

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Débora Trevisan

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CONCRETO CONVENCIONAL
VIBRADO A PARTIR DO AJUSTE DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS**

Santa Maria, RS

2022

Débora Trevisan

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CONCRETO CONVENCIONAL
VIBRADO A PARTIR DO AJUSTE DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Civil, da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito para obtenção
do título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof^o Dr. Erich D. Rodríguez

Santa Maria, RS
2022

Débora Trevisan

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CONCRETO CONVENCIONAL
VIBRADO A PARTIR DO AJUSTE DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Civil, da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito para obtenção
do título de **Engenheira Civil**.

Aprovado em março de 2022:

Prof^o Dr Erich D. Rodríguez (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof^o Dr André Lübeck (UFSM)

Eng. Civil Tuani Zat (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Gabriel e Jussara, que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado, prestando todo apoio possível.

Agradeço aos meus irmãos, Gabriel e Leticia, por serem desde o princípio meus exemplos.

Agradeço a minha avó Eli, por ter sido minha segunda mãe enquanto na minha vida estive presente fisicamente e hoje me proteger de onde está.

Agradeço aos meus amigos da Engenharia Civil, que tornaram o período da faculdade muito mais gratificante. Aos meus amigos da vida, também agradeço pelo apoio e companheirismo.

Agradeço aos meus colegas de empresa, Kaeng Infraestrutura, que durante o período me apoiaram e ensinaram.

Agradeço ao meu orientador Érich pelo apoio durante a graduação e por ter disponibilizado seu tempo e atenção para contribuir com meu trabalho.

Agradeço a banca examinadora pela disponibilidade em contribuir com meu trabalho.

A todos que mencionei e a todos que contribuíram indiretamente na pesquisa e em minha formação como Engenheira Civil, minha eterna gratidão.

RESUMO

OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CONCRETO CONVENCIONAL VIBRADO A PARTIR DO AJUSTE DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS

AUTORA: Débora Trevisan

ORIENTADOR: Prof^o Dr. Erich D. Rodríguez

O concreto de cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil, sendo a redução do seu custo final de produção alvo de diversos estudos. Por ser o material com o maior custo unitário na composição, busca-se pela redução do consumo de cimento. Nesse sentido, o presente trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo do empacotamento das partículas de um concreto convencional vibrado de 10 MPa aos 90 dias utilizado na obra de uma Pequena Central Hidrelétrica, a fim de reduzir o consumo de cimento do traço, que representa o maior volume a ser aplicado no empreendimento. Para isso, realizaram-se ensaios da distribuição granulométrica das matérias primas para, posteriormente otimizar o nível de empacotamento das partículas mediante o modelo de Andreassen Modificado com auxílio do programa EMMA Mix Analyzer. A partir das análises realizadas ajustou-se o traço mantendo a relação a/c constante com uma redução do consumo de cimento de 22% e, para isso, necessitou-se da adição de pedrisco e microsílca na composição. Ao executar os traços em laboratório, observou-se que: no estado fresco, o ajuste do empacotamento gerou um aumento da demanda de aditivo superplastificante como consequência do aumento no teor de finos. Para a resistência a compressão e ensaio de absorção de água, o traço com empacotamento otimizado apresentou desempenho superior e no que tange a viabilidade econômica, ele apresentou uma relação custo/MPa mais atrativa que o traço inicial.

Palavras-chaves: Empacotamento. Distribuição Granulométrica. Concreto.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF A CONVENTIONAL VIBRATED CONCRETE USING PARTICLE PACKING CONCEPT

AUTHOR: Débora Trevisan
ADVISOR: Erich D. Rodríguez

This undergraduate thesis presents a study of the packing particles of a conventional vibrated concrete of 10 MPa at 90 days used in the construction of a small hydroelectric power plant, in order to reduce the cement consumption of the trace. For this, tests were carried out on the granulometric distribution of the raw materials to optimize the level of packing particles using the Modified Andreassen model of the EMMA Mix Analyzer software. From the analyzes carried out, the mixture was adjusted with a reduction in cement consumption of 22%. When performing the traces in the laboratory, it was observed that: in the fresh state, the packaging adjustment generated an increase in the demand for superplasticizer as a consequence of the increase in the fines content. For the axial compressive strength and water absorption test, the mixture with optimized packaging presented superior performance and in terms of economic viability, it presented a more attractive cost/MPa ratio than the initial mixture.

Keywords: Packing particles. Granulometric distribution. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais fatores que influenciam sobre a trabalhabilidade do concreto.....	16
Figura 2 - Ilustração das etapas do ensaio de abatimento do tronco de cone.....	17
Figura 3 - Tipos de Cimento Portland no BrasilFonte: Isaia (2011).....	18
Figura 4 - Influência da finura da Sílica Ativa na resistência a compressão do concreto.....	22
Figura 5 - Influência das partículas na densidade de empacotamento.	23
Figura 6 - Mínima porosidade calculada pelo modelo de Alfred em função do módulo de distribuição.....	25
Figura 7 - Fluxograma do programa experimental.....	26
Figura 8 - Curva granulométrica Cimento.	27
Figura 9 - Curva granulométrica da areia artificial.	28
Figura 10 - Curva Granulométrica da Brita 0.	29
Figura 11 - Curva granulométrica Brita 01.	30
Figura 12 - Distribuição Granulométrica Microsílica.	31
Figura 13 - Organização dos materiais para execução dos traços.....	33
Figura 14 - Verificação da temperatura do TR.	34
Figura 15 - Verificação do abatimento do TR.....	34
Figura 16 - Corpos de prova identificados e armazenados.	35
Figura 17 - Câmara úmida utilizada para cura dos corpos de prova.	36
Figura 18 - Corpo de prova com molde de Neoprene.....	37
Figura 19 - Crescimento das resistências - Traço Referência.	38
Figura 20 - Lançamento do Traço Referência no programa EMMA.....	39
(A) Figura 21 - Verificação do Coeficiente de Distribuição para (A) $q = 0,29$. (B) $q = 0,30$. (C) $q = 0,31$. (D) $q = 0,32$	39
Figura 22 - Traço Experimental no programa EMMA.	40
Figura 23 - Curva granulométrica do Traço Experimental.	41
Figura 24 - Verificação da temperatura do Traço Experimental.....	42
Figura 25 - Verificação do abatimento do Traço Experimental.....	42
Figura 26 - Execução do ensaio de absorção por capilaridade.	43
Figura 27 - Distribuição de água no interior dos corpos de prova para (A) Traço Referência. (B) Traço Experimental.....	44
Figura 28 - Resultados dos ensaios de abatimento.....	45
Figura 29 - Resultados resistência a compressão TR e TE.	46

Figura 30 - Acréscimo de Resistência x Idade.....	46
Figura 31 - Maiores Valores de absorção de água por capilaridade.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peneiras da série normal e intermediária e suas respectivas aberturas nominais....	20
Tabela 2 - Quantidade mínima de amostra a ser ensaiada de acordo com a dimensão máxima do agregado.	21
Tabela 3 - Composição do Traço Referência.	32
Tabela 4 - Traço unitário - TR	32
Tabela 5 - Composição Traço Experimental.....	40
Tabela 6 - Composição Traço Experimental.....	41
Tabela 7 - Traço Unitário - TE.....	41
Tabela 8 - Maiores Valores de absorção de água por capilaridade (g/cm ²).	47
Tabela 9 - Preços unitários dos materiais.....	48
Tabela 10 - Custo total Traço Referência.....	48
Tabela 11 - Custo total Traço Experimental.	48
Tabela 12 - Avaliação do (Custo/m ³)/MPa para cada traço.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água/cimento

m – Metro

L – Litro

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

TE – Traço Experimental

TR – Traço Referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivo	14
1.2.3	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Concreto	15
2.1.1	Propriedades do concreto fresco	15
2.1.2	Propriedades do concreto endurecido	17
2.2	Cimento	17
2.3	Agregados.....	18
2.3.1	Classificação quanto ao tamanho	19
2.3.2	Composição granulométrica.....	19
2.4	Aditivos.....	21
2.5	Efeito da adição de Sílica Ativa nas propriedades e na microestrutura do concreto	22
2.6	Empacotamento de partículas.....	23
2.6.1	Teorias de empacotamento.....	23
2.6.2	Software de empacotamento utilizado	25
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	26
3.1	Seleção e caracterização dos materiais	27
3.1.1	Aglomerante.....	27
3.1.2	Agregados	27
3.1.3	Adição	30
3.1.4	Aditivos	31
3.2	Traço de concreto referência.....	31
3.2.1	Dosagem.....	31
3.2.2	Execução do traço de concreto referência.....	32

3.3	Estudo de dosagem e empacotamento	37
3.4	Execução do Traço Experimental	41
3.4.1	Parâmetros do concreto no estado fresco	42
3.5	Ensaio de absorção	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Parâmetros do concreto no estado fresco	45
4.1.1	Abatimento	45
4.2	Parâmetros do concreto no estado endurecido	45
4.2.1	Ensaio de resistência a compressão axial	45
4.2.2	Ensaio de absorção por capilaridade	47
4.3	Viabilidade Econômica	48
5	CONCLUSÃO	50
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	50

1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento das dosagens de concreto, geralmente associa-se a resistência à compressão do material ao consumo de cimento. No entanto, os elevados teores por metro cúbico além de trazerem inconvenientes no desempenho das estruturas – aparecimento de trincas e fissuras, onera o concreto e gera maiores consequências ambientais.

Uma das etapas mais importantes para a fabricação do cimento Portland é a clinquerização, que requer a queima de matérias-primas a uma temperatura de aproximadamente 1.500 °C, liberando aproximadamente 90% das emissões de CO₂ provenientes da fabricação de cimento (MATOS, 2015). Em 2018, a indústria mundial de cimento respondeu por 7% das emissões globais de gás carbônico, evidenciando o problema desse setor. (ROADMAP, 2019)

A fim de amenizar esse impacto ambiental, e principalmente por interesses econômicos, busca-se constantemente por alternativas que substituam ou diminuam o consumo de cimento Portland das misturas de concreto. Mostram-se como alternativas a substituição de parte de cimento por adições minerais, bem como estudos aprofundados dos agregados e empacotamento do traço.

Nesse sentido, a distribuição granulométrica dos agregados que compõem os concretos devem ser estudadas de modo a obter um produto com alta densidade a partir do empacotamento das partículas, tal que os espaços entre as partículas maiores sejam preenchidos pelas partículas menores de forma que se obtenha melhoria nas propriedades do material.

1.1 Justificativa

Sendo o concreto de cimento Portland o material mais utilizado na construção civil, são realizados diversos estudos a fim de diminuir o custo final da produção. Nesse sentido, buscam-se dosagens com redução do consumo de cimento, principal insumo na fabricação de concretos e que também representa o maior custo individual na composição. A redução dessa matéria-prima, além de viabilizar economicamente a produção de concretos, também contribui para o desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, segundo REBMAN (2016) o estudo do empacotamento de partículas se faz muito importante, já que através da otimização dos materiais granulares é possível obter misturas com densidade de empacotamento elevadas, com poucos vazios na microestrutura,

possibilitando a redução do consumo de cimento sem comprometer o desempenho mecânico e durabilidade do concreto.

A redução do consumo de cimento propicia diversas vantagens técnicas nos concretos, como a redução do calor de hidratação, redução da retração e da fissuração. Para isso, nos últimos tempos passou-se a utilizar materiais cimentícios suplementares como pozolanas, fíler calcário e escória que auxiliam na melhoria do empacotamento da mistura.

Ao encontro dos pontos apresentados, DAMINELI, PILEGGI e JOHN (2017) afirmam que a otimização no proporcionamento das matérias primas nas dosagens de concreto, aplicando metodologias de melhoria do empacotamento de partículas é uma forma eficiente de aumentar a densidade do concreto, reduzir o número de vazios e assim reduzir o consumo de cimento e auxiliar a produção de concretos com desempenho mecânico superior ou com um menor custo.

1.2 Objetivo

Ajustar a dosagem das matérias primas a partir do incremento do nível de empacotamento das partículas.

