

20^o Prêmio CBIC de Inovação e Sustentabilidade

1. Proposta

Desenvolvimento de estrutura com grande durabilidade a base de concreto de pós reativos (CPR).

2. Categoria

Novos Materiais

3. Autor

Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil - itt Performance, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos.

Arq, pesquisadora Esp. Alice Medeiros Rota Rizzardo (itt Performance, Unisinos); Eng. Civil, Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian (itt Performance, Unisinos); Eng. Civil, Prof. MS Uziel C. Medeiros Quinino (itt Performance, Unisinos); Eng. Civil, Prof. MS Roberto Christ (itt Performance, Unisinos); Eng Civil, pesquisadora Fernanda Pacheco (itt Performance, Unisinos); Eng Civil, pesquisador Esp. Fabrício Bolina (itt Performance, Unisinos); Arq., pesquisadora MS Josiane Reschke Pires (itt Performance, Unisinos); Eng. Civil, pesquisador Esp. Diego Schneider (itt performance).

4. Equipe

Construtora Premold Ltda.; Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS; Arcelor Mittal; Eng. civil, Newton Napoli (Construtora Premold Ltda); Diretor Cavaliere (Construtora Premold Ltda); Eng Civil, Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (LEME, UFRGS); Eng Civil, pesquisador Rafael Burin Fávero (LEME, UFRGS); Eng Civil, pesquisador Lucas Reginato (LEME, UFRGS).

5. Concepção e objetivos

O concreto é, indiscutivelmente, o material de construção civil mais utilizado pelo homem, principalmente em conjunto com o aço, formando, assim, o concreto armado. Este material constitui-se como a combinação mais corriqueira para a produção de sistemas estruturais das obras civis, sendo dominado e bem utilizado tanto por projetistas quanto construtores e operários da construção civil.

Contudo, o setor da construção civil vem sofrendo paulatina transformação. Fatores como as exigências de otimização dos materiais e processos, o incremento do conhecimento do comportamento mecânico dos materiais, além da necessidade - cada vez maior - da velocidade de produção, vem fazendo o homem idealizar edificações cada vez mais imponentes e sobre condições cada vez mais desafiadoras.

Originalidade:

Estas novas exigências fazem surgir, em paralelo, a necessidade da idealização de materiais com características distintas dos materiais tradicionalmente utilizados, seja em termos de desempenho mecânicos ou de melhora dos processos executivos. Ademais, em certas situações, o concreto convencional não consegue atender aos requisitos necessários, provindo a necessidade de, mais uma vez, conceber alternativas que apresentem uma relação técnica e econômica mais favorável.

Por isso foram desenvolvidas misturas especiais, com propriedades superiores aos concretos convencionais. A busca constante pela obtenção de concretos mais resistentes, capazes de atender estas novas exigências estruturais resultou no desenvolvimento de concreto de Ultra-Auto-Desempenho (CUAD), cujo concreto de Pós Reativos (CPR) é o representante a ser analisado.

O uso de Concretos de Ultra-Auto-Desempenho vem suprir, ademais, a demanda e a necessidade de produção de estruturas mais duráveis. Durabilidade esta que, aliás, provém como um tema em evidência no cenário nacional, dada a necessidade de aplicação da recém-vigorada norma de desempenho, a ABNT NBR 15575: 2013, a qual estabelece um desempenho mínimo das edificações e seus sistemas, inclusive o estrutural.

Objetivo:

O objetivo deste projeto é desenvolver um concreto com propriedades mecânicas superiores ao do concreto convencional e aplicá-lo na indústria de pré-fabricados. Como meta se estabeleceu que este material fosse idealizado, testado e otimizado em universidades e laboratórios de reconhecida capacidade técnica, sendo posteriormente aplicado na indústria de pré-fabricados para análise de sua viabilidade.

