líquidos e solúveis em água (LIANG *et al.*, 2015). Os polímeros adicionados na mistura se aglomeram formando uma película polimérica nos hidratos de cimento, durante o processo de hidratação e endurecimento do cimento (GEMERT *et al.*, 2005). Atuando assim, no preenchimento dos poros capilares, o que diminui a perda de água e, conseqüentemente, a retração por secagem (WENG, 2017).

Um elevado consumo de cimento na mistura aumenta a quantidade de pasta e, conseqüentemente, a possibilidade de retração (IDIART, 2009). O aumento da pasta de cimento ocasiona uma diminuição da quantidade de agregados, que são responsáveis por

restringir a retração por secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Assim, dentre as possíveis alternativas para diminuir a retração por secagem, podem estar as misturas com adição de materiais poliméricos e o consumo moderado de cimento. Segundo Damineli, Pileggi e John (2017), pode-se reduzir o consumo de cimento sem perda de desempenho, empregando a teoria de empacotamento de partículas na dosagem de materiais cimentícios.

2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Define-se empacotamento de partículas como o processo de escolha da proporção e das dimensões adequadas de materiais particulados que podem compor uma mistura, buscando otimizar o esqueleto granular para produzir um material com a maior compacidade possível (VANDERLEI, 2004). Nesse contexto, os métodos de empacotamento de partículas desenvolvidos, objetivam a redução dos vazios intragranulares da mistura, que devem ser preenchidos por partículas de menores dimensões (BARANHUK, 2014).

Os modelos de empacotamento de partículas se apresentam por meio de equações destinadas a calcular a “densidade de empacotamento teórica de uma mistura baseado na distribuição granulométrica e na densidade de empacotamento de um determinado grupo de partículas” (OLIVEIRA *et al.*, 2018, p. 3). Existem diversos modelos de empacotamento, dentre eles o modelo de Furnas (1931), de Andreasen (1930) e o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC). Neste trabalho foi empregado o MEC, desenvolvido por De Larrard (1999).

Tal método apresenta inicialmente uma abordagem analítica, que é empregada para a otimização da compacidade da mistura, conforme os parâmetros empregados no MEC. Após a realização do cálculo da maior compacidade, o MEC utiliza equacionamentos empíricos para correlacionar as propriedades do estado fresco e do estado endurecido do material cimentício (FORMAGIN, 2005).

Para a realização do proporcionamento das misturas estudadas neste trabalho pelo MEC, foi utilizado o simulador MECFOR, desenvolvido por Formagini (2005), cujo procedimento está descrito no item 3.3.1 da metodologia.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida em cinco etapas, a saber: i) Definição do projeto experimental; ii) Caracterização dos materiais; iii) Proporcionamento e produção das misturas; iv) Ensaios de caracterização mecânica e retração; e, v) Análise de indicadores de desempenho.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi realizada a avaliação da influência do consumo de cimento e da adição de polímero EVA na retração por secagem em materiais de reparo à base de cimento para aplicação em estruturas erodidas. Para isso foram dosadas misturas à base de cimento com proporções definidas, com a utilização da teoria do empacotamento de partículas.

Foram produzidas misturas variando o consumo de cimento (548, 450 e 350 kg/m³) e o teor de adição de polímero EVA (0 e 1,5 %), totalizando seis misturas cimentícias. O proporcionamento base (D1) foi realizado com as proporções definidas por Andrade (2017)¹ e os demais (D2 à D6) foram definidos a partir do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC)². O proporcionamento da mistura D1 está apresentado na Tabela 1 e os das outras (D2 à D6) no item 3.3.1 (ver Tabela 7).

Tabela 1 – Dosagem base para a produção de 1 m³ de argamassa para reparo

Material	Quantidade (kg/m ³)
Cimento Portland (Kg/m ³)	548,0
Sílica Ativa (Kg/m ³)	69,0
Areia natural (Kg/m ³)	1234,0
Aditivo* (%)	1,0 a 3,0
Fibra de Polipropileno** (Kg/m ³)	0,9
Polímero EVA*** (%)	1,0
Água (Kg/m ³)	242,0

*O teor ótimo de aditivo foi ajustado conforme o índice de consistência da mistura.

**Foi utilizado 0,4% da quantidade de cimento da mistura, com base no trabalho de Rohr *et al.* (2019).

***É utilizado para finalidade de reparo de grandes áreas. Sua quantidade é dada em função da quantidade de cimento. No traço original referência utiliza-se polímero acrílico, nesse trabalho utilizou-se o EVA, assim trocou-se o teor de polímero de 1,0% para 1,5%.

Fonte: Autora, 2020

¹ Consultor da UHE de ITAIPU BINACIONAL, documento cedido pelo autor.

² Tendo em vista que o objetivo é produzir um material de reparo para aplicações em grandes áreas, o empacotamento de partículas foi empregado com a finalidade de reduzir o consumo de cimento, um dos materiais de maior influência na retração deste tipo de material.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para reproduzir amostras de argamassas de reparo, foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP V³, sílica ativa, filer calcário⁴, areia natural de origem quartzosa do Rio Paraná, aditivo superplastificante, polímero EVA, fibra de polipropileno e água.

Os ensaios de caracterização realizados para os materiais pulverulentos, agregado miúdo e aditivo, bem como os resultados obtidos, está apresentados nas Tabelas 2 e 3 e na Figura 1.

Tabela 2 – Análise da composição química dos materiais por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)

Amostra (%)	Cimento	Areia Natural	Sílica Ativa	Fíler Calcário
Na ₂ O	0,4	0,12	0,33	-
MgO	3,73	0,06	0,59	5,5
Al ₂ O ₃	4,24	1,45	0,31	1,3
SiO ₂	16,2	94,4	92,5	5
P ₂ O ₅	0,19	0,05	0,21	< 0,1
SO ₃	4,14	0,03	0,19	0,1
Cl	0,03	0,01	0,15	-
K ₂ O	1,41	1,14	1,91	0,3
CaO	60,6	0,18	1,53	46,3
TiO ₂	0,64	0,48	nd	0,1
V ₂ O ₅	0,05	nd	nd	-
Cr ₂ O ₃	nd	0,02	nd	-
MnO	0,08	0,03	0,06	< 0,1
Fe ₂ O ₃	4,22	1,6	0,19	0,8
NiO	0,01	nd	nd	-
CuO	0,01	nd	0,01	-
ZnO	0,04	nd	0,01	-
Rb ₂ O	0,01	nd	<0,01	-
SrO	0,1	<0,01	0,01	< 0,1
Y ₂ O ₃	nd	nd	nd	-
ZrO ₂	0,02	0,02	nd	-
BaO	nd	nd	nd	-
P.F	3,86	0,4	1,98	46,3

nd - não detectado; 0,01 - limite de quantificação FRX; P.F = Perda ao Fogo

Fonte: Autora, 2020

³ O cimento CP V foi escolhido pois é o cimento atual com maior teor de clínquer e como foram incorporados outros materiais à mistura é mais indicado um cimento com menor interferência de adições.

⁴ Apenas nas misturas proporcionados com conceitos de empacotamento de partículas.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais

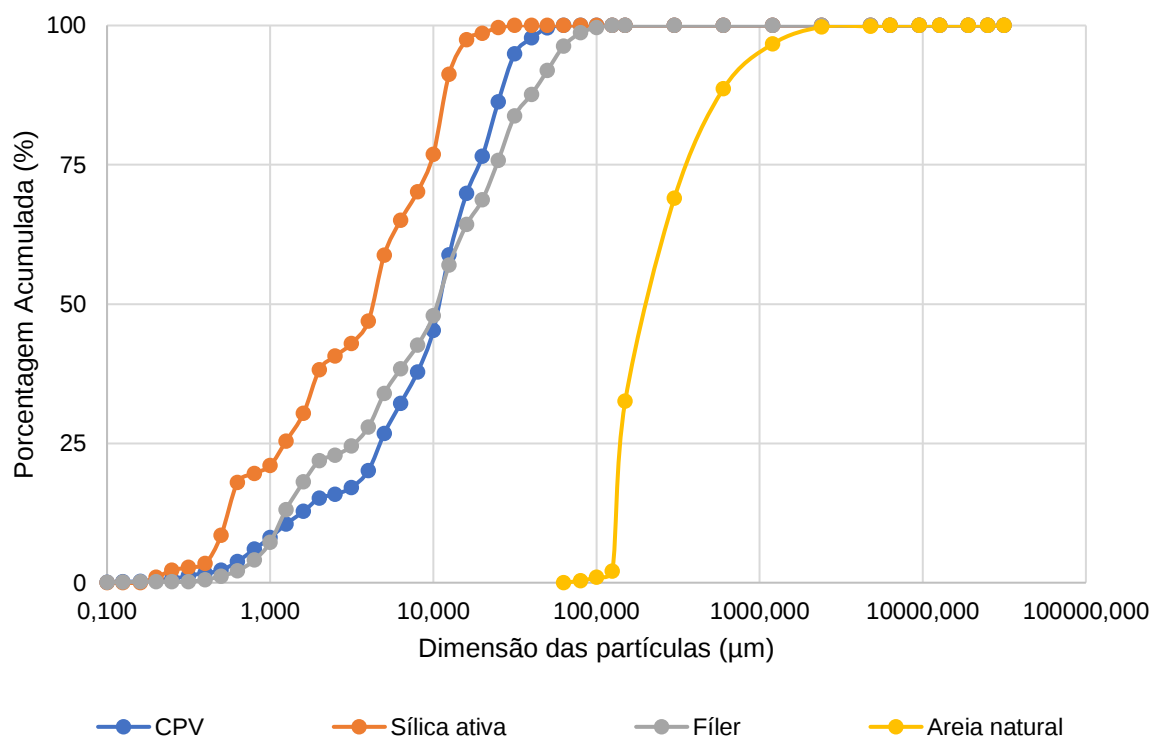
Propriedade	Norma/Procedimento	Material	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16605 (2017)	Cimento CP V ARI	2,97
		Sílica Ativa	2,20
		Fíler Calcário	2,70
	NBR NM 52 (2009)	Areia Natural	2,64
	NBR 11768-3 (2019)	Aditivo	1,07 e-6
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (2006)	Areia Natural	1,76
Dmed (μm) por granulometria a laser	ISO 13320 (2009)	Cimento CP V ARI	12,32
		Sílica Ativa	0,35
		Fíler Calcário	11,84
Dmax (mm) por peneiramento	NBR NM 248 (2003)	Areia Natural	2,36
Demanda de Água*	Formagini (2005)	Cimento CP V ARI	0,616
		Sílica Ativa	0,391
		Fíler Calcário	0,737
Ponto de Saturação do Aditivo	Kantro (1980)	Pasta (cimento + água)	0,3 %**
		Pasta (Fíler Calcário + água)	0,3 %**
		Pasta (Sílica Ativa + água)	4,0 %**
Teor de Sólidos por termoanálise	ASTM E 2550 (2017)	Aditivo	33%

*O ensaio apresenta como resultado os valores de compactidade real dos materiais

** % de teor de sólidos do aditivo pela massa do material

Fonte: Autora, 2020

Figura 1 – Curvas Granulométricas dos materiais particulados



Fonte: Autora, 2020

Com exceção do FRX, conduzido junto ao Laboratório de minerais e rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e da demanda de água, realizada no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCl) da Itaipu Binacional, os demais ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de desempenho estruturas e materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA).

Em relação às fibras de polipropileno e ao polímero EVA (vinil acetado etileno) foram utilizadas as especificações fornecidas pelo fabricante de cada material. As propriedades do polímero e da fibra de polipropileno estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5 respectivamente.

Tabela 4 – Especificações Polímero EVA

Propriedades	
Estado Físico	Pó
Teor de umidade (g/cm ³)	0,40 - 0,60*
Teor de material retido #40	máximo 10%
pH solução 1%	5,0 - 9,0
Teor de umidade (%)	máximo 2,0%

Fonte: Aditex (Fabricante)

Tabela 5 – Especificações Fibra de Polipropileno

Propriedades	
Comprimento (mm)	6
Diâmetro (µm)	18
Seção	Circular
Alongamento (%)	80
Módulo de Young (MPa)	3000
Peso Específico (g/cm ³)	0,91
Resistência à Tração (MPa)	300
Temperatura de Fusão (° C)	160
Temperatura de Ignição (° C)	365

Fonte: Maccaferri (Fabricante)

Os procedimentos para realização dos ensaios que não possuem normas ou não foram realizados com norma brasileira (granulometria à laser, teor de sólidos, ponto de saturação do aditivo e demanda de água) estão apresentados no Anexo A.