1.2.3 Objetivos Específicos

- Formular, através da otimização do empacotamento da mistura, um traço de concreto com menor consumo de cimento;
- Avaliar economicamente o ajuste do traço a partir da melhoria do empacotamento das partículas do concreto;
- Avaliar o efeito nas propriedades em estado fresco e endurecido do concreto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto

Concreto pode ser entendido no sentido mais amplo, conforme Neville e Brooks (2013) como um material compósito particulado de matriz cimentante. Esse meio, geralmente, origina-se do produto da reação entre um cimento hidráulico e água e representa a parte principal do produto final, que tem os agregados como material de enchimento. O concreto pode ainda ser produzido com diferentes tipos de cimento e conter pozonalas, como cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno, adições minerais, aditivos, polímeros e fibras.

Para Mehta e Monteiro (2014) a utilização de partículas muito finas aumentam a demanda da água de amassamento, o que pode provocar a redução da resistência mecânica do concreto produzido. No entanto, outros trabalhos demonstram que a redução de finos pode promover, na verdade, a diminuição da resistência a compressão.

Para Gonçalves (2005) a redução do teor de finos de concreto por meio da classificação da areia artificial promoveu uma redução da resistência a compressão em relação aos concretos que continham areia artificial sem classificação (com finos). Nisso, a redução da resistência a compressão foi atribuída à redução do empacotamento das mistura e ao aumento do módulo de finura, que pode ter formado uma zona de interface pasta/agregado maior.

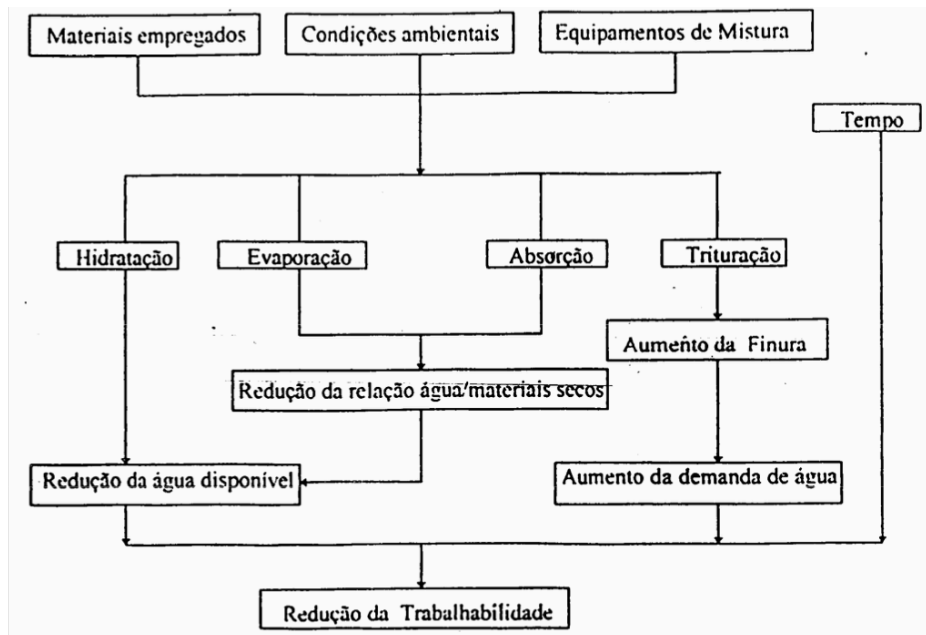
No trabalho de Lang (2006) também constatou-se influência positiva dos finos da mistura na resistência do concreto. Ele comparou concretos com areia artificial lavada e não lavada e, como resultado, o concreto com areia não lavada obteve resistência a compressão superior em todas as idades e com variações na relação a/c. O fato foi creditado ao efeito filler e à nucleação heterogênea do material pulverulento da mistura.

2.1.1 Propriedades do concreto fresco

2.1.1.1 Trabalhabilidade

Para QUIROGA e FOWLER (2004) trabalhabilidade é definida pela norma da ASTM C 125, que trata da terminologia relacionada ao concreto e agregados para concreto, como a propriedade que determina a energia necessária para manipular uma quantidade de concreto fresco com perda mínima da homogeneidade. Para o American Concrete Institute (ACI, 1994b) trabalhabilidade é a propriedade que determina a facilidade e a homogeneidade com que o concreto fresco pode ser misturado, lançado, compactado e acabado. A Figura 1 ilustra os principais fatores que influenciam na trabalhabilidade do concreto.

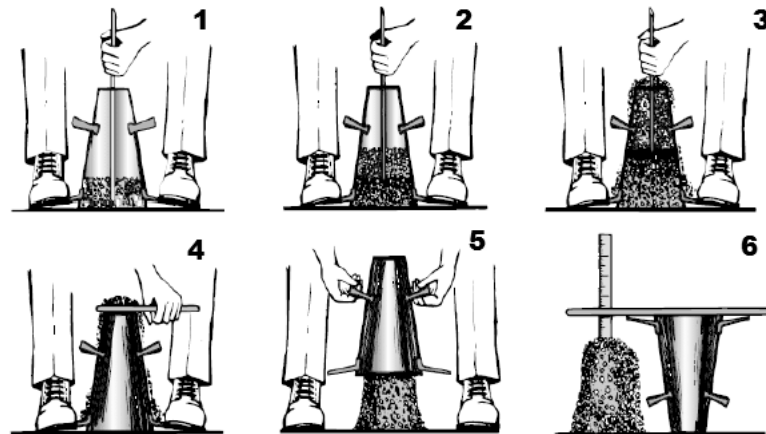
Figura 1 - Principais fatores que influenciam sobre a trabalhabilidade do concreto.



Fonte: GIAMMUSO, 1995

Todo concreto demanda uma trabalhabilidade adequada a cada situação. Os condicionantes são definidos por projetos. Para TATTERSAL (1978) a trabalhabilidade é uma variável complexa, que depende de fatores intrínsecos e extrínsecos ao material. No caso de fatores intrínsecos ao concreto, adota-se no Brasil, a consistência do concreto fresco como parâmetro principal. Essa consistência pode ser obtida através do ensaio em conformidade com a NBR 16889 (ABNT, 2020), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Ilustração das etapas do ensaio de abatimento do tronco de cone.



Fonte: Google imagens

2.1.2 Propriedades do concreto endurecido

2.1.2.1 Resistência a compressão

Para Mehta e Monteiro (2008) a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura do corpo de prova e a partir dela pode-se deduzir diversas outras propriedades do concreto. A resposta do concreto à tensão aplicada depende de diversos fatores, como:

- Relação água/cimento;
- Proporção dos materiais que formam o traço;
- Condições de cura.

2.1.2.2 Porosidade e Permeabilidade

BROWN et al. (1993) afirmam que a permeabilidade depende da porosidade. Mais importante ainda para a permeabilidade, é a maneira como a porosidade total está distribuída. A porosidade é relacionada ao empacotamento do concreto, das partículas de agregados, das adições minerais à relação água/sólidos.

Para Isaía (2002) a porosidade e distribuição do tamanho dos poros determinam a permeabilidade, mas apenas os poros com tamanho superior a um valor específico contribuem significativamente para a mesma.

2.2 Cimento

Denominado tecnicamente como Cimento Portland, consiste em um pó fino com propriedades aglutinantes que quando endurecido não se decompõe mais. É dito um

aglomerante hidráulico, pois endurece em contato com água. Segundo o autor, é o mais importante dos aglomerantes conhecido pelo homem (AMBROZEWICZ, 2012).

Bauer (2013) considera o cimento como um produto “obtido pela pulverização de clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com certa proporção de sulfato de cálcio natural”.

Após passar pelo processo de hidratação, cimentos com características distintas em suas propriedades químicas irão resultar em concretos com propriedades distintas (NEVILLE e BROOKS, 2013). Conforme a Figura 3, as principais diferenças nos tipos de cimento ocorrem, principalmente, em função das quantidades de clínquer e os tipos de adições utilizadas.

Figura 3 - Tipos de Cimento Portland no Brasil

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos Componentes (%)			
			Clínquer + gipsita	Escória	Pozolana	Filer calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100	0		
Comum com Adição	CP I-S	25, 32, 40	99-95	1-5		
Composto com Escória	CP II-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filer	CP II-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CP III	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	-			
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: Isaia (2011).

2.3 Agregados

Responsáveis em média por 70% do volume do concreto, os agregados influenciam em muitas de suas propriedades. Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é um material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto. Já para Neville (1997) o agregado não é inerte e suas propriedades têm influência no desempenho do concreto.

Do ponto de vista tecnológico, segundo Mehta e Monteiro (2014) e Neville (1997), as características dos agregados graúdos e miúdos afetam principalmente a resistência, a trabalhabilidade e a durabilidade do concreto e, dessa forma, deve-se atentar-se a escolha dos mesmos.

Diante do exposto, serão abordada as características dos agregados, principalmente as características físicas, que podem ser afetadas pelo processo de britagem.

2.3.1 Classificação quanto ao tamanho

Os agregados utilizados para concreto classificam-se quanto ao tamanho em agregados miúdo e graúdo, cuja separação se dá pela peneira com malha de 4,75 mm. Será apresentada a definição conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

- Agregado miúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 4,75 mm.
- Agregado graúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 75 mm e ficam retidos na malha 4,75 mm em ensaio de peneiramento.

2.3.2 Composição granulométrica

Composição granulométrica é a distribuição de dimensão das partículas de um material granular entre várias faixas granulométricas, normalmente expressa em termos de porcentagem acumulada maior ou menor de cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou da porcentagem entre certa faixa de aberturas de peneiras (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento possuem malhas padronizadas, classificadas em série normal e série intermediária, de acordo com a NBR 7211 ABNT, 2009), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Peneiras da série normal e intermediária e suas respectivas aberturas nominais.

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

Fonte: Adaptação da ABNT NBR 7211:2009.

As peneiras da série intermediária são utilizadas para auxiliar na avaliação granulométrica e classificação quanto à dimensão máxima característica. As peneiras de série normal devem sempre ser utilizadas, já que os resultados provenientes delas são utilizados para classificação granulométrica e determinação do módulo de finura.

O Ensaio de peneiramento é descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003), que apresenta recomendações quanto a quantidade mínima de amostra a ser ensaiada (após secagem) de acordo com a dimensão máxima característica de cada agregado, conforme Tabela 2, e a quantidade limite de material que pode ficar sobre cada peneira, a fim de evitar obstrução da malha.

Tabela 2 - Quantidade mínima de amostra a ser ensaiada de acordo com a dimensão máxima do agregado.

Dimensão Máxima do Agregado (mm)	Massa Mínima da Amostra (kg)
< 4,75	0,3
9,5	1
12,5	2
19	5
25	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Fonte: Adaptação da ABNT NBR NM 248:2003

Os dados obtidos através dos ensaios granulométricos podem ser utilizados para construir curvas granulométricas, em que é possível visualizar se a granulometria de um determinado agregado atende às especificações pretendidas, se está fora dos limites estabelecidos ou ainda, se tem deficiência em alguma dimensão específica. De acordo com Quiroga e Fowler (2004), concretos que possuem curva granulométrica otimizada podem apresentar elevado grau de empacotamento. Isso pode demandar menos cimento no concreto, tornando-o mais barato e diminuindo problemas de durabilidade, como porosidade e retração por secagem

2.4 Aditivos

Aditivos são substâncias adicionadas ao concreto com finalidade de melhorar suas características. Dentre as diversas classificações dos aditivos, as principais são: plastificantes, incorporadores de ar, produtos de cura, dispersores, impermeabilizantes, produtores de gás ou espuma, aceleradores e retardadores (AMBROZEWICZ, 2012).