6. Escopo e desenvolvimento da inovação

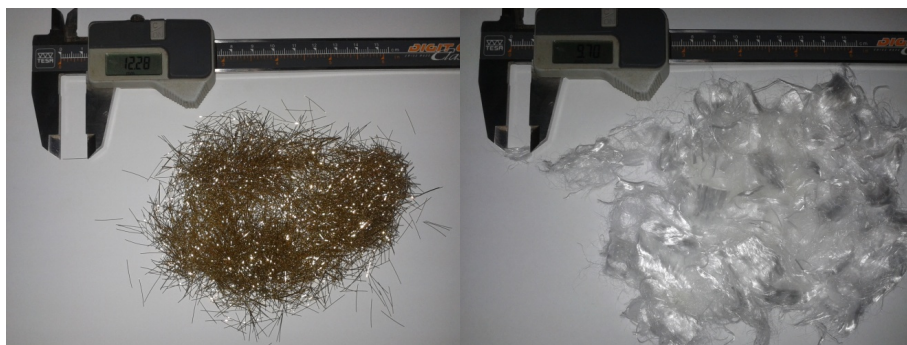
A idealização do material foi produzida em três etapas: (1º) Concepção e estudo da viabilidade de aplicação no mercado do CUAD; (2º) Produção e estudo das propriedades do CUAD; (3º) Aplicação do CUAD na Construtora Premold.

A primeira e a segunda etapa foram produzidas no itt Performance, na Unisinos, e no LEME, na UFRGS. A terceira etapa foi produzida nas dependências da Construtora Premold.

O concreto de pós reativos (CPR) é constituído de cimento, sílica ativa, cinza volante, areia de fundição, areia fina, pó de quartzo, água, superplastificante, modificador de viscosidade, fibras de aço e fibras de polipropileno, com quantidades que foram definidas em pesquisas realizadas no itt Performance (UNISINOS) e LEME (UFRGS), constituindo-se a primeira etapa de estudo.

Para a dosagem do CPR, um dos CUAD, a seleção dos materiais constituintes tem uma grande importância no desempenho final do material. Tipicamente são utilizados cimento, areia, pó de quartzo, sílica ativa, aditivos e fibras de aço e de polipropileno. Os materiais utilizados apresentam as seguintes características:

- a) CIMENTO - O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CP-V-ARI.
- b) CINZA VOLANTE - A cinza volante utilizada nesta pesquisa tem origem na unidade geradora de vapor de uma empresa fabricante de papel.
- c) SÍLICA ATIVA - A sílica ativa utilizada nesta pesquisa é proveniente da produção de silício metálico, do tipo não densificada.
- d) PÓ DE QUARTZO - O pó de quartzo utilizado para o estudo é comercializado como pó de quartzo malha #200, composto basicamente por dióxido de silício (SiO_2).
- e) AREIA - Para a realização deste trabalho foram utilizados dois tipos de areia, uma fina, normalmente utilizada no mercado para acabamento final em rebocos; e outra utilizada para fundição de peças metálicas, ambas encontradas na região da grande Porto Alegre
- f) ADITIVOS - Para a realização do estudo foram utilizados dois tipos de aditivos, um modificador de viscosidade e um superplastificante, a base de policarboxilatos. O aditivo superplastificante é constituído por polímeros de éter carboxílico modificado, apresenta um teor de sólidos de 52%, uma coloração amarelo turvo com odor característico, peso específico de $1,1 \text{ g/cm}^3$, pH de 5,5 e é totalmente solúvel em água.
- g) FIBRAS - Para a realização deste trabalho foram utilizados dois tipos de fibras, uma fibra de aço e uma de polipropileno. As fibras de aço são importadas e fabricadas na China. As fibras são comercialmente denominadas como dramix[®] OL 13/.20, possuem 13mm de comprimento, 0,21mm de diâmetro com formato reto e uma resistência à tração de 2750 N/mm^2 , de acordo com o fabricante. As fibras são expostas na figura 1.



