

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
NÍVEL MESTRADO**

JONATHAN MELLO KEBHARD

**OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS LIGANTES EM PASTAS ATRAVÉS DO
EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM MICROESCALA COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND**

São Leopoldo

2023

JONATHAN MELLO KEBHARD

**OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS LIGANTES EM PASTAS ATRAVÉS DO
EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM MICROESCALA COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em 2023 da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo

2023

K25o

Kebhard, Jonathan Mello.

Otimização da eficiência dos ligantes em pastas através do empacotamento de partículas em microescala com substituição parcial de cimento Portland / por Jonathan Mello Kebhard – 2023.

112 f. : il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Mauricio Mancio.

1. Empacotamento de partículas. 2. Concreto.
3. Microestrutura. 4. Resistência. 5. Sustentabilidade. I. Título.

CDU 624

Catálogo na Fonte:
Bibliotecário Maicon Juliano Schmidt - CRB 10/2791

JONATHAN MELLO KEBHARD

**OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS LIGANTES EM PASTAS ATRAVÉS DO
EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM MICROESCALA COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em 2023 da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 27 de julho de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Christ – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Prof. Dr. Claudio Kazmierczak – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Prof. Dr. Eduardo Polesello – Universidade Feevale

Dedico este trabalho para minha família, minha esposa Tanara Pereira Kebhard e ao meu querido filho Théo Pereira Kebhard.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus. Por me acompanhar e dar essa oportunidade de estar exatamente onde estou hoje, com todos os desafios e aprendizados. Por me transmitir muita força para dedicação em momentos que realmente precisei.

Agradeço ao meu orientador, Prof Dr. Mauricio Mancio, pela confiança, por todos os ensinamentos, os quais me ajudaram na realização de todas as etapas dessa tese.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, sempre me incentivando. Em especial, ao meu querido filho Théo Pereira Kebhard, sendo uma verdadeira fonte de energia, dando sentido a tudo para eu ter determinação em continuar.

Ao prof Dr. Roberto Christ por ter compartilhado conhecimentos ao longo do estudo que muito ajudaram no desenvolvimento deste mesmo.

Aos meus colegas de trabalho Cicero Augusto Reichert, Christiano Augusto Muller Neto, Eliziane Jubanski, Gabrielle Mattos, João Vinicius Buezer Santos, Kleison e Lucas Bez Sehn, que ajudaram na caracterização dos materiais.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMC, Mateus, Helen e Leonardo pelo apoio técnico e ajuda nas análises realizadas.

Ao pessoal do Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMAT, Marluci e Graceane, pelo apoio e agilidade nos ensaios realizados.

Ao pessoal do Laboratório da história da Vida e da Terra – LAVIGÆA e o Museu de história geológica do Rio Grande do Sul – MHGEO, Romulo Cenci e Gabriela da Rosa Correa pela ajuda técnica no levantamento fotográfico das amostras da pesquisa.

Às empresas Votorantim Cimentos, Engemix, Cedro Engenharia, Comércio e Mineração e GCP que forneceram os materiais necessários para a produção de pastas estudadas.

À empresa Concresul, meu atual trabalho, empresa que me apoiou e incentivou para a continuação e realização deste.

Por fim, agradeço a todos que de forma indireta ou direta contribuíram para essa pesquisa.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

RESUMO

A construção civil possui grande consumo de recursos e emissões de gases de efeito estufa, e a sustentabilidade tem se tornado um dos principais focos de atenção. Dentre os materiais utilizados na produção de materiais cimentícios, é o cimento Portland que possui maior impacto ambiental. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a aplicação de método de empacotamento de partículas em microescala para obtenção de pastas com maior eficiência dos ligantes, utilizando adições minerais como sílica ativa, fíler calcário, fíler granítico e cinzas pozolânicas. Essas adições são um ponto positivo para a sustentabilidade, podendo reduzir o consumo de cimento, que possui grande impacto na emissão de CO₂, na escala de produção. Na primeira etapa, foram caracterizados os materiais finos. Na etapa 2, a proporção dos materiais finos foi ajustada, em diferentes misturas, buscando reduzir o índice de desvio de empacotamento (IDE) em relação ao modelo de empacotamento de partículas de Alfred. Na terceira etapa, dois traços adicionais foram propostos levando em conta também a composição ideal da pasta em termos de cálculos estequiométricos. Na quarta etapa foram confeccionadas as pastas, com controle do espalhamento no estado fresco. Observando em dois tipos de cura, as pastas foram caracterizadas no estado endurecido quanto a resistência à compressão, com levantamento fotográfico da parte interna dos corpos de prova para análise da dispersão das partículas. Em geral, no estado fresco, as pastas com melhor empacotamento obtiveram menor consistência e demandaram mais aditivo. No estado endurecido, as pastas ajustadas, apesar de não atingirem o potencial de resistência das pastas referências, obtiveram índice de eficiência de ligantes melhor, com redução do consumo de cimento por unidade de resistência (kg/MPa) em 42,5% nas pastas com cimento CII F-40 e 20,7% de redução nas pastas com cimento CIV 32. A partir de um teor de pasta ideal adotado para concretos, calcula-se que há possibilidade de produção de concretos com 3,0 kg/MPa. Avaliando em termos de sustentabilidade, considerando a aplicação das pastas otimizadas na dosagem de concretos, e levando-se em conta o fator clínquer, é possível a produção de concretos com 2,4 kg de clínquer por MPa com cimento CII F-40, e 2,2 kg de clínquer por MPa para o cimento CIV 32. O método utilizado permite gerar pastas otimizadas para concretos, com alto desempenho e menor impacto ambiental, devido à maximização da eficiência no uso dos ligantes.