Os aditivos químicos plastificantes são produtos de efeito dispersantes, que permitem redução da água de amassamento na faixa de 5 a 10%, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco. Dessa forma, são capazes de promover uma maior trabalhabilidade do material para uma mesma relação água/cimento. Os aditivos superplastificantes também são redutores de água e permitem a redução de até 30% da água de amassamento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.5 Efeito da adição de Sílica Ativa nas propriedades e na microestrutura do concreto

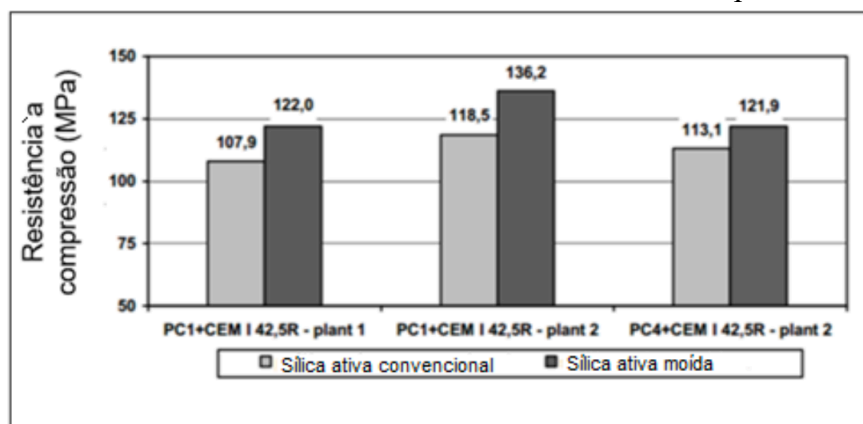
A fim de reduzir a alta produção de carbono associada as estruturas de concreto, segundo Aïtcin (2016), a indústria da construção deve intensificar o uso dos materiais cimentícios alternativos (adições minerais), como cinzas volantes, escória e sílica ativa. A última é um subproduto da indução de fornos a arco nas indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício, considerada um pó extremamente fino que, em geral, possui diâmetro médio da ordem de 0,1µm (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Sílica Ativa é uma adição mineral que atua de duas formas: Tanto fisicamente, através do efeito filer (preenchimento de vazios), que age no acréscimo da coesão na zona de transição, quanto química através da promoção da reação pozolânica.(ALMEIDA, 2005).

Para Neville (1997), um dos mais importantes efeitos da microssilica no concreto é a diminuição de fissuras devido seu efeito de preenchimento de vazios. Com isso os concretos apresentam pouca exsudação, tendendo a ter uma camada superficial mais resistente.

Terzijski (2004) realizou ensaios utilizando sílica ativa convencional e uma sílica ativa moída (elevada finura) e dois tipos de aditivos plastificantes. Os resultados dos ensaios comprovam que a finura da sílica ativa promove alterações no concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, a sílica moída promoveu aumento na viscosidade da mistura ou seja, melhorou o empacotamento de partículas. Na resistência à compressão axial, a mistura com sílica ativa moída obteve de 8 a 15%, conforme demonstra a Figura 4, maior resistência quando comparada a mistura com sílica ativa convencional. Isso se deve ao fato de sílica moída apresenta melhor dispersão, otimizando o empacotamento das partículas da mistura.

Figura 4 - Influência da finura da Sílica Ativa na resistência a compressão do concreto.



Fonte: Adaptação de Terzijski (2004).

2.6 Empacotamento de partículas

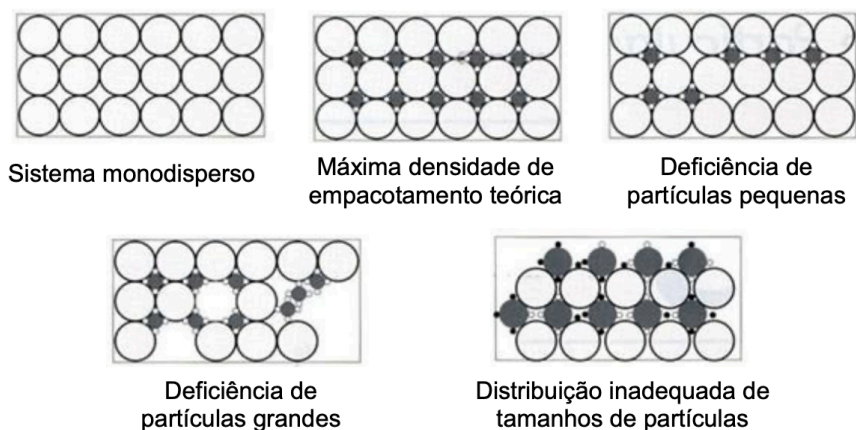
Nos últimos anos, aumentou-se o interesse pelo entendimento do empacotamento das partículas, isso porque, grande parte dos materiais naturais ou industrializados contém partículas de diferentes formas e tamanhos (CASTRO; FERREIRA, 2016).

O empacotamento de partículas tem um efeito marcante sobre a porosidade do corpo, na resistência mecânica, no módulo de elasticidade e na permeabilidade (ROMANO; TORRES; PILEGGI, 2015)

Para McGEARY (1961, *apud* OLIVEIRA et al., 2000) o fenômeno de empacotamento de partículas define-se como a questão da correta seleção da proporção e do tamanho das partículas, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.

Quantitativamente, o empacotamento pode ser avaliado pela densidade de empacotamento, que define-se como o volume de sólido em uma unidade de volume total (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Nesse sentido, um material possui densidade de empacotamento teórica máxima quando não possui vazios e, nesse processo, sofre influência da quantidade e do tamanho de partículas, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Influência das partículas na densidade de empacotamento.



Fonte: Oliveira et al., 2000

2.6.1 Teorias de empacotamento

O Empacotamento das partículas do concreto foi investigado pela primeira vez em 1892 por Féret. Desde então, alguns modelos de empacotamento têm sido propostos para otimizar os componentes granulares do concreto. Existem modelos de empacotamento de partículas com

abordagem discreta, que consideram as partículas individualmente, como o Modelo de Furnas (Equação 01), e modelos com abordagem contínua, como o de Andreassen (Equação 02) (OLIVEIRA et al., 2000).

$$CPFT(\%) = \left(\frac{D^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \times 100$$

Onde CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que D, D é o diâmetro da partícula, D_S é o diâmetro da menor partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula e r é o quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha imediatamente inferior.

$$CPFT(\%) = \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \times 100$$

Onde CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que D, D é o diâmetro da partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula e q é o coeficiente de distribuição.

FUNK e DINGER (1994) após extensa análise comparativa entre os dois modelos citados anteriormente, provaram que ambos convergiam matematicamente para uma mesma equação (Equação 03), que representa o modelo de Alfred ou Andreassen Modificado, modelo que introduziu o conceito de tamanho mínimo de partícula. Para OLIVEIRA, C.O (2018) o modelo de Alfred destaca-se na dosagem de concretos por possuir maior eficiência de empacotamento e ser mais condizente com sistemas particulados reais.

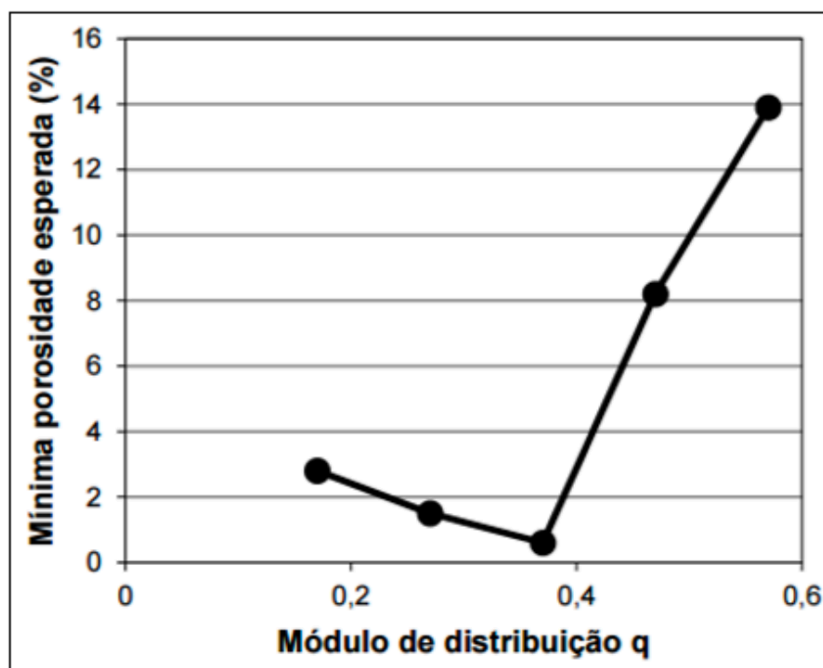
$$CPFT(\%) = \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100$$

Onde CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o Diâmetro D em volume, D_S é o diâmetro da menor partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula e q é o coeficiente de distribuição.

Para o modelo de Alfred, com a utilização de simulações computacionais, concluiu-se que para valor de “q” igual ou inferior a 0,37, 100% do empacotamento seria possível para uma distribuição finita. Já, para valor de “q” superior a 0,37, tem-se sempre porosidade. Além disso, para concretos com boa fluidez o coeficiente de distribuição não deve exceder aproximadamente 0,30. Logo, utilizando-se valores de “q” próximos de 0,30 obtém-se

concretos adensados por vibração e para valores de “q” inferiores a 0,25 obtém-se concretos auto adensáveis (VANDERLEI, 2004).

Figura 6 - Mínima porosidade calculada pelo modelo de Alfred em função do módulo de distribuição.



Fonte: Adaptação de Dinger e Funk (1994).

2.6.2 Software de empacotamento utilizado

O Software utilizado para análise do empacotamento das dosagens de concreto foi o EMMA (Elkem Materials Mixture Analyzer), desenvolvido pela empresa Elkem Materials. O EMMA se caracteriza como um programa que avalia o empacotamento das partículas, calculando e apresentando a distribuição granulométrica das misturas.

O programa utiliza os modelos de Andreassen e Andreassen Modificado para avaliar o empacotamento das misturas, calculando a distribuição do tamanho de partícula. Através de diversos testes de laboratório e documentação a empresa Elkem fornece a base para confecção de concretos auto adensáveis, de ultra alto desempenho entre outros (GUERRA, 2014).

Com sua interface de fácil manipulação, a partir das proporções de materiais inseridas, com base nos dados informados, o programa calcula a curva granulométrica da mistura e também a curva de Andreassen Modificado. No entanto, ele não é capaz de calcular a proporção de materiais que mais se aproxima da curva de Andreassen Modificado.

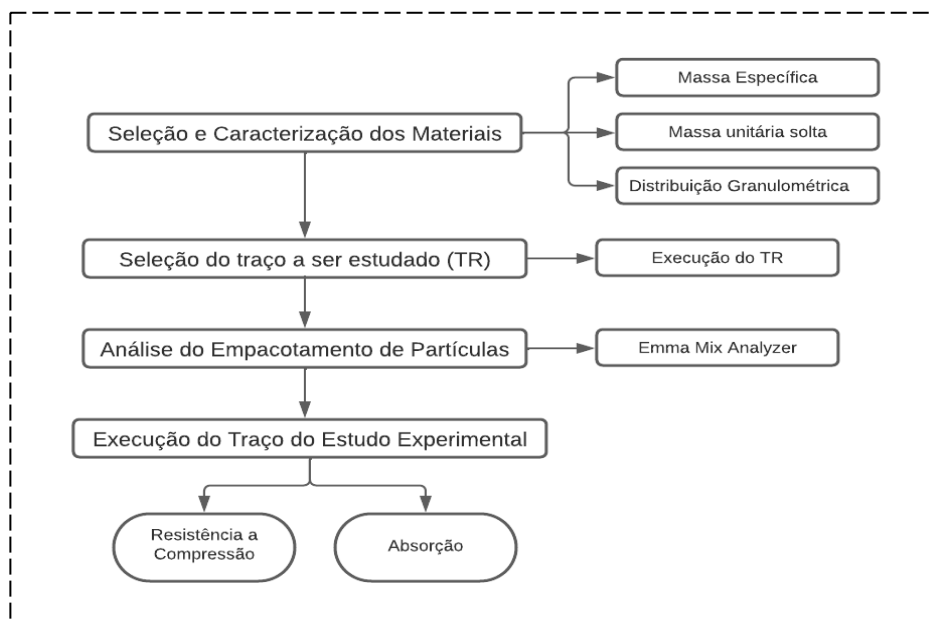
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho está baseado em um traço de concreto utilizado na obra PCH Rincão dos Albinos, a fim de otimizar o consumo de cimento.