(a) Fibras de aço

(b) Fibras de polipropileno

Figura 1 – Fibras utilizadas na pesquisa a) Fibras de aço b) fibras de polipropileno.

Foram estudados diversos traços com diferentes proporções de fibra, realizando ensaios mecânicos no material, sendo eles, resistência à compressão, resistência à tração, determinação do módulo de elasticidade e determinação da tenacidade, expostos parcialmente na figura 02. A obtenção dos resultados assim como a análise em conjunto destes compôs a segunda etapa de desenvolvimento do projeto.



Figura 2: Ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão

A análise destas características viabilizou a escolha do traço a ser utilizado na terceira etapa deste estudo, que segue apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Traço utilizado na terceira etapa.

Materiais	Traço unitário		Traço em kg/m ³	
Cimento	1	0,44	573,59	251,80
Sílica ativa		0,37		213,88
Cinza volante		0,19		107,91
Areia de fundição	2,39	1,02	1370,82	583,33
Areia fina		0,86		495,83
Pó de quartzo		0,51		291,66
Água	0,22*		126,19	
Superplastificante	0,03*		17,21	
Modif. de Visc.	0,01*		5,74	
Fibra de aço	0,748		188,4**	
Fibra de PP	0,021		5,46**	

*Teor de adição em relação ao aglomerante

**Valores em relação à massa de CPR

Funcionalidade:

Com este traço, conduziu-se a terceira etapa do projeto, consistindo, conforme citado, na aplicabilidade do material desenvolvido na Construtora Premold. Foi executada uma caixa de drenagem com o novo material, conforme necessidades das indústrias químicas.

Caixa de drenagem

Iniciou-se o processo com a separação e pesagem dos materiais constituintes. Posteriormente, foram despejados no misturador planetário de um metro cúbico, onde a empresa realiza a mistura do concreto convencional e auto adensável para fabricação de suas peças. A mistura foi dividida em duas etapas, apesar do misturador ter capacidade de produzi-la de uma só vez, pois não se sabia como a mistura iria se comportar. Na figura 3 é possível ver a mistura dentro do misturador e o aparelho termo higrômetro que foi utilizado no controle de temperatura.



Figura 3 - Mistura do compósito cimentício avançado.

O tempo total de mistura foi de 13 minutos e 45 segundos nas duas misturas, no ensaio de espalhamento o resultado foi de 63 cm e a temperatura do concreto subiu 4 graus durante a mistura, passando de 28°C para 32°C. A figura 4 mostra a concretagem da caixa, onde é possível perceber a viscosidade do concreto.



Figura 4 – Concretagem da caixa.

A caixa foi desformada depois de sete dias, isso porque o concreto demorou a atingir resistência necessária para desforma. Na figura 5 pode-se ver o aspecto superficial liso da caixa já desformada.



Figura 5 – Concretagem da caixa.

Com os resultados obtidos nesta pesquisa foi possível realizar uma comparação entre a caixa de drenagem constituída de concreto armado e de compósito cimentício avançado, conforme segue.

7. Resultados Quantitativos e Qualitativos

a) Resistência à compressão

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão ao longo do tempo do CPR com mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente. Os resultados estão apresentados na tabela 2 e a representação gráfica das médias aritméticas está apresentada na Figura 6.

Tabela 2 – Resultados à compressão ao longo do tempo.

