



AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGLOMERANTE NA CONFEÇÃO DE CONCRETOS POR RESÍDUOS VÍTREOS

Ana Beatriz Guimarães Leonel¹, Anna Caroline do Nascimento Souza², Daniel Garla Pismel³,
Vitor Aranda Selverio⁴, Silvia Paula Sossai Altoé⁵

¹ Acadêmica de Engenharia Civil, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. ra111525@uem.br

² Acadêmica de Engenharia Civil, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. ra111528@uem.br

³ Acadêmico de Engenharia Civil, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. ra109818@uem.br

⁴ Acadêmico de Engenharia Civil, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. ra111529@uem.br

⁵ 2Docente, Doutora, Orientadora, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá. spsaltoe@uem.br

RESUMO

O cimento é um aglomerante hidráulico, utilizado na fabricação de concretos e argamassas, presente em praticamente todas as edificações que compõem as cidades do Brasil e do mundo. Esse tipo de aglomerante é produzido em quantidades elevadíssimas, o que contribui para o aumento da extração de recursos naturais, do gasto energético e da emissão de CO₂. Para reduzir estes impactos e reduzir os custos de produção a indústria cimenteira passa a adotar as adições na fabricação. Vários resíduos vêm sendo estudados para essa finalidade, através da substituição parcial, como é o caso dos resíduos vítreos. Esta alternativa diminui a demanda de cimento, dá uma destinação adequada aos rejeitos vítreos, e tem melhorado o desempenho do concreto. Neste trabalho, avaliamos as propriedades mecânicas do concreto em relação a porcentagem de substituição parcial do aglomerante por pó de vidro. Os traços terão teores variáveis de substituição. A partir dessa composição serão confeccionados corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, todos os traços serão comparados com um traço de referência, produzido sem adição do resíduo. No que diz respeito a absorção não houve alterações significativas, já quanto a resistência os resultados foram muito expressivos, uma vez que mesmo com 30% de substituição os valores de resistência não variaram de forma relevante em relação ao traço referência. Um resultado que deve ser ressaltado é a influência da substituição na trabalhabilidade dos concretos, o que precisa ainda ser mais estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Adições; Cimento; Construção; Pó de Vidro; Substituições.

1 INTRODUÇÃO

No setor da Construção Civil, um dos setores com o maior impacto ambiental, torna-se imprescindível estudar meios mais limpos e eficientes para as construções. Assim, volta-se a atenção para um dos fatores que mais traz consequências ao meio ambiente e ao mesmo tempo tem grande potencial de ser otimizado: o concreto, material tido como base e indispensável em todo o setor.

A ampla utilização do concreto é comprovada por dados que apontam que em 2016 foram consumidos cerca de 104 milhões de metros cúbicos de concreto pré-misturado na América latina, bem como que após 04 anos de redução no consumo de cimento, em 2019 somente no Brasil foram vendidos cerca de 54,5 milhões de toneladas deste componente (SNIC, 2020). Juntamente a esses fatos, estima-se que o cimento é responsável por mais de 90% da energia total necessária para a produção do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). E ainda, sabe-se que para cada tonelada de cimento fabricada, uma tonelada de gás carbônico (CO₂) também é produzida, fazendo com que a indústria cimentícia caminhe em direção à posição de segunda maior indústria emissora de CO₂, depois das usinas de energia (SITI, A. I.; HASLEND, H. 2015).

Portanto, diante da noção acerca do quão detrimental essa produção pode ser ao meio ambiente, tem-se que uma das alternativas para amenizar esses impactos seria a substituição parcial do cimento por algum outro material, o qual seria preferencialmente



algum resíduo. Os resíduos vítreos, objeto de estudo deste trabalho, apresentam vantagem adicional ao meio ambiente quanto aos demais resíduos passíveis de serem utilizados: eles terão destinação adequada. Sabe-se que apesar de os rejeitos vítreos serem um material 100% reciclável, possuem logística complexa e representam um problema no processo de reciclagem. Dados de VGRESÍDUOS (2019) mostram que menos de 50% de embalagens de vidro são recicladas no Brasil, sendo que 470 mil toneladas dessas embalagens são descartadas em aterros sanitários anualmente.

