



UTILIZAÇÃO DE COPRODUTO À BASE DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E FIBRA CELULÓSICA COMO AGENTE DE CURA INTERNA E REFORÇO EM CONCRETO APLICADO EM ESCALA INDUSTRIAL

Use of a Co-Product Based on Industrial Solid Waste from Superabsorbent Polymer and Cellulosic Fiber as an Internal Curing Agent and Reinforcement in Concrete Applied on an Industrial Scale

Mateus Essvein Barth, Mestre em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

mearth@unisinis.br

Igor Lucas De Leis, Graduando em Engenharia Civil, Programa de Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

igordeleis@gmail.com

Mauricio Mancio, Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

mancio@unisinis.br

Carlos Alberto Mendes Moraes, Doutor em Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

cmoraes@unisinis.br

Feliciane Andrade Brehm, Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

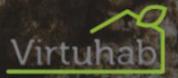
felicianeb@unisinis.br

Número da sessão temática da submissão – [5]

Resumo

O objetivo do estudo é avaliar a influência da utilização de coproduto à base de resíduos sólidos industriais de polímero superabsorvente e fibra celulósica (denominado como Coproduto) em escala industrial como agente de cura interna e reforço em concreto para piso industrial, aplicado por uma concreiteira parceira em um projeto real. Para isso, a partir de um estudo de dosagem experimental, foram elaborados concretos contendo o Coproduto e um concreto de referência, ambos com resistência mecânica equivalente entre si. Os concretos foram misturados e lançados por concreiteira parceira, aplicados em um piso industrial de concreto cujas características físicas e mecânicas foram avaliadas. Com isso, foi possível comprovar a equivalência entre os concretos em termos de resistência, porém o concreto Coproduto apresentou redução da retração, além de se mostrar efetivo na mitigação da fissuração, proporcionando maior consolidação do uso do coproduto e um avanço no seu nível de maturidade tecnológica.

Palavras-chave: polímero superabsorvente; fibra celulósica; coproduto; concreto.



Abstract

The objective of this study is to evaluate the influence of using a co-product based on industrial solid waste from superabsorbent polymer and cellulose fiber (referred to as Co-product) on an industrial scale, as an internal curing agent and reinforcement in concrete for industrial flooring, applied by a partner concrete supplier in a real-world project. For this purpose, based on an experimental mix design study, concretes containing the Co-product and a reference concrete—both with equivalent mechanical strength—were produced. The concretes were mixed and placed by the partner concrete supplier and applied to an industrial concrete floor, whose physical and mechanical characteristics were evaluated. The results confirmed the equivalence of the concretes in terms of strength; however, the Co-product concrete showed reduced shrinkage and was effective in mitigating cracking. This contributed to a more consolidated use of the Co-product and marked an advancement in its level of technological maturity.

Keywords: *superabsorbent polymer; cellulosic fiber; co-product; concrete.*



1. Introdução

A cura adequada do concreto é um dos processos de maior importância no período pós-concretagem, para que o concreto possa obter a resistência mecânica e a durabilidade almejada. Esse procedimento consiste, basicamente, no provimento de umidade suficiente para que haja a hidratação do cimento, evitando a evaporação da água necessária para as reações de hidratação, permitindo que o material desenvolva as propriedades adequadas (KOPPE, 2016). Contudo, parte das obras realiza esse procedimento por períodos inadequados ou, muitas vezes, nem o realiza. Desta forma, características superficiais são comumente afetadas, acarretando o aumento da porosidade e, conseqüentemente, aumentando a permeabilidade, fissuração e carbonatação (HELENE; LEVY, 2013).

A fim de combater esses problemas ocasionados pela inadequada cura do concreto, a comunidade científica vem estudando a utilização de materiais promissores para emprego como agente de cura interna. Conforme Jensen (2013), são materiais dotados de capacidade de retenção hídrica que, quando incorporados à matriz cimentícia, liberam a água e promovem a hidratação de dentro para fora.

Alguns dos materiais que podem ser utilizados como agente de cura interna são os polímeros superabsorventes (PSA), que tiveram sua aplicação na construção civil pela primeira vez visando combater a retração autógena em concretos de alto desempenho com relação a/c muito baixa (JENSEN; HANSEN, 2001). O PSA é um material polimérico, dotado de alta capacidade de absorção e retenção hídrica dentro da sua estrutura (JENSEN, 2013). Dependendo das características do PSA, pode ocorrer a absorção de água de até 5000 vezes a sua massa seca (KUMM, 2009; JENSEN, 2013). Jensen (2013) define que um agente de cura interna, como é o caso do PSA, pode ser classificado como um componente interno capaz de absorver água e liberá-la gradualmente conforme solitação do concreto, promovendo a cura de dentro para fora.

Outro material capaz de promover benefícios à matriz cimentícia é a fibra celulósica, embora não possua capacidade de absorção alta suficiente a ponto de justificá-la exclusivamente no emprego como agente de cura interna (KAWASHIMA; SHAH, 2011). A fibra celulósica atua como um reforço à matriz cimentícia, podendo trazer benefícios nas propriedades vinculadas à durabilidade. A alta resistência mecânica das fibras celulósicas aliada à sua capacidade de adesão à matriz cimentícia proporciona melhorias que são mais evidentes quanto à tenacidade, resistência à flexão e ao impacto, além de atuarem no combate à propagação de fissuras na matriz (SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012). Conforme Sika S/A ([2025?]) existem, no mercado, diversas fibras para aplicação em concretos de cimento Portland. Cada tipo de fibra, comprimento e geometria, deve ser adotado conforme propriedades que se deseja promover ao conjunto. Fibras mais longas costumam atuar de forma mais intensa nas características mecânicas da matriz, enquanto fibras curtas tendem a ser empregadas para minimização da retração da matriz.