Idades de ensaio	CPs	Resistência à compressão (MPa)	Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
7 dias	1	135	128,7	12,78	9,93
	2	132			
	3	138			
	4	110			
14 dias	5	154,1	162,8	13,73	8,43
	6	181,1			
	7	150,6			

	8	165,3			
21 dias	9	170,3	168,8	5,12	3,03
	10	162,9			
	11	175			
	12	167			
28 dias	13	185	169,4	13,37	7,89
	14	176			
	15	160,3			
	16	156,5			
56 dias	17	164	166,7	5,56	3,33
	18	165			
	19	163			
	20	175			

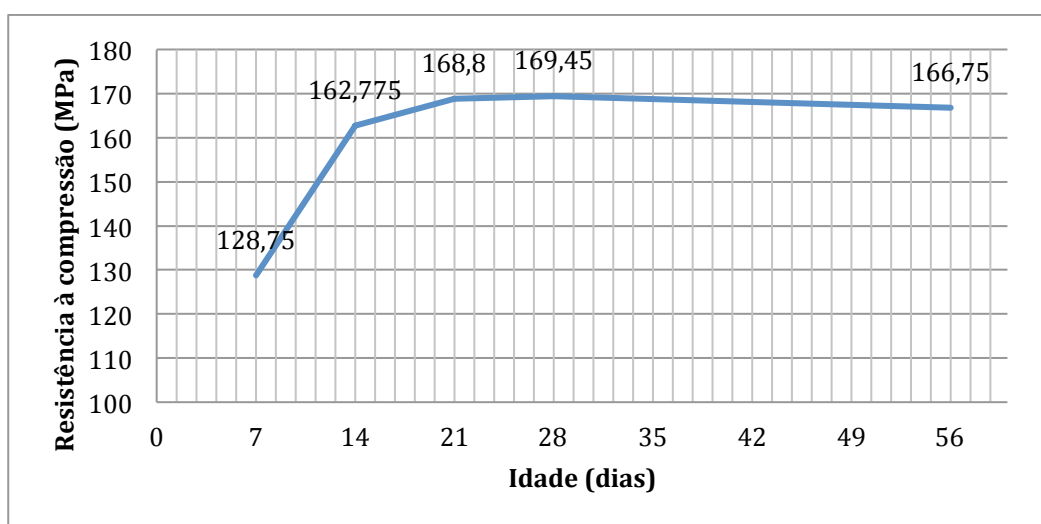


Figura 6 – Resistência média dos corpos-de-prova ao longo do tempo.

Observa-se que a resistência à compressão da mistura atingiu quase 170 MPa, cerca de 8 vezes a resistência de um concreto usual. E com o auxílio da tabela 2 é possível perceber que a resistência à compressão aumentou ao longo do tempo até a idade de 14 dias, após isso a resistência apresenta uma estabilização.

b) Resistência à tração

Foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão ao longo do tempo do CPR com mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno em teores de 80% e 20%, respectivamente. Os resultados estão apresentados na Figura 7.

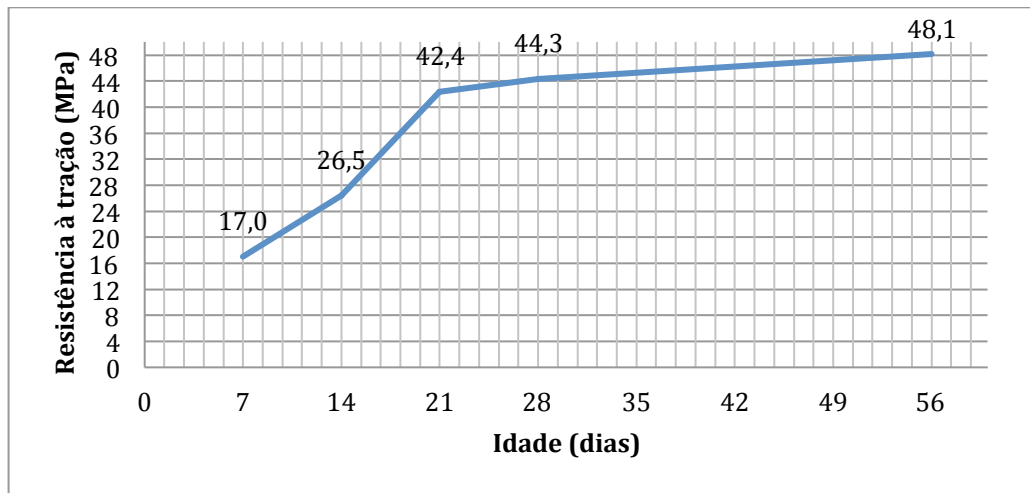


Figura 7 – Resistência à tração na flexão ao longo do tempo.

