

PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM RESÍDUOS DE POLIURETANO TRITURADO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO

PRODUCTION OF CONCRETE WITH POST-CONSUMED CRUSHED PU IN SUBSTITUTION OF SAND

Wesley Batista Pereira¹
Simone Perruci Galvão²

RESUMO

A reutilização de materiais em potencial que outrora seriam encaminhados para aterros sanitários ou armazenados em locais incorretos, contribuindo com a poluição de cursos de água e influenciando no esgotamento sanitário das cidades e os mais variados danos ao meio ambiente e a população, é uma realidade cada vez mais atual. Entre estes materiais, destaca-se o polímero poliuretano (PU) em suas muitas variações, onde a sua reintrodução na cadeia produtiva traz vantagens socio-ambientais. O presente artigo apresenta uma análise comparativa entre um traço de concreto convencional e concretos com a substituições parciais do agregado miúdo por resíduos de poliuretano expandido triturado, proveniente de sucata de geladeiras, nos teores de 5% e 10%, substituídos em relação ao volume da areia, esse procedimento também foi realizado para um traço com adição de sílica ativa. Foram desenvolvidos dois traços pilotos um com sílica (CS) e outro sem sílica (SS). As propriedades dos concretos produzidos foram avaliadas, através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR 16889:2020), análises da resistência à compressão (NBR 5739:2018), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222:2011), massa específica e absorção de água (NBR 9778:2005). Os resultados obtidos a partir deste estudo demonstram que o aumento na quantidade de espuma de PU no concreto reduziu pouco significativamente a massa específica e reduziu a resistência mecânica da peça. Ressalta-se que a utilização da sílica ativa pode ser um diferencial na produção de concretos com agregados reciclados do tipo espuma de PU expandido, de modo que as resistências sejam mantidas.

Palavras-chave: Concreto. Poliuretano. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The reuse of potential materials that would otherwise be sent to landfills or stored in incorrect locations, contributing to the pollution of water courses and influencing the sewage system of cities and the most varied damages to the environment and the population, is a reality each more current. Among these materials, the polyurethane polymer (PU) stands out in its many variations, where its reintroduction into the production chain brings socio-environmental

¹ Tecnólogo da Construção Civil - Edificações - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho. 2021

² Doutora em Engenharia dos Materiais, UFPE; Professora Ajunta da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho

advantages. This article presents a comparative analysis between a mix of conventional concrete and concretes with partial replacements of fine aggregate by crushed expanded polyurethane waste, from refrigerator scrap, in 5% and 10% contents, replaced in relation to the volume of the sand, this procedure was also performed for a mix with the addition of silica fume. Two pilot traces were developed, one with silica (CS) and one without silica (SS). The properties of the concrete produced were evaluated through the slump test of the cone trunk (NBR 16889: 2020), analysis of compressive strength (NBR 5739: 2018), tensile strength by diametrical compression (NBR 7222:2011), mass specific and water absorption (NBR 9778:2005). The results obtained from this study demonstrate that the increase in the amount of PU foam in concrete reduced significantly the specific mass and reduced the mechanical strength of the part. It is noteworthy that the use of silica fume can be a differential in the production of concrete with recycled aggregates such as expanded PU foam, so that the resistances are maintained.

Keywords: Concrete. Polyurethane. Sustainability.

INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas que afetam a qualidade de vida nas grandes cidades e causa danos permanentes no meio ambiente é a quantidade de lixo gerado todos os dias, com contribuição especialmente de polímeros (ROSA; GUEDES, 2003). Portanto, os aspectos técnicos e científicos envolvidos para a reutilização de rejeitos são de grande importância para a minimização dos problemas ambientais. Assim, a reciclagem e a reutilização se tornam essenciais para o desenvolvimento sustentável, considerando que todo ser humano gera resíduos.

Para solucionar parte desse problema, materiais sintéticos passaram a ser investigados com o objetivo de substituir os materiais tradicionalmente usados para novos tipos de aplicação. (OLIVEIRA NETO; CHAVES; VENDRAMETTO, 2010).

Um desses materiais poliméricos que se tornam lixo pós uso é o poliuretano, também chamado de PU, que é uma classe razoavelmente versátil de polímero. Este polímero pode se apresentar tanto na forma de um termoplástico, termofixo, elastômero ou fibra, na forma expandida ou não, a depender da estrutura química e funcionalidade dos reagentes empregados na formulação do polímero. Entre as suas

diversas aplicações, tem-se o seu uso como revestimento térmico, em geladeiras e freezers (CANEVAROLO, 2002).

Um dos problemas do uso de espuma rígida de PU é que após o fim da sua vida útil, os resíduos devem ser destinados para aterros especiais de alto custo porque a incineração deste polímero é tóxica e o descarte arbitrário é proibido por lei, pois este material é agressivo para o meio ambiente. Desta forma, a empresa responsável por sua fabricação é obrigada a fornecer a disposição final em local apropriado. (MARIANO, 2009).

A espuma rígida de PU é composta por mais de 90% de ar e o restante de plástico o que torna economicamente inviável o reaproveitamento como matéria-prima para a realimentação de seu processo de produção. Outro procedimento que se torna demasiadamente caro é o aterro do material, o que se justifica pelo grande volume ocupado, devido à sua baixa densidade, bem como os seus 150 anos para decomposição (MAIA SIQUEIRA; STRAMARI; FOLGUERAS, 2004).

Assim, quando os resíduos não podem ser evitados, estes devem ser recuperados, reutilizados ou reciclados, de modo que o mínimo possível tenha como destino final os aterros industriais, aterros sanitários ou ainda o meio ambiente (BARCELOS et al., 2020).

Como todos os materiais orgânicos (naturais ou sintéticos), os poliuretanos queimam na presença de oxigênio e fogo.

A espuma de PU pode queimar se exposta a uma chama aberta formando CO₂ e óxidos de nitrogênio. Em um ambiente fechado, quando o teor de oxigênio no ar diminui é favorecida a formação CO, e traços de cianeto de hidrogênio (HCN), também conhecido como ácido cianídrico ou gás cianídrico (VILAR, 2002).

Segundo Vilar (2002), uma opção, para evitar a liberação de fumaça tóxica e inflamabilidade do material é adicionar hidróxido de alumínio ao PU ainda no seu processo produtivo.

Em um estudo realizado por Grijó e Baasch (2003), partindo do mesmo princípio citado anteriormente, foi adicionado o hidróxido de alumínio na produção blocos de concreto com resíduos de PU (proveniente de pranchas de surf). Este material foi ensaiado quanto à inflamabilidade e foi constatado que acima de 100 °C a alumina hidratada reagiu com o calor umedecendo as amostras, ao ponto de inibir a chama-piloto.