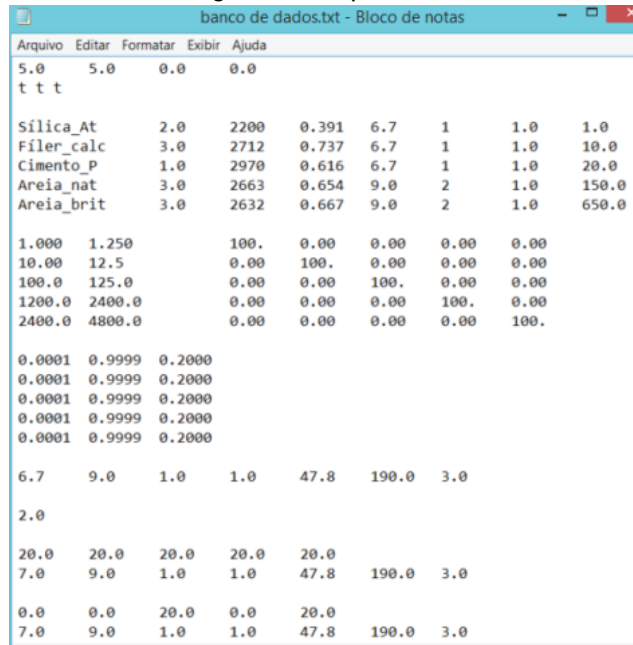
3.3 PROPORCIONAMENTO E PRODUÇÃO DAS MISTURAS

3.3.1 Proporcionamento das misturas

O método de dosagem utilizado foi o Modelo de Empacotamento Compressível (De LARRARD, 1999). Para aplicar o método foi utilizado um simulador desenvolvido por Formagini (2005). O consumo de cimento das misturas foi reduzido em relação ao traço de referência, no entanto, foi fixada a resistência à compressão de 60 MPa (f_c) e o índice de consistência de 240 ± 10 mm conforme Rohr (2019).

A inserção dos dados no simulador MECFOR é feita por meio de um arquivo “.txt” (Figura 2). Ao iniciar o simulador (Figura 4), esse solicita a inserção do nome do arquivo “.txt” onde estão os dados e o nome desejado para o arquivo com os resultados gerados após a simulação.

Figura 2 – Arquivo “.txt”

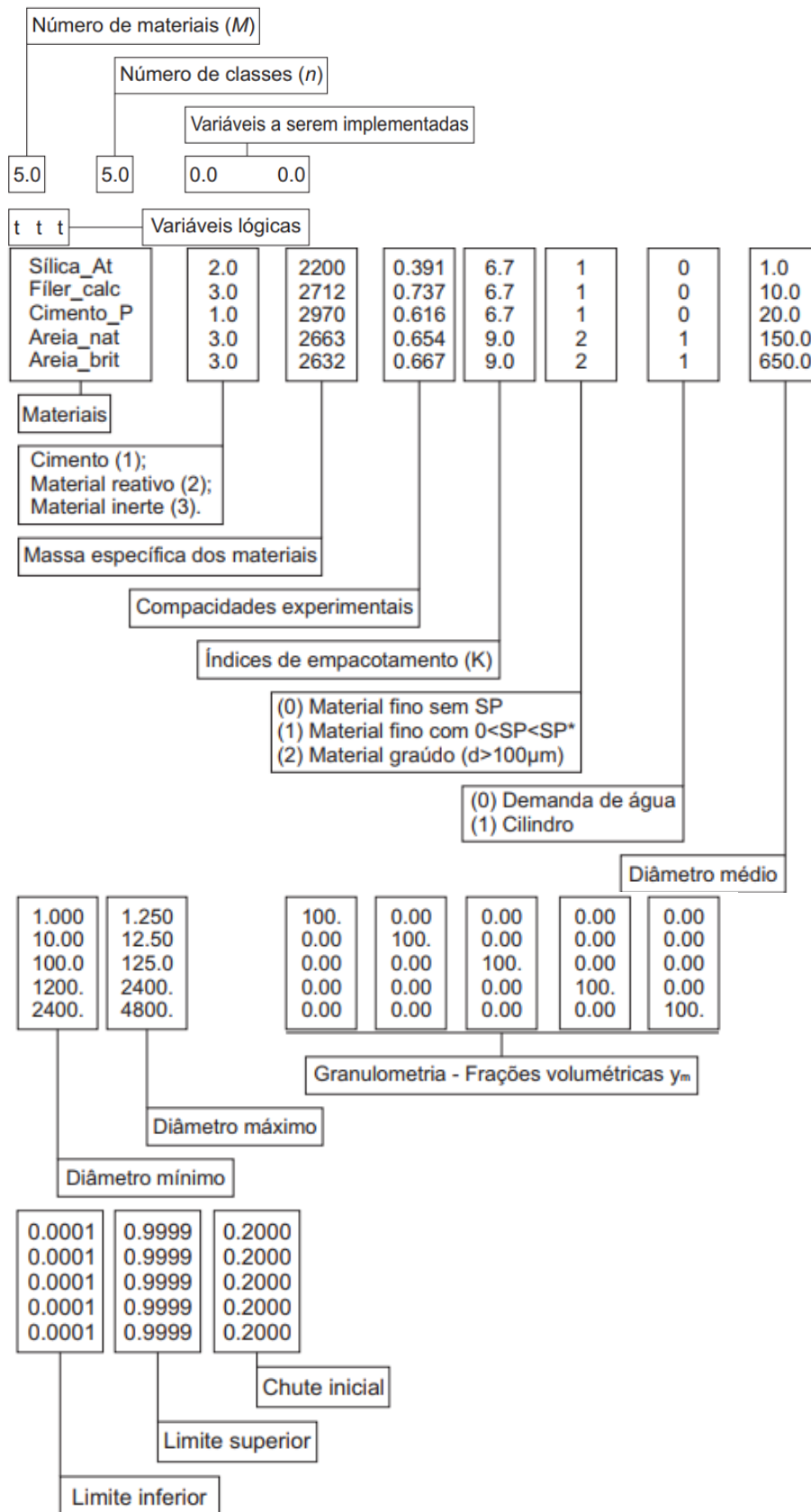


banco de dados.txt - Bloco de notas									
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda									
5.0	5.0	0.0	0.0						
t	t	t							
Silica_At	2.0	2200	0.391	6.7	1	1.0	1.0		
Filer_calc	3.0	2712	0.737	6.7	1	1.0	10.0		
Cimento_P	1.0	2970	0.616	6.7	1	1.0	20.0		
Areia_nat	3.0	2663	0.654	9.0	2	1.0	150.0		
Areia_brit	3.0	2632	0.667	9.0	2	1.0	650.0		
1.000	1.250	100.	0.00	0.00	0.00	0.00			
10.00	12.5	0.00	100.	0.00	0.00	0.00			
100.0	125.0	0.00	0.00	100.	0.00	0.00			
1200.0	2400.0	0.00	0.00	0.00	100.	0.00			
2400.0	4800.0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.			
0.0001	0.9999	0.2000							
0.0001	0.9999	0.2000							
0.0001	0.9999	0.2000							
0.0001	0.9999	0.2000							
0.0001	0.9999	0.2000							
6.7	9.0	1.0	1.0	47.8	190.0	3.0			
2.0									
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0					
7.0	9.0	1.0	1.0	47.8	190.0	3.0			
0.0	0.0	20.0	0.0	20.0					
7.0	9.0	1.0	1.0	47.8	190.0	3.0			

Fonte: Autora, 2020

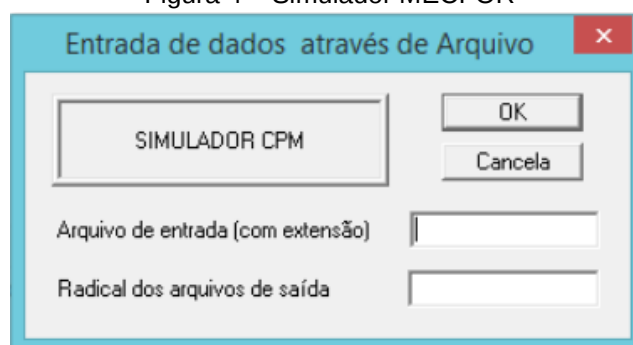
O arquivo “.txt” deve ser montado conforme a configuração da Figura 2. São inseridas informações do número de materiais, número de classes dimensionais de cada material, resultados dos ensaios de caracterização, a mistura arbitrária inicial e os limites de frações volumétricas de cada material. Na Figura 3 estão indicadas as informações que devem constar no arquivo “.txt” e em que local do arquivo apresentado na Figura 2.

Figura 3 – Legenda de informações “.txt”



Fonte: Formagini, 2005.

Figura 4 – Simulador MECFOR



Fonte: Formagini, 2005.

Os outros valores que aparecem na Figura 2 e não foram explicados na Figura 3 são entradas para cálculo da compacidade de misturas de interesse da dosagem, tal como uma de referência. Esta opção permite que o usuário compare seus resultados com a compacidade dessas misturas.

Para inserção da mistura referência no simulador, que foi considerada como a mistura arbitrária inicial, faz-se a conversão das proporções de massa para volume, de maneira a obter as frações volumétricas da mistura de referência, apresentada na Tabela 6. Ao inserir o proporcionamento, e os limites inferior (LI) e superior (LS) aceitáveis para a quantidade de cada material da mistura, o simulador realiza um processo iterativo de busca da distribuição de frações volumétricas que levará à maior compacidade possível dentro dos limites pré-estabelecidos. Inicialmente, já se faz uma substituição de parte da quantidade de cimento por fíler calcário (Tabela 6), essa substituição inicial é arbitrária, uma vez que depois de executar o simulador, novas frações volumétricas serão apresentadas (as que promovem maior densidade de empacotamento), respeitando os LI e LS estipulados.

Tabela 6 – Frações Volumétricas das misturas de referência e simuladas

Materiais	Fração volumétrica da mistura de referência	Limite Inferior (LI)	Limite Superior (LS)	Volume Simulado
Cimento	0,265	0,01	0,999	0,200
Sílica Ativa	0,046	0,01	0,999	0,046
Fíler Calcário	-	0,01	0,999	0,065
Areia Natural	0,689	0,01	0,999	0,689
Total	1,000	-	-	1,000

Fonte: Autora, 2020

Depois de montado o arquivo ".txt" é feita a simulação no MECFOR. Tem-se como resultado o arquivo ".pro" com os resultados das misturas dadas (Figura 5).

Figura 5 – Resultado “.pro”



MISTURA OTIMIZADA			
C	C(K=9)	Gama	S
0.75257	0.78979	0.88665	0.24743

Proporções	
Mat.: Areia_brit	Vol.= 0.000000
Mat.: Areia_nat	Vol.= 0.658281
Mat.: Cimento_P	Vol.= 0.133000
Mat.: Filer_calc	Vol.= 0.139719
Mat.: Sílica_At	Vol.= 0.069000

Fonte: Autora, 2020

Para atingir o proporcionamento final é necessário realizar diversas simulações, pois a proporção volumétrica obtida, embora possa ter uma alta compacidade, nem sempre atenderá às propriedades mecânicas desejadas. A cada simulação os valores de f_c e EE são calculados para verificar se estes estão dentro do estabelecido. Assim, os LI e LS são ajustados a cada simulação até que se encontre a maior compacidade possível respeitando as propriedades mecânicas estipuladas. As equações para determinação dessas propriedades, conforme Formagini (2005), estão apresentadas a seguir. E as proporções das dosagens (D1 à D6) estão apresentados na Tabela 7.

$$f_{cm} = \alpha R_c \left[\frac{v_c}{v_c + v_w v_{ar}} \right]^{c_1} MEP^{-0,13}$$

Em que:

f_{cm} – Resistência à compressão da matriz aos 28 dias

$\alpha = 11,4$ (Constante de ajuste da expressão).

R_c - Resistência à compressão da pasta de cimento aos 28 dias.

v_c – volumes de cimento presente em um volume unitário de concreto.

v_w – volumes de água presente em um volume unitário de concreto.

v_{ar} – volumes de ar aprisionado presente em um volume unitário de concreto.

$c_1 = 2,85$ (constante de ajuste da expressão).

MEP - Distância média entre os agregados imersos na matriz.