É importante salientar que esta resistência à tração é cerca de 10 vezes a encontrada em concretos convencionais. Com o auxílio da Figura 7, é possível notar que a resistência à tração na flexão do CPR aumenta com o tempo. A evolução é maior nas idades iniciais até o período de 21 dias, após isso a resistência segue crescendo, porém em uma menor proporção. O cimento utilizado na pesquisa foi um cimento CP-V, onde a resistência final é rapidamente atingida. Durante a hidratação do cimento é produzido o hidróxido de cálcio que reage com os materiais pozolânicos formando novos cristais hidratados aumentando a resistência do material. Até os 28 dias, aproximadamente, os materiais pozolânicos já consumiram todo o hidróxido de cálcio disponível, estabilizando a mistura. Certamente, no interior do CPR, resta uma série de partículas de cimento não hidratadas e materiais pozolânicos atuando como inertes.

c) Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade na flexão ocorreu a partir das leituras dos *strain gages*, instalados na parte inferior nos prismas, e das medições das cargas aplicadas. Ambos os dados foram adquiridos no ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos, cujos resultados são apresentados na Figura 8.

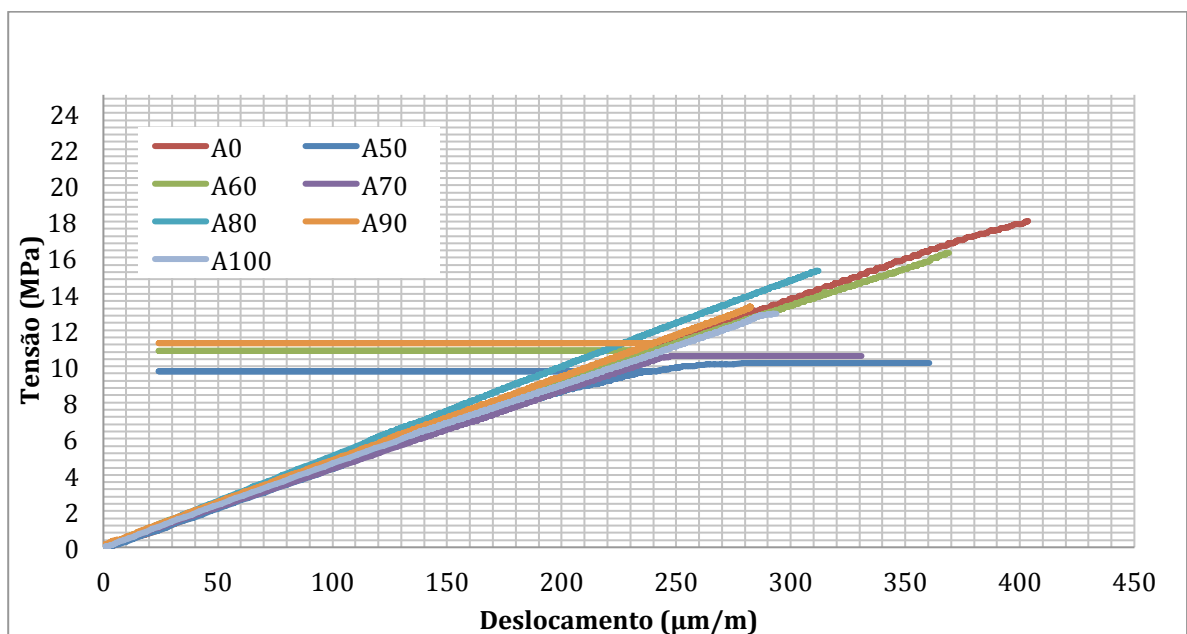


Figura 8 – Gráfico tensão deformação da parte mais tracionada dos corpos-de-provas prismáticos em ensaio de flexão em quatro pontos.