Desta forma a reutilização do PU para a produção de concretos torna-se possível, mantendo-se a integridade do ambiente caso seja exposto a uma situação de incêndio.

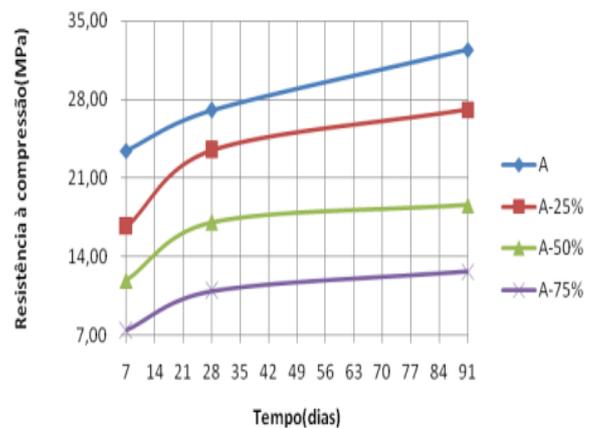
Os resíduos de PU propiciam ainda propriedades como a de isolante termo-acústico e quando misturados junto com cimento Portland CP V-ARI e areia, transferem esta característica aos blocos. GRIJÓ E BAASCH, 2003). Por este estudo constatou-se que, mesmo se utilizando a alumina hidratada, os resultados de resistência à compressão destes blocos, aos 28 dias, apresentaram resistências individuais superiores a 2,0 MPa seguindo exigência da norma NBR 6136 (ABNT, 2007).

Já em estudo desenvolvido por Mariano (2009), foi realizada a substituição da areia por espuma rígida de PU nas porcentagens de 75%, 50% e 25% relação ao volume da areia em 3 (três) traços

pilotos, para a produção de concretos com resistência à compressão de 20 MPa (traço A), 30 MPa (traço B) e 40 MPa (traço C).

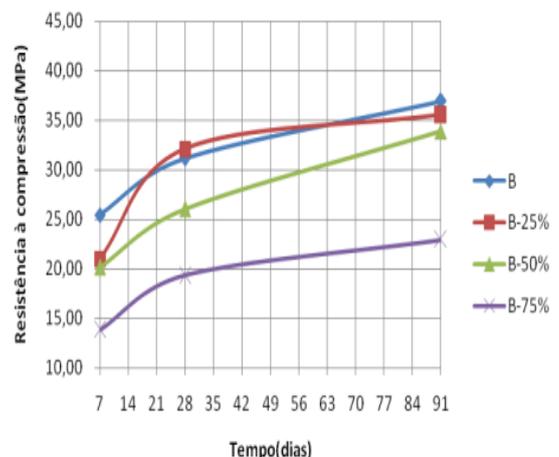
Os resultados do estudo de Marino (2009) apontaram que a substituição da areia natural, por espuma rígida de PU, em até 25%, é viável tecnicamente de acordo com a resistência à compressão axial, pois apresentaram fck superiores a 20 MPa, como pode ser visto nos Gráficos 1, 2 e 3.

Gráfico 1 – Ensaio de resistência à compressão para o traço A, nas idades de 7, 28 e 91 dias.



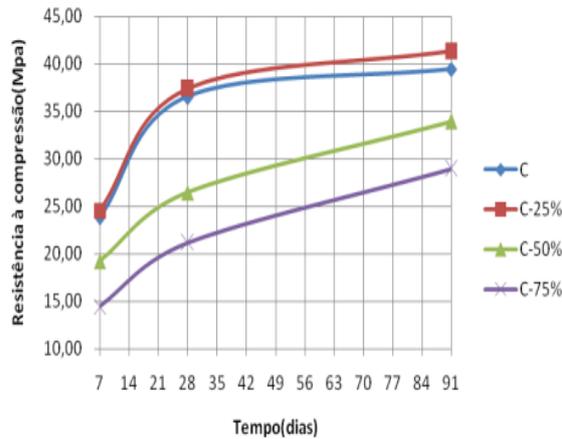
Fonte: Mariano (2009)

Gráfico 2 – Ensaio de resistência à compressão para o traço A, nas idades de 7, 28 e 91 dias.



Fonte: Mariano (2009)

Gráfico 3 – Ensaio de resistência à compressão para o traço A, nas idades de 7, 28 e 91 dias.



Fonte: Mariano (2009)

Logo, uma alternativa ecológica para recolocar a espuma rígida de poliuretano na cadeia produtiva e amenizar o problema da extração da areia é o seu uso na fabricação de concreto estrutural (MARIANO, 2009).

Porém, estudos devem ser aprofundados, se chegando a teores ideais deste material, de maneira a potencializar suas máximas propriedades nos estados fresco e endurecido, além da necessidade de testá-los quanto à resistência ao fogo e emissão de fumaças tóxicas.

No presente trabalho, espumas rígidas de poliuretano foram utilizadas na composição de concretos como alternativa de reintroduzir este material na cadeia produtiva, podendo trazer vantagens sociais e ambientais.

Este estudo é uma análise experimental das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, com a utilização da espuma de PU triturado, em substituição parcial da areia, avaliando o seu potencial para produção de concretos estruturais com menor massa específica. As espumas utilizados são aqueles provenientes dos descartes de refrigeradores e congeladores.

Neste estudo o efeito da adição mineral sílica ativa, na composição destes concretos, também foi testado, com o intuito de se avaliar o seu potencial no incremento da resistência do concreto quanto à introdução dos resíduos de PU e sua influência na redução da massa específica dos concretos.

A sílica ativa, conhecida também como sílica volatilizada, microssílica, ou fumo de sílica é um resíduo das indústrias de silício metálico e ligas de ferro metálico. Segundo estudo de Bianchini (2010) a adição de sílica aumenta a resistência do concreto à idade de 28 dias, segundo Metha e Monteiro (1994), os teores ideais para o uso são de 7% a 10%, em relação à massa do cimento.

METODOLOGIA

A partir do método de dosagem proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) foi determinado o traço piloto para obtenção de um concreto com resistência característica à compressão de 25 MPa. Posteriormente ao mesmo, foi introduzida ao traço a sílica ativa e a substituição de areia natural pela espuma rígida de poliuretano.

As normas utilizadas neste trabalho foram acessadas através da plataforma GEDWeb. Por serem de uso restrito para a comunidade da UFRPE, as normas referenciadas no estudo não estão com endereço eletrônico.

Materiais

Os materiais utilizados na confecção dos concretos estudados são citados a seguir.

Cimento:

O cimento (aglomerante hidráulico) utilizado na confecção do concreto foi o cimento CP-V ARI MAX (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), da marca Nacional.