(1)

$$MEP = D \left[\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right]$$

Em que:

MEP - Distância média entre os agregados imersos na matriz

D - Máxima dimensão do agregado

g - Volume de agregados ($d > 80 \mu m$) em um volume unitário de concreto

g^* - Equivale a compacidade real dos agregados ($d > 80 \mu m$) mediante um índice de compactação $K=9$

(2)

$$E_m = 226f_{cm}$$

Em que:

E_m – Módulo de Elasticidade da Matriz

f_{cm} – Resistência à compressão da matriz aos 28 dias

(3)

Tabela 7 – Materiais para a produção de 1 m³ de argamassa para reparo

Material	Misturas/dosagens					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Cimento Portland (Kg/m³)	548	548	450	450	350	350
Sílica Ativa (Kg/m³)	69	69	47	47	70	70
Areia natural (Kg/m³)	1234	1234	1466	1466	1570	1570
Aditivo* (%)	0,22	0,24	0,24	0,24	1,04	1,0
Fibra de Polipropileno (Kg/m³)	2,20	2,20	1,80	1,80	1,40	1,40
Polímero EVA (%)	1,5%	-	1,5%	-	1,5%	-
Água (Kg/m³)	242	242	249	249	211,4	211,4
Fíler Calcário (Kg/m³)	-	-	149	149	128	128
Água/Ligante	0,39	0,39	0,50	0,50	0,50	0,50

*O teor ótimo de aditivo foi ajustado conforme o índice de consistência da mistura, sendo dado em % da quantidade de cimento da mistura.

Fonte: Autora, 2020

3.3.2 Produção das Amostras

As amostras foram produzidas no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA. Durante a moldagem foram realizados ensaios de *flow table* de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016a) (Figura 6), para ajustar a quantidade de aditivo a ser colocado na mistura, assim como o ensaio de massa específica conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005a) (Figura 7). Depois da realização desses ensaios os corpos de prova foram moldados (Figura 8). Os resultados dos ensaios no estado fresco estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Ensaio no estado fresco

Mistura/ Dosagem	Aditivo (%)	Índice de Consistência (mm)	Massa Específica (g/cm³)		Teor de ar Incorporado (%)
			Experimental	Teórica	
D1 548 - 0%	0,22	245,10	2,34	2,25	-3,60
D2 548- 1,5%	0,24	243,62	2,30	2,22	-3,30
D3 450 - 0%	0,24	243,74	2,32	2,29	-1,45
D4 450 -1,5%	0,24	237,77	2,31	2,27	-1,96
D5 350 - 0%	1,04	242,05	2,35	2,25	-4,00
D6 350 -1,5%	1,00	237,65	2,34	2,23	-5,00

Fonte: Autora, 2020

Para o ensaio de retração por secagem (ASTM C596, 2018) foram produzidos seis corpos de prova prismáticos de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm por mistura, totalizando 36 unidades.

Os corpos de prova (CPs) para o ensaio de retração por secagem foram submetidos à cura úmida por 48 horas após a desmoldagem (feita após 24 horas), depois disso, foram levados para secagem⁵ em sala semi-climatizada⁶, e fez-se a primeira coleta de dados do ensaio (3 dias após a moldagem). As demais leituras do ensaio foram realizadas aos 4, 11, 18 e 25 dias, após 25 dias de secagem dos corpos de prova (ver Figura 9).

Para o controle tecnológico do material de reparo foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e resistência à tração na flexão, de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 2018), NBR 8522 (ABNT, 2017) e NBR 12142 (ABNT, 2010), respectivamente.

Para a avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade estático foram produzidas, respectivamente seis e três amostras cilíndricas 5 x 10 cm para cada mistura e idade. Já para o ensaio de resistência à tração na flexão foram produzidos três corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm por mistura, para cada idade. O ensaio de resistência à compressão e à tração na flexão foram realizados em duas idades (7 e 28 dias) e o módulo de elasticidade estático, apenas aos 28 dias, totalizando assim 126 amostras de controle tecnológico (90 cilíndricas e 36 prismáticas) e 162 amostras de todo o experimento. Os corpos de prova destinados ao controle tecnológico foram desmoldados após 24 horas e ficaram em cura por imersão a partir da desmoldagem, até as datas de ensaio.

Figura 6 – Ensaio de índice de consistência



Fonte: Autora, 2020

Figura 7 – Ensaio de massa específica



Fonte: Autora, 2020

⁵ A secagem foi realizada em cima de suportes metálicos (ver Figura 9) para permitir a circulação do ar entre as amostras.

⁶ Foi empregada uma sala com ar condicionado cuja temperatura e acesso são controlados. A umidade relativa do ar não foi controlada.

Figura 8 – Amostras de uma mistura moldada



Fonte: Autora, 2020

Figura 9 – Amostras de retração na sala de ensaio



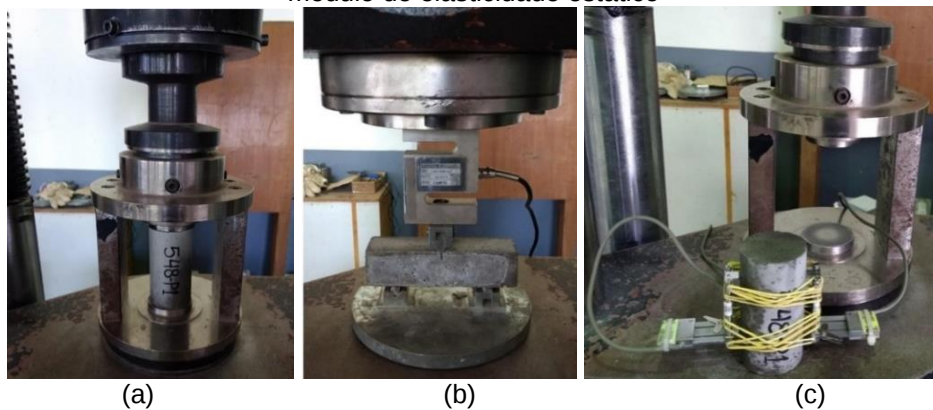
Fonte: Autora, 2020

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E RETRAÇÃO

3.4.1 Caracterização mecânica das amostras

Após sete dias foram executados os ensaios de resistência à compressão (f_c) e à tração (f_t), os quais foram repetidos aos 28 dias juntamente com o ensaio de módulo de elasticidade estático (EE). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Ensaios mecânicos: (a) resistência à compressão, (b) resistência à tração na flexão e (c) módulo de elasticidade estático



Fonte: Autora, 2020

3.4.2 Ensaio de retração por secagem

Para a realização do ensaio de retração por secagem foram seguidos os procedimentos da norma ASTM C596 (2018). As leituras foram feitas por meio de um dispositivo metálico que possui um relógio comparador. O corpo de prova prismático com

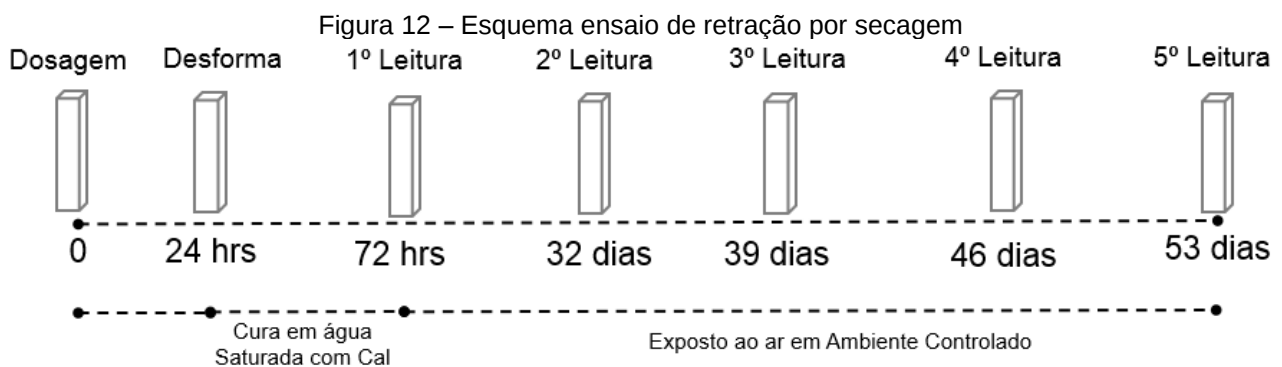
pinos metálicos acoplados em suas extremidades foi posicionado, sempre na mesma posição no dispositivo metálico e a leitura exibida no relógio comparador foi anotada. As medidas de comprimento das amostras em cada idade são dadas pela subtração da leitura obtida de uma barra padrão da leitura obtida dos corpos de prova. Na Figura 11 é possível observar as leituras da barra padrão e do corpo de prova.

Figura 11 – Equipamento ensaio de retração por secagem: (a) leitura barra padrão (b) leitura do corpo de prova.



Fonte: Autora, 2020

A retração por secagem foi estimada subtraindo da medida de comprimento inicial aos 3 dias do corpo de prova, das medidas de comprimento nas idades 32, 39, 46 e 53 dias a partir da data de moldagem das amostras. O esquema de ensaio está ilustrado na Figura 12.



Fonte: Autora, 2020

3.5 ANÁLISE DE RESULTADOS (INDICADORES DE DESEMPENHO)

A análise de resultados foi realizada com base na avaliação de indicadores de desempenho técnico, econômico e ambiental, conforme mostrado a seguir.

3.5.1 Análise de Indicador Técnico – Retração e propriedades mecânicas

Os resultados foram analisados a partir da verificação da influência das variáveis de controle da pesquisa (presença de polímero e consumo de cimento) na variável de resposta (retração por secagem), por meio da análise gráfica dos dados experimentais. Os resultados dessa análise foram discutidos com base na bibliografia.

Também se fez a análise de variância (ANOVA) que foi conduzida no software Statistica 10.0. Com essa análise foi possível avaliar se as variáveis de controle (consumo de cimento e presença de polímeros) exercem influência significativa ou não, para a retração por secagem (RS) e para as propriedades mecânicas (f_c , f_t e EE) considerando o nível de significância de 5% estipulado na análise.

Os resultados também foram analisados a partir de requisitos de durabilidade do sistema substrato x material de reparo, por meio verificação das relações ideais entre as propriedades mecânicas do material de reparo e do substrato. Para isso foram realizadas análises gráficas dos dados experimentais obtidos para os materiais de reparo, em comparação com os dados dos três substratos de referência⁷. Esses resultados também foram discutidos com base na bibliografia.

3.5.2 Análise de Indicador Econômico - Custo do material

A análise de custo foi realizada por meio de comparações dos valores do m³ das misturas da pesquisa. Com base nisso e nos indicadores de desempenho, pode-se determinar a mistura mais interessante em questões econômicas e de desempenho para aplicações práticas de Engenharia.

Conhecidos os valores (Kg/m³) de cada material da mistura (Tabela 7) e seus

⁷ Os dados dos substratos de referência são da calha do vertedouro de Itaipu e foram obtidos de Escobar (2015).

custos (R\$/Kg) (Tabela 9), calcula-se o valor do m³ de cada mistura desse trabalho. O custo da água foi desconsiderado.

Tabela 9 – Informações de compra e custo dos materiais

Material	R\$/Kg	Origem do Orçamento*	Fornecimento	Data
Cimento Portland CPV da Votorantin	0,45	Concresuper	Tonelada	24/11/2020
Sílica Ativa da Tecnosil	1,00	Tecnosil	Sacos 10 Kg	24/11/2020
Areia natural	0,04	Concresuper	Tonelada	24/11/2020
Aditivo	16,19	Mc - Bauchemie	Tambor 210 Kg	26/11/2020
Fibra de Polipropileno	20,02	Maccaferri.	Sacos de 100g	22/07/2019
Polímero EVA	14,38	Aditex	Sacos 25 Kg	03/03/2020
Filer Calcário	0,34	Calcário Roma	Tonelada	28/02/2020

Fonte: Autora, 2020

3.5.3 Análise de Indicador Ambiental - Emissão de CO₂

Na avaliação de indicador ambiental, foram calculadas as emissões de CO₂ das argamassas de reparo. Para isso estimou-se a quantidade de CO₂ liberada na atmosfera devido ao processo de produção dos materiais constituintes da argamassa de reparo, sem considerar o transporte até o local de utilização.