Com auxílio da Figura 8 é possível perceber que os modelos apresentam praticamente o mesmo comportamento na resposta inicial. Verifica-se que a resposta elástica inicial, compreendida no intervalo entre 0 e 240 μm de deslocamento na face mais tracionada dos modelos, é praticamente inalterada em função do tipo de fibra utilizada ou pela hibridização das fibras.

A partir do gráfico de tensão x deformação, gerado no ensaio de resistência à tração na flexão, foi possível determinar o módulo de elasticidade secante E_{cs} à tração das diferentes misturas de fibras analisadas, onde os resultados estão apresentados na Figura 9.

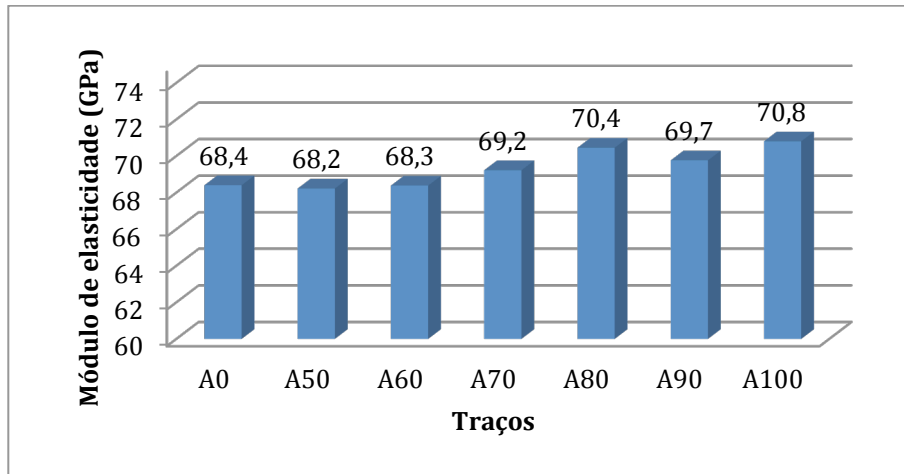


Figura 9 – Módulo de elasticidade á flexão das diferentes misturas.

Percebe-se que o módulo de elasticidade à flexão do CPR aumenta conforme o aumento do teor de fibras de aço na mistura. Cabe ressaltar que mesmo com pequena proporção de fibras de aço o material apresenta um elevado módulo de elasticidade, ficando acima de 68 GPa.

d) Tenacidade

Para a determinação da tenacidade, foi utilizado o diagrama gerado no ensaio de tração na flexão, utilizando um LVDT para determinação do deslocamento. Para cada mistura híbrida de fibras foi gerado um gráfico de carga x deslocamento dos modelos analisados; os valores são apresentados na Figura 10.