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físico-químicas e da composição química do cimento fornecida pela concreteira que disponibilizou o material.

Tabela 1 – Ensaio Físicos e Químicos do Cimento Portland CPV - ARI MAX

CPV - ARI MAX		EXIGÊNCIAS ABNT	
ENSAIOS QUÍMICOS	RESULTADOS		
Resíduo Insolúvel - RI (%)	0,58	≤ 3,5	NBR NM 15
Perda ao Fogo - PF (%)	1,81	≤ 6,5	NBR NM 18
Óxido de Magnésio - MgO (%)	2,34	≤ 6,5	NBR 14656
Trióxido de Enxofre - SO ₃ (%)	4,35	≤ 4,5	NBR 14656
Óxido de Sódio - Na ₂ O (%)	0,05	-	NBR 14656
Óxido de Potássio - K ₂ O (%)	1,05	-	NBR 14656
Equivalente Alcalino - Na ₂ Oeq (%)	0,74	-	-
ENSAIOS FÍSICOS			
Área Específica (Blaine) (cm ² /g)	4.357	-	NBR 16372
Massa Específica (g/cm ³)	3,11	-	NBR 16605
Finura pela peneira 75 µm (%)	0,03	≤ 6,0	NBR 11579
Finura pela peneira 45 µm (%)	0,4	-	NBR 9202/85
Água de consistência da pasta (%)	33	-	NBR 16606
Início de pega (min)	152	≥ 60	NBR 16607
Fim de pega (min)	213	≤ 600	NBR 16607
Expansibilidade à quente (mm)	0,1	≤ 5	NBR 11582

Fonte: Supermix (2021)

Sílica ativa:

A sílica utilizada na confecção do concreto foi da marca Ferbasa, gentilmente doada pela concreteira Supermix, o qual foi introduzida ao concreto em substituição parcial à massa do cimento, no teor de 10% em massa.

O agregado miúdo (areia):

O agregado miúdo utilizado foi uma areia fina natural. A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NBR 9776 (ABNT, 1987), sendo obtido o valor de 2,78 g/cm³ e a massa unitária de 1,67 g/cm³ obtida através do método de volume conhecido, métodos atualizados

não foram usados por conta do material disponível para a execução do ensaio.

O agregado foi caracterizado quanto à sua distribuição granulométrica, segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003), constando a mesma na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição granulométrica da areia

PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA*		AGREGADO MIÚDO: AREIA NATURAL FINA		
		Massa: 1000g		
ABERTURA DAS MALHAS		MASSA MÉDIA	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
MM	pol/Nº	RETIDA (g)		
19,0	3/4"	0	0	0
12,5*	1/2"	0	0	0
9,5	3/8"	0	0	0
6,3	1/4"	0	0	0
4,75	4	0	0	0
2,36	8	15,00	2	2
1,18	16	87,42	9	10
600 MM	30	242,18	24	34
300 MM	50	339,05	34	68
150 MM	100	175,85	18	86
FUNDO	-	140,25	14	100
TOTAL		999,75	100	-
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA: ABNT NBR NM 248:2003		2,36 mm		
MÓDULO DE FINURA: ABNT NBR NM 248:2003		2,01		

Fonte: Autor (2021)

Agregados graúdos:

Os agregados graúdos (brita 0 e brita 1) foram provenientes do pátio da concreteira Supermix.

A verificação da massa específica foi realizada de acordo com a NM 53 (ABNT, 2009), sendo obtido o valor de 2,75 g/cm³ e 2,77 g/cm³ respectivamente.

A brita 0 (B0) foi caracterizada quanto à sua distribuição granulométrica, segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003), constando a mesma na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição granulométrica da B0

PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA*		AGREGADO GRAUDO: BRITA 0		
		Massa: 1000g		
ABERTURA DAS MALHAS		MASSA MÉDIA RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
MM	pol/Nº			
19,0	3/4"	0	0	0
12,5*	1/2"	39,16	2	2
9,5	3/8"	475,6	24	26
6,3	1/4"	738,36	37	63
4,75	4	409,84	20	83
2,36	8	310,86	16	99
1,18	16	8,4	0	99
600 MM	30	1,45	0	99
300 MM	50	3,95	0	99
150 MM	100	2,4	0	100
FUNDO	-	9,4	0	100
TOTAL		1999,42	100	-
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA: ABNT NBR NM 248:2003		12,5 mm		
MÓDULO DE FINURA: ABNT NBR NM 248:2003		6,05		

Fonte: Autor (2021)

A Brita 1 (B1) foi caracterizada quanto à sua distribuição granulométrica, segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003), conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Composição granulométrica da B1.

PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA*		AGREGADO GRAUDO: BRITA 1		
		Massa: 3000g		
ABERTURA DAS MALHAS		MASSA MÉDIA RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
MM	pol/Nº			
31,5*	1 1/4"	0	0	0
25,0*	1"	0	0	0
19,0	3/4"	283,22	9	9
12,5*	1/2"	2187,43	73	82
9,5	3/8"	423	14	96
6,3	1/4"	95	3	100
4,75	4	4,12	0	100
2,36	8	0,25	0	100
1,18	16	0,15	0	100
600 MM	30	0,75	0	100
300 MM	50	1,80	0	100
150 MM	100	3,20	0	100
FUNDO	-	0,58	0	100
TOTAL		2999,50	100	-
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA: ABNT NBR NM 248:2003		19 mm		
MÓDULO DE FINURA: ABNT NBR NM 248:2003		7,05		

Fonte: Autor (2021)

Água:

A água para a produção dos concretos foi água potável disponível na rede de abastecimento (Compesa), a qual é considerada adequada para esse uso.

Poliuretano:

A espuma de PU utilizado é oriundo do enchimento do corpo e da porta de um refrigerador. O refrigerador foi desmontado e a espuma resultante, na forma de placas de PU foi retirado.

Em seguida, as placas foram trituradas utilizando um de liquidificador e em seguida o resíduo foi peneirado e separado em determinadas granulometrias, fazendo uma adaptação da NBR NM 248 (ABNT, 2003), os resultados do ensaio de granulometria deste material consta na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição granulométrica do PU

PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA*		AGREGADO MIUDO: PU		
		Massa: 70,66g		
ABERTURA DAS MALHAS		MASSA MÉDIA RETIDA (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
MM	pol/Nº			
31,5*	1 1/4"	0	0	0
25,0*	1"	0	0	0
19,0	3/4"	0	0	0
12,5*	1/2"	0	0	0
9,5	3/8"	0	0	0
6,3	1/4"	0	0	0
4,75	4	15,60	22	22
2,36	8	40,10	57	79
1,18	16	10,96	21	100
600 MM	30	0	0	100
300 MM	50	0	0	100
150 MM	100	0	0	100
FUNDO	-	0	0	100
TOTAL		70,66	100	-
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA: ABNT NBR NM 248:2003		4,75 mm		
MÓDULO DE FINURA: ABNT NBR NM 248:2003		5,01		

Fonte: Autor (2021)

Ao final do processo, o PU pronto para ser inserido na matriz cimentícia pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Resíduos de PU triturados.