Além disso, algumas propriedades do concreto, como a resistência mecânica, podem ser potencializadas pela substituição parcial do cimento (ou de algum dos agregados) por resíduos vítreos. De mesmo modo, propriedades relacionadas à durabilidade também podem ter melhoras significativas devido às características químicas e físicas do vidro incorporado (GUIGNONE, 2017).

O estudo tem como objetivo avaliar a influência da substituição parcial do aglomerante por resíduos de laminação de vidro em 5 teores diferentes (10,15,20,25 e 30%) de substituição e com dois fatores a/c (0,55 e 0,60) na trabalhabilidade e na resistência à compressão dos concretos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Este trabalho visa avaliar o desempenho do concreto com diferentes teores de substituição parcial do cimento pelo pó de vidro. Para isso, foi elaborado um planejamento experimental para que se estudasse as características do resíduo e do concreto confeccionado a partir dele, sendo estas características observadas no estado fresco e no estado endurecido da mistura. Os traços serão definidos de acordo com a forma que afetarem as seguintes características: No estado fresco, determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test) e massa específica. No estado endurecido, Resistência à compressão, absorção de água.

Foram realizadas substituições de 10, 15, 20, 25 e 30% em massa, as quais são estabelecidas em função da trabalhabilidade e slump test cada traço utilizado. Para as combinações de dosagem utilizou-se o traço desenvolvido por (CAMARGO, 2020), e adaptou-se aos fins deste trabalho. O traço utilizado foi na ordem de 1:1,96:2,72.

A dosagem dos corpos de prova foi executada segundo traços definidos por um estudo realizado por Camargo (2020), o qual visou obter traços otimizados para concretos estruturais com resistência à compressão característica de 30 MPa, aproximadamente. Utilizou-se o traço da ordem de 1:1,96:2,72, que foi adaptado para a substituição do PDV.

Com a substituição de resíduo no concreto, há uma diminuição considerável na consistência do material, sendo necessário aumentar o fator a/c para que se mantenha uma trabalhabilidade aceitável. Inicialmente não foi possível adotar o fator a/c de 0,48 por conta da consistência, e por isso o estudo foi iniciado a partir de um fator a/c de 0,6. Este fator foi mantido até que se atingisse o teor de substituição de 25%, a partir do qual houve a necessidade de aumentar o fator a/c para 0,63, visando-se atingir a substituição de 30% cimento por resíduos. Os resultados dos testes de abatimento estão no Quadro 01.

Quadro 01 - Resultados dos testes.



Traço	Fator a/c	Resíduos (%)	Slump	Resistência à compressão	Temperatura (°C)	Condição climática
T1	0,6	0	13	29,2	36	quente e seco
T2	0,6	10	12	27,3	36	quente e seco
T3	0,6	20	9	28,43	36	quente e seco
T4	0,63	25	8	26,5	36	quente e seco
T5	0,55	0	2	Não moldou	36	quente e seco
T6	0,63	0	16	18,6	36	quente e seco
T7	0,63	10	15	25	36	quente e seco
T8	0,63	15	15	27,1	36	quente e seco
T9	0,63	20	14	24,2	36	quente e seco

Conforme observado no Quadro 01, o fator a/c de 0,63, necessário para que seja viável a substituição parcial de 30% não favorece a resistência à agressividade ambiental no concreto. Por isso, optou-se por não dar continuidade aos estudos com 30% de substituição. Desta forma, limitou-se o teor de PDV ao valor de 30%

Segundo a NBR 12655:2015, há uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade. Assim a mesma norma, relaciona o fator água/cimento do concreto com a classe de agressividade à qual ele está sujeito, desta forma foram adotados os fatores água cimento de 0,6 e 0,55, e os consumos de cimento para estes fatores foram 357,47 kg/m³ e 363,98 kg/m³, respectivamente. Desta forma, poderá ser avaliada a influencia do fator a/c na trabalhabilidade e na resistencia dos concretos fabricados.

A cura foi feita em câmara úmida até o dia dos ensaios, 28 dias após a moldagem. Os corpos de prova foram confeccionados em betoneira de 400 litros.