Para determinar as emissões devido à produção do cimento, multiplica-se as emissões da produção do clínquer ($E_{clín}$) pela porcentagem presente no cimento ($\%C_c$) e soma-se ao valor da emissão do consumo de energia elétrica (E_{ee}) multiplicada pelo fator de emissão (f_e), conforme Equação 4. Na Tabela 10 estão apresentadas as informações de emissões dos materiais utilizados.

$$E_c = E_{clín} \times \%C_c + E_{ee} \times f_e$$

Em que:

E_c : Emissão para a produção do cimento, em KgCO₂/t;

$E_{clín}$: Emissão para a produção do clínquer, em KgCO₂/tclínquer;

C_c : Consumo de cimento para produzir 1 m³, em Kg;

E_{ee} : Emissão para a produção de energia elétrica, em Kg CO₂/kWh

f_e : Fator de Emissão de energia elétrica, em Kg CO₂/kWh

(4)

Para estimar a emissão final de CO₂ das argamassas, realizou-se a soma proporcional das emissões dos materiais constituintes da argamassa, ou seja, realizou-se o somatório das emissões típicas desses, multiplicado pelo consumo de cada material,

conforme observa-se na Equação 5.

$$E_{arg} = E_c \times C_c + E_{fil} \times C_{fil} + E_{areia} \times C_{areia} + E_{ad} \times C_{ad} + E_{fib} \times C_{fib} + E_{EVA} \times C_{EVA}$$

Em que:

E_{arg} : Emissão total para produção da argamassa, em KgCO_2/t ;

E_c : Emissão para a produção do cimento, em KgCO_2/t ;

E_{fil} : Emissão para a produção do fíler calcário, em KgCO_2/t ;

E_{areia} : Emissão para a produção da areia, em KgCO_2/t ;

E_{ad} : Emissão total para produção do aditivo, em KgCO_2/t ;

E_{fib} : Emissão para a produção da fibra de polipropileno, em KgCO_2/t ;

E_{EVA} : Emissão para a produção do polímero EVA, em KgCO_2/t ;

C_c : Consumo de cimento para produzir 1 m^3 , em Kg;

C_{fil} : Consumo de fíler calcário para produzir 1 m^3 , em Kg;

C_{areia} : Consumo de areia para produzir 1 m^3 , em Kg.

C_{ad} : Consumo de aditivo para produzir 1 m^3 , em Kg.

C_{fib} : Consumo de fibra de polipropileno para produzir 1 m^3 , em Kg;

C_{EVA} : Consumo de polímero EVA para produzir 1 m^3 , em Kg;

(5)

Tabela 10 – Emissões de CO_2 dos materiais constituintes das misturas em estudo

Material	Processo	Descrição	Emissão	Referência
Cimento	Produção de Clínquer	Emissões por calcinação e queima de combustíveis ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{tclínquer}$)	866	GNR PROJECT (2016)
		Porcentagem no CP V - ARI (%)	90 a 100**	NBR 16697 (2018)
	Energia elétrica	Consumo (kWh/t)	109	GNR PROJECT (2016).
		Fator de Emissão ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kWh}$)	0,08	MCTIC (2016).
Fíler Calcário	Produção	Emissão ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{t}$)	8	MILLER <i>et al</i> (2017)
Areia	Produção	Emissão ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{t}$)	47,84	RIGO (2019)
Sílica	Resíduo	Emissão ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{t}$)	0,00*	KULAKOWSKI (2002)

* A sílica é subproduto da produção de ligas de ferro silício, carbono neutro (zero emissão) | **Adotado 95%

Fonte: Autora, 2020

Utilizando as Equações 4 e 5 e as informações da Tabela 10, calculou-se as emissões de CO_2 de cada mistura desse trabalho. As emissões das fibras, polímeros e aditivo, foram desconsideradas tendo em vista a dificuldade de encontrar dados confiáveis para as análises. Apesar destes materiais serem empregados em pequenas quantidades, é importante em estudos futuros a consideração das emissões associadas a eles, assim como de outros indicadores ambientais.

3.5.4 Avaliação Global dos Indicadores

Com a análise conjunta dos três indicadores, pode-se selecionar a mistura mais promissora em termos técnicos (retração e propriedades mecânicas), econômicos (custo) e ambientais (emissões de CO₂)⁸.

⁸ Existe uma série de outros indicadores ambientais relacionados aos materiais, para avaliá-los faz-se necessário a realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE INDICADOR TÉCNICO

A análise de indicador técnico foi realizada em quatro etapas: Análise gráfica dos dados experimentais; Análise de Variância (ANOVA) para retração por secagem (RS); Análise de Variância (ANOVA) para as propriedades mecânicas (f_c , f_t e EE); e Análise requisitos de durabilidade do sistema substrato (S) x material de reparo (MR).

4.1.1 Análise Gráfica dos Dados Experimentais

Os resultados obtidos com o ensaio de retração por secagem (RS) estão apresentados na Tabela 11 e na Figura 13.

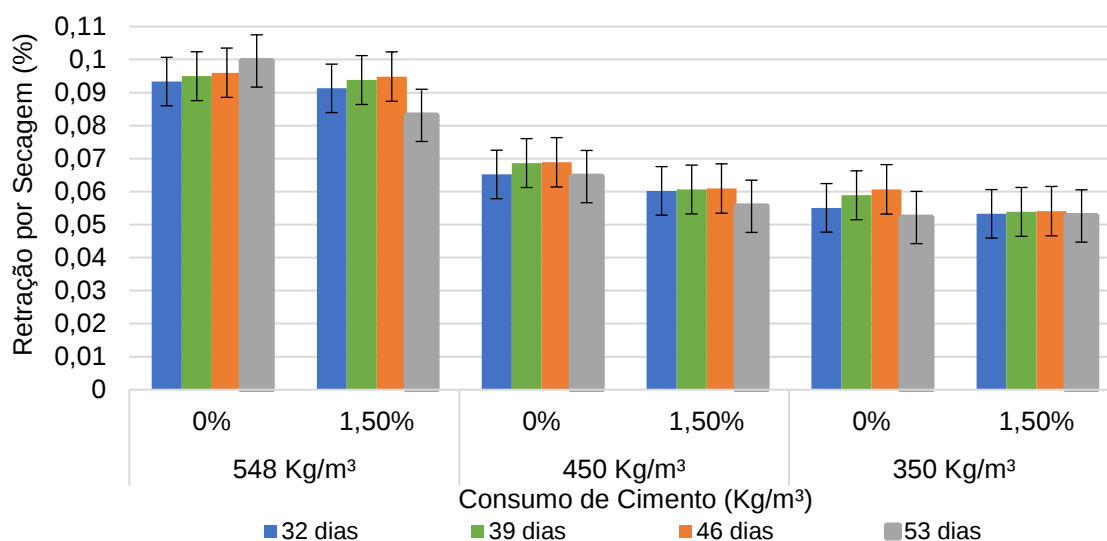
Tabela 11 – Retração por secagem (%)

Consumo de Cimento (Kg/m ³)		32 dias		39 dias		46 dias		53 dias	
		Retração (%)	Sd	Retração (%)	Sd	Retração (%)	Sd	Retração (%)	Sd
D1	548 - 0%	0,09333	0,10034	0,09497	0,09778	0,09602	0,09865	0,09959	0,094696
D2	548 - 1,5%	0,09129	0,06293	0,09380	0,05815	0,09485	0,05807	0,08310	0,060569
D3	450 - 0%	0,06520	0,01969	0,06865	0,04653	0,06889	0,04435	0,06456	0,046588
D4	450 - 1,5%	0,06023	0,00599	0,06064	0,00708	0,06094	0,00963	0,05556	0,006439
D5	350 - 0%	0,05509	0,06328	0,05889	0,08449	0,06070	0,03743	0,05216	0,066773
D6	350 - 1,5%	0,05327	0,01995	0,05386	0,01943	0,05409	0,02254	0,05263	0,021081

Sd = desvio padrão

Fonte: Autora, 2020

Figura 13 – Retração por secagem dos materiais em estudo em função do consumo de cimento



Fonte: Autora, 2020

Avaliando a Figura 13 percebe-se uma tendência de aumento da retração ao longo do tempo, exceto para a idade de 53 dias. Tal fato ocorreu provavelmente pelo desligamento do ar-condicionado pelo período de três dias na última semana de leitura, devido a uma manutenção programada do parque tecnológico onde está alocado o laboratório LADEMA.

Observou-se que as taxas de retração são maiores para misturas com consumos de cimento mais elevados, em concordância com a literatura. Um consumo de cimento mais alto implica no aumento da quantidade de pasta e assim, a redução da quantidade de agregados. E esses atuam na redução da retração por secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A presença de polímero EVA também influenciou na diminuição da retração, em concordância com Weng (2017), que afirma que os polímeros atuam no preenchimento dos poros capilares, diminuindo assim a perda de água e, logo, a retração por secagem. Assim, as misturas de menor consumo de cimento e com presença de polímero apresentaram as menores taxas de retração.

A redução do consumo de cimento de 548 Kg/m^3 , para 450 kg/m^3 e 350 kg/m^3 , levou a uma redução de 35,17% e 47,62% respectivamente no valor final de retração aos 53 dias. A adição de polímeros às misturas reduziu o valor final de retração por secagem, em 16,55% para o consumo 548 kg/m^3 e em 13,94% para o consumo 450 kg/m^3 . Já na mistura de 350 kg/m^3 houve um aumento de 0,89% quando se adicionou os polímeros.

4.1.2 Análise de Variância (ANOVA) - Retração por Secagem

No tópico anterior, verificou-se que com a diminuição do consumo de cimento e a presença de polímeros tinha-se uma tendência de diminuição da retração por secagem. Contudo, pela análise de variância (ANOVA), observa-se que apenas o consumo de cimento influencia significativamente nos resultados de retração por secagem (Tabela 12).

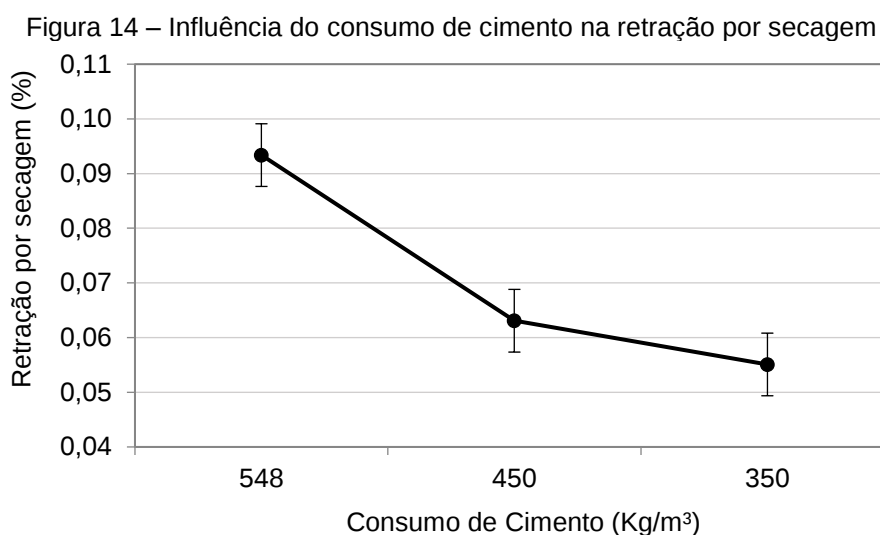
Na Figura 14 é possível observar a influência do consumo de cimento na retração por secagem, que mostra a tendência de redução de retração à medida que o consumo de cimento diminui.

Tabela 12 – Anova para os parâmetros analisados para a retração por secagem

Propriedade	Efeito	SQ	GDL	MQ	F	P- value
Retração por secagem	Consumo de Cimento (CC)	0,039147	2	0,019573	48,698	0,000000*
	Polímero (P)	0,001018	1	0,001018	2,532	0,114197
	Idade (I)	0,000475	3	0,000158	0,394	0,757391
	CC*P	0,000108	2	0,000054	0,134	0,874387
	CC*I	0,000013	6	0,000002	0,005	0,999999
	P*I	0,000136	3	0,000045	0,113	0,952381
	CC*P*I	0,000492	6	0,000082	0,204	0,974969
	Erro	0,048232	120	0,000402		

* Variáveis com significância estatística; GDL – Graus de Liberdade; SQ – Soma Quadrada; MQ = Média Quadrada = SQ/GDL; F= MQmodelo/MQresíduo; P-value= Probabilidade – distribuição t de student

Fonte: Autora, 2020



Fonte: Autora, 2020

A redução da retração com o uso de polímeros, de acordo com a análise gráfica dos dados experimentais, foi de 16,55% para o consumo mais elevado de cimento, ganho que não pode ser desconsiderado. Porém, na ANOVA, essa redução não apresentou significância. Assim, pode ser interessante a realização de estudos com maiores idades de ensaio e outros teores de polímero, para melhor avaliar a significância desses na retração por secagem.