Fonte: Autor (2021)

O poliuretano foi substituído nos teores de 5% e 10%, em relação ao volume do agregado miúdo.

Para a produção de todos os traços de concretos ainda foi utilizado um aditivo químico superplastificante, do tipo Sika ViscoCrete-100 HE, na proporção de 0,2% sobre o peso dos aglomerantes. Este aditivo, segundo dados do fabricante, promove alta resistência inicial e melhoria no tempo de trabalhabilidade. Adequado para cimentos com baixo teor de adição, como CPII e CPV ARI.

Produção e caracterização do concreto

Com a caracterização dos agregados graúdos e miúdos, foram definidos os traços piloto para elaboração dos concretos com base no método de dosagem da ABCP, para uma Fck de 25 MPa e abatimento de 70mm.

Para os traços com adição mineral foi feita a substituição de 10% do cimento, pela sílica ativa, em relação à massa do cimento.

Foram usados dois agregados graúdos, a brita 0 e brita 1, nas proporções de 30% e 70%, respectivamente.

Na Tabela 6, encontra-se os traços pilotos unitários, em massa, sem sílica (SS) e com sílica ativa (CS).

Tabela 6 - Traços pilotos com e sem sílica (Kg).

Traço	SS	CS
Cimento	1	0,9
Sílica	0	0,1
Areia	2,16	2,16
Brita 0	0,95	0,95
Brita 1	2,21	2,21
Água	0,56	0,56

Fonte: Autor (2021)

Os concretos foram elaborados com os agregados na condição seca na estufa.

Em seguida, utilizando o traço SS, a areia foi substituída pela espuma rígida de PU expandido reciclado e triturado, nas porcentagens de 5% e 10%, em volume, conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 – Traços sem sílica com substituição parcial da areia por PU (Kg).

Traço	SS5	SS10
Cimento	1	1
Areia	2,05	1,95
PU	0,00124	0,00249
Brita 0	0,95	0,95
Brita 1	2,21	2,21
Água	0,56	0,56

Fonte: Autor (2021)

O mesmo foi feito para o traço CS, conforme a Tabela 8:

Tabela 8 - Traços com sílica com substituição parcial da areia por PU (Kg).

Traço	CS5	CS10
Cimento	0,9	0,9
Sílica	0,1	0,1
Areia	2,05	1,95
PU	0,00124	0,00249
Brita 0	0,95	0,95
Brita 1	2,21	2,21
Água	0,56	0,56

Fonte: Autor (2021)

Em função da massa específica do agregado PU ser muito leve ($0,032\text{g/cm}^3$),

realizou-se a substituição de agregado miúdo por agregado leve, em volume.

Para o cálculo da massa do PU triturado para substituir as porcentagens da massa de agregado miúdo da mistura, nos respectivos teores de 5 e 10%, em volume, fez-se uso da Equação (Eq. 01).

$$mpu = mare * \frac{\gamma_{pu}}{\gamma_{are}} \quad (\text{Eq. 01}).$$

Onde:

mpu: Massa de agregado miúdo leve (Kg);

mare: Massa de agregado da areia (Kg)

γ_{pu} : Massa específica do agregado miúdo leve (g/cm^3),

γ_{are} : Massa específica da areia (g/cm^3)

Na Tabela 9, encontra-se as massas de areia e resíduos de PU triturado necessário para substituição do agregado miúdo no traço rodado de 6 kg de cimento.

Tabela 9 – Areia e PU necessários para o preparo de concreto com 6kg de cimento.

Teor de PU	Areia (kg)	PU triturado (kg)
0%	12,96	-
5%	12,312	0,00746
10%	11,624	0,01492

Fonte: Autor (2021)

Para a execução das misturas, no início foi feita uma argamassa na proporção do traço, para “imprimir” a betoneira.

Em seguida foram colocados os agregados graúdos e o PU na betoneira em movimento, com 1/3 (um terço) da água, seguindo pela inserção do cimento, mais 1/3 (um terço) da água, por um tempo de (1) um minuto.

Por último, foi acrescentada a areia e o resto da água. O concreto foi misturado durante 3 minutos, com volume de 17 litros de concreto por traço produzido. O tempo total da mistura foi de 5 minutos.

Após o preparo dos traços de concreto, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco cone que procedeu-se seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2020). Foram moldados 8 CPs para cada traço produzido, ao todo foram produzidos 6 diferentes traços, totalizando 48 corpos de prova (CPs), com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova de concreto, foram feitas as desformas. A partir de então, os CPs foram submetidos a cura em tanque saturado com hidróxido de cálcio até data de ensaios. A moldagem e cura de CP's foram feitas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Métodos

As moldagens e os traços adotados neste trabalho foram desenvolvidos e realizados no Laboratório de Geotecnia e Tecnologia do Concreto, da empresa JOVEN Engenharia.

As propriedades do concreto foram analisadas nos estados fresco e endurecido. No estado fresco, foi analisada a propriedade de consistência, a partir do ensaio de abatimento pelo tronco cônico (slump test), de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020).

As quantidades dos materiais para cada traço foram determinadas para 17 dm^3 e ajustadas conforme o volume de concreto utilizado, sendo suficiente para preencher 8 corpos de prova de 10 cm x 20 cm.

Foram preparados 4 CPs para ensaios de resistência à compressão axial simples NBR 5739 (ABNT, 2018), um par foi rompido aos 7 dias e outro na idade de 28 dias.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011) foi realizado aos 28 dias, utilizando 2 CPs por situação.

Os ensaios de massa específica e capacidade de absorção de água foram determinados aos 21 dias, com 2 CPs por situação de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

Os corpos de provas foram ensaiados em uma prensa hidráulica, modelo PC 100 C EMIC, com capacidade de carga de 20 toneladas.

A massa específica foi obtida através da fórmula 2 (Eq. 02) de acordo com a NBR 9778 (2005).

$$\rho S = \frac{ms}{msat - mi} \quad (\text{Eq. 02})$$

Fonte: ABNT (2005).