Os ensaios foram realizados utilizando-se fator a/c 0,6 para a família 1 e fator a/c 0,55 para a família 2, as quais foram posteriormente renomeadas para traços de T1 a T6 na família 1 e T7 a T12 para a família 2.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO

A caracterização dos agregados graúdo e miúdo foi realizada segundo as seguintes normas:

- Determinação da composição granulométrica: ABNT NBR NM 248:2003.
- Determinação da massa unitária - ABNT NBR NM 45:2006.
- Determinação da massa específica – ABNT NBR NM 53:2009.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO (PDV)

A amostra utilizada no estudo foi coletada em uma empresa que faz a laminação de vidro na cidade de Apucarana - PR. Quando coletada, o PDV possui textura pastosa e tem alto teor de água incorporado, sendo necessário portanto que passe por um processo de secagem ao sol e depois que seja destorroado e transformado em pó, de forma a torna-lo o mais fino possível para ser agregado na mistura de concreto. Por se tratar de um material extremamente fino a análise granulométrica se deu. A análise granulométrica foi realizada pela combinação entre peneiramento e sedimentação seguindo a ANBT NBR 7181:1984.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM PÓ DE VIDRO (PDV)



O Quadro 02 traz os traços unitários em massa para cada teor de substituição, considerando os dois fatores a/c adotados.

Quadro 02 - Traços para os concretos com substituição de PDV.

Traço			Fator a/c	Cimento (kg)	PDV (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)
FAMÍLIA 1	T1	0%	0,6	1	0	1,96	2,72
	T2	10%	0,6	0,9	0,1	1,96	2,72
	T3	15%	0,6	0,85	0,15	1,96	2,72
	T4	20%	0,6	0,8	0,2	1,96	2,72
	T5	25%	0,6	0,75	0,25	1,96	2,72
	T6	30%	0,6	0,7	0,3	1,96	2,72
FAMÍLIA 2	T7	0%	0,55	1	0	1,96	2,72
	T8	10%	0,55	0,9	0,1	1,96	2,72
	T9	15%	0,55	0,85	0,15	1,96	2,72
	T10	20%	0,55	0,8	0,2	1,96	2,72
	T11	25%	0,55	0,75	0,25	1,96	2,72
	T12	30%	0,55	0,7	0,3	1,96	2,72

Para caracterização do concreto no estado fresco foi realizado o ensaio de abatimento de troco de cone conforme a ABNT NBR NM 67:1998, determinando assim a consistência do concreto e avaliando a sua trabalhabilidade

Para caracterização do estado endurecido foi determinada a resistência à compressão, o ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2018 (Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos). Foram confeccionado 6 corpos de prova para realização do ensaio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os resultados da caracterização dos agregados (Quadro 03 e 04), bem como as curvas granulométricas de cada um são as seguintes (Figura 01 e 02):

Quadro 03 - Caracterização do agregado gráúdo.

Propriedade	Valores
Massa Específica [g/cm ³]	2,387
Massa unitária no estado solto [g/cm ³]	1,466
Diâmetro máximo característico [mm]	19
Módulo de finura	6,82

Quadro 04 - Caracterização do agregado miúdo.

Propriedade	Valores
Massa Específica [g/cm ³]	2,658
Massa unitária no estado solto [g/cm ³]	1,52
Diâmetro máximo característico [mm]	1,2
Módulo de finura	1,88

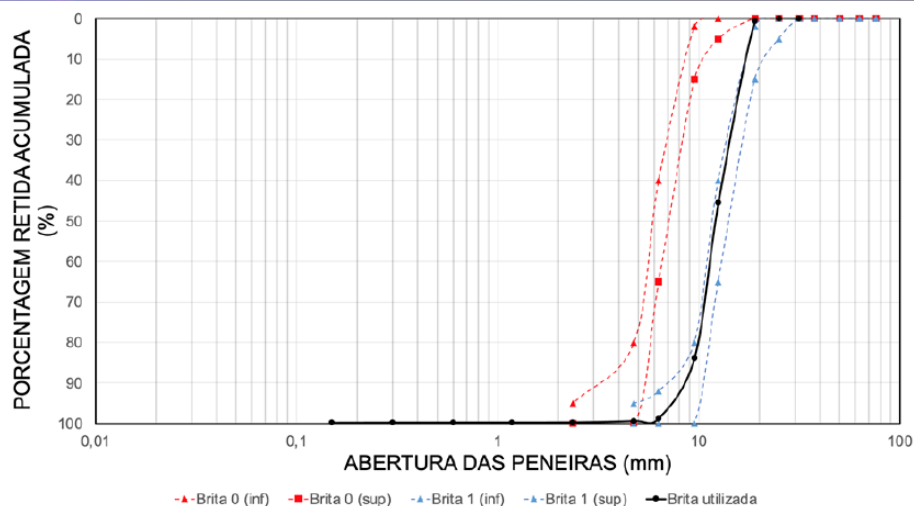


Figura 01 - Curva de caracterização Agregado Graúdo.