O polímero superabsorvente e a fibra celulósica podem ser encontrados juntos em produtos de higiene pessoal (fraldas descartáveis e absorventes higiênicos), bem como em parte dos resíduos do setor de qualidade deste tipo de indústria, onde é gerado em quantidades consideráveis (aproximadamente 6,8 mil toneladas, apenas no ano de 2015, por uma fabricante no Brasil) (BARTH, 2020). O núcleo destes produtos é removido de suas respectivas embalagens e demais materiais responsáveis pela conformação através de um processo de descaracterização (GOMES, 2014). Porém, esses resíduos podem ser heterogêneos. Estudos desenvolvidos por Barth et al. (2024) demonstram que, por meio de processos de homogeneização, é possível melhorar a dispersão dos materiais, tornando confiáveis os resultados obtidos pelos métodos de caracterização. Através das análises de caracterização do



polímero superabsorvente e fibra celulósica originada de resíduos sólidos industriais da produção de fraldas descartáveis e absorventes higiênicos, e de aplicação de diferentes composições destes materiais em concretos de cimento Portland, realizados por Barth (2021), foi possível determinar, que o coproduto desenvolvido e aplicado conforme as determinações apresentadas na pesquisa, possui excelente potencial de aplicação como reforço e agente de cura interna em matrizes de cimento Portland, destacando benefícios como o aumento da resistência à tração da matriz em até 50%, redução da retração plástica de até 85% e redução da fissuração de até 85%. Cabe salientar que estes resultados só são obtidos pelo efeito sinérgico entre os componentes do coproduto desenvolvido, onde o PSA atua como agente de cura interna e mitigador dos mecanismos de retração, enquanto a fibra celulósica atua principalmente no aumento da resistência à tração e diluição dos esforços internos da matriz.

O trabalho desenvolvido por Barth (2021), o qual apontou os resultados descritos no parágrafo anterior, apontou benefícios mais equilibrados promovidos pelo coproduto à matriz cimentícia quando aplicado em composição de 15% de PSA e 85% de fibra celulósica, em massa. Esse projeto, em desenvolvimento desde 2012, originou o depósito da patente BR 10 2022 012389 6, e encontra-se ao final do nível 6 na escala de nível de maturidade tecnológica, - conforme os critérios demonstrados por Manning (2023) -, ou seja, para o produto desenvolvido já houve a demonstração do modelo de protótipo de sistema em ambiente relevante. Este nível foi obtido por Barth (2021) após realizar a obtenção do protótipo contemplando atividades críticas de industrialização (toda e qualquer atividade capaz de causar alterações físicas e/ou químicas no produto) e aplicação em concretos em ambiente de cura seca (60% U.R. e $23 \pm 2^\circ\text{C}$), cura úmida (100% U.R. e $23 \pm 2^\circ\text{C}$), e em escala piloto-industrial.

Para avanço no nível de maturidade tecnológica (nível 7), bem como parte do processo de transferência de tecnologia relacionado a etapa de industrialização, se faz necessário a demonstração do protótipo em ambiente operacional.

O desenvolvimento do projeto não se justifica apenas pelo próprio avanço no nível de maturidade tecnológica, mas sim pelo desenvolvimento de uma alternativa de reciclagem externa e reinserção em uma nova cadeia produtiva de um resíduo sólido industrial gerado em processos de produção em escala global, bem como pela alteração de propriedades das matrizes de cimento Portland, principalmente aquelas relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto armado, demonstrando potencial de incremento da vida útil neste tipo de estrutura e minimização da necessidade de manutenção, podendo resultar em uma redução no consumo de cimento Portland e, conseqüentemente, redução do consumo energético e de emissões de CO_2 relacionadas a este tipo de indústria.

O estudo, portanto, objetiva avaliar a influência da utilização de coproduto à base de resíduos sólidos industriais de polímero superabsorvente e fibra celulósica (denominado como Coproduto) em escala industrial como agente de cura interna e reforço em concreto para piso industrial, aplicado por uma concreteira parceira para um cliente real.

2. Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados no estudo, os métodos aplicados e a descrição da aplicação em escala industrial. Para isso, o programa está subdividido em três etapas.

A primeira etapa apresenta a caracterização e descrição dos materiais empregados. A segunda etapa apresenta a definição dos traços resultantes do estudo de dosagem experimental, bem como os métodos aplicados para avaliação das propriedades dos concretos. Por fim, na terceira etapa, é descrito o processo de aplicação em escala industrial.

Pelo conjunto de propriedades alteradas pelo coproduto e por questões estratégicas de desenvolvimento do projeto, foi definido como ambiente operacional a aplicação de coproduto em concreto de cimento Portland aplicado em pisos industriais, aplicados por uma concreteira em concreto usinado (principal cliente potencial para o coproduto), com acabamento superficial executado pelo cliente receptor do concreto.