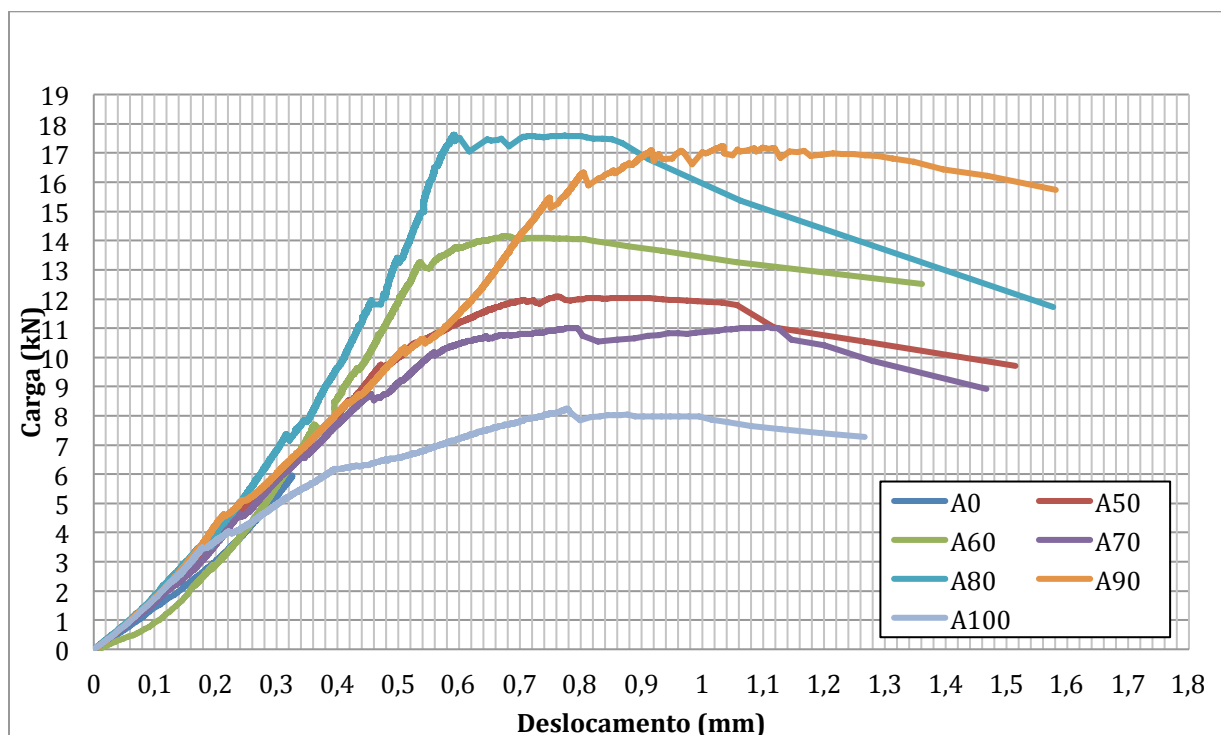


Figura 10 – Diagramas carga x deslocamento para cada mistura híbrida de fibras.

Pode-se perceber que todas as amostras apresentam na sua fase inicial um comportamento não linear causado pela acomodação do ensaio, seguido por uma fase elástica linear com capacidade de suporte e deslocamentos bastante variáveis em função de cada mistura analisada.

A deformação máxima obtida nos ensaios foi variada, alguns modelos resistiram mais e outros menos, com a máxima deformação chegando a aproximadamente 1,6 mm para as misturas A80 e A90. Com isso foram realizadas cinco determinações de tenacidade múltiplas de 0,286 mm de deformação, valor este que foi determinado por ser o valor mais próximo da faixa da primeira fissuração da maioria das misturas testadas. A tabela 3 apresenta os resultados da tenacidade para cada mistura submetida a ensaio de flexão.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de tenacidade

Tenacidade	A0	A50	A60	A70	A80	A90	A100
$I_5 (0,286)$	0,28	0,34	0,23	0,33	0,38	0,37	0,25
$I_{10} (0,572)$	1,57	2,38	2,32	3,42	2,81	2,44	1,94
$I_{20} (0,858)$	-	5,69	6,31	8,00	7,72	6,17	4,11
$I_{30} (1,144)$	-	9,18	10,16	8,48	13,98	11,08	6,43
$I_{40} (1,43)$	-	12,28	13,44	11,49	18,09	16,01	8,58

Pode-se perceber uma grande variação na tenacidade em relação às diferentes misturas de fibras, sendo que uma similaridade dos valores é encontrada para as misturas A80 e A90. Na mistura A0, com 100% de fibras de polipropileno, não foi possível determinar a energia de fratura para elevadas deformações, mostrando a incapacidade desta fibra em evitar a propagação de fissuras, como discutido anteriormente. A mistura que apresentou o melhor comportamento foi a 80% de fibras de aço e 20% de polipropileno.