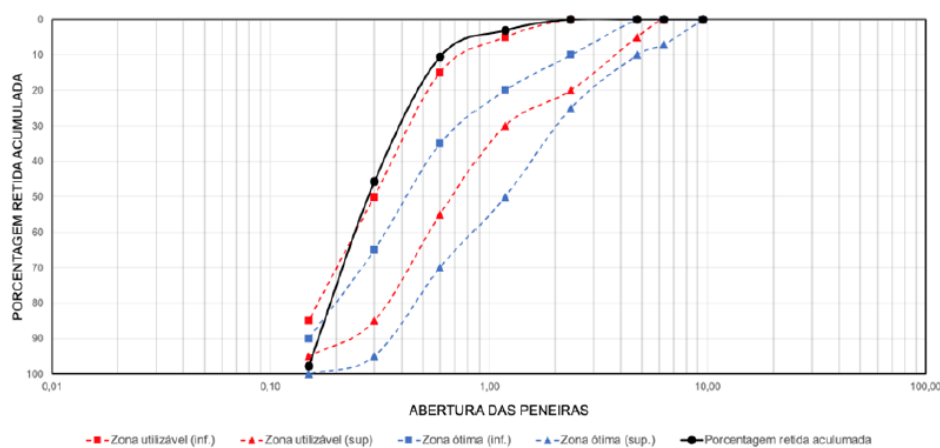


Figura 02 - Curva de caracterização Agregado Miúdo.

De acordo com os resultados apresentados os agregados podem ser classificados como areia fina e brita 1, ou seja agregados que podem ser utilizados para confecção de concretos estruturais.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO (PDV)

A curva granulométrica obtida para o PDV foi a seguinte:

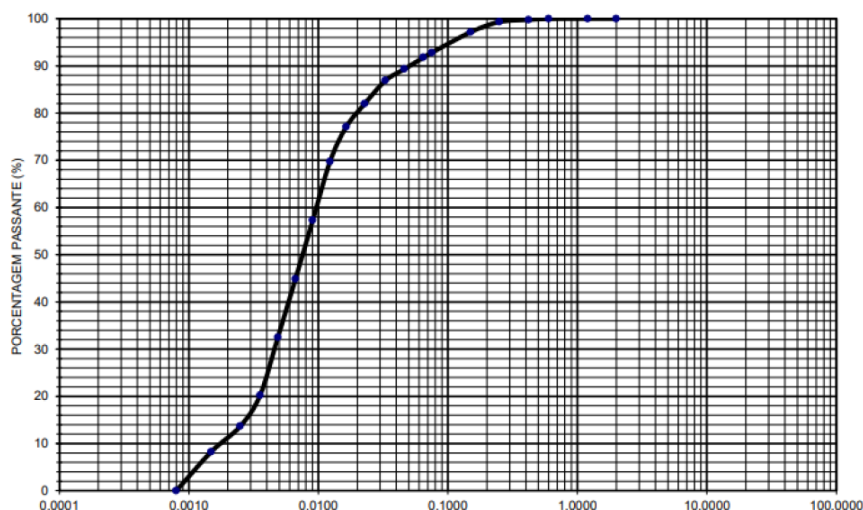


Figura 03: Curva granulométrica do PDV

Conforme a curva granulométrica da Figura 03, observamos que cerca de 75% do resíduo de pó de vidro ficou retido na peneira de 0,002 a 0,06mm, que conforme NBR 6502/1995, classifica o PDV como similar ao material classificado como SILTE.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS COM PÓ DE VIDRO (PDV)

Para a realização do slump teste realizados ensaios nos concretos moldados durante 4 dias consecutivos, portanto houve a variação de temperatura e umidade, que influenciam relativamente aos dados de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone (slump test), conforme analisado na Quadro 05.