A execução do programa experimental iniciou-se com a coleta dos materiais utilizados na obra para execução dos ensaios de massa específica, massa unitária solta e granulometria. A granulometria dos materiais foi realizada seguindo os critérios da NBR 7211 (ABNT, 2009). Para o cimento e passante da peneira #200 da areia artificial foi realizada granulometria a laser no Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Todos os resultados provenientes dos ensaios foram inseridos no programa *EMMA Mix Analyzer* e, com essas informações, montou-se a combinação de materiais provenientes do traço escolhido - Traço Referência (TR) para estudo a fim de otimizar o empacotamento. A partir das informações inseridas, o programa gera a curva de distribuição granulométrica real da mistura e uma curva ótima teórica baseada no modelo de Andreassen Modificado, considerando o coeficiente de distribuição especificado. A partir da análise das divergências entre as duas curvas, foram testadas manualmente diversas proporções de materiais buscando-se a máxima aproximação com a curva ideal gerada pelo programa. A composição com empacotamento otimizado que atingiu o objetivo foi denominada Traço Experimental (TE). Por fim, executaram-se os dois traços em laboratórios a fim de comparar o comportamento de ambos. Segue na Figura 7 o fluxograma do estudo.

Figura 7 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Autora.

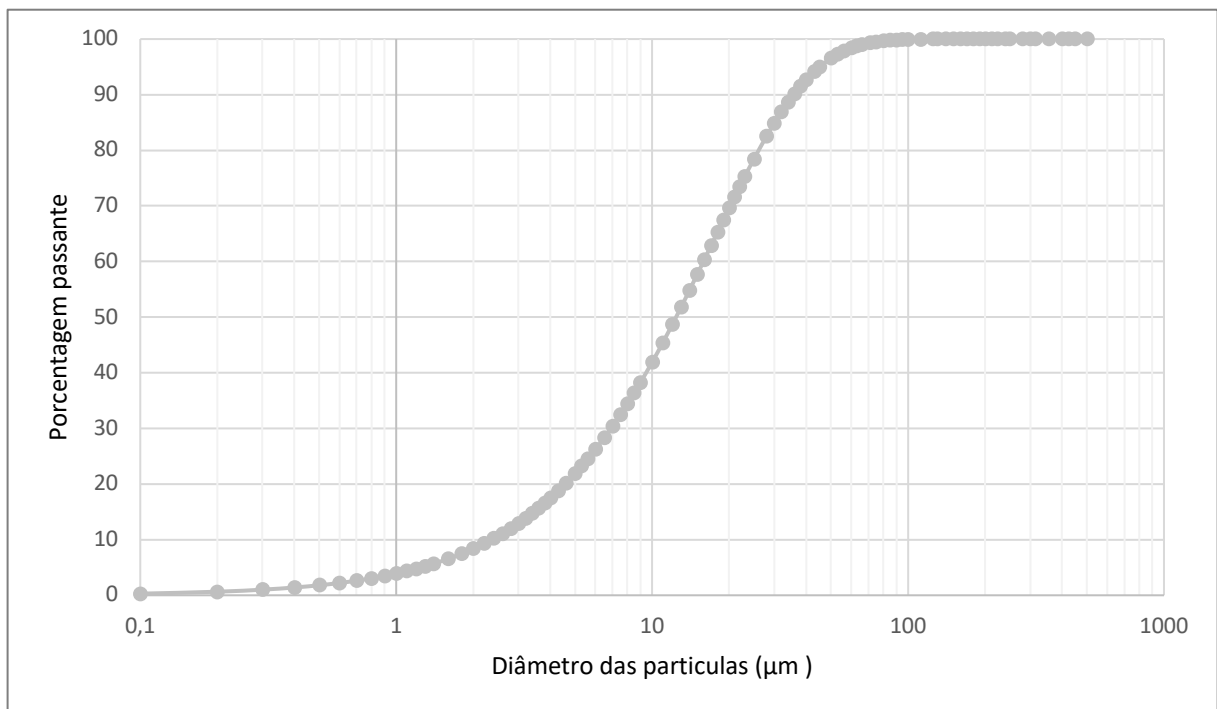
3.1 Seleção e caracterização dos materiais

Todos os materiais pulverulentos e granulares utilizados foram caracterizados quanto à sua massa específica e distribuição granulométrica, conforme será descrito a seguir.

3.1.1 Aglomerante

O cimento utilizado foi do tipo CP IV-32-RS, da marca Votorantim. Por se tratar de um material muito fino, não foi possível determinar o tamanho das partículas pelo método convencional de peneiramento, sendo necessário realizar o ensaio de granulometria a laser. Segue na Figura 8 a curva granulométrica do cimento. A massa específica foi fornecida pelo fabricante com o valor de 2.780 kg/m^3 .

Figura 8 - Curva granulométrica Cimento.



Fonte: Autora.

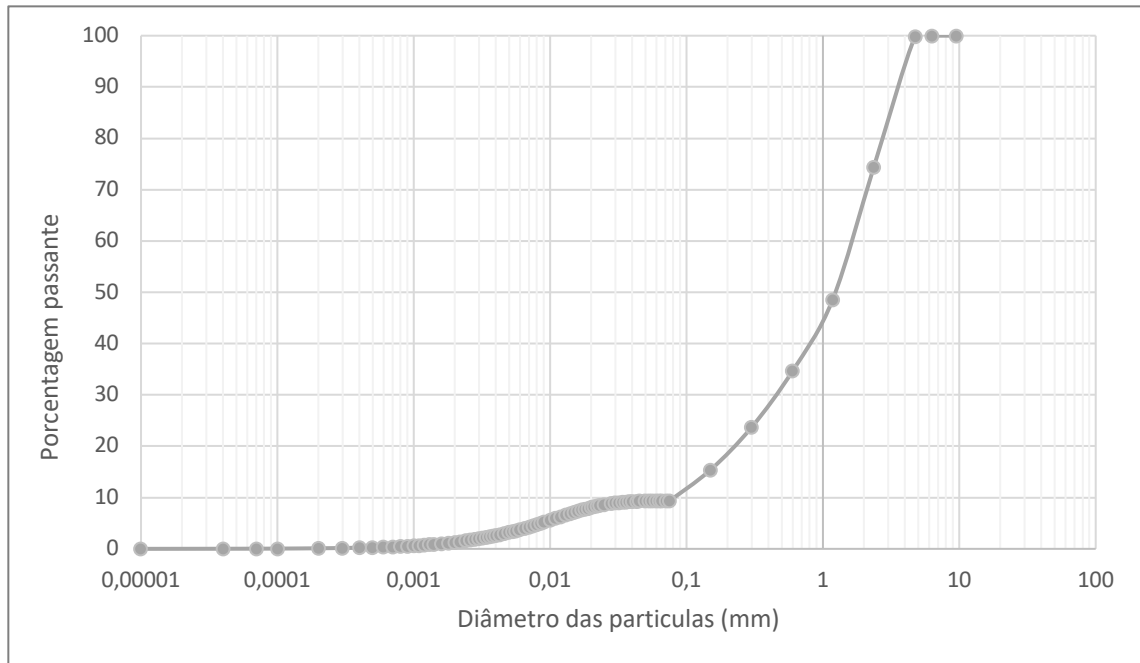
3.1.2 Agregados

3.1.2.1 Areia artificial

Realizou-se o ensaio convencional de peneiramento e o ensaio de granulometria a laser para obtenção da curva granulométrica da areia artificial, conforme Figura 9. Determinou-se, de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), a massa específica da areia, que resultou em 2.790

kg/m^3 e, de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021), a massa unitária solta, que resultou em 1.700 kg/m^3 .

Figura 9 - Curva granulométrica da areia artificial.

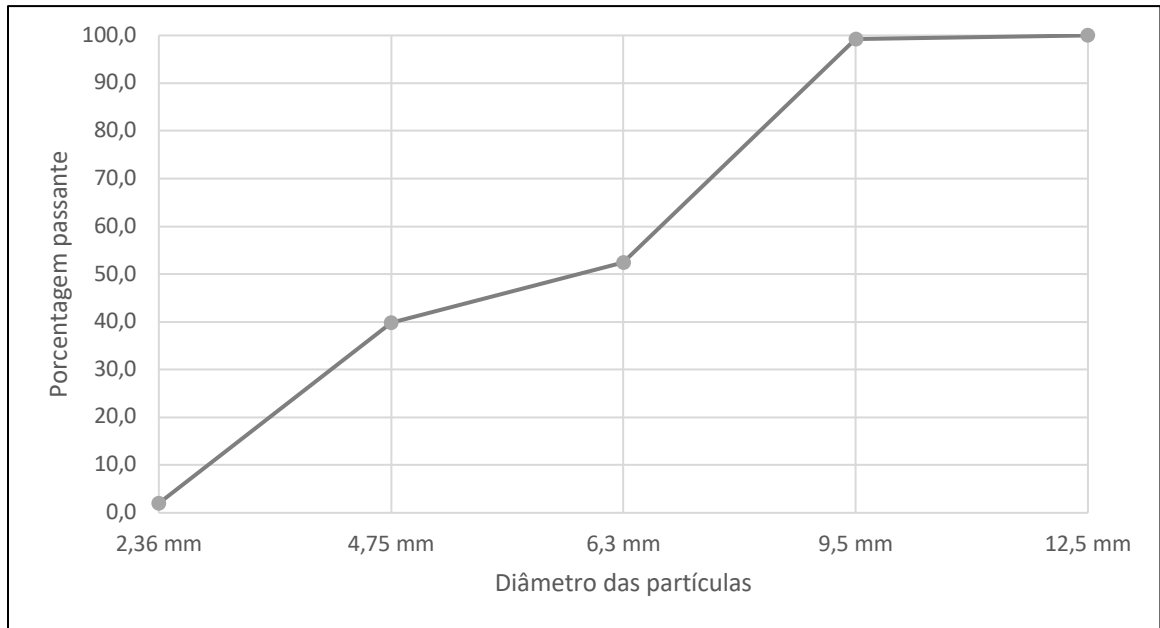


Fonte: Autora.

3.1.2.2 Brita 0

O ensaio de granulometria foi realizado no laboratório da obra PCH Rincão dos Albinos, conforme curva granulométrica apresentada na Figura 10. Determinou-se, de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021) a massa específica real, que resultou em 2.820 kg/m^3 . A massa unitária solta resultou em 1.520 kg/m^3 .

Figura 10 - Curva Granulométrica da Brita 0.