Onde:

msat: É a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms: É a massa da amostra seca em estufa;

mi: É a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação 3 (Eq. 03) de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (\text{Eq. 03})$$

f_{ct,sp}: é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

F: é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d: é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l: é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Os valores obtidos, resultantes dos ensaios realizados com a substituição da areia pela espuma rígida expandida de PU triturada, foram comparados com o resultado dos ensaios dos traços pilotos convencionais e com adição mineral a fim de avaliar as influências destas modificações para verificação da viabilidade da substituição proposta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

A consistência do concreto foi determinada conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), sendo os resultados apresentados na Tabela 10.

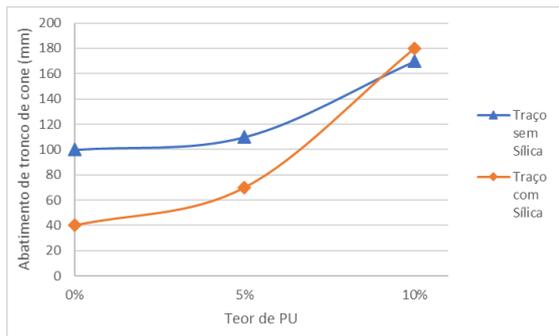
Tabela 10 - Resultados de consistência pelo abatimento do tronco de cone- slump test.

Traços	Teor de PU (%)	Abatimento (mm)
SS	0	100
SS5	5	110
SS10	10	170
CS	0	40
CS5	5	70
CS10	10	180

Fonte: Autor (2021)

Apenas o concreto CS5, apresentou o slump designado pelo método de dosagem. Percebe-se que também há um aumento no abatimento com o crescimento do teor de substituição da areia pelo PU (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Ensaio abatimento de tronco de cone.



Fonte: Autor (2021)

A introdução do aditivo superplastificante permitiu esta variação do abatimento para mais, no caso dos concretos sem a sílica ativa.

Os concretos com a sílica ativa na composição dos traços, mesmo com a introdução do aditivo, apresentaram valores no slump inferiores ao sem sílica, exceto o concreto CS10. A introdução de um material de menor dimensão dos grãos e maior finura, como é o caso da sílica ativa, propicia este menor abatimento. Logo, a adição mineral utilizada permitiu uma maior coesão da mistura e consequentemente influenciou na consistência.

Quanto ao maior abatimento quando adicionado o PU, em substituição à areia, segundo Mariano (2009), que também obteve crescimento do slump, ao aumentar o teor de PU à mistura, alega que a provável causa desse evento pode ser justificada pelo material de PU ter baixa absorção de água em comparação com a areia, resultando em mais água livre na mistura e resultando, consequentemente, em uma consistência mais fluida.

A diferença nos slumps dos concretos produzidos, podem ser visualizados nas Figuras 2 (a, b) a seguir.

Figura 2 - Ensaio de consistência: a) verificação de abatimento do traço SS. b) verificação de abatimento do traço CS10.



a)

b)

Fonte: Autor (2021)

Determinação da massa específica do concreto

A massa específica do concreto endurecido foi determinada conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Através da fórmula de massa específica obtiveram-se os resultados constantes na Tabela 11.

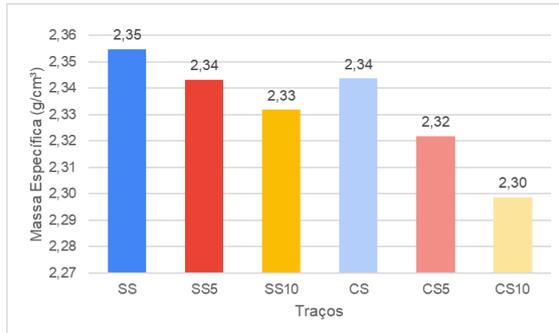
Tabela 11 - Resultados de Massa Específica aos 21 dias de idade.

Traços	Massa Específica (g/cm ³)
SS	2,35
SS5	2,34
SS10	2,33
CS	2,34
CS5	2,32
CS10	2,30

Fonte: Autor (2021)

O resultado das massas específicas obtidas indica que a introdução do PU no concreto, propicia uma tendência de redução de seus valores, em relação aos traços pilotos com e sem sílica (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Comparação das massas específicas em g/cm³ (aos 21 dias de idade).



Fonte: Autor (2021)

As diferenças entre as massas específicas foram mínimas, pouco significativas. Este comportamento pode ter sido oriundo do grande volume de agregados graúdos, em relação à quantidade de agregado miúdo na mistura. Outra probabilidade, é a quantidade de PU utilizado na mistura não ter sido suficientes para reduzir a massa específica.

Siqueira, Stramari e Folgueras, (2004), em seu estudo para confecção de blocos com adição de 5 e 10%, em massa, de cimento pelo PU, os autores observaram uma boa redução de peso para os CPs com 10% de PU, mas os mesmos foram descartados devido a sua baixa resistência. Já os que possuem 5% do resíduo, em massa, adquiriram resistência compatíveis para serem utilizados na fabricação de blocos. Entretanto, a redução do peso também não foi tão significativa, não atingindo as expectativas iniciais do projeto. O que mostra uma tendência próxima ao que foi obtido neste trabalho, apesar dos teores em substituição terem sido em massa, ou seja, em maior valor do que utilizados neste trabalho.

No estudo de Vieira et al (2017), com a utilização do PU para confecção de pisos intertravados, foram definidos três tipos de proporções de amostras, sendo elas

em 10, 20 e 30%, em substituição à massa de areia.

Os autores constataram uma redução de peso significativa quando empregados teores de 20% e 30%, em substituição. Estes valores foram de 17,5% e 21,26%, respectivamente.

No entanto, algumas considerações foram ponderadas pelos autores em relação às variáveis que podem alterar os resultados de densidade da massa, como, por exemplo: o grau de compactação do PU e umidade da mistura e quantidade, tamanho e absorção do PU.

Absorção

A absorção do concreto rígido foi determinada conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Através da fórmula de absorção obtiveram-se os seguintes resultados como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados de Absorção aos 21 dias de idade.

Traços	Absorção (%)
SS	2,68
SS5	3,78
SS10	4,18
CS	3,46
CS5	3,95
CS10	4,61

Fonte: Autor (2021)

Com a adição de PU, a taxa de absorção de água do concreto aumenta e, quanto maior o seu teor, mais água é absorvida.

Siqueira, Stramari e Folgueras, (2004), em seu estudo obteve resultados semelhantes (Tabela 13). Segundo os autores desse estudo, a absorção tem uma relação direta com a redução de peso. Assim, quanto maior a absorção de água, maior a porosidade do material e menor o peso da peça. O motivo desse acontecimento pode ser justificado pelo excesso de água no concreto, propiciada

pela baixa absorção do material PU, que ao evaporar a água, gera capilaridade.