2.1. Materiais

O aglomerante utilizado foi cimento Portland CP II F-40. A determinação do uso deste tipo de aglomerante se deu por conta de ser o cimento utilizado pela concreteira parceira em seu concreto referência para pisos industriais. A determinação do uso deste tipo de aglomerante no estudo ainda beneficia as análises, ao modo que não possui adições pozolânicas, permitindo melhor avaliação das propriedades dos concretos em idades iniciais, além de, conforme Bentz, Lura e Roberts (2005), não ser influenciado pelas altas taxas de retração química das adições pozolânicas.

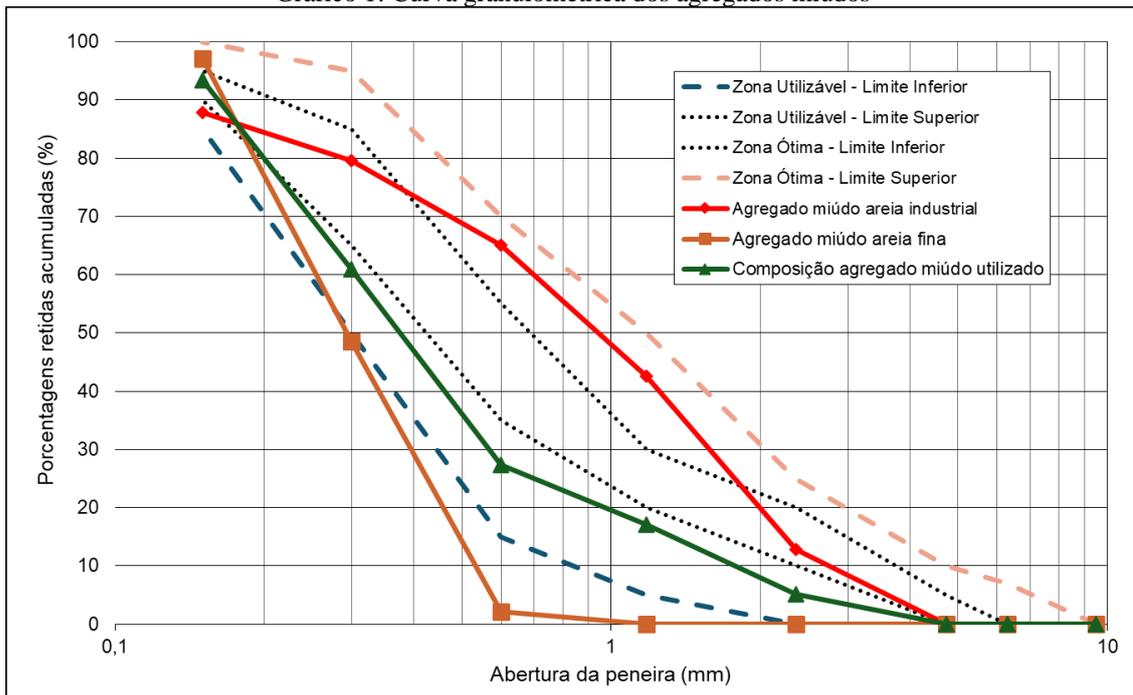
Os agregados miúdos utilizados nos concretos foram areia fina extraída de leito de rio e areia industrial resultante de processo de britagem de basalto, conforme nomenclaturas adotadas pela concreteira parceira. Ambos os agregados miúdos foram caracterizados conforme sua distribuição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica conforme ABNT NBR NM 248:2001. A absorção foi obtida conforme ABNT NBR NM 30:2000. A massa específica seca e saturada com a superfície seca foram obtidas conforme ABNT NBR NM 52:2009. Os resultados de distribuição granulométrica podem ser vistos na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta os resultados de massa específica, absorção e módulo de finura.

Tabela 1: Granulometria agregado miúdo

| Abertura da peneira (mm) | Areia fina | | Areia Industrial | |
|-------------------------------------|------------|-----------|------------------|-----------|
| | Massa (%) | | Massa (%) | |
| | Retida | Acumulada | Retida | Acumulada |
| 6,3 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 4,75 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 2,36 | 0% | 0% | 13% | 13% |
| 1,18 | 0% | 0% | 30% | 43% |
| 0,6 | 2% | 2% | 22% | 65% |
| 0,3 | 46% | 49% | 15% | 80% |
| 0,15 | 49% | 97% | 8% | 88% |
| Fundo | 3% | 100% | 12% | 100% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Dimensão máxima característica (mm) | 0,6 | | 4,75 | |

Fonte: Autores.

Gráfico 1: Curva granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: Autores.

Tabela 2: Caracterização agregado miúdo

| Característica | Resultado | |
|---|------------------------|------------------------|
| | Areia fina | Areia industrial |
| Massa específica saturada superfície seca | 2,58 g/cm ³ | 2,45 g/cm ³ |
| Massa específica agregado seco | 2,57 g/cm ³ | 2,43 g/cm ³ |
| Absorção | 0,24% | 0,76% |
| Módulo de Finura | 1,48 | 2,88 |

Fonte: Autores.