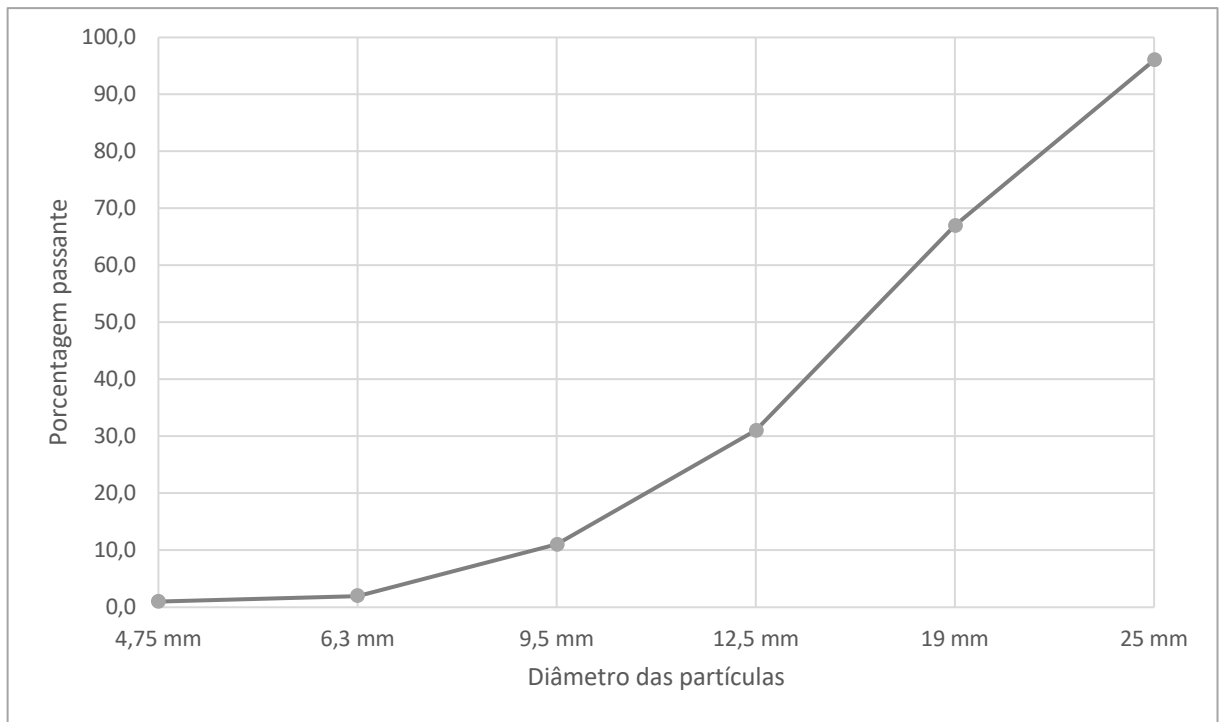


Fonte: Autora.

3.1.2.3 Brita 01

O Ensaio de Granulometria foi realizado no laboratório da obra PCH Rincão dos Albinos, conforme curva granulométrica apresentada na Figura 11. Determinou-se, de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021) a massa específica, que resultou em 2.820 kg/m^3 . A massa unitária solta resultou em 1.490 kg/m^3 .

Figura 11 - Curva granulométrica Brita 01.

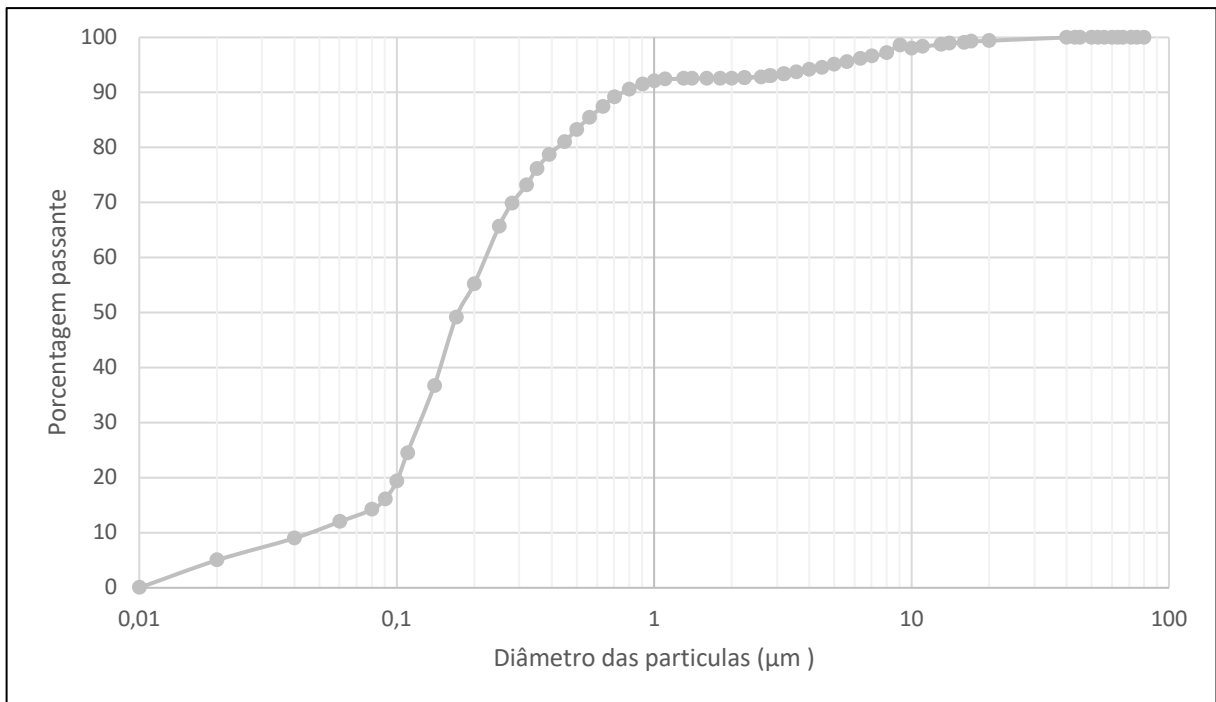


Fonte: Autora.

3.1.3 Adição

A fim de obter continuidade na distribuição da fração fina da mistura, foi utilizado Microsílica da marca Tecnosil. A granulometria do material foi fornecida pelo fabricante, conforme Figura 12.

Figura 12 - Distribuição Granulométrica Microsílica.



Fonte: Autora.

3.1.4 Aditivos

Foram utilizados dois tipos de aditivos ao longo da pesquisa: Um aditivo considerado Plastificante e outro Superplastificante, ambos da fabricante Viapol.

O Aditivo Plastificante utilizado foi o Eucon PL 370, que de acordo com o fabricante, sua dosagem pode ser ajustada para atender elevada fluidez, manutenção da trabalhabilidade e redução do consumo de cimento. É indicado dosagens de até 1%. A massa específica fornecida foi de 1.180 kg/m³.

O Aditivo Superplastificante utilizado foi o Plastol 4100, a base de policarboxilatos. De acordo com o fabricante, utiliza-se como um redutor de água de alta eficiência. A massa específica fornecida foi de 1.070 kg/m³.

3.2 Traço de concreto referência

3.2.1 Dosagem

Utilizou-se como traço referência (TR) um concreto convencional vibrado de 10 MPa depois de 90 dias de cura. A escolha se deu pelo fato de ser o concreto de enchimento da barragem, representando o maior volume a ser aplicado na construção. Segue na Tabela 3 a dosagem para a produção de 1 m³ do mesmo e na Tabela 4 o traço unitário.

Tabela 3 - Composição do Traço Referência.

Cimento (kg)	Brita 01 (kg)	Areia Artificial (kg)	Aditivo Plastif. (kg)	Aditivo Superplastif. (kg)	Água (kg)
225	910	1011	1,575	1,100	210

Fonte: Autora.

Tabela 4 - Traço unitário - TR

Material	Massa Unitária
Cimento	1
Areia artificial	4,49
Brita 01	4,04
Água	0,93
Aditivo Plastificante	0,007
Aditivo Superplastificante	0,005

Fonte: Autora.

3.2.2 Execução do traço de concreto referência

Inicialmente, executou-se o Traço Referência no laboratório a fim de obter os parâmetros de análise no estado fresco e no estado endurecido.

3.2.2.1 Preparação dos materiais

Inicialmente, separou-se os materiais necessários para execução dos traços na betoneira e ensaios de abatimento e massa específica, conforme Figura 13. Têm-se como instrumentos necessários:

- a) Moldes de corpo de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015);
- b) Haste de adensamento de aço, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015);
- c) Placa metálica plana de dimensão superior a 500 mm, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020);
- d) Molde de tronco de cone oco, com dimensão de diâmetro de base inferior de 200 mm, com diâmetro da base superior de 100 mm e a altura de 300 mm, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020);
- e) Betoneira com um volume de 420 L;
- f) Desmoldante a base de óleo vegetal;
- g) Colher de Pedreiro;
- h) Régua;

i) Balança.

Figura 13 - Organização dos materiais para execução dos traços.



Fonte: Autora.

Pesaram-se separadamente os materiais, que foram armazenados em recipientes adequados para o início dos ensaios. Foram feitas as determinações da umidade dos agregados, valores que foram levados em consideração no cálculo do peso de água a ser adicionada na mistura.

3.2.2.4 Execução do Traço

Inicialmente, umedeceu-se a betoneira a fim de diminuir a perda de água do concreto para o equipamento. Adicionou-se toda brita com aproximadamente 80% da água do traço e, na sequência, colocou-se a areia artificial e o cimento. Após verificar a homogeneização, adicionou-se o restante da água de amassamento juntamente com os aditivos plastificante e superplastificante a fim de reproduzir o processo executivo da central de concreto da obra, em que utiliza-se o plastificante a fim de garantir a manutenção da trabalhabilidade e o superplastificante para garantir a bombeabilidade.

Depois, transferiu-se o concreto pronto para um recipiente umedecido, a fim de reduzir a perda de água. Observou-se então a trabalhabilidade do concreto com o auxílio de uma colher de pedreiro. Aferiu-se também a temperatura do concreto, conforme Figura 14, que resultou em 31,8°C.

Figura 14 - Verificação da temperatura do TR.



Fonte: Autora.

Todos os equipamentos necessários para o ensaio de abatimento foram umedecidos e procedeu-se com o ensaio de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). Após o processo, o molde foi retirado cuidadosamente na posição vertical, com movimento constante. Imediatamente após a retirada, mediu-se o abatimento do concreto, que resultou em um *slump* de 100 mm, conforme Figura 15.

Figura 15 - Verificação do abatimento do TR.



Fonte: Autora.

3.2.2.5 Moldagem e cura dos corpos de prova

O processo de moldagem dos corpos de prova foi executado de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Inicialmente garantiu-se a completa limpeza dos moldes e revestiu-se internamente os mesmos com desmoldante. Posteriormente, os moldes foram preenchidos com concreto em duas camadas sucessivas, com volumes aproximadamente iguais, cada uma delas recebendo 12 golpes para conferir o adensamento necessário conforme a norma. A fim de garantir o fechamento de eventuais vazios, bateu-se levemente na face externa dos moldes com o auxílio de um martelo de borracha e rasou-se com colher de pedreiro, retirando o excesso de concreto existente.

Devido a pouca quantidade de moldes de corpos de prova disponíveis no laboratório, a amostragem teve que ser reduzida para 2 corpos de prova para cada idade de rompimento de 3, 7, 14, 28 e 56 dias.

Após o processo de moldagem, identificou-se cada corpo de prova, que foram armazenados em local protegido pelas primeiras 24 horas, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Corpos de prova identificados e armazenados.



Fonte: Autora.

Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e transferidos para câmara úmida, com temperatura controlada de 25 °C e umidade relativa de 96%, conforme Figura 17.

Figura 17 - Câmara úmida utilizada para cura dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

3.2.2.6 Ensaio de resistência a compressão

A metodologia para determinação da resistência a compressão dos corpos de prova seguiu o determinado na norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Os ensaios foram realizados no laboratório da PCH Rincão dos Albinos, executados com prensa eletrohidráulica da marca Fortest, devidamente calibrada, com a velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s.

Antes de iniciar o ensaio, acoplou-se no topo do corpo de prova um molde de neoprene para nivelar o mesmo e assim, aplicar a carga de maneira equivalente em todo o corpo de prova, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Corpo de prova com molde de Neoprene.