Tabela 13 - Comparativo entre a redução de peso e a absorção das peças.

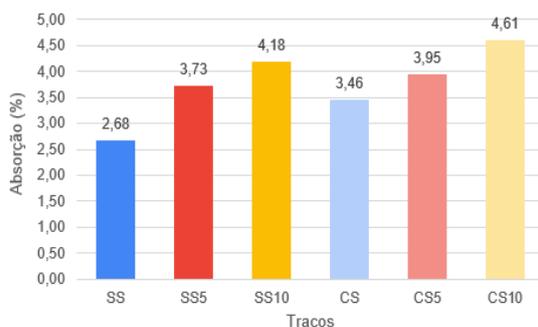
CP	Peso (g)	Redução de peso (%)	Absorção (%)
Padrão (sem PU)	3320	-	9,58
Com 5% de PU3	2982	11,33	12,20
Com 10% de PU3	2410,2 5	37,75	21,06
Com 5% de PU2	2983,2 5	11,29	12,19
Com 10% de PU2	2564,2 5	29,47	19,30

Fonte: Siqueira, Stramari e Folgueras (2004)

Os concretos com sílica ativa tenderam a absorver mais água em relação ao concreto sem sílica ativa. A sílica ativa tende a refinar tamanho de poros e dos grãos e aumentar a densidade da matriz, porém neste estudo, notou-se que apesar de toda esta contribuição a adição não conseguiu alterar de maneira relevante a estrutura física da pasta de maneira a interferir na absorção total de água. Talvez estes efeitos sejam potencializados na idade dos 91 dias, devido as reações pozolânicas ocorrerem em idades mais avançadas.

Esses resultados podem ser observados no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Comparação do teor de absorção em porcentagem (aos 21 dias de idade).



Fonte: Autor (2021)

O comportamento das amostras de concreto analisadas neste trabalho, teve uma tenência parecida ao trabalho de Siqueira, Stramari e Folgueras (2004), quando relacionado a absorção com a massa específica.

Determinação de Resistência à Compressão

A resistência à compressão foi determinada conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

Os Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados da resistência à compressão com rupturas dos corpos de prova feitas aos 7 e 28 dias, para os traços SS e CS, e substituições da areia pelos resíduos de espuma rígida de PU, nos teores de 5% e 10%, para cada traço.

Todos os concretos moldados, apresentaram resistências superiores aos 25 MPa. Houve um crescimento de 8%, em média, nas resistências à compressão entre as idades de 7 e 28 dias, para os concretos sem sílica (Tabela 14).

Tabela 14 - Resultados de resistência à compressão para o traço sem sílica.

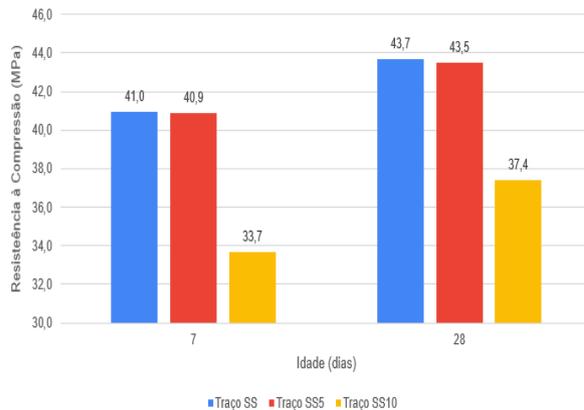
Traços	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
SS	7	41,0
	28	43,7
SS5	7	40,9
	28	43,5
SS10	7	33,7
	28	37,4

Fonte: Autor (2021)

As resistências do traço com o PU foram menores a medida em que houve o aumento do percentual de substituição da areia pelo PU. Para o traço SS5 a diferença foi de 0,5% na resistência, enquanto que para o traço SS10 esta perda foi de cerca de 14%, em relação ao traço de referência.

Com os dados do Tabela 14 foi possível elaborar o gráfico de Resistência à Compressão Axial x Tempo (Gráfico 7).

Gráfico 7 – A resistência à compressão do traço sem sílica.



Fonte: Autor (2021)

No caso dos concretos confeccionados com a sílica ativa (Tabela 15) houve um acréscimo relevante em relação à resistência à compressão, entre as idades de 7 e 28 dias. Os traços CS, CS5 e CS10 tiveram crescimento de 24,0%, 24,4% e 25,7% respectivamente. Aos 28 dias, os concretos com sílica ativa e PU, apresentaram resistências à compressão superiores aos concretos sem a sílica ativa.

Tabela 15 – Resultados de resistência à compressão para o traço com sílica.

Traços	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
CS	7	38,4
	28	47,6
CS5	7	35,3
	28	43,9
CS10	7	33,3
	28	41,8

Fonte: Autor (2021)

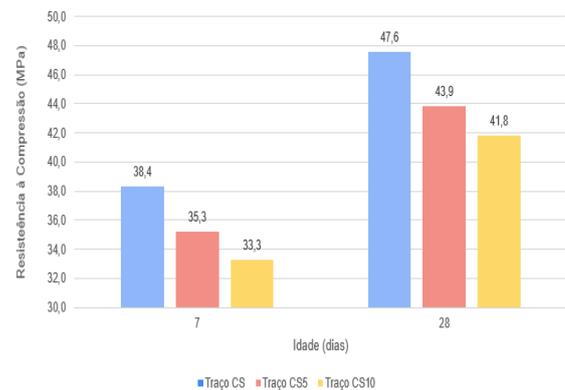
Em seus estudos com a utilização da sílica ativa, Silva (2016) e Bianchini (2010) também obtiveram resultados em que o ganho de resistência foi mais acentuado para as amostras ensaiadas aos 28 dias, em comparação a idades inferiores.

As resistências para cada traço com sílica ativa diminuíram na medida em que

houve aumento de substituição da areia pelo PU. Para o traço CS5 a diferença foi de 8%, na resistência, já o traço CS10 diminui cerca de 12%, em relação ao traço de referência, na idade de 28 dias.

Com os dados do Tabela 10 foi possível elaborar o gráfico de Resistência à Compressão Axial x Tempo (Gráfico 8).

Gráfico 8 – A resistência à compressão do traço com sílica.



Fonte: Autor (2021)

Analisando os Gráficos 7 e 8, onde se tem o resultado dos ensaios de resistência à compressão axial para os traços SS e CS e suas substituições de areia por espuma rígida de PU, pode-se concluir que quanto maior quantidade de PU no traço, menor será a resistência à compressão, porém ao adicionar sílica ativa ao concreto obtém-se maiores resultados na idade de 28 dias.