4.1.3 Análise de Variância (ANOVA) - Propriedades Mecânicas

Em relação as propriedades mecânicas, os resultados obtidos com os ensaios de controle tecnológico e seus desvios padrão (Sd) estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas das misturas

Consumo de Cimento (Kg/m³)		7 dias				28 dias					
		fc (MPa)	Sd	ft (MPa)	Sd	fc (MPa)	Sd	ft (MPa)	Sd	EE (GPa)	Sd
D1	548 - 0%	47,90	1,07	8,25	0,16	60,23	1,70	10,14	0,40	34,01	1,52
D2	548 - 1,5%	46,08	1,06	7,61	0,29	60,74	2,04	7,89	0,65	30,75	4,21
D3	450 - 0%	36,29	0,69	6,60	0,29	49,04	1,27	8,92	0,44	35,58	1,61
D4	450 - 1,5%	34,91	0,68	5,85	0,28	44,28	0,78	7,25	0,06	36,23	4,18
D5	350 - 0%	40,69	0,59	9,75	0,27	57,22	0,85	9,75	0,27	37,08	1,63
D6	350 - 1,5%	42,07	0,46	6,09	0,28	57,65	1,77	9,31	0,09	42,61	2,85

Sd = desvio padrão

Fonte: Autora, 2020

Pela Anova (Tabela 14), observa-se que o consumo de cimento é significativo, para todas as propriedades mecânicas (*fc*, *ft* e *EE*), sendo o único fator de significância para o módulo de elasticidade. Para a resistência à tração e à compressão, os polímeros e a interação entre o consumo de cimento e a idade também apresentaram significância estatística. Para a resistência à compressão, além desses, a idade, a interação da idade com o consumo de cimento e a interação entre idade, consumo de cimento e polímeros, também foram significativos.

Tabela 14 – Anova para os parâmetros analisados para as propriedades mecânicas

Propriedade	Efeito	SQ	GDL	MQ	F	P- value
Resistência à Compressão	Consumo de Cimento (CC)	1968,9	2	984,4	969,4	0,000000*
	Polímero (P)	15,8	1	15,8	15,6	0,000213*
	Idade (I)	3297,8	1	3297,8	3247,5	0,000000*
	CC*P	48,3	2	24,1	23,8	0,000000*
	CC*I	74,7	2	37,3	36,8	0,000000*
	P*I	2,0	1	2,0	2,0	0,163581
	CC*P*I	24,6	2	12,3	12,1	0,000039*
	Erro	60,9	60	1,0		
Resistência à Tração	Consumo de Cimento (CC)	6,434	2	3,217	22,571	0,000086*
	Polímero (P)	9,461	1	9,461	66,387	0,000003*
	CC*P	2,575	2	1,288	9,034	0,004040*
	Error	1,710	12	0,143		
Módulo de Elasticidade	Consumo de Cimento (CC)	167,51	2	83,75	9,876	0,002914*
	Polímero (P)	4,27	1	4,27	0,504	0,491382
	CC*P	58,10	2	29,05	3,426	0,066540
	Error	101,77	12	8,48		

* Variáveis com significância estatística; GDL – Graus de Liberdade; SQ – Soma Quadrada; MQ = Média Quadrada = SQ/GDL; F= MQmodelo/MQresíduo; P-value= Probabilidade – distribuição t de student

Fonte: Autora, 2020

4.1.4 Análise de Requisitos de Durabilidade

Na Tabela 15 são apresentados os valores dos indicadores de desempenho aos 28 dias dos três substratos de referência (19A35, 19B14 e 19B21) para aplicação e de cada

mistura da pesquisa, bem como os valores de retração final correspondentes. Os dados dos substratos de referência são da calha do vertedouro de Itaipu e foram obtidos de Escobar (2015).

Nas Figuras 15, 16 e 17 estão apresentados gráficos que correlacionam a retração com as propriedades mecânicas do material de reparo e que comparam as propriedades desses com as do substrato (linhas vermelhas dos gráficos).

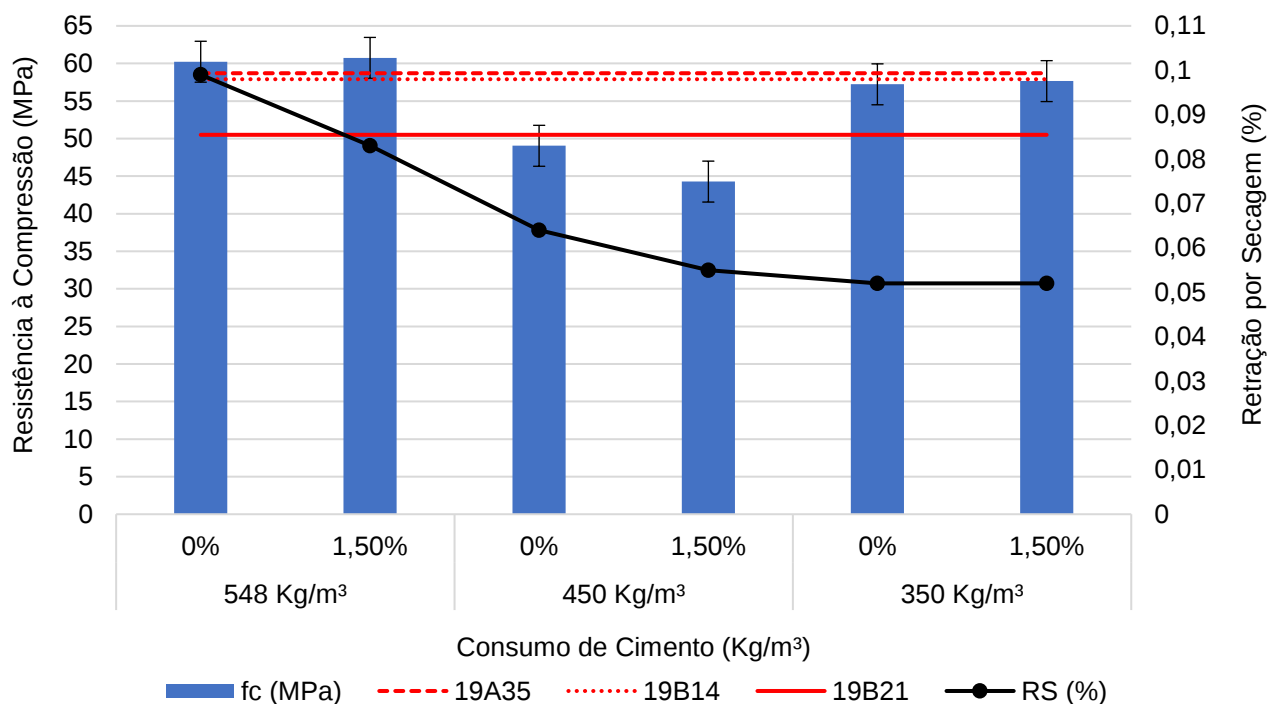
Tabela 15 – Comparativo de indicadores de desempenho

Identificação		Propriedades mecânicas aos 28 dias						Retração aos 53 dias	
		fc (MPa)	Sd	ft (MPa)	Sd	EE (GPa)	Sd	RS (%)	Sd
Substrato*	19A35	58,70	-	3,80	-	40,40	-	-	-
	19B14	57,9	-	4,0	-	37,9	-		
	19B21	50,5	-	3,5	-	31,2	-		
Materiais de Reparo	D1	548 - 0%	60,23	1,70	10,14	0,40	34,01	1,52	0,09959
	D2	548 - 1,5%	60,74	2,04	7,89	0,65	30,75	4,21	0,08310
	D3	450 - 0%	49,04	1,27	8,92	0,44	35,58	1,61	0,06456
	D4	450 - 1,5%	44,28	0,78	7,25	0,06	36,23	4,18	0,05556
	D5	350 - 0%	57,22	0,85	9,75	0,27	37,08	1,63	0,05216
	D6	350 - 1,5%	57,65	1,77	9,31	0,09	42,61	2,85	0,05263

Sd = desvio padrão; RS= Retração por secagem

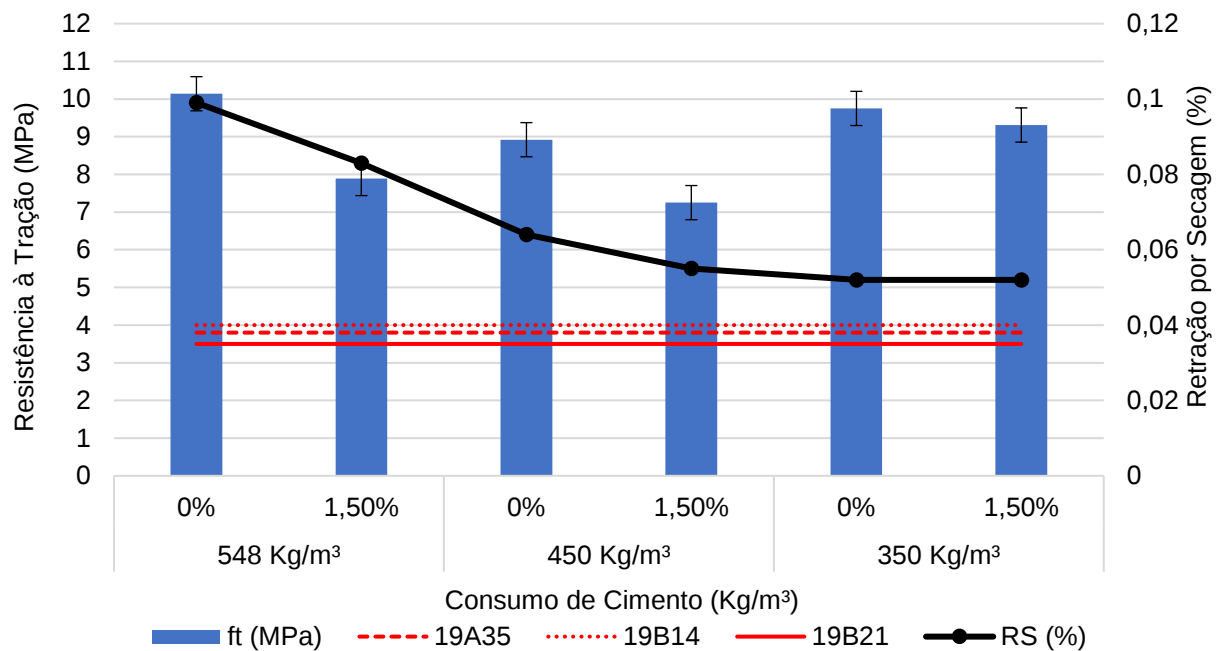
Fonte: Escobar, 2015

Figura 15 – Resistência à compressão (fc) x retração por secagem (RS)