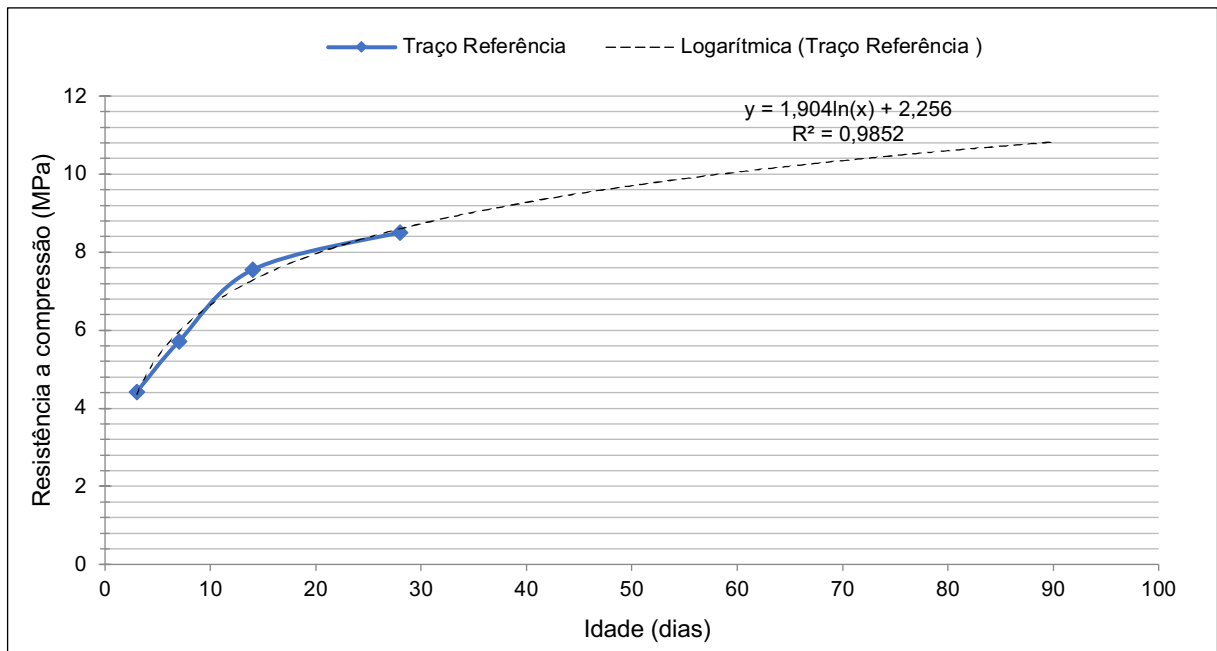
Fonte: Autora.

Após o rompimento de cada corpo de prova, foram registrados os resultados das cargas aplicadas e os tipos de ruptura. Repetiu-se o processo descrito para todos os corpos de prova das idades de 3, 7, 14, 28 e 56 dias.

3.3 Estudo de dosagem e empacotamento

Para o desenvolvimento da composição de empacotamento otimizado (TE), inicialmente analisaram-se os resultados do ensaio de resistência a compressão do TR, que até o momento apresentava resultados de rompimento das idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Dessa forma, elaborou-se uma curva de crescimento das resistências a fim de avaliar os resultados, conforme Figura 19.

Figura 19 - Crescimento das resistências - Traço Referência.



Fonte: Autora.

Analisando os resultados da curva, em conjunto com resultados obtidos a partir das moldagens dos concretos produzidos na central de concreto da obra, constata-se que é possível reduzir o consumo de cimento, já que para esse consumo a resistência resulta superior ao especificado em projeto aos 90 dias. A fim de avaliar o comportamento da mistura, reduziu-se o consumo de cimento em 20 kg desde o princípio dos estudos do Traço Experimental.

Utilizou-se no Software *EMMA* o Traço Referência, conforme Figura 20, e pelo método do Andreassen Modificado foram testadas alternativas para o coeficiente de distribuição “*q*” com o objetivo de gerar uma curva teórica ideal próxima da real. Por tratar-se de um concreto adensado por vibração, testaram-se valores próximos a 0,30, conforme Vanderlei (2004). Na Figura 21 se observa que a alternativa “D” com $q=0,32$ é a que possui melhor enquadramento não somente da fração mais grossa (mais perceptível visualmente) como também da fração mais fina ($\# < 100$ microns) devido à área remanescente formada entre as linhas azul e vermelha ser mais reduzida e portanto representando o melhor enquadramento dentro das limitações intrínsecas dos materiais.

Figura 20 - Lançamento do Traço Referência no programa EMMA.

Recipe Details

C:\Program Files (x86)\EMMA\Recipes\Traco Referencia - 10 Mpa.RCP
This is a recipe file. Material data are copied from the library and stored together with the recipe

Name: Traco Referencia - 10 Mpa
Description:

Dry Density: 2.20 kg/m³
Green Density: 2.41 kg/m³
Price pr MT: (local currency)
CO2: N/A kg/m³
Embodied Energy: N/A kJ/m³

Water Quantity: 210.00 Vol% Water: 21.52
Last Change: 2/2/2022 5:27:51 PM Version: 1

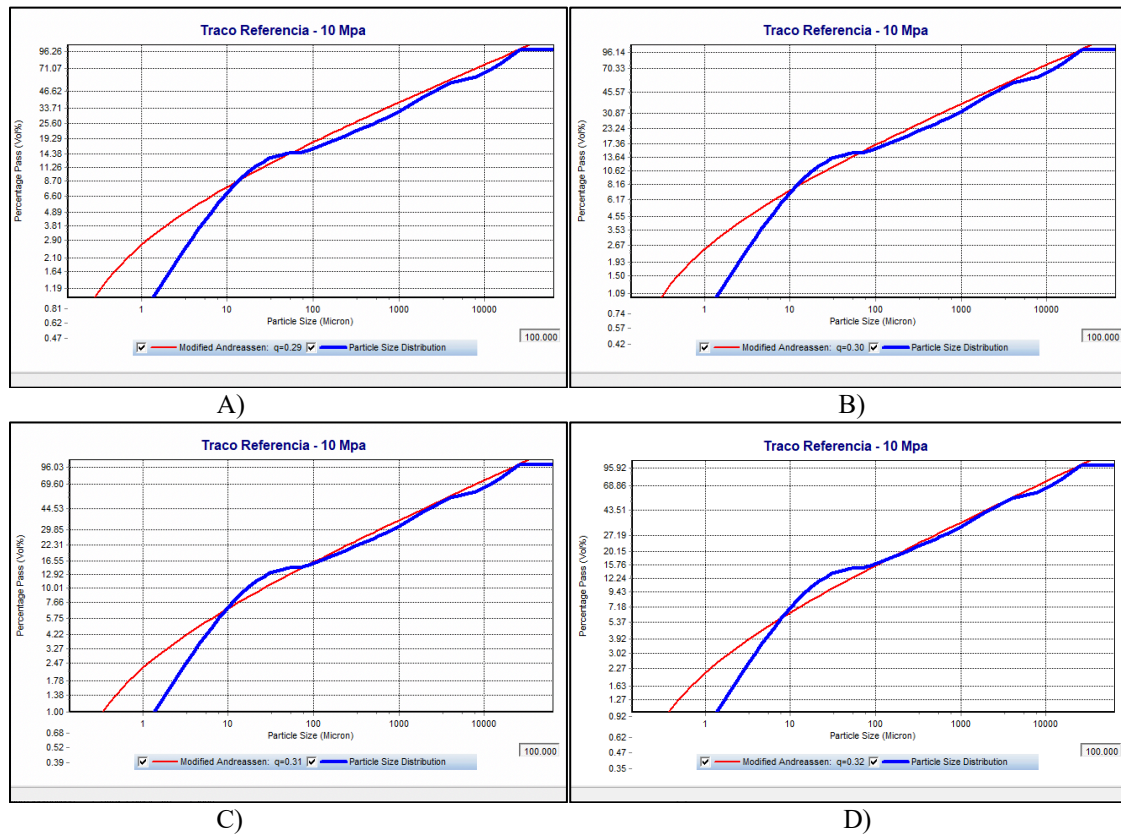
Materials In Composition

Material Name	Density	Quantity	Vol %	Price	Version	CO2/kg	KJ/kg
Brita 01	2.82	910.00	42.13			0.00	0.00
Areia artificial	2.79	1011.00	47.31			0.00	0.00
Cimento CP IV	2.78	225.00	10.57			0.00	0.00

Calculation Model

Selected Model: Modified Andreasen
Parameters:
q-Value: 0.32
Max. Particle Size: 25000
Min. Particle Size: 0.10

Fonte: Autora.

Figura 21 - Verificação do Coeficiente de Distribuição para (A) $q = 0,29$. (B) $q = 0,30$.
(C) $q = 0,31$. (D) $q = 0,32$.

Fonte: Autora.

A partir da análise das figuras acima é possível identificar uma descontinuidade na granulometria dos finos da mistura, que se acentua entre as partículas com dimensões inferiores a 8 μm , constatando-se a necessidade de utilizar uma adição mineral para melhor ajuste da curva. Por haver disponibilidade em obra, somado aos benefícios do material, optou-se pela utilização da Microsílica, que possui partículas suficientemente finas para preencher o espaço entre as partículas de cimento, melhorando o empacotamento.

Com a adição da Microsílica, fixou-se o Cimento Equivalente do traço e testaram-se diferentes proporções dos materiais da mistura no *EMMA* a fim de aproximar ao máximo a curva real da curva teórica ideal de empacotamento para $q=0,32$. Ao final da análise, a composição apresentada na Tabela 5 e Figura 22 foi a que melhor correspondeu ao objetivo do estudo, conforme ilustrado na Figura 23.

Tabela 5 - Composição Traço Experimental.

Cimento (kg)	Microsílica (kg)	Brita 01 (kg)	Pedrisco (kg)	Areia Artificial (kg)	Água (kg)
175	30	910	225	1026	191

Fonte: Autora.

Figura 22 - Traço Experimental no programa EMMA.

The screenshot shows the EMMA software interface for a recipe file named 'TRACO PAULO.RCP'. The main window displays the following information:

- Name:** Traco Experimental 01
- Description:** (empty field)
- Water Quantity:** 191.00
- Vol% Water:** 19.18
- Last Change:** 2/2/2022 6:09:53 PM
- Version:** 1
- Dry Density:** 2.26 kg/m³
- Green Density:** 2.45 kg/m³
- Price pr MT:** (local currency)
- CO2:** N/A kg/m³
- Embodied Energy:** N/A kJ/m³

The **Materials In Composition** table is as follows:

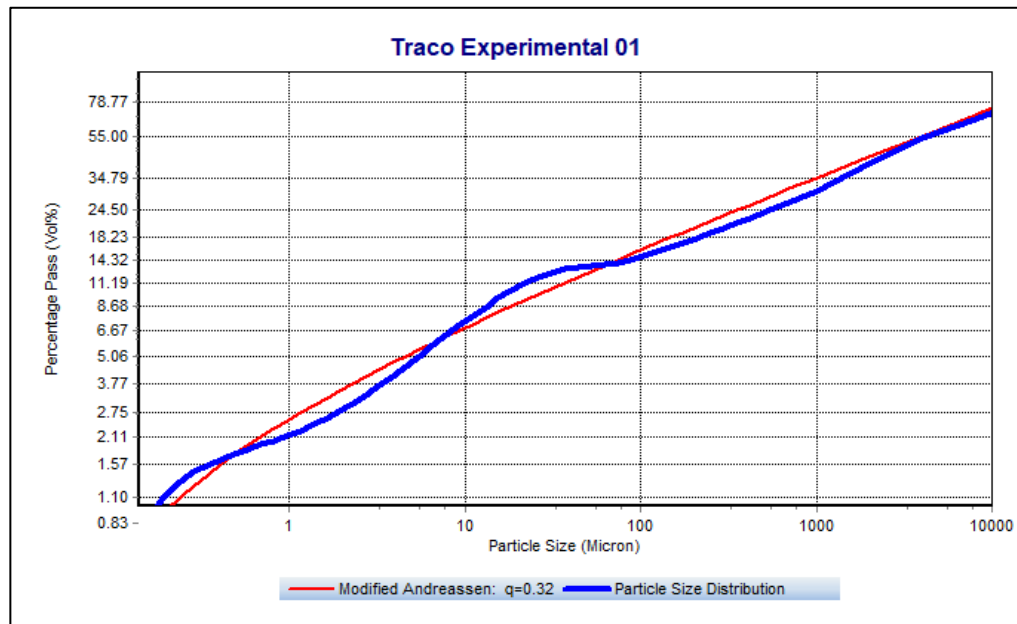
Material Name	Density	Quantity	Vol %	Price	Version	CO2/kg	KJ/kg
Cimento CP IV	2.78	175	7.82			0.00	0.00
Areia artificial	2.79	1026.00	45.70			0.00	0.00
Pedrisco	2.82	225.00	9.92			0.00	0.00
Brita 01	2.82	791.00	34.86			0.00	0.00
Silica - Tecnosil	2.20	30	1.69			0.00	0.00

The **Calculation Model** section shows:

- Selected Model:** Modified Andreassen
- Parameters:**
 - q-Value: 0.32
 - Max. Particle Size: 25000
 - Min. Particle Size: 0.04

Fonte: Autora.