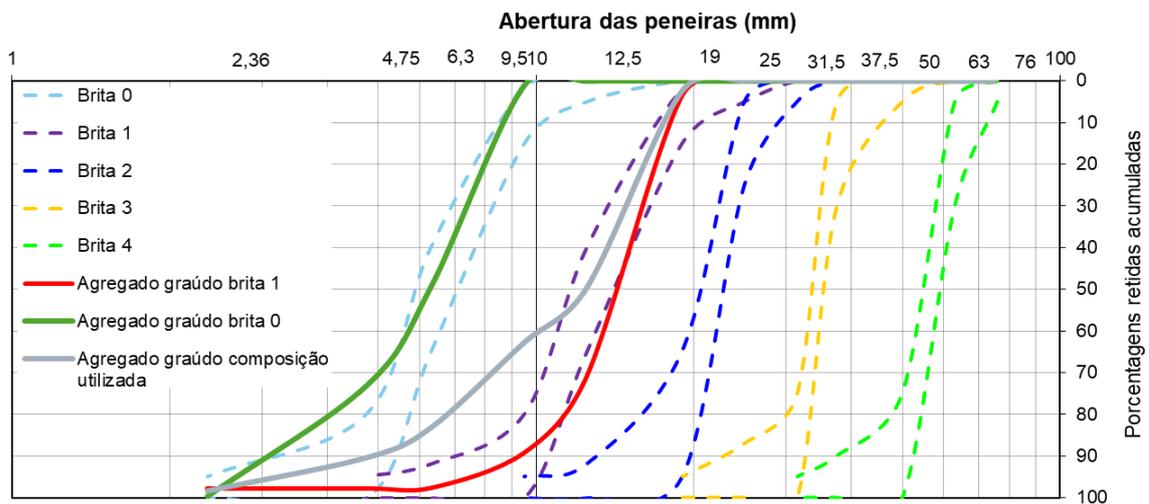
Os agregados graúdos utilizados nos concretos foram brita 0 e brita 1, ambos de origem basáltica, conforme nomenclaturas adotadas pela concreteira parceira. Ambos os agregados graúdos foram caracterizados conforme sua distribuição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica conforme ABNT NBR NM248:2001. A absorção foi obtida conforme ABNT NBR NM 53:2009. A massa específica seca e saturada com a superfície seca foram obtidas conforme ABNT NBR NM 53:2009. Os resultados de distribuição granulométrica podem ser vistos na Tabela 3 e no Gráfico 2, enquanto a Tabela 4 apresenta os resultados de massa específica, absorção e módulo de finura.

Tabela 3: Granulometria agregado graúdo

| Abertura da peneira (mm) | Brita 0 | | Brita 1 | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Massa (%) | | Massa (%) | |
| | Retida | Acumulada | Retida | Acumulada |
| 19 | 0% | 0% | 3% | 3% |
| 12,5 | 0% | 0% | 67% | 71% |
| 9,5 | 1% | 1% | 18% | 89% |
| 6,3 | 49% | 49% | 9% | 98% |
| 4,75 | 24% | 73% | 0% | 98% |
| 2,36 | 27% | 100% | 0% | 98% |
| Fundo | 0% | 100% | 2% | 100% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Dimensão máxima característica (mm) | 9,5 | | 19 | |

Fonte: Autores.

Gráfico 2: Curva granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Autores.

Tabela 4: Caracterização agregado graúdo

| Característica | Resultado | |
|---|------------------------|------------------------|
| | Brita 0 | Brita 1 |
| Massa específica saturada superfície seca | 2,56 g/cm ³ | 2,56 g/cm ³ |
| Massa específica agregado seco | 2,68 g/cm ³ | 2,64 g/cm ³ |
| Absorção | 3,01% | 1,93% |
| Módulo de Finura | 5,73 | 6,79 |

Fonte: Autores.

O material designado como coproduto é composto por 15% de PSA e 85% de fibra celulósica, em massa. O processo de obtenção e aplicação do coproduto consta no registro do INPI sob nº BR 10 2022 012389 6. O consumo de coproduto é variável conforme características do líquido empregado no processo de pré-hidratação. Porém, por simplificação, foi adotado um valor de absorção médio considerando água do sistema de abastecimento público, o que leva a um consumo de 2,43 g de coproduto por kg de cimento. A água de hidratação do coproduto

empregado na aplicação em escala industrial, foi adicionada no início da mistura, diretamente no caminhão betoneira, juntamente com o coproduto e misturado por 10 min até que fosse prosseguido o restante do carregamento. A água utilizada na hidratação do coproduto, conforme os critérios preconizados pela ABNT NBR 6118:2023, foi integralmente computada como água de amassamento, ou seja, incluída na determinação do teor de a/c.

2.2. Métodos

Neste item são abordados os métodos empregados para determinação das características físicas e mecânicas dos concretos originados.

2.2.1. Definição de traços

Inicialmente, houve um estudo de dosagem experimental para definição dos traços referência e com o coproduto. Para isso, foram feitos concretos ricos, intermediários e pobres, partindo do traço intermediário, conforme o traço padrão comercial correspondente à classe C30 para pisos, empregado pela concreteira parceira, onde para os traços ricos e pobres, o teor de agregados foi variado em -1 e +1, respectivamente. Para as relações de areia e de brita, foi empregada ainda uma composição granulométrica utilizada pela concreteira parceira no respectivo traço, sendo para a areia de 60% de areia fina e 40% de areia industrial. Para a brita, estas relações foram de 30% de brita 0 e 70% de brita 1, ambas relações em massa. Para ajuste da trabalhabilidade, obtido através da consistência pelo abatimento de tronco de cone conforme ABNT NBR 16889:2020, objetivando uma consistência de 120 ± 20 mm, foi empregado aditivo superplastificante.