Os traços com sílica ativa em comparação com os traços sem sílica, apresentaram resultados de resistência a compressão maiores em: 8,8%, 0,8% e 11,8%, para os traços com substituição de 0%, 5% e 10% de espuma de PU, respectivamente.

Determinação de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada

conforme a norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

As Tabelas 16 e 17, que estão apresentadas graficamente nos Gráficos 9 e 10, apresentam os resultados dos ensaios da resistência à tração por compressão diametral (fct,sp) dos concretos dosados com e sem sílica ativa e com a presença da espuma de PU nos teores de 0, 5 e 10%, na idade de 28 dias.

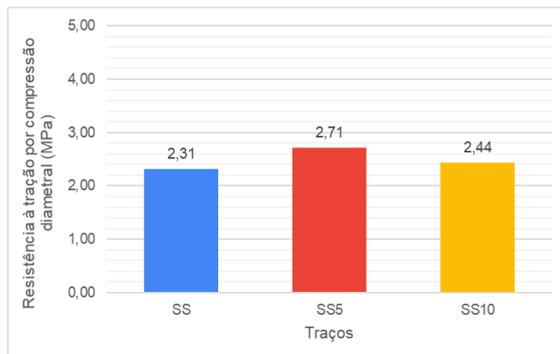
Tabela 16 - Resistência à tração por compressão diametral para o traço sem sílica.

Traços	Resistências à tração por compressão diametral (MPa)
SS	2,31
SS5	2,71
SS10	2,44

Fonte: Autor (2021)

Para facilitar a comparação, o Gráfico 9 apresenta a resistência à tração do concreto sem sílica.

Gráfico 9 – Resistência à tração por compressão diametral para o traço sem sílica.



Fonte: Autor (2021)

Nota-se um pequeno crescimento da resistência à tração do concreto, quando adicionado o PU, sendo mais evidente no traço com 5% do PU, em substituição à areia, com um acréscimo de 14% nesta resistência.

No caso das amostras com 5% do polímero, este crescimento no resultado de resistência a tração, pode ser explicado, devido a capacidade do Polímero em

absorver mais os esforços desta natureza, em relação aos agregados cerâmicos, repercutindo sob as propriedades deste compósito. Porém, nota-se que a resistência à compressão das amostras com o polímero e sem o polímero foram muito próximas. Como a resistência à tração é cerca de 10% da resistência à compressão, no caso dos concretos (MARIANO, 2009), este efeito pode ser observado nos resultados apresentados.

Na amostra SS10, a pior qualidade da matriz, devido a maior introdução do polímero, pode ter exercido um efeito maior que o do benefício do polímero. A menor resistência à compressão foi detectada nesta amostra, em relação à SS5, fortalecendo esta ideia.

O incremento da resistência à tração com a utilização de polímeros foi constatado no trabalho de Bussolo (2020), no entanto este autor utilizou o poliestireno expandido (EPS), como agregado em argamassa.

Quando utilizada a sílica ativa na composição dos traços, não foi observado o incremento da resistência com a introdução do PU (Tabela 17). Porém, os resultados foram maiores em relação às amostras sem a sílica ativa. Provavelmente neste caso, o efeito da qualidade da matriz cimentícia não foi superior às propriedades desenvolvidas pelo poliuretano no compósito.

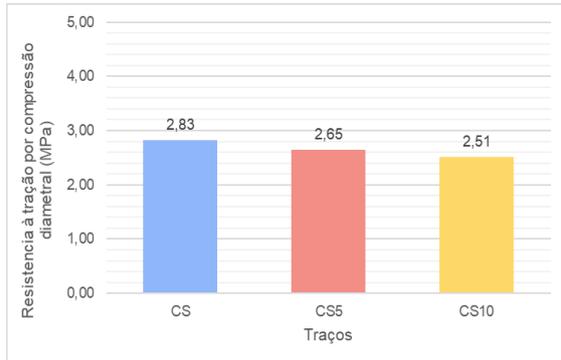
Em relação aos traços sem a sílica, pode-se perceber que os traços CS e CS10 obtiveram um melhor desempenho à tração.

Tabela 17 - Resistência à tração por compressão diametral para o traço com sílica.

Traços	Resistências à tração por compressão diametral (MPa)
CS	2,83
CS5	2,65
CS10	2,52

Fonte: Autor (2021)

Gráfico 10 – Resistência à tração por compressão diametral para o traço com sílica.

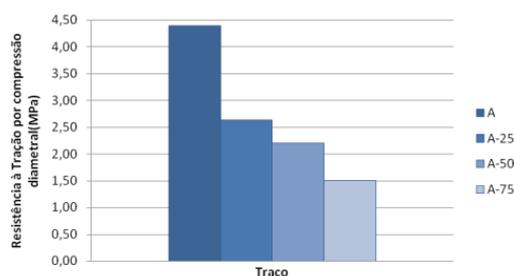


Fonte: Autor (2021)

No concreto com a adição de sílica é possível observar as resistências à tração, dos diferentes concretos, possuem uma relação diretamente proporcional com a resistência à compressão, apresentando um pequeno decréscimo com o aumento do teor de PU na mistura.

Estes dados estão de acordo com o trabalho de Mariano (2009), por este trabalho observa-se que, quanto maior quantidade de PU no traço, menor será a resistência à tração. Isto pode ser observado no Gráfico 11, onde são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral para os traços sem substituição por espuma de PU (traço A), com substituição de 25%, 50% e 75% (traços A25%, A50% e A75%).

Gráfico 11 – Resistência à tração por compressão diametral para os traços A, A25%, A50% e A75%.



Fonte: Mariano (2009)

Analisando cada traço individualmente, é possível dizer que todos alcançaram valores dentro do esperado, ou seja, entre 5% a 10% do valor da resistência à compressão.

CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados neste estudo sobre produção de concretos com resíduos de poliuretano triturado em substituição ao agregado miúdo podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

- A espuma rígida de PU, em substituição à mesma proporção do volume de areia, na elaboração do concreto, alterou a trabalhabilidade da mistura. Houve um aumento do abatimento de acordo com o acréscimo de teor de PU na mistura.
- Ocorreram perdas na resistência mecânica do concreto com a substituição da areia pela espuma rígida de PU, essas perdas foram maiores quanto houve aumento no teor da espuma adicionada;
- Em relação aos ensaios de compressão axial verifica-se que a resistência diminuiu com o teor de espuma de PU adicionada ao concreto, tanto para amostras com 7 dias de idade quanto para amostras com 28 dias.
- Quanto à resistência à tração, verifica-se que os resultados nos traços sem o uso sílica apresentaram crescimento com o teor de PU adicionado, diferente do traço com sílica que quanto maior quantidade de PU no traço, menor foi o resultado de resistência à tração.