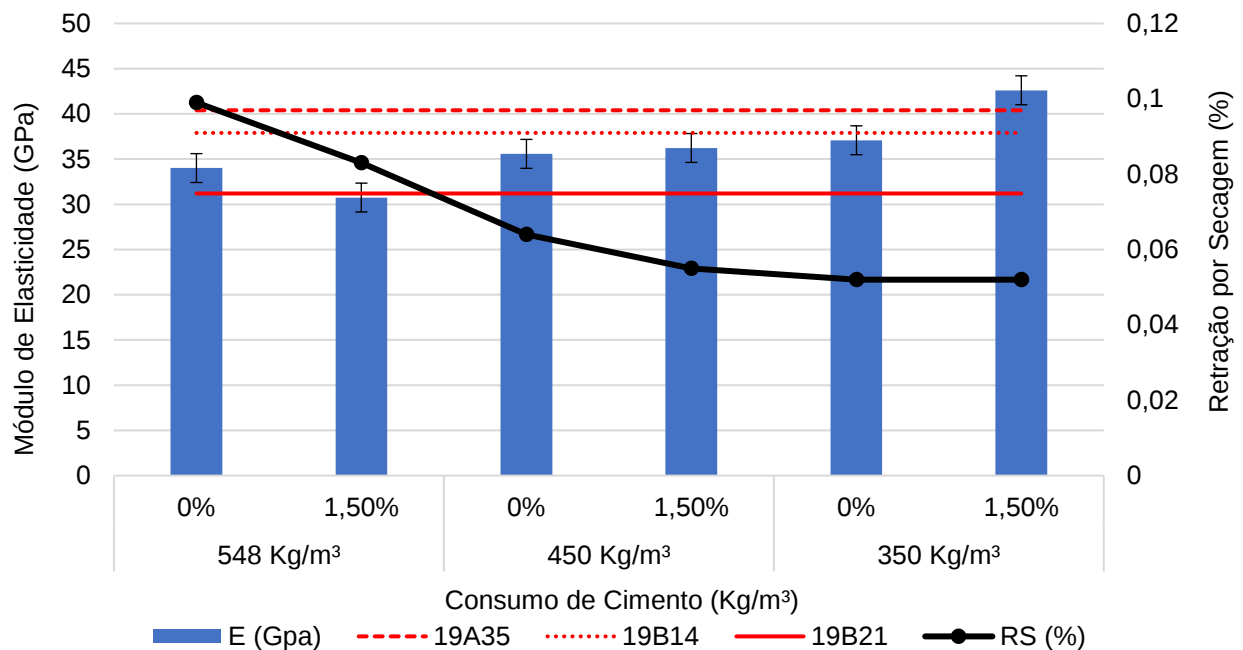
Fonte: Autora, 2020

Figura 16 – Resistência à tração (ft) x retração por secagem (RS)



Fonte: Autora, 2020

Figura 17 – Módulo de elasticidade (EE) x retração por secagem (RS)



Fonte: Autora, 2020

Essas propriedades foram avaliadas considerando as relações das propriedades mecânicas entre material de reparo e substrato para que esse sistema apresente boa durabilidade indicados na Tabela 16. Ou seja, é desejável que o Material

de Reparo (MR) tenha resistência à compressão e à tração maior e módulo de elasticidade similar ao substrato em que será aplicado.

Tabela 16 – Requisitos sistema substrato x material de reparo

Propriedade	Relação Material de Reparo (MR) x Substrato (S)
Resistência à Compressão (MPa)	$MR > S$
Resistência à Tração (MPa)	$MR > S$
Módulo de Elasticidade Estático (GPa)	$MR \cong S$

Fonte: Cusson (2009); Sandström (2010); Lukovic et al. (2012); Vaysburd et al. (2014)

Analisando as Figuras 15, 16 e 17 e as Tabelas 15 e 16 percebe-se que as relações ideais para resistência à tração são atendidas por todas as misturas, para os três substratos em análise. Para módulo de elasticidade, as relações não são atendidas para a mistura 548 -1,5% em relação ao substrato 19A35 e para a mistura 350-1,5% em relação ao substrato 19B21.

Para resistência à compressão, as misturas de 548 kg/m³ e 350 kg/m³ (considerando o desvio padrão) atendem às relações ideais para todos os substratos, exceto a mistura de 350-0% para o substrato 19A35. A mistura de 450 kg/m³- 1,5% não atende aos requisitos de f_c para nenhum substrato, e a 450-0% fica bem próxima de atender apenas para o substrato 19B21 (considerando o desvio padrão). Isso se deve provavelmente a um problema na dosagem dessa mistura (450 Kg/m³), pois essa apresentou uma reação água/ligante muito mais alta que o traço referência (ver Tabela 7) e a quantidade de sílica está bastante reduzida em relação aos demais traços.

Uma maior relação água/ligante implica em perda de resistência (FORMAGINI, 2005). E a sílica é um material reativo responsável pelo ganho de resistência em idades mais avançadas, assim a redução do seu teor também acarreta diminuição da resistência (ANDRADE, 2017).

A combinação de propriedades ideais para redução da fissuração em materiais à base de cimento conta com um baixo módulo de elasticidade, alta resistência à tração, elevada fluência e baixa retração (VAYSBURD *et al.*, 2014). Um módulo de elasticidade menor, diminui a magnitude das tensões devido às variações volumétricas inerentes da estrutura (VAYSBURD, 2005). Quanto maior a resistência à tração, menor a chance de a tensão de tração exceder a capacidade do material resistir a esse esforço, provocando fissuras no material (VAYSBURD *et al.*, 2014).

Os módulos de elasticidade encontrados para os materiais de reparo, em geral, foram próximos aos dos substratos, exceto para a mistura 548-1,5% em relação ao

substrato 19A35 e para a mistura 350-1,5% em relação ao substrato 19B21. As resistências à tração foram mais altas que às dos substratos, para todas as misturas. Assim como as resistências à compressão dos materiais de 548 kg/m³ e 350 kg/m³ (considerando o desvio padrão), exceto a mistura de 350-0% para o substrato 19A35.

Levando em conta que as misturas de 350 kg/m³ com e sem polímero apresentaram valores de retração muito próximos entre si, menores que os das demais misturas (450 e 548 kg/m³) e boas propriedades mecânicas, as misturas com 350 kg/m³ de cimento poderiam ser as misturas mais otimizadas em termos de propriedades mecânicas.

Contudo, é importante destacar que para a tomada de decisão faz-se necessário avaliar concomitantemente outras propriedades dos materiais de reparo, sobretudo aderência, erosão ou abrasão hidráulica e coeficiente de dilatação térmica.

4.2 ANÁLISE DE INDICADOR ECONÔMICO (CUSTO DO MATERIAL)

Analizando a Tabela 17 e a Figura 18, que mostram os resultados dos custos de cada mistura, nota-se que os materiais mais caros são o cimento e o polímero. Nas misturas sem polímero, ao reduzir o consumo de cimento para 450 kg/m³ e 350 kg/m³, houve uma redução do custo de 3,35% e 1,26% respectivamente em relação ao consumo de 548 kg/m³. Nas misturas com polímero, ao reduzir o consumo de cimento para 450 kg/m³ e 350 kg/m³ houve uma redução do custo de 6,75% e 9,39% respectivamente em relação ao consumo de 548kg/m³.

Ao adicionar polímeros às misturas, houve um aumento no custo de 27,48%, 23,00% e 16,98% para os consumos de cimento de 548 kg/m³, 450 kg/m³ e 350 kg/m³ respectivamente.

Observa-se que a redução do custo do traço referência (548kg/m³) para o traço de 350kg/m³ foi pequena, uma vez que para compensar a redução do consumo de cimento, adicionou-se fíler calcário e aumentou-se a quantidade de areia e aditivo, o que elevou o custo. Contudo, tem-se ganhos em relação à redução da retração, o que é desejável do ponto de vista técnico.

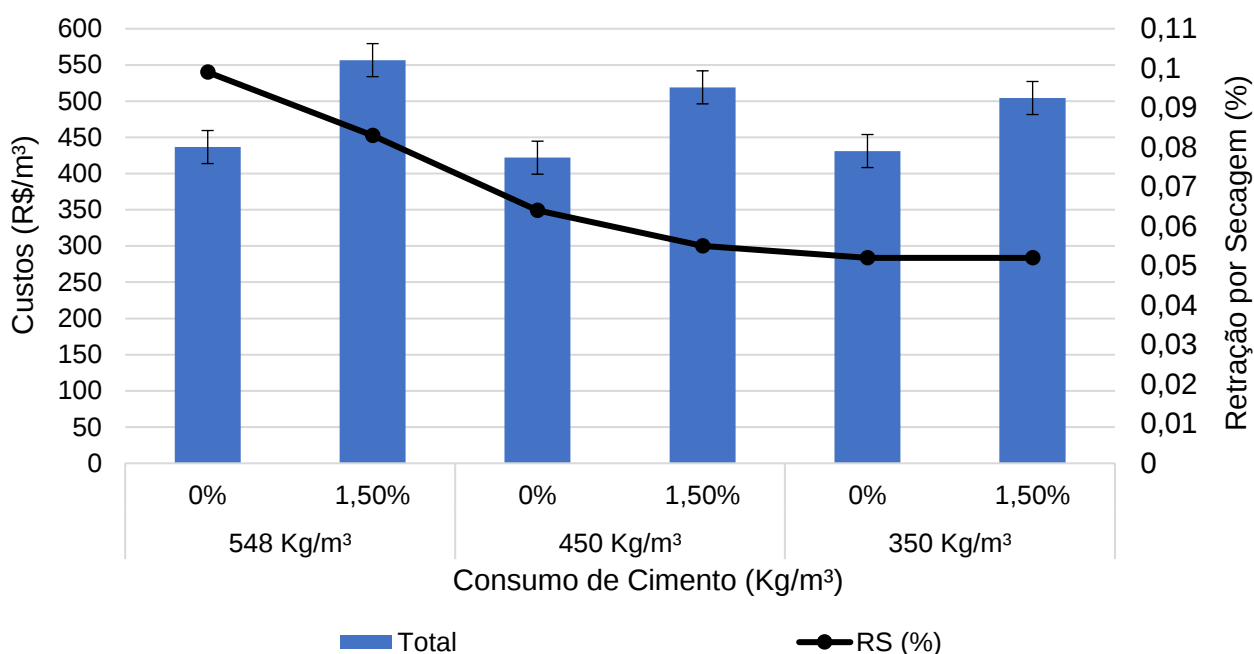
A adição de polímeros às misturas elevou consideravelmente o custo e o ganho em relação a redução de retração foi pequeno. Assim, estudos devem ser conduzidos para determinar o teor ideal de polímero a ser adicionado, a fim de garantir os benefícios da redução de retração, sem elevar tanto o custo.

Tabela 17 – Custo do m³ de cada mistura

Material (R\$/m ³)	Traços					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	548 - 0%	548 - 1,5%	450 - 0%	450 - 1,5%	350 - 0%	350 - 1,5%
Cimento Portland	246,60	246,60	202,50	202,50	157,50	157,50
Sílica Ativa	69,00	69,00	47,00	47,00	70,00	70,00
Areia natural	57,50	57,50	68,31	68,31	73,16	73,16
Aditivo	19,51	21,29	17,48	17,48	58,93	56,66
Fibra de Polipropileno	44,04	44,04	36,03	36,03	28,02	28,02
Polímero EVA	0,00	118,22	0,00	97,08	0,00	75,51
Fíler Calcário	0,00	0,00	50,66	50,66	43,52	43,52
Total (R\$/m³)	436,65	556,65	421,98	519,06	431,13	504,37

Fonte: Autora, 2020

Figura 18 – Retração por secagem x custos



Fonte: Autora, 2020

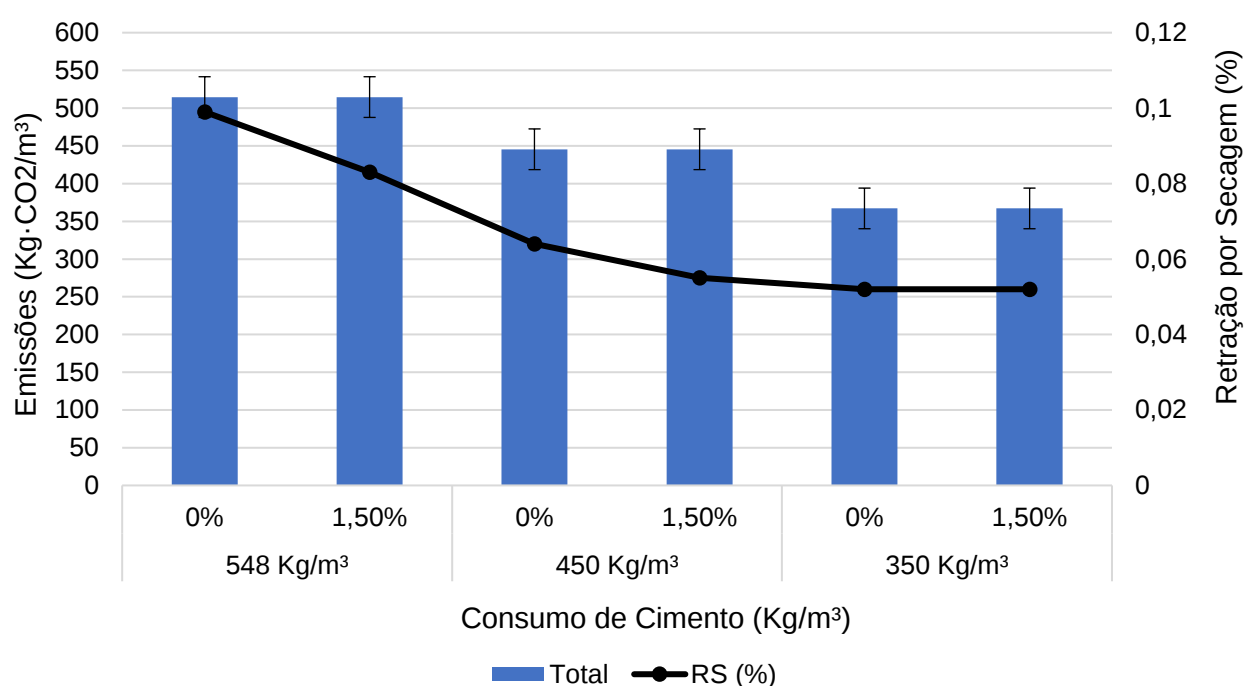
4.3 ANÁLISE DE INDICADOR AMBIENTAL (EMISSÃO DE CO₂)

Os resultados das emissões de CO₂ associadas à produção de cada mistura estão apresentados na Tabela 18 e na Figura 19.