Figura 23 - Curva granulométrica do Traço Experimental.



Fonte: Autora.

3.4 Execução do Traço Experimental

Executou-se o traço obtido pela otimização do empacotamento a fim de avaliar as características do concreto bem como definir o percentual de aditivo. A composição completa do Traço Experimental 01 é demonstrado na Tabela 6 e o traço unitário na Tabela 7.

Tabela 6 - Composição Traço Experimental 01.

Cimento (kg)	Microsílica (kg)	Brita 01 (kg)	Pedrisco (kg)	Areia Artificial (kg)	Água (kg)	Aditivo Plastif. (kg)	Aditivo Superplastif.(kg)
175	30	791	225	1026	191	1,43	1,85

Fonte: Autora.

Tabela 7 - Traço Unitário – TE.

Material	Massa Unitária
Cimentante (Cimento+ Microsílica)	1
Areia artificial	5,00
Brita 0	1,10
Brita 1	3,86
Água	0,93
Aditivo Plastificante	0,007
Aditivo Superplastificante	0,009

Fonte: Autora.

3.4.1 Parâmetros do concreto no estado fresco

Os procedimentos adotados para execução foram os mesmos utilizados para o Traço Referência. Após transferir-se o concreto para um recipiente úmido, observou-se a trabalhabilidade do mesmo e verificou-se a temperatura, conforme a Figura 24, que resultou em 28,9 °C.

Figura 24 - Verificação da temperatura do Traço Experimental.



Fonte: Autora.

Realizou-se o ensaio de abatimento em conformidade com a NBR 16889 (ABNT, 2020), que resultou em uma slump de 90 mm, conforme Figura 25.

Figura 25 - Verificação do abatimento do Traço Experimental.



Fonte: Autora.

3.5 Ensaio de absorção

Após a definição do Traço Experimental e obtenção dos resultados dos ensaios de compressão axial nas primeiras idades, realizou-se o ensaio de absorção por capilaridade, a fim de avaliar a permeabilidade dos dois traços.

Executou-se o ensaio conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012) Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Inicialmente, moldou-se, para cada traço, 3 corpos de prova cilíndricos com dimensão 15x30. Essas amostras foram ensaiadas aos 14 dias.

Ao preparar os corpos de prova para execução do ensaio foram determinadas as massas ao ar seco de cada amostra e, após isso, todas permaneceram em estufa até atingir a constância da massa, seguindo os critérios determinados na norma. Depois de secos, os corpos de prova foram imersos em água, de forma que o nível de água permaneceu constante em 5 ± 1 mm acima da face inferior de cada um, conforme Figura 26.

Figura 26 - Execução do ensaio de absorção por capilaridade.

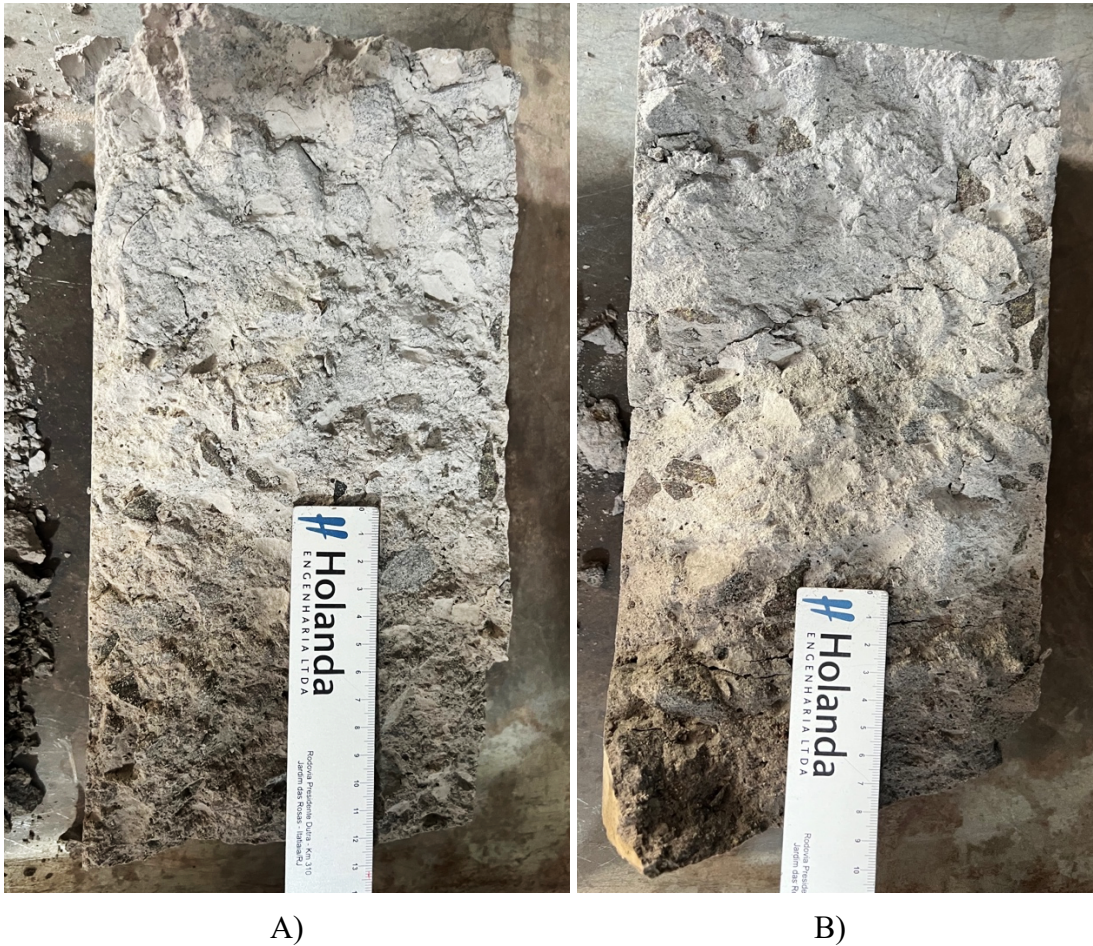


Fonte: Autora.

A massa saturada de cada amostra foi determinada nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após início do ensaio. E então, a partir dos dados coletados, a absorção de água foi calculada.

Conforme a norma, após a última etapa, romperam-se os corpos de prova por compressão diametral, a fim de visualizar a distribuição de água no seu interior, conforme Figura 27.

Figura 27 - Distribuição de água no interior dos corpos de prova para (A) Traço Referência. (B) Traço Experimental.



Fonte: Autora.

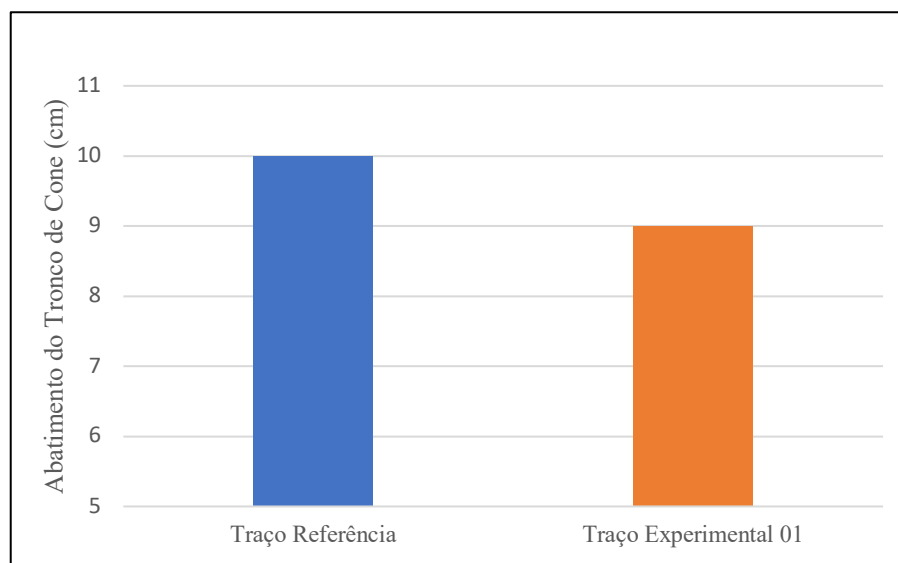
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Parâmetros do concreto no estado fresco

4.1.1 Abatimento

O ensaio de consistência do estado fresco do concreto foi realizado conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020) através do abatimento do tronco de cone. Os resultados encontrados no Traço de Concreto Referência e no Traço Experimental seguem na Figura 28.

Figura 28 - Resultados dos ensaios de abatimento.



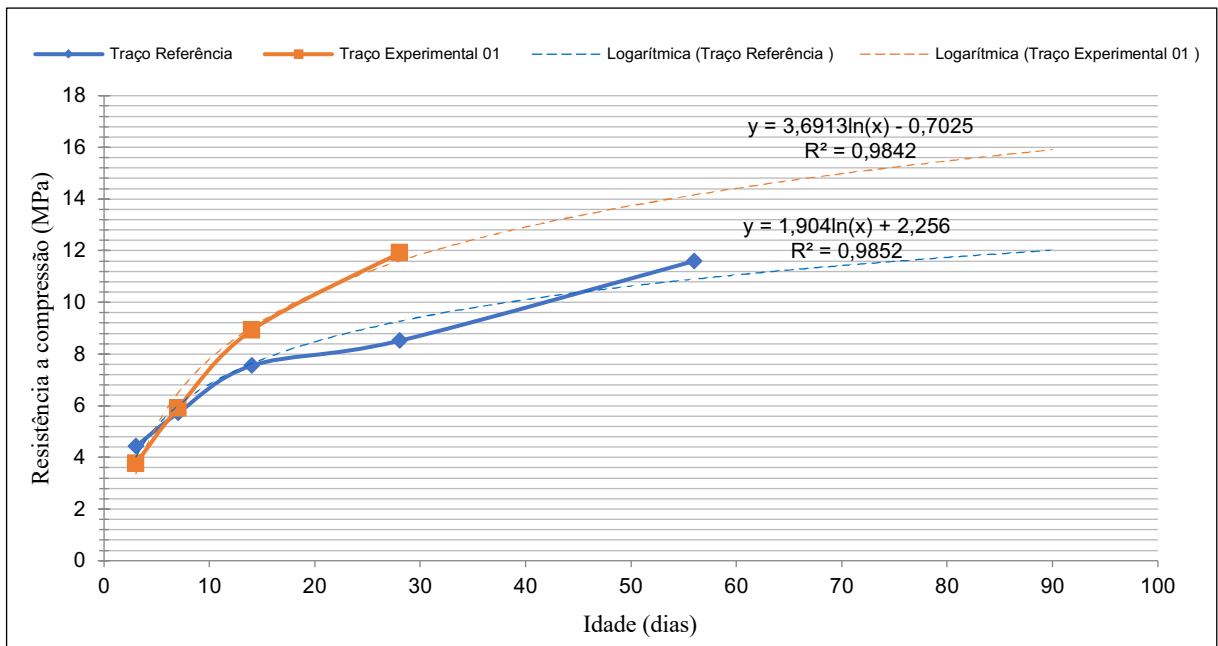
Fonte: Autora.

4.2 Parâmetros do concreto no estado endurecido

4.2.1 Ensaio de resistência a compressão axial

Os resultados de resistência a compressão axial do Traço Referência obtidos aos 3 dias, 7 dias, 14 dias, 28 dias e 56 dias, bem como os resultados do Traço Experimental obtidos aos 3 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias estão ilustrados na Figura 29 juntamente com a curva de crescimento teórica dos dois traços até os 90 dias - idade especificada em projeto para o concreto de 10 MPa da obra.

Figura 29 - Resultados resistência a compressão TR e TE.