Quadro 05 – Ensaio de Abatimento - Slump Test.

DATA DO ENSAIO	TEMPERATURA CLIMÁTICA	TRAÇO	FATOR A/C	SLUMP
28/03	SOL - 30°C	T1	0,60	18
28/03	SOL - 30°C	T2		17
28/03	SOL - 30°C	T3		15
29/03	SOL - 31°C	T4		15
29/03	SOL - 31°C	T5		14
29/03	SOL - 31°C	T6		12
29/03	SOL - 31°C	T7	0,55	16
30/03	SOL - 31°C	T8		14
30/03	SOL - 31°C	T9		12
31/03	CHUVA - 22°C	T10		13
31/03	CHUVA - 22°C	T11		11
31/03	CHUVA - 22°C	T12		10



Uma primeira análise pode ser feita em relação ao fator a/c, quanto maior maior o slump, mesmo sendo em traços onde havia a substituição do aglomerante por PDV e a redução da trabalhabilidade já era esperada de acordo com os testes iniciais, de forma geral os traços confeccionados com a/c de 0,60 apresentaram uma faixa maior de consistência.

Observa-se claramente que quanto maior o teor de substituição menor a trabalhabilidade do concreto, isso se dá pela maior necessidade de água na mistura quando da presença do resíduo devido a sua granulometria e capacidade de absorção.

Outro aspecto importante a ser destacado é a sensibilidade do resíduo à temperatura e umidade do ar, em dias mais quentes o slump foi maior enquanto em dias nublados o mesmo reduziu consideravelmente, este é um aspecto a ser levado em consideração em estudos futuros para viabilizar a utilização deste resíduo.

Para resultados dos ensaios de resistência a compressão, analisamos a Quadro 06.

Quadro 06 - Resistência à compressão média.

TRAÇO	A/C	PDV (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA (MPa)	VARIÇÃO DE RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO AO TRAÇO PILOTO	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIÇÃO (%)
T1	0,60	0	31,20	Piloto	3,5	11,23
T2		10	31,75	1,76	1,65	05,18
T3		15	29,70	-4,81	1,85	06,22
T4		20	26,50	-15,06	3,31	12,50
T5		25	26,30	-15,70	1,35	05,13
T6		30	23,80	-23,72	2,18	09,17
T7	0,55	0	34,95	Piloto	4,59	13,13
T8		10	30,65	-12,30	4,62	15,07
T9		15	31,80	-08,93	1,74	04,63
T10		20	26,75	-23,46	3,74	12,97
T11		25	29,40	-15,88	2,23	07,60
T12		30	28,50	-18,45	1,51	05,32

O Gráfico da Figura 04 traz a comparação entre as resistências a compressão dos diferentes fatores a/c adotados na pesquisa.

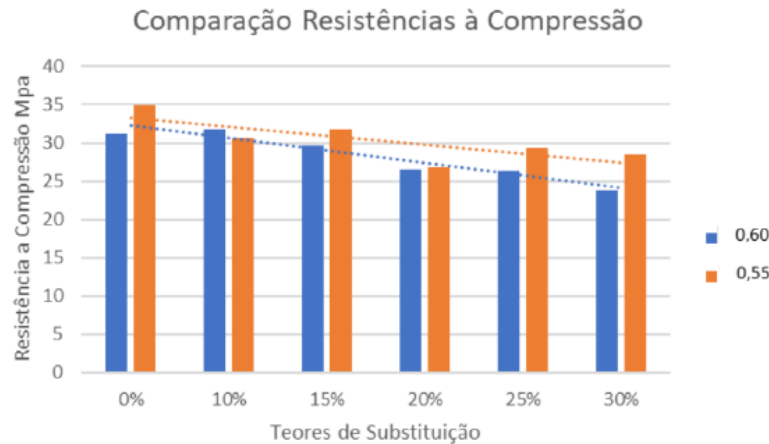


Figura 04 - Comparação de Resistências à Compressão.

É possível através da Quadro 05, que as resistências médias dos concretos que possuem fator a/c de 0,55 apresentam melhores resultados, e despeito de uma alta substituição do cimento pelo PDV, correspondente a 30%, a resistência não obteve resultados inferiores a 23 Mpa, classificando assim de acordo com a ABNT NBR 8953:2015 todos os concretos confeccionados com esse fator a/c como estruturais.