Salienta-se ainda que, tanto para o estudo de definição dos traços quanto para a aplicação em escala industrial, a umidade de cada respectivo agregado foi determinada, de modo a permitir sua aplicação em condição de saturada superfície seca, ou seja, caso estivesse com umidade inferior à sua absorção, houve durante a mistura, a adição da quantidade de água necessária para que os agregados alcançassem esta condição. Caso os respectivos agregados estivessem com umidade superior à sua absorção, a água excedente foi contabilizada para a água de amassamento, respeitando o conceito de a/c descrito pela ABNT NBR 12655:2022.

Através deste estudo de dosagem experimental, respeitando os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023 e a condição de preparo A estabelecida pelo ABNT NBR 12655:2022, foram elaborados os traços unitários para o concreto referência e para o concreto com coproduto, dosados de forma que respeitassem os critérios da norma para um concreto classe C30 em classe III de agressividade ambiental. O traço unitário dos concretos pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5: Traços unitários dos concretos

| Traço | Classe | C | a | | b | | a/c | H (%) | Teor adit. (%) (adt/Cc) | Teor de coproduto (kg/m ³) | Cc (kg/m ³) |
|------------|--------|---|-------------------|-------------------|----------------|----------------|------|-------|----------------------------|---|----------------------------|
| | | | a _{fina} | a _{ind.} | b ₀ | b ₁ | | | | | |
| Referência | C30 | 1 | 1,62 | 1,08 | 1,04 | 2,42 | 0,58 | 8,07 | 0,40 | - | 292,50 |
| Coproduto | C30 | 1 | 1,72 | 1,15 | 1,08 | 2,53 | 0,60 | 8,06 | 0,45 | 0,68 | 280,07 |

Fonte: Autores.

2.2.2. Resistência à compressão

Durante aplicação em escala industrial, foram moldados dois corpos de prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão aos 28 dias, para cada caminhão, seguindo o critério de amostragem estabelecido pela ABNT NBR 12655:2022. Os corpos de prova foram moldados e mantidos em ambiente saturado até a idade de ensaios, seguindo os critérios

determinados pela ABNT NBR 5738:2016. A resistência à compressão dos corpos de prova foi obtida conforme ABNT NBR 5739:2018.

2.2.3. Retração por secagem

A retração por secagem foi determinada em laboratório, empregando 4 corpos de prova por traço, moldados imediatamente antes do lançamento dos concretos, desformados com 24h de idade e mantidos em laboratório sob duas condições de cura (seca 60 ± 5 % U.R. e 23 ± 2 °C, e úmida 100% U.R. e 23 ± 2 °C). As idades de ensaio foram 1, 3, 14, 20 e 28 dias. O ensaio seguiu as orientações da norma americana ASTM C157/C157M:2017, utilizando corpos de prova prismáticos de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. As leituras foram realizadas através de um medidor de precisão, acoplado em uma base metálica com ajuste de posicionamento do corpo de prova.

Foram moldados e analisados 4 corpos de prova para cada traço proposto, sendo 2 deles submetidos à cura úmida e 2 à cura seca. Foram realizadas 10 leituras de variação dimensional horizontal em cada corpo de prova analisado em cada idade. Com base nas 10 medidas, foi calculada a média, utilizada no processo de cálculo de deformação unidirecional conforme descrito na ASTM C157/157M:2017, pela Equação 1.

$$\Delta Lx = \frac{L_{jc} - L_{oc}}{G} \quad (1)$$

0,000001

Onde:

ΔLx = deformação unidirecional após desforma ($\mu\text{m}/\text{m}$);

L_{jc} = leitura inicial no aparelho comparador na idade j (dias) em mm;

L_{oc} = leitura inicial no aparelho comparador após desforma em mm;

G = comprimento inicial de referência (250 mm).

2.2.4. Aplicação em escala industrial

Para aplicação industrial, foram produzidos 16 m³ de concreto contendo Coproduto – totalizando aproximadamente 160 m² de área concretada -, onde o Coproduto foi introduzido ao caminhão betoneira, de forma prévia a inserção dos demais materiais, e acrescido de sua respectiva água de hidratação, mantendo rotação lenta do tambor por 10 min para hidratação do agente de cura interna. Para o concreto Referência, foram produzidos 112 m³ de concreto. Ambos os concretos foram aplicados no mesmo dia e, para fins de comparação de propriedades, as amostras de análise foram removidas de dois caminhões próximos, sendo o “caminhão 1” referente à coleta da amostra de concreto contendo coproduto e o “caminhão 3” referente à coleta da amostra Referência, em ordem de saída dos caminhões na central de dosagem da concreteira parceira. Os dois caminhões contendo Coproduto e o terceiro caminhão, contendo concreto Referência, foram mapeados durante sua aplicação.

A aplicação industrial foi feita na cidade de Bom Princípio – RS, no dia 31/03/2023. Autorizado pelo órgão municipal competente conforme anuência concedida pela Prefeitura Municipal de Bom Princípio, através da Secretaria de Desenvolvimento Econômico e de Meio Ambiente – SDEMA.

Os concretos foram dosados em central dosadora da concreteira parceira. Misturados e transportados em caminhão betoneira com capacidade de 8 m³. Os concretos contendo Coproduto e o terceiro caminhão contendo o concreto Referência, foram dosados entre as 4h30min e 6h30min do respectivo dia de execução.