Tabela 18 – Emissões de CO_2 por mistura

Material ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{m}^3$)	Misturas					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	548 - 0%	548 - 1,5%	450 - 0%	450 - 1,5%	350 - 0%	350 - 1,5%
Cimento Portland	455,61	455,61	374,13	374,13	290,99	290,99
Sílica Ativa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Areia natural	59,03	59,03	70,13	70,13	75,10	75,10
Fíler Calcário	0,00	0,00	1,19	1,19	1,024	1,02
Total ($\text{Kg} \cdot \text{CO}_2/\text{m}^3$)	514,65	514,65	445,46	445,46	367,12	367,12

Fonte: Autora, 2020

Figura 19 – Retração por secagem x Emissões de CO_2 

Fonte: Autora, 2020

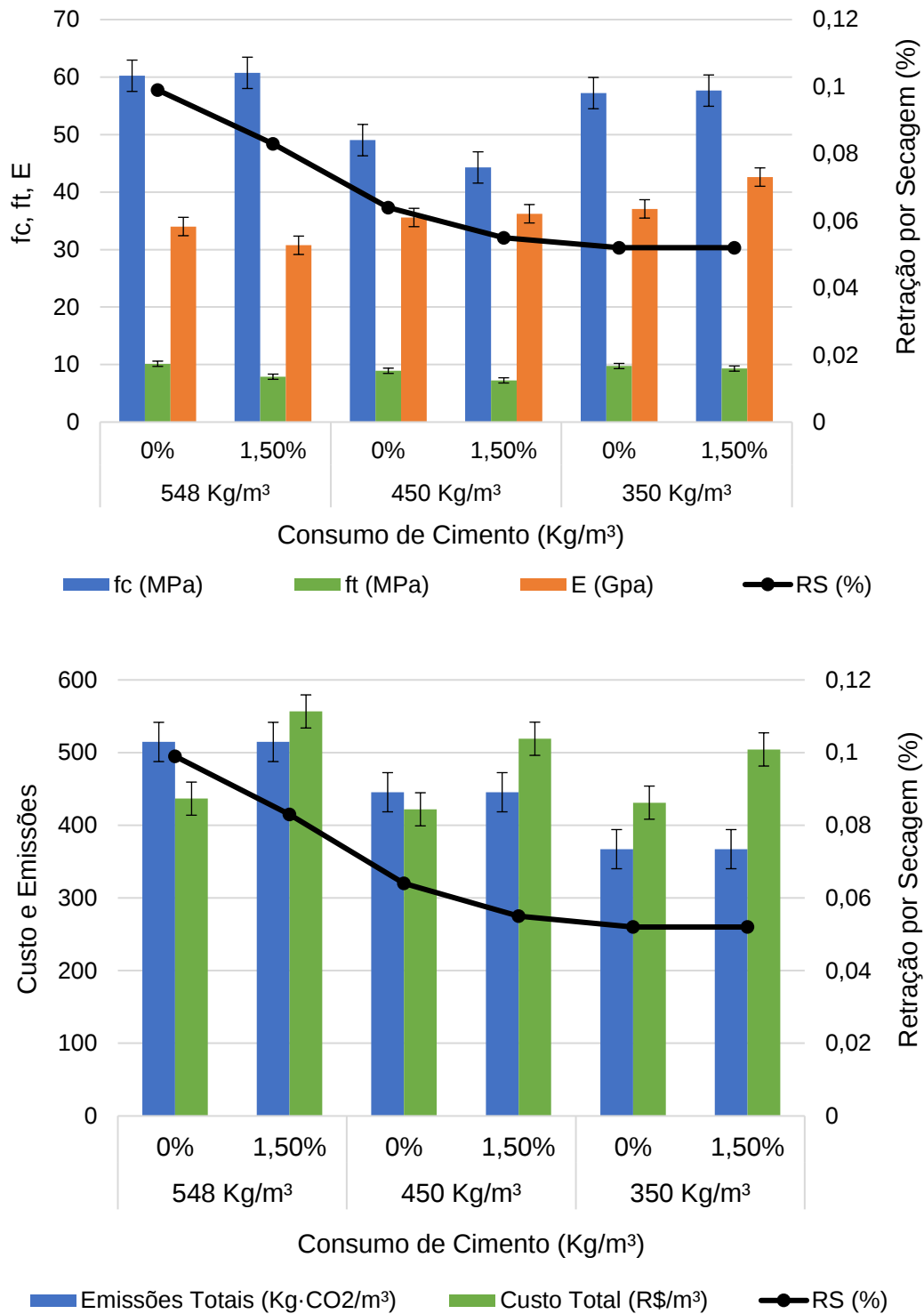
Analisando a Tabela 18 e a Figura 19, nota-se que ao reduzir o consumo de cimento para 450 kg/m^3 e 350 kg/m^3 houve uma redução das emissões de CO_2 de 13,44% e 28,66% respectivamente em relação ao consumo de 548 kg/m^3 . Como as emissões de alguns materiais foram desconsideradas, não houve diferença no valor das emissões pela presença de polímero (ver Tabela 18).

4.4 AVALIAÇÃO GLOBAL DOS INDICADORES CONSIDERADOS

Na Figura 20 é possível observar as relações entre as variáveis de controle (consumo de cimento e presença de polímeros), a variável de resposta (retração por

secagem) e os parâmetros de análise (propriedades mecânicas (f_c , f_t e EE), custos e emissões).

Figura 20 – Avaliação global dos indicadores considerados



Fonte: Autora, 2020

Fazendo uma avaliação conjunta de todos os aspectos de análise, a mistura de consumo de cimento de 350 Kg/m^3 sem presença de polímeros (D5), pode ser a mais adequada do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Uma vez que apresentou a menor taxa de retração por secagem, atendeu às relações das propriedades mecânicas entre material de reparo e substrato para que esse sistema apresente boa durabilidade, proporcionou a maior redução (28,66%) das emissões de CO_2 em relação ao traço de referência, e apesar de pequena, gerou também uma redução de custo de 1,26% em relação a mistura de referência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o objetivo de avaliar a retração por secagem de materiais cimentícios de reparo, com e sem adição de polímero EVA, para aplicação em estruturas erodidas proporcionados pelo MEC e analisando os resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- a) A redução do consumo de cimento proporcionada pela utilização do MEC apresenta influência estatística significativa na retração por secagem, apresentando uma tendência de diminuição da retração por secagem conforme diminui-se o consumo de cimento.
- b) A presença de polímeros também influenciou na retração por secagem, uma vez que as misturas com polímero apresentaram menores valores de retração, no entanto, não se observou significância estatística. Logo, mais estudos devem ser realizados para determinar o teor adequado de utilização deste, pois apesar do efeito positivo do ponto de vista técnico (redução da retração), do ponto de vista econômico, a presença de polímero elevou muito o custo do material de reparo.
- c) Os ganhos da redução do consumo de cimento proporcionada pela utilização do MEC, em termos econômicos, foram pequenos, uma vez que para compensar a redução do consumo de cimento, outros materiais tiveram que ser adicionados, o que elevou o custo da mistura. Nesse sentido, avaliações econômicas devem ser realizadas concomitantemente ao processo de dosagem para que se possa obter uma mistura com consumo de cimento otimizado e com redução mais significativa dos custos. No entanto no que diz respeito a vantagens ambientais, a otimização do consumo de cimento levou a uma redução nos valores de emissões de CO₂.

Com base nos resultados desse estudo a mistura que se mostrou mais promissora, considerando todos os aspectos de análise (desempenho, custos e emissões) foi a de consumo de cimento de 350 Kg/m³ sem presença de polímeros (D5). Pois, atendeu aos requisitos de durabilidade e proporcionou redução das emissões de CO₂ e custo. Entretanto, mais estudos devem ser conduzidos para determinar o teor adequado de utilização de polímeros, para que seja possível aproveitar seus benefícios quanto à redução de retração sem onerar.

Para estudos futuros, sugere-se a realização de um projeto experimental com estudo de mais teores de polímero, que levem em conta outras propriedades relevantes para o desempenho dos materiais de reparo (aderência, contração térmica, erosão e abrasão hidráulica) e com avaliações de custo em paralelo ao processo de dosagem.

REFERÊNCIAS

AITCIN, P.-C.; NEVILLE, A.M.; ACKER, P. **Integrated View of Shrinkage Deformation**, Concrete International, V. 19, No. 9, September 1997, pp. 35-41.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C596**: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken (EUA), 2017.

ANDRADE, W. P. **Procedimento de reparos de concretos**. 2017. [Documento restrito, cedido pelo autor].

ANDREASEN, A. Über die beziehung zwischen kornabstufung und zwischenraum in produkten aus losen körnern (mit einigen experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, Springer, v. 50, n. 3, p. 217-228, 1930.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**. Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137**: Ensaios não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

BARANHUK, A. D. **Análise da influência do empacotamento dos agregados na porosidade do concreto**. 2014. 86 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BASUNBUL, I. A, DEWAH, H. A. F, MASSLEHUDDIN, M. Durability evaluation of repair materials in hot-arid environments. **American Concrete Institute Special Publication SP-145**, Detroit, 1994:835-850.

CAMPOS, H.; KLEIN, N.; FILHO, J. M. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, p. 121907, 2020.

CLARK, C. **Concrete shrinkage prediction using maturity and activation energy**. 2009, 114p. Master of Science - University of Maryland, College Park, 2009.

CUSSON, D. Durability of concrete repaired concrete structures. **Failure, Distress and Repair of Concrete Structure**, p. 297–321, 2009.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, SciELO Brasil, v. 10, n. 5, p. 998–1024, 2017.

DEHWAH, H. A. F; BASUNBUL, I. A; MASLEHUDDIN, M; AL-SULAIMANI, G. J; BALUCH, M. H. Durability performance of repaired reinforced concrete beams. **ACI Materials Journal**. v. 91, Issue.2: 167–172, 1994

DE LARRARD, F., **Concrete Mixture Proportioning**: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, v. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421p.

ESCOBAR, C. T. M. **Estudo de materiais de reparo para a calha esquerda do vertedouro da usina hidrelétrica de Itaipu**. Trabalho de conclusão de curso. Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

FURNAS, C. Grading aggregates-i.-mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Industrial & Engineering Chemistry**, ACS Publications, v. 23, n. 9, pp. 1052–1058, 1931.

GALLETTO, Adriana. **Reparo de Estruturas de Concreto: Contribuição ao Estudo da Aderência**. 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GALVÃO, J. C. A. **Uso De Materiais Poliméricos Reciclados Em Estruturas De Concreto Para Superfícies Hidráulicas**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - Pipe., Universidade Federal do Paraná., Curitiba, 2010.

GEMERT, D.V.; CZARNECKI, L.; MAULTZSCH, M.; SCHORN, H.; BEELDENS, A.; ŁUKOWSKI, P.; KNAPEN, E. Cement concrete and concrete–polymer composites: Two merging worlds. A report from 11th ICPIG Congress in Berlin, 2004. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 9-10, pp. 926-933, out-nov. 2005, ISSN 0958-9465.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª. Ed. São Paulo: Pini, 1992

IDIART, A. E. **Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level**. 2009. 213 p. Doctoral Thesis. Department of Geotechnical Engineering and Geosciences – Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: Particle size analysis - Laser diffraction methods. Genebra, 2009.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, ASTM International, v. 2, n. 2, pp. 95-102, 1980.

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Curitiba, 2002. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná, 2002.