A razão para o decréscimo da resistência mecânica é a influência do próprio PU, que é um material alta

deformabilidade quando exposto a esforços de compressão. E provavelmente menor aderência da pasta ao agregado, que cria uma interface de baixa resistência gerando pontos de fragilidade no concreto.

Cabe destacar que houve um crescimento da resistência de 7 para 28 dias, sendo mais acentuada para as amostras ensaiadas com sílica. Comparando os crescimentos para as amostras sem sílica: SS, SS5 e SS10, os acréscimos são de: 6,7%, 6,4% e 11,0%, respectivamente. Já para as amostras modificadas com sílica: CS, CS5 e CS10, os acréscimos são de 24,0%, 24,4% e 25,7%, respectivamente.

No estudo da resistência à tração por compressão diametral, as composições sem sílica e com espuma rígida de PU, apresentaram resultados de tração superiores aos respectivos traços sem substituição de PU. Ao acionar um elemento polimérico à matriz cimentícia o resultado foi um concreto com melhor capacidade de deformação, provavelmente. No entanto, este efeito não foi evidenciado nas amostras com a sílica ativa, apresentando um comportamento não esperado. Neste caso, o polímero influenciou negativamente, necessitando-se portanto, de estudos mais específicos para se entender a causa, entre estes, uma análise microestrutural.

De acordo com os resultados obtidos, como todos os traços realizados, alcançaram resistências à compressão acima de 35 Mpa, aos 28 dias. Todos podem ser empregados para a produção de concretos estruturais.

Porém, estudos adicionais precisam ser realizados, levando-se em consideração a resistência deste material para uma dada situação de incêndio e na produção de fumaças tóxicas.

Deste modo conclui-se que, o resíduo de poliuretano reciclado é um material que pode ser aproveitado no concreto. Sua utilização é desejável do ponto de vista ecológico, por aumentar a vida útil de um resíduo tóxico que poderia estar exposto no meio ambiente e poder ainda substituir parcialmente a areia natural, na produção de concretos, evitando-se a necessidade de se extrair mais material de um recurso natural não renovável.

A utilização do PU é viável do ponto de vista técnico, desde que os traços de concreto sejam bem dosados e tenham um bom controle tecnológico na sua produção, avaliando-se as propriedades pretendidas para o concreto dosado.

Assim, esta experiência está sendo exposta com o intuito de atingir o interesse das empresas geradoras de resíduos na forma de espuma de poliuretano, sobre a necessidade de sua destinação final. Além de abrir portas para a utilização de um agregado leve ainda pouco comentado.

Como recomendações para trabalhos futuros é indicado um estudo com a utilização de diferentes frações e diâmetros de agregado graúdo na composição dos traços do concreto, em conjunto à introdução de PU, afim de se chegar aos teores ideais de cada material para uma dada propriedade. Além de se indicar o uso do hidróxido de alumínio, na composição destes traços, e verificar a sua influência nas propriedades do concreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. 2011

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria. Requisitos. Rio de Janeiro, 2007

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9776**: Determinação da massa específica de

agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

BARCELOS, R. L., CUBAS, A. V., AGUIAR, A. R., SILVA, L., LERIPIO, A. A., MAGNAGO, R. F. Confeção e Avaliação das Propriedades de Placas de Poliuretano com Aproveitamento de Resíduo da Fabricação de Pranchas. **5Th International Workshop Advances In Cleaner Production – Academic Work**, São Paulo, p. 1 – 10. 2020. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/fifth/files/sexoes/6A/7/barcelos_rl_et_al_academic.pdf. Acesso em: 13 ago. 2021.

BIANCHINI, Mauricio. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. 2010. Dissertação (Pós-Graduação em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/24035>. Acesso em: 26 nov. 2021

BUSSOLO, C. de S. et al. **Influência do uso de poliestireno expandido (EPS) como agregado em argamassa**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218786>. Acesso em 03 set. 2021

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros** / Sebastião V. Canevarolo Jr. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

GRIJÓ, P.E.A., BAASCH, S.S.N., Estudo para usos dos dejetos da indústria do surf. **Saneamento Ambiental**, nº 100, p. 42-47, 2003. Disponível em: <http://docplayer.com.br/10843342-Estudo->

[para-uso-dos-dejetos-da-industria-do-surf.html](#). Acesso em 07 ago. 2021.

MAIA SIQUEIRA L. V.; STRAMARI M. M. R.; FOLGUERAS V. Adição de Poliuretano Expandido para a Confeção de Blocos de Concreto Leve. **Revista Matéria**, v. 9, n. 4, pp.399 – 410, 2004. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10607/>. Acesso em: 09 ago. 2021.

MARIANO, Salma Seleme. **Avaliação do efeito da substituição da areia por espumas rígidas pós-consumidas de poliuretano nas propriedades do concreto de cimento portland**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009 Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/25811>. Acesso em: 09 ago. 2021.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo JM; CARMONA FILHO, Antônio. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini, 1994.

OLIVEIRA NETO, G. C. de; CHAVES, L. E. de C.; VENDRAMETTO, O. Vantagens econômicas e ambientais na reciclagem de poliuretano em uma empresa de fabricação de borracha. **Exacta**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 65-80, 2010. Disponível em <https://www.redalyc.org/pdf/810/81015201008.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2021.

ROSA, D. S.; GUEDES, C. G. F. Reciclagem de resíduo industrial de poliuretano, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 13, nº 1, p. 64-71, 2003. Disponível em: <https://www.revistapolimeros.org.br/journal/polimeros/article/doi/10.1590/S0104-14282003000100012>. Acesso em 13 set. 2021.

SILVA, J. H. da. **Influência da adição de sílica ativa sobre a resistência mecânica e a tenacidade à fratura de concretos de**

cimento portland para utilização em pavimentos rígidos rodoviários - Natal, RN, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21471>. Acesso em: 05 nov. 2021.

VIEIRA, Carla da C. et al. Estudo sobre o Tratamento e Destinação de Rejeitos de Poliuretano. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 12, n. 12, p. 31-34, 2017. Disponível em: <https://revista.pgsskroton.com/index.php/rcext/article/view/5453>. Acesso em: 09 ago. 2021.

VILAR, W. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. 3 ed., Rio de Janeiro, 2002.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que colocam a educação dos filhos como prioridade.

Aos meus amigos que me entendem e me acompanharam nessa aventura.

À orientadora Prof^ª Simone Perruci Galvão pelos conselhos dados e por ter me guiado no estudo.

A todos os funcionários da Empresa JOV Engenharia que me auxiliaram na execução dos ensaios.

À empresa Supermix pela doação dos materiais.