Conforme dados do INMET, às 7h00min do dia 31/03/2023 (horário aproximado de lançamento dos três primeiros caminhões de concreto) a temperatura do ar estava em 20,9 °C e umidade relativa do ar estava em 96%. Neste dia, o pico de agressividade ambiental para o concreto ocorreu às 18h00, chegando à 30,9 °C e 54% U.R. Salienta-se ainda que, no dia posterior à concretagem, por 8 horas à U.R. foi inferior à 60% (com mín. de 46%). Nos três dias posteriores à concretagem, houve períodos do dia com U.R.< 60% (mín. de 42% em 03/04/2023 às 17h00min). Não houve registro de precipitação até 14 dias após a concretagem. Aos 14 dias, foi feita uma análise visual da área concretada, visando a identificação e quantificação de possíveis fissuras, acompanhado e validado por representantes da empresa financiadora e da empresa compradora dos concretos (cliente final).

3. Análise e Discussão dos Resultados

Neste item são apresentados e discutidos os resultados dos métodos apresentados.

A resistência à compressão foi obtida conforme item 2.2.2, executado pela concreteira parceira, onde a Tabela 6 apresenta o resultado de resistência à compressão para os concretos em dois exemplares por caminhão betoneira, onde os caminhões 1 e 2 referem-se ao concreto com Coproduto e os caminhões 3 e 4, referem-se ao concreto Referência.

Tabela 6: Resistência à compressão dos concretos

| Traço | Caminhão | Resistência à compressão (MPa) | |
|------------|----------|--------------------------------|------------|
| | | Exemplar 1 | Exemplar 2 |
| Coproduto | 1 | 24,2 | 24,9 |
| | 2 | 24,2 | 22,9 |
| Referência | 3 | 21,8 | 23,2 |
| | 4 | 25,2 | 23,7 |

Obs: foram moldados dois corpos de prova por caminhão, denominados por “Exemplar 1” e “Exemplar 2”

Fonte: Autores.

Em relação a resistência à compressão, pode-se perceber que comparando os resultados entre os caminhões que tiveram suas dosagens, misturas e lançamentos em horários próximos, não houve variação significativa aos 28 dias entre o concreto contendo coproduto e o concreto Referência, onde o concreto Coproduto apresentou resultado médio de 24,05 MPa e o concreto Referência 23,47 MPa. Tal fato foi esperado, confirmando a equivalência de resistência dos concretos.

A retração por secagem foi determinada em laboratório, com corpos de prova moldados imediatamente antes do lançamento dos concretos (coletados dos caminhões 2 e 3). Esses corpos foram desformados com 24h de idade e mantidos em laboratório, conforme as condições de cura descritas no item 2.2.3. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7 e no Gráfico 3.

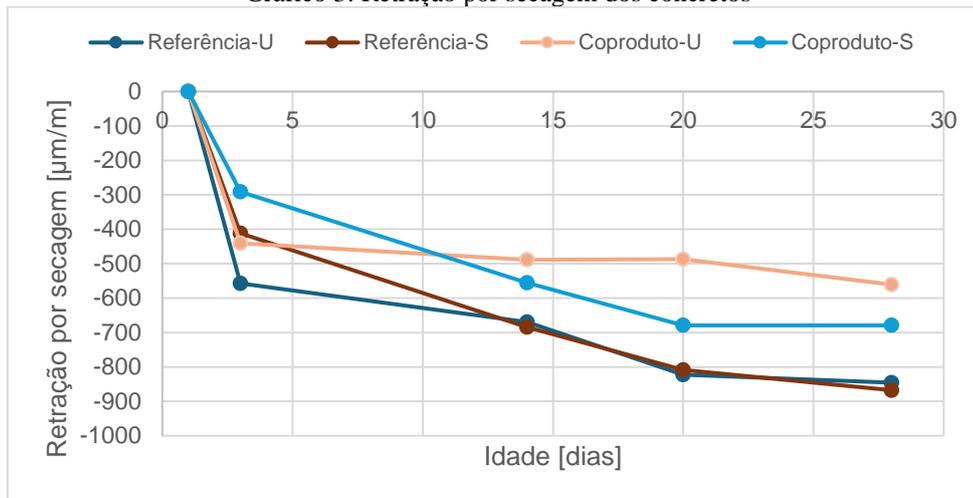
Tabela 7: Retração por secagem dos concretos

| Traço | Retração por secagem (µm/m) | | | | |
|--------------|-----------------------------|--------|---------|---------|---------|
| | 1 dia | 3 dias | 14 dias | 20 dias | 28 dias |
| Referência-U | 0 | -557,4 | -669,4 | -823 | -845,8 |
| Referência-S | 0 | -411,6 | -684,2 | -808,8 | -867,6 |
| Coproduto-U | 0 | -440,6 | -488,4 | -486,6 | -560,8 |
| Coproduto-S | 0 | -291,6 | -555,4 | -679,2 | -679,2 |

Obs: O sufixo “U” refere-se a cura úmida e “S” a cura seca.

Fonte: Autores.