KUDLANVEC JUNIOR, V. L. **Aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto com ênfase no comportamento reológico**. 2017. 181 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre (2002).

KUMM, T. C. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento portland**. 2009. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LENART, M. Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use. In. 7th SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE MATERIAL PROBLEMS IN CIVIL ENGINEERING. Junho, 2015, Cracóvia. **Anais...** Cracóvia: Procedia Engineering, 2015.

LIANG C-S, LV Z-F, BO Y, ET AL. Effect of modified polypropylene on the interfacial bonding of polymer–aluminum laminated films. **Mater Design**, v. 81, pp. 141–148. 2015.

LIU, J.; QIU, Q.; XING, X.; PAN, D.. Permeation Properties and Pore Structure of Surface Layer of Fly Ash Concrete. **Materials**, v.7, n. 6, pp. 4282-4296, 2014.

LUKOVIC, M; YE, G; VAN BREUGEL, K. **Reliable concrete repair: A critical review**, in: 14th International Conference Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland, UK, 3-5 July, 2012.

MEHTA, P. K.; GERWICK Jr., B. C. **Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment**. Concrete International, v. 4, n. 10, p. 45–51, out. 1982.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MILLER, S. A.; JOHN, V. M.; PACCA, S. A.; HORVATH, A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 114, n. November 2016, pp. 115-124, 2018.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES - MCTIC. Secretaria e Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. **3ª Comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, 2016.

MOMAYEZ, A; EHSANI, M. R; RAMEZANIANPOUR, A. A; RAJAIE, H. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, **Cem. Concr. Res.** 35 (4), pp. 748-757, 2005.

MOMBER, A.; KOVACEVIC, R.; YE, J. **The fracture of concrete due to erosive wear by high velocity water flow**. Tribology Transactions, v. 38, pp. 686-692, 1995.

MORGAN, D. R. Compatibility of concrete repair materials and systems. **Construction and Building Materials**, v. 10, pp. 57-67, 1996.

OLIVEIRA, C. O. *et al.* Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 1, pp.1-15, 5 mar. 2018. Fap UNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0298>.

QIAN, J; YOU, C; WANG, Q; WANG, H; JIA, X. A method for assessing bond performance of cement-based repair materials, **Constr. Build. Mater.** v. 68 pp. 307-313, 2014.

RIGO, E. **Avaliação da captura de CO₂ devido à carbonatação de concretos com resíduos de construção de demolição.** 2019, 59f. Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-graduação Em Engenharia Civil – Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

ROHR, N. G. **Análise do desempenho de argamassa de reparo com adição de fibra de polipropileno submetida à erosão hidráulica.** 2018. 76 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

ROHR, N. G.; GAVA, G. P.; RIZZI, R. L.; RAMPANELLI, C. H. O.; TRENTINI, C. B. Análise do desempenho de argamassa de reparo com adição de fibra de polipropileno submetida à erosão hidráulica. *In: Anais...* Congresso Brasileiro do Concreto. [S.l.: s.n.], 2019.

ROQUIER, G. A theoretical packing density model (tpdm) for ordered and disordered packings. **Powder Technology**, Elsevier, v. 344, p. 343-362, 2019.

SANDSTRÖM, T. **Durability of concrete hydropower structures when repaired with concrete overlays.** Tese (Doutorado) — Luleå tekniska universitet, 2010.

SILVA, L. M. B da. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto.** 2016. 393 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SOBRAL, HERNANI S.. **Reologia e Trabalhabilidade dos Concretos.** Associação Brasileira de Cimento Portland, Nº 62, São Paulo, 1990, 76 p.

SOUZA, K. L. B. de. **Análise numérica da influência do material de reparação em vigas de concreto armado recuperadas.** 2018. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018a.

SOUZA, M. H de. **Análise De Argamassas De Reparo De Base Polimérica.** 2018. 138 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018b.

SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto.** 1ª. ed. 5ª tiragem. São Paulo: Pini, Abr, 2009.257p.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

VAYSBURD, A. M.; BISSONNETTE, B.; FAY, K. F. von. **Compatibility issues in design and implementation of concrete repairs and overlays.** US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service, 2014.

VAYSBURD, A. M. Repairing concrete: random thoughts on concrete ills and treatment prescriptions. **International Journal of Materials and Product Technology**, Inderscience Publishers, v. 23, n. 3-4, p. 164–176, 2005.

WBCDS. **GNR Project**. Weighted average excluding CO₂ from on-site power generation Grey clinker, 2016b. Disponível em: < <https://www.wbcdcement.org/GNR-2016>. Acesso em: 30/10/2020

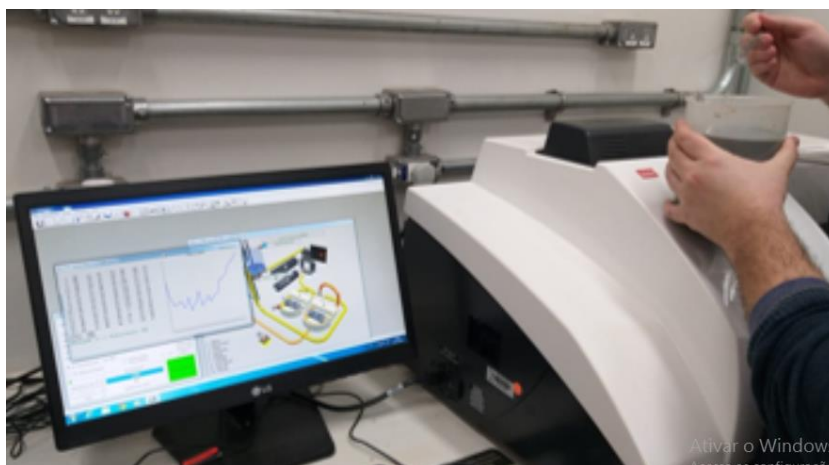
WEERACHART T, CHAI J. Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. **Cem Concr Compos**, 2010, v. 32, n. 10, pp. 767-774

WENG, T-L. Evaluation of Cementitious Repair Mortars Modified with Polymers. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, pp. 1-7, 2017.

ANEXO A

O Ensaio de granulometria a laser foi realizado de acordo com a ISO13320 (ISO, 2009), no equipamento da marca CILAS (modelo 1190), cuja faixa de leitura das partículas está entre 0,04 e 2500 μm . Para a análise utiliza-se um índice de obscuração utilizado de cerca de 25% e as amostras são dispersadas em água destilada, exceto no caso da areia, que o ensaio é realizado a seco. A análise foi realizada três vezes para verificação de resultados. Na Figura 20 é possível observar a realização do ensaio.

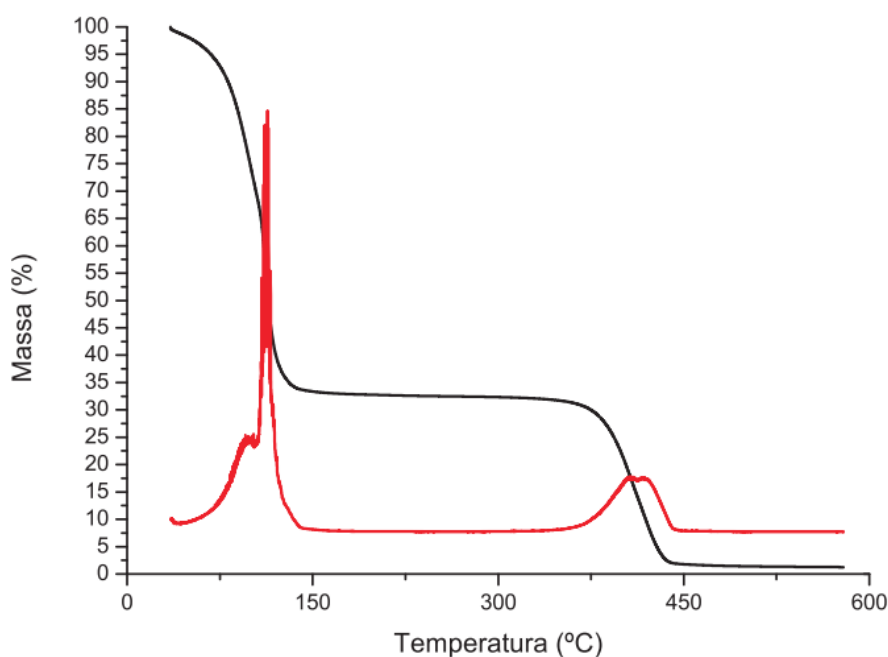
Figura 21 – Ensaio Granulometria à Laser



Fonte: Autora, 2020

O ensaio de teor de sólidos do aditivo foi realizado por análise termogravimétrica, conforme a ASTM E 2550 (ASTM, 2017). O equipamento utilizado é da marca Percking Elmer (modelo STA 8000), o ensaio foi feito na faixa de temperatura de 35 a 600 $^{\circ}\text{C}$, com uma taxa de aquecimento de 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e fluxo de nitrogênio de 20 ml/min . Na Figura 21 pode-se observar o início da perda da porção líquida do aditivo (quando a temperatura atinge 100 $^{\circ}\text{C}$), quando a curva de perda de massa estabiliza e a curva do DTG tem seu pico (em 67% de perda de massa), significa que o restante da massa são os sólidos do aditivo (33% de sólidos)

Figura 22 – Resultado da TG e DTG



Fonte: Autora, 2020

O resultado do ensaio anterior foi utilizado para o ensaio de ponto de saturação do aditivo, realizado com base em Kantro (1980). Tendo-se a relação água/materiais sólidos desejada é possível definir a quantidade de água e de material pulverulento a ser utilizada. A quantidade de aditivo é variável, testa-se diversos teores até que seja encontrado o ponto de saturação. Os materiais são pesados, misturados em misturador mecânico e depois o ensaio é realizado. A pasta é colocada no Cone de Kantro com cuidado, para evitar que sejam formadas bolhas de ar na mistura e o excesso de pasta na parte superior do cone, são também aplicados cinco golpes para realizar o adensamento da pasta. Após esse procedimento, retira-se o cone rapidamente para promover o espalhamento da pasta e então mede-se o diâmetro do seu referido espalhamento. O ponto de saturação ocorre para o teor anterior ao qual o diâmetro de espalhamento começa a diminuir. Na Figura 22 é possível observar a realização do ensaio.

Figura 23 – Ensaio ponto de saturação do aditivo



Fonte: Autora, 2020

O ensaio anterior é necessário para a realização do ensaio de demanda de água, realizado segundo Formagini (2005), que é um pré-requisito para determinar a compacidade da mistura e assim realizar a dosagem pelo Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

O ensaio consiste em determinar a quantidade adequada de água (demanda de água) para que a mistura de aditivo e material pulverulento, se torne uma pasta homogênea. Inicialmente os materiais são pesados, as quantidades de material pulverulento (350 g) e de água inicial (500 ml) foram escolhidas com base em Formagini (2005) e a quantidade de aditivo de acordo com o teor de saturação.

A água vai sendo adicionada aos poucos até que a mistura se torne uma pasta homogênea, segundo Sobral (1990) ela passa por várias fases: seca, pendular, funicular e capilar.

Inicialmente tem-se a fase seca, a fase pendular é iniciada quando se inicia a mistura no misturador mecânico em velocidade baixa, de todo o material pulverulento mais 50% da quantidade de água. Após misturar por um minuto, o aditivo é colocado e a partir daí a água vai sendo adicionada aos poucos (a cada 1 minuto) com o misturador em velocidade média, até o fim dessa fase e início da fase funicular. Isso ocorre quando uma quantidade de água capaz de molhar completamente todos os grãos é adicionada. Após o início dessa fase a mistura deve repousar por 30 segundos, o recipiente deve ser raspado e a mistura deve ser batida novamente em velocidade alta por mais um minuto. A fase funicular perdura até que todos os vazios entre grãos sejam completamente saturados de água. Nesse momento inicia-se a fase capilar, o início dessa fase é marcado como o ponto de demanda de água (mistura homogênea), e o ensaio é finalizado, (o tempo médio de ensaio gira em torno de 10 minutos) pois a partir desse ponto, se mais água for adicionada os grãos começam a se afastar, reduzindo a compacidade da mistura.

A determinação de início e término das fases, bem como o ponto de demanda de água é feita visualmente. Em Formagini (2005) são apresentadas as imagens características de cada uma das fases. Na Figura 23 é possível observar a realização do ensaio.

Figura 24 – Ensaio demanda de água



Fonte: Autora, 2020