e) Produção da caixa de drenagem

Tabela 4 – Consumo de materiais da caixa de concreto armado

DESCRIÇÃO	UNIDADE	CAIXA DE CONCRETO ARMADO	CAIXA EM COMP. CIMENT. AVANÇADO	DIFERENÇA (CC/ CRP)
		QUANT.	QUANT.	
CONCRETO	m ³	2,08	0,93	124%
CIMENTO	Kg	791,16	233,92	238%
SÍLICA	Kg	41,64	198,69	n/a
CINZA VOLANTE	Kg	-	100,24	n/a
PÓ DE QUARTZO	Kg	-	270,95	n/a
AREIA	Kg	1684,34	1002,54	n/a
BRITA	Kg	2178	-	n/a
ÁGUA	Kg	374,76	120,85	n/a
FIBRAS	Kg	-	175,01	n/a
AÇO	Kg	143,76	-	n/a
FORMAS	m ²	18,73	16,37	14,40%
MÃO DE OBRA	Horas/homem	7	4	75%

Sustentabilidade:

Observa-se que a caixa em concreto convencional utilizou 124% a mais de concreto e 238% a mais de cimento, representando um custo financeiro importante além de um impacto ambiental considerável. Também foi necessário utilizar 14,4% de formas e 75% a mais de mão de obra para a confecção da caixa em concreto convencional.

Industrialização:

A execução de caixa constituída de compósito cimentício avançado apresentou maior facilidade de execução do que a caixa constituída de concreto armado, pois, como não é necessária armadura, foi somente necessário despejar o concreto. Como este compósito cimentício se comportou como um concreto autoadensável, não foi necessário vibrá-lo para obter a compactação necessária. A montagem das formas ocorreu da mesma maneira como na caixa de concreto armado, porém com as alterações das medidas.

8. Implementação do sistema

De modo a serem analisados os resultados obtidos na produção da caixa, optou-se por comparar o custo de fabricação e o peso do material com os que seriam obtidos para caixa convencional de concreto armado.

O custo para fabricação de uma caixa de concreto armado foi estimado em R\$ 2114,62, com base no valor atual dos materiais constituintes e também na mão de obra despendida pelos profissionais. O peso total da caixa é de 5205 kg. O custo para fabricação de uma caixa com compósito cimentício avançado foi estimado em R\$ 3.227,82, e o peso total da caixa é de 2322,5 kg.

Viabilidade da inovação:

Apesar do custo da caixa em compósito cimentício avançado ser maior ao da caixa de concreto armado, deve-se também analisar o custo com frete, pois com praticamente metade do peso é possível carregar o dobro de caixas de compósito cimentício em relação a caixas de concreto armado, mas isso deve ser considerado caso a caso.

Também deve-se levar em conta a durabilidade e a vida útil entre as duas caixas, onde o compósito cimentício avançado teoricamente se comporta melhor, pois, com elevada resistência a compressão e alta adição de sílica ativa e cinza, a penetração de agentes agressivos é extremamente dificultada. Outro fator importante que eleva a vida útil da caixa de compósito cimentício, se comparada com a caixa de concreto armado, é a extinção da armadura, mesmo sendo constituída com fibras de aço, pois, conforme estudos, a fibra não apresenta corrosão significativa em ambientes agressivos.

Impacto Social:

Considerando que compósito cimentício permite a execução de peças de seção mais esbeltas e mais leves do que o concreto convencional, a operação e o manuseio das peças é facilitada, diminuindo os riscos de acidente para os operários. A industrialização do processo também torna o ambiente de trabalho destes operários mais seguro e organizado, proporcionando uma melhor qualidade do ambiente de trabalho.

Considera-se, então, que o uso do compósito avançado CPR pode ser viável em diversas situações, como neste caso, sendo que este material pode se tornar uma excelente opção para a construção civil em um futuro próximo.