Gráfico 3: Retração por secagem dos concretos



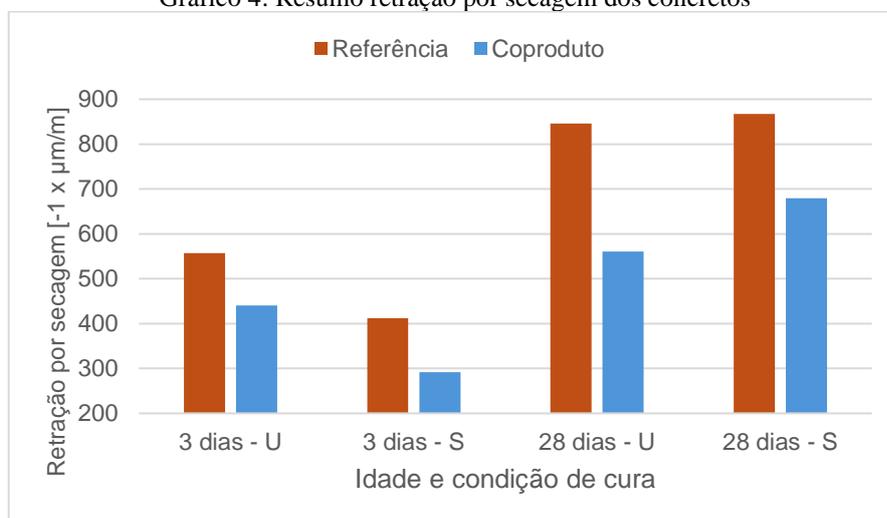
Obs: O sufixo “U” refere-se a cura úmida e “S” a cura seca.

Fonte: Autores.

A análise concentrou-se nas idades de 3 e 28 dias, consideradas estratégicas para a propriedade avaliada. Até o terceiro dia, a taxa de retração é mais acentuada em comparação a idades posteriores, além do concreto apresentar um baixo grau de hidratação. Isso implica uma menor formação dos produtos de hidratação, resultando em resistência mecânica reduzida e, portanto, maior suscetibilidade à fissuração, uma vez que o material possui menor capacidade de suportar os esforços internos — que, por sua vez, se manifestam de forma mais intensa nesse período. Por outro lado, a idade de 28 dias foi destacada por representar um possível ponto de estabilização da retração, em virtude do avanço do processo de hidratação da matriz cimentícia.

Comparando os concretos Coproduto e Referência, em situação de cura úmida (condição ideal de hidratação), aos 3 dias o concreto Coproduto apresentou retração 21% inferior ao concreto Referência, enquanto aos 28 dias o concreto Coproduto apresentou retração 34% inferior ao concreto Referência. Em condição de cura seca (situação de cura mais próxima da realidade de aplicação), o concreto Coproduto apresentou retração 29% inferior ao concreto Referência aos 3 dias, enquanto aos 28 dias o concreto Coproduto apresentou retração 22% inferior ao concreto Referência. Estes resultados podem ser melhor percebidos através do Gráfico 4.

Gráfico 4: Resumo retração por secagem dos concretos



Obs: O sufixo “U” refere-se a cura úmida e “S” a cura seca.

Fonte: Autores.

Aos 14 dias, foi feita ainda uma análise visual no local. Devido à extensa área concretada, não foi possível realizar uma análise fotográfica detalhada para a quantificação de fissuras. Portanto, a análise de fissuração aos 14 dias na área concretada, foi feita de forma semiquantitativa. A Figura 1 ilustra um segmento de fissura presente na área concretada com o concreto Referência.

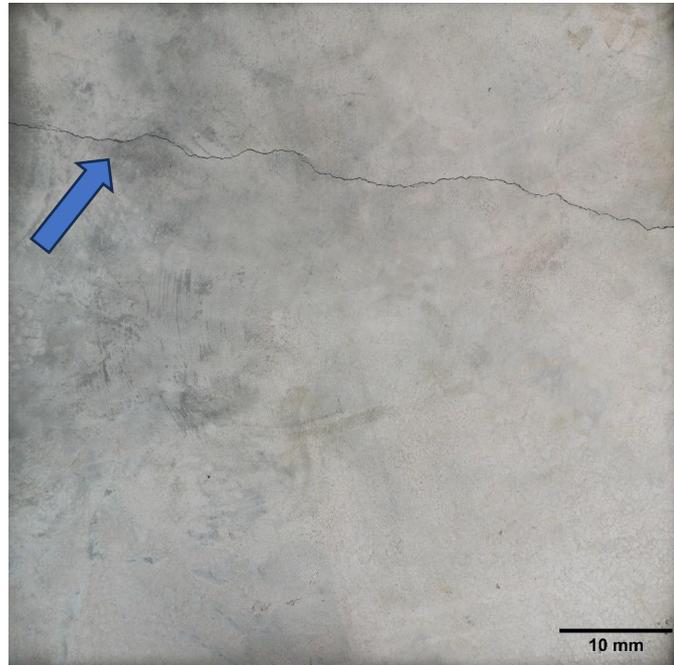


Figura 1: Segmento de fissura no concreto Referência. Fonte: elaborada pelos autores.

Na ocasião da análise, às 16h30min do dia 15/04/2023, estavam presentes: um representante, por parte da UNISINOS; um representante por parte da empresa parceira gestora do resíduo sólido empregado no Coproduto; e um representante por parte do cliente final. Foi avaliado e confirmado por todos os presentes que a área concretada com o concreto contendo o Coproduto não apresentava fissuras visíveis a olho nu. Na área concretada utilizando o concreto Referência, dentre as fissuras visíveis a olho nu (semelhante com o segmento apresentado na Figura 1), foi observado aproximadamente 16 m lineares de fissuras.