Apesar dos concretos não apresentarem resistências superiores ao traço referência os mesmos têm grande quantidade do aglomerante substituindo por um resíduo, salientando aqui o teor de 15% de substituição que em ambos os estudos apresentou menor variação em relação ao traço sem substituição e com resistência média na ordem de 30 Mpa, aproximadamente.

Evidenciou-se que sob o aumento da substituição parcial pelo resíduo, os traços rodados com o fator a/c de 0,6 (família 1) apresentaram tendência à redução na resistência à compressão, apesar de estes valores terem se mantidos praticamente constantes até a substituição de 15%, dado que a variação máxima entre o piloto e o traço com este teor de substituição foi de 2%. Por outro lado, os traços rodados com fator a/c de 0,55 (família 2) não mostraram uma relação diretamente proporcional entre o teor de substituição e a resistência à compressão, visto que esta propriedade diminui e depois torna a aumentar. Em média, os traços da família 2 tiveram resultados melhores quanto à resistência mecânica, particularmente para o teor de substituição de 25% e 30%, os quais mantiveram uma resistência relativamente próxima à do traço piloto, o oposto do que se observou na família 1. O principal fator que contribui para isso é a própria relação água/cimento, que sendo menor contribui para uma resistência mecânica maior em todos os traços.

Outro dado relevante do estudo é o comportamento de acordo com a Lei de Abrahams dos concretos estudados, independente da utilização de um material alternativo, ou seja, quanto maior o fator a/c na confecção dos concretos menor será a resistência do mesmo. Ao mesmo tempo trabalhando com um fator a/c relativamente alto obteve-se resistência à compressão satisfatória para todos os traços rodados, ou seja, todos apresentaram valores de resistência à compressão característicos maiores que 20 MPa, classificando-se, portanto, como concretos estruturais, conforme a ABNT NBR 8953:2015.

3 CONCLUSÕES

A influência que o PDV tem no fator água cimento da mistura é alta. Quanto maior o teor de substituição parcial, menor é a trabalhabilidade do concreto, característica refletida pelo valor do teste de abatimento. Assim, faz-se necessário aumentar a quantidade de água na mistura para que ela se mantenha viável, o que por sua vez influencia na resistência à



compressão, na resistência à agressividade do ambiente, na trabalhabilidade e na massa específica do concreto.

A substituição do aglomerante apesar de contribuir para a redução da resistência a compressão dos concretos confeccionados no estudo não afetou esta propriedade de forma tão significativa quando levada em consideração frente a quantidade substituída. Uma vez que as classes de concretos obtidas são semelhantes ao do concreto referência, e os teores de substituição são muito altos.

Por fim, conclui-se que o PDV é uma boa opção para substituição parcial de aglomerante, ou ainda uma excelente forma de alternativa de adição, como a sílica ativa ou as pozolanas, levando em conta os resultados satisfatórios obtidos no presente estudo. Vale salientar ainda o favorecimento do meio ambiente, visto que a substituição parcial por pó de vidro gera imediatamente um consumo menor de cimento, cuja fabricação emite 1 tonelada de CO₂ para cada tonelada de tonelada produzida, conforme detalhado na introdução, além de proporcionar uma destinação adequada ao resíduo de laminação de vidro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18p. ABNT

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

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



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

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

CAMARGO, M. V. DE. Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END). 2020. 143f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020

SITI, A. I.; HASLEND, H. LOW CARBON MEASURES FOR CEMENT PLANTEA REVIEW. Journal of Cleaner Production, v.103, p. 260-274, 2015

NEVILLE, Adam M. PROPRIEDADES DO CONCRETO. Sumaré - SP: Pini, 1997.

RADKE, Isadora de Goes. VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE LAMINAÇÃO DE VIDRO NA CONFECÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.

P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, "Concreto: estrutura, propriedades e materiais", PINI, S. Paulo, SP (1994).

GUIGNONE C. G.; DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS AO CIMENTO. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, 2017

VG RESÍDUOS. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/reciclagem-de-embalagens-de-vidro/amp/>>. Acesso em março 2020.