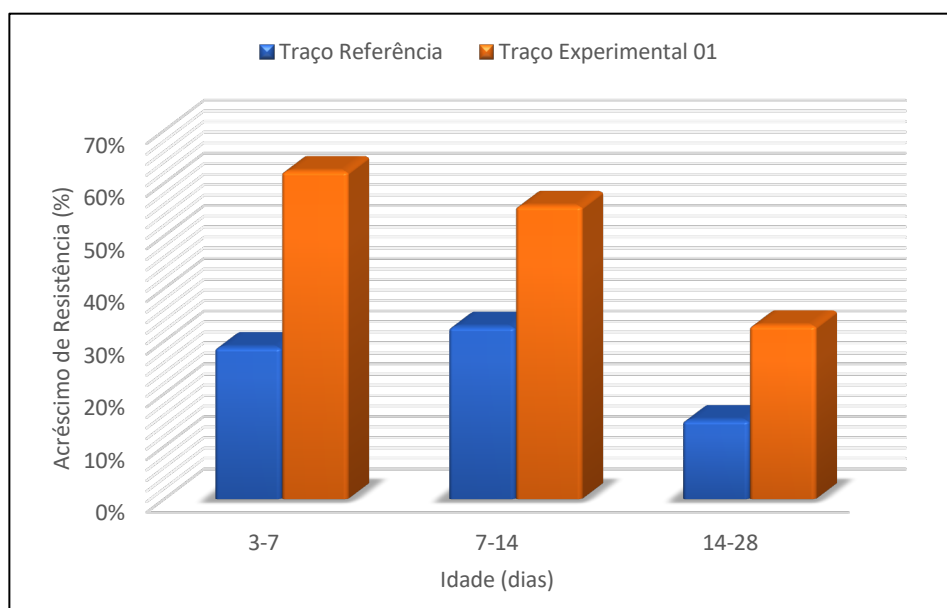


Fonte: Autora.

Observa-se então que, assim como esperado, o Traço Experimental, com empacotamento otimizado, obteve resistência superior em todas as idades, com tendência de alcançar resistência próxima a 16 MPa aos 90 dias. Mostrando-se possível realizar ainda uma redução significativa de cimento Portland para a resistência desejada.

Na Figura 30 são apresentados os acréscimos de resistência em porcentagem para cada traço de concreto em cada idade.

Figura 30 - Acréscimo de Resistência x Idade.



Fonte: Autora.

Observa-se que o traço que teve substituição parcial de cimento por Microsílica apresentou acréscimo de resistência superior ao Traço de Concreto Referência. Isso se explica pelo fato de, além do empacotamento otimizado, o traço possuir, somada a hidratação do cimento, a reação pozolânica na presença de água, entre o CH e a Sílica, gerando mais produtos hidratados.

4.2.2 Ensaio de absorção por capilaridade

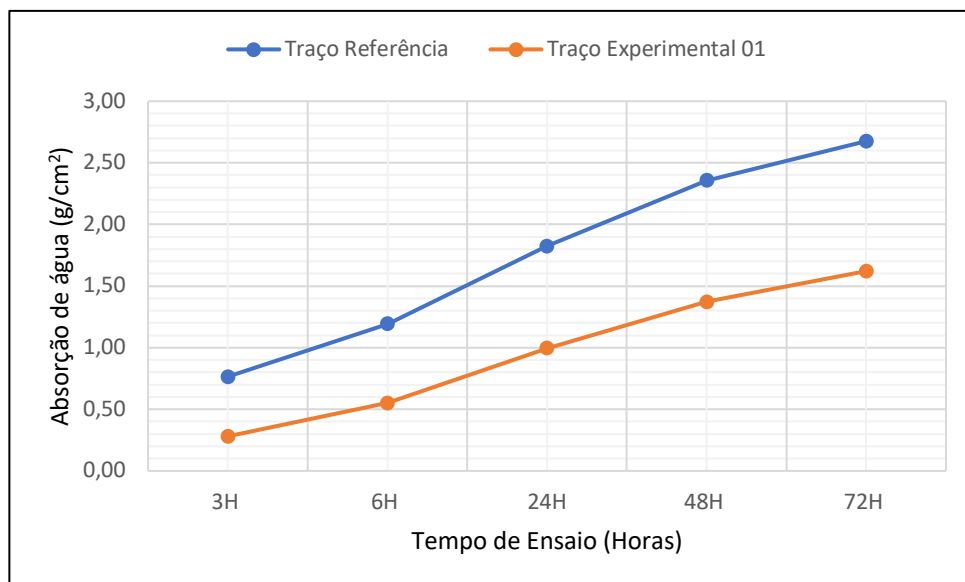
A Tabela 8 e a Figura 31 apresentam os resultados do ensaio de absorção por capilaridade dos concretos estudados.

Tabela 8 - Maiores Valores de absorção de água por capilaridade (g/cm²).

TIPO	3H	6H	24H	48H	72H
TRAÇO REFERÊNCIA	0,77	1,19	1,82	2,36	2,68
TRAÇO EXP.	0,28	0,55	1,00	1,37	1,62

Fonte: Autora.

Figura 31 - Maiores Valores de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Autora.

Com base nos resultados expostos, comprova-se que o traço com melhor empacotamento tem absorção de água reduzido, indicando menor porosidade. Com isso, garantimos um concreto com maior durabilidade e menor permeabilidade.

4.3 Viabilidade Econômica

A fim de avaliar a viabilidade econômica de implantação do Traço experimental, realizou-se um comparativo do custo em relação ao Traço Referência. Como os agregados são britados em obras, o custo desses já estão considerados no preço final do concreto, não tendo o valor unitário de cada. Dessa forma, foram tomados como base os dados encontrados no SINAPI 2022. Já para o Cimento, os aditivos e a adição, considerou-se os preços praticados em obra. A relação de preços segue na Tabela 9. O custo total do TR e do TE estão expostos na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 9 - Preços unitários dos materiais.

MATERIAL	UNIDADE	PREÇO (R\$)
Cimento CP IV 32 - RS	kg	0,59
Areia Artificial	m ³	69,00
Pedrisco	m ³	70,51
Brita 01	m ³	61,07
Microsílica	kg	1,84
Aditivo Polifuncional	L	3,25
Aditivo superplastificante	L	13,48

Fonte: Autora.

Tabela 10 - Custo total Traço Referência.

CONCRETO CONVENCIONAL - TR		
MATERIAL	CONSUMO	CUSTO (R\$)
Cimento CP IV 32 - RS	225 kg	132,75
Areia Artificial	0,59 m ³	40,71
Brita 01	0,61 m ³	37,25
Aditivo Polifuncional	1,33 L	4,33
Aditivo superplastificante	1,02 L	14,82
Total		229,88

Fonte: Autora.

Tabela 11 - Custo total Traço Experimental.

CONCRETO CONVENCIONAL - TE		
MATERIAL	CONSUMO	CUSTO (R\$)
Cimento CP IV 32 - RS	175 kg	103,25
Areia Artificial	0,60 m ³	41,40
Pedrisco	0,15 m ³	10,58
Brita 01	0,53 m ³	32,37
Microsílica	30 kg	55,20
Aditivo Polifuncional	1,21 L	3,94
Aditivo superplastificante	1,72 L	23,24
Total		269,98

Fonte: Autora.

A partir dos dados expostos verifica-se que o traço com melhor empacotamento apresenta custo de fabricação 17% superior ao do traço referência. Como substituiu-se parte do cimento por microsíllica, o fato de a mesma ser cerca de 3 vezes mais cara que o cimento impactou no custo final do m³ produzido.

Pode-se também avaliar o custo do m³ em relação a resistência média prevista aos 90 dias. Dessa forma, segue na Tabela 12 o resultado do custo do concreto para 1 MPa.

Tabela 12 - Avaliação do (Custo/m³)/MPa para cada traço.

Traço	Custo/m³ (R\$)	Resistência Média - 90 dias (MPa)	(Custo/m³)/MPa
TR	229,88	10,82	21,25
TE	269,98	15,90	16,98

Fonte: Autora.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos estudos apresentados pode-se concluir que:

- O estudo de dosagem que considerou o ajuste do empacotamento das partículas resultou em um traço de concreto com menor consumo de cimento.
- Como observado no ensaio de resistência a compressão axial, o Traço Experimental apresentou desempenho superior ao Traço Referência.
- No que se refere à absorção de água, o TE apresentou menor variação no seu peso durante o ensaio quando comparado ao Traço Referência. Isso se deve ao menor número de vazios do concreto, ou seja, menor porosidade.
- Ao avaliar economicamente os dois traços, o m³ do TE apresentou-se mais caro. No entanto, ao comparar os custos dos concretos em relação a resistência média prevista aos 90 dias, o TE mostra-se mais viável.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros na área, a fim de complementar esse, destaca-se:

- Avaliar o desempenho de outras adições na otimização do empacotamento;
- Utilizar diferentes valores de coeficiente de distribuição a fim de avaliar o comportamento da mistura;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

_____. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.

_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

_____. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116 R-90: Cemente and concreto terminology**: ACI manual of concrete practice. Detroit, 1994b. Part 1: materials and general properties of concrete.

ALMEIDA, I. R. de. **Concretos de Alto Desempenho**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005. v. 2, cap. 38, p. 1159-1193.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção – Normas, Especificações, Aplicações e Ensaios de Laboratório**. 1. ed. São Paulo. Pini, 2012.

BROWN, P. W. et al. Porosity/permeability relationships. In: ROY, D. M. et al. **Concrete microstructure porosity and permeability**. Washington, DC: Strategic Highway Research Program - National Research Council, 1993.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção – Novos Materiais para Construção Civil**. 5. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CASTRO, A; FERREIRA, F. **Effect of particle packing in the durability of high performance concretes**. Ingeniería de Construcción, v. 31, n. 2, p. 91-104, 2016.

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

ELKEM S/A. EMMA - Elkem Material Mix Analyzer - Version 3.5.2 - Aplicativo - 2012.

FUNK, J. E.; DINGER, D. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing**. New York: Springer Science & Business Media, 1994.

GIAMMUSSO, S. E. **Praparo do Concreto ET – 42**. São Paulo: ABCP, 1995.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese apresentada na COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

GUERRA, R. S. Clube do Concreto. Empacotamento (8) software Elkem. 2014. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2014/01/empacotamento-8-software-elkem.html>>.

ISAIA, Geraldo S. Pesquisa sobre cobertura da armadura das estruturas de concreto. Santa Maria, RS, 2002.

LANG, C. L. **Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland**. Dissertação apresentado a Universidade federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006. MATOS, L. W. de. Análise Dos

Métodos De Redução De Emissão De Co2 Em Uma Indústria De Cimento. Anais...
CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, Rio de Janeiro, 2015.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**.
3.ed. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto** 2^a ed. Porto Alegre: Bookman 2013
p. 2, 12 – 22, 63, 78 – 80, 88, 157 - 158, 235 – 236, 268 - 269.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, C.O.; MACIEL, G.F.; CASTRO, A.L; BARBOSA, M.P.; CAMPOS, R.S. revista
Matéria, v. 23, n. 1, 2018.

OLIVEIRA, I.R., STUDART, A.R., PILEGGI, R.G., et al., **Dispersão e empacotamento de
partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**, São Paulo, Fazendo Arte,
2000

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The effects of aggregates characteristics on the
performance of portland cement concrete**. International Center for Aggregates
Research, Austin. 2004

REBMANN, M. S. **Robustez de concreto com baixo consume de cimento Portland:
desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos
agregados**. 2016. 252 f. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo, São Paulo, SP, 2016. ROADMAP. ROADMAP Tecnológico. Rio de Janeiro: SNIC,
2019.

ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, R. G. Impact of Aggregate Grading and Air-
Entrainment on the Properties of Fresh and Hardened Mortars. **Construction and Building
Materials**, v. 82, p. 219-226, 2015.

TATTERSALL, G. H. **The Workability of Concrete**: a view point publication. London:
Cemente and Concrete Association, 1978.

TERZIJSKI, I. Compatibility of Components of High and Ultra High Performance Concrete.
Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete.
Kassel, Germany, p. 175-186, september, 2004.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.