Salienta-se ainda que a área concretada com Coproduto foi a primeira a ser lançada, reguada e polida, ficando mais tempo exposta ao ambiente agressivo do que a área com concreto Referência. Aponta-se ainda que, a área concretada contendo Coproduto não apresentava zonas de sombreamento, enquanto parte da área contendo concreto Referência apresentava locais de sombreamento. Tanto o local dentro da área de concretagem do piso quanto a sequência de concretagem foram determinadas de modo a submeter o concreto contendo Coproduto a possíveis situações de maior agressividade ambiental que o concreto Referência.

4. Considerações Finais

A aplicação do Coproduto em escala industrial, ainda em estado fresco, demonstrou êxito, tendo em vista que não prejudicou as atividades de mistura, lançamento, nivelamento e polimento do concreto em relação ao concreto Referência. O controle tecnológico realizado pela concreteira parceira demonstrou equivalência da resistência à compressão entre o concreto Coproduto e o concreto Referência, o que evidencia o sucesso na definição e no desenvolvimento do estudo de dosagem experimental.

A retração por secagem dos concretos em escala industrial, demonstrou que em situação de cura úmida (condição ideal de hidratação), aos 3 dias o concreto Coproduto apresentou retração

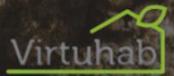


21% inferior ao concreto Referência, enquanto aos 28 dias o concreto Coproduto apresentou retração 34% inferior ao concreto Referência. Em condição de cura seca (situação de cura mais próxima da realidade de aplicação), o concreto Coproduto apresentou retração 29% inferior ao concreto Referência aos 3 dias, enquanto aos 28 dias o concreto Coproduto apresentou retração 22% inferior ao concreto Referência. A redução da retração da matriz promovida pelo uso do coproduto, aliada ao potencial aumento da resistência à tração – pelos resultados dos concretos do estudo de dosagem experimental e pelas referências empregadas –, impediu o surgimento de fissuras, até pelo menos 14 dias, na área concretada contendo o coproduto no piso de concreto, enquanto na área contendo concreto Referência, houve a manifestação de fissuras.

Os resultados obtidos neste estudo conferem o avanço em nível de maturidade tecnológica, do projeto referente ao desenvolvimento de coproduto a partir de resíduos sólidos industriais de polímero superabsorvente e fibra celulósica para uso como agente de cura interna e reforço em matrizes de cimento Portland, ao final do nível 7. Ou seja, houve a demonstração do protótipo (coproduto) em ambiente operacional (concreto usinado dosado e executado por concreteira e aplicação em escala industrial). O estudo promoveu ainda a adaptação tecnológica relativa à transferência de tecnologia, além de possibilidade de comparação a concretos equivalentes, reforçando seus benefícios em relação ao concreto convencional.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C157 / C157M-17**: standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655**: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 30**: agregado miúdo — determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 52**: agregado miúdo — determinação da massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 53**: agregado graúdo — determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.



BARTH, M. E. et al. Analysis of water absorption in industrial waste of superabsorbent polymer and cellulosic fiber. **Revista Matéria**, v. 29, n. 1, 2024.

BARTH, M. E. et al. Relações simbióticas na aplicação de coproduto a partir de resíduo industrial de polímero superabsorvente e fibra celulósica (PSAR) como agente de cura interna em matrizes de cimento Portland. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (FIRS), 11., Porto Alegre, 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: Instituto Venturi, 2020.

BARTH, M. E. **Utilização de resíduo industrial de polímero superabsorvente e fibra celulósica como agente de cura interna em concretos de cimento Portland**. 2021. 255 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

BENTZ, D. P.; LURA, P.; ROBERTS, J. W. Mixture Proportioning for internal curing. **Concrete International**, v. 27, n. 2, p. 35-40, 2005.

GOMES, L.M. **Avaliação da potencialidade de resíduo sólido de base celulósica advindo do setor de higiene pessoal testando sua adição em argamassa de revestimento**. 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

HELENE, P. R. L.; LEVY, S. **Boletín técnico** – curado del hormigón. asociación latinoamericana de control de calidad, patología y recuperación de la construcción. México: ALCONPAT, 2013.

JENSEN, O. M. Use of superabsorbent polymers in concrete. **Concrete International**, p. 48-52, jan. 2013. Disponível em: <http://procureusa.com/distributors/wp-content/uploads/2014/04/SAPs-In-Concrete.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2020.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I – principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, p. 647-654, 2001.

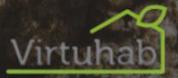
KAWASHIMA, S.; SHAH, S. P. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 201-208, 2011.

KOPPE, A. **Utilização de resíduo à base de polímero superabsorvente e fibra celulósica como agente de cura interna em matrizes de cimento Portland**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

KUMM, T. C. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MANNING, C. Technology Readiness Levels. In: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Technology Readiness Levels**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

MASUDA, F. Trends in the development of superabsorbent polymers for diapers. **Superabsorbent Polymers**, v. 573, p. 88-98, 1994.



SIKA S/A. Concreto Reforçado com Fibras. *In*: SIKA S/A. **Concreto Reforçado com Fibras**. São Paulo, [2025?]. Disponível em: <https://bra.sika.com/pt/concreto-reforcado-com-fibras.html#macrofibras>. Acesso em: 27 abr. 2025.

SOROUSHIAN, P.; WON, J. P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 44-53, 2012.