Palavras-chave: empacotamento de partículas, concreto, microestrutura, resistência e sustentabilidade.

ABSTRACT

Civil construction consumes a lot of resources and emits greenhouse gases, and Sustainability becomes one of the main focuses of attention. Among the materials used in the production of cementitious materials, Portland cement has the greatest environmental impact. In this context, the present work proposes the application of a particle packing method to obtain pastes with greater binder efficiency, using mineral additions such as: silica fume, limestone filler, granitic filler and pozzolanic ash, these additions being a positive point for Sustainability, which can reduce cement consumption, which has a great impact on CO₂ emissions, on the scale of production. In the first stage, the fine materials were characterized. In step 2, the proportion of the fine materials was adjusted, seeking a lower IDE in relation to Alfred's particle packing model. In the third step, two traits were proposed taking into account the ideal composition of the paste in terms of stoichiometric calculations. In the fourth stage, the pastes were made, with spreading control in the fresh state. Observing in two types of curing, the pastes were characterized in the hardened state, in terms of strength, with a photographic survey of the internal part of the test specimens to analyze the dispersion of the particles. In general, in the fresh state, pastes with better packing required more additives and had lower consistency. In the hardened state, the adjusted pastes did not reach the resistance potential of the reference pastes, but obtained a better Binder efficiency index, with a reduction in the kg/MPa index of 42.5% in the pastes with cement CII F-40 and 20.7% reduction in the pastes with cement CIV 32. From an ideal paste content adopted for concrete, it is calculated that there is the possibility of producing concrete with 3.0 kg/MPa. Evaluating in terms of Sustainability, based on the estimate adopted for concrete, the clinker factor was taken into account, making it possible to produce concrete with 2.4 kg of clinker for each MPa per m³ with cement CII F-40 and 2.2 kg of clinker for CIV 32 cement. The method used makes it possible to generate optimized pastes for concrete, with high performance and less environmental impact, due to the maximization of efficiency in the use of binders.

Key-words: particle packing, concrete, microstructure, strength and sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Empacotamento de partículas de uma mistura	30
Figura 2 – Esquema de densidade com esferas rígidas de mesmo diâmetro	31
Figura 3 – Situação de Empacotamento do Concreto	32
Figura 4 - Diferença entre a estrutura de (a) concreto convencional e (b) UHPC	33
Figura 5 – O Efeito parede e afastamento na interface das frações agregado	34
Figura 6 – Adição de partículas mais finas que cimento no empacotamento, melhorando a zona de transição	36
Figura 7 – (a) influência do coeficiente q no modelo modificado de A&A, (b) Comparação entre os modelos de Fuller, Thompson, A&A e o modelo modificado de A&A	44
Figura 8 – Curva teórica utilizando modelo de empacotamento de Alfred	46
Figura 9 – Curvas de empacotamento ótimo e mistura	47
Figura 10 – Índice de Desvio de Empacotamento	47
Figura 11 – Índice de Desvio de Empacotamento ajustado	48
Figura 12 – Efeito de partículas aglomeradas no empacotamento e dispersão: (a) partículas aglomeradas, com capacidade de ligar a suspensão diminuída e obstrução ao fluxo; (b) partículas desaglomeradas com baixo IPS; (c) partículas desaglomeradas com alto IPS.....	50
Figura 13 – Comparativo das relações água/cimento em diferentes tipos de concretos.....	52
Figura 14 – Evolução da carga elétrica dos dispersantes em mistura cimentícia	53
Figura 15 – Diâmetro e área superficial específica de materiais utilizados para produzir diferentes concretos	55
Figura 16 – Fluxograma do programa experimental.....	60
Figura 17 - Equipamento Tri Star II Plus para determinação da área superficial específica	69
Figura 18 - Equipamento Picnômetro modelo AccuPyc II 1340 para determinação da massa específica.....	69
Figura 19 – Equipamento Microtac S3500 para verificação da granulometria a laser	70
Figura 20 – Equipamento EDX 720HS para caracterização química	71
Figura 21 – Distribuição Granulométrica de mistura irreal	73

Figura 22 – Corpos de prova moldados	77
Figura 23 – Cura dos corpos-de-prova: a) úmida normal e b) aquecida em banho térmico	77
Figura 24 – Distribuição granulométrica da sílica ativa	81
Figura 25 – Distribuição discreta dos materiais finos	83
Figura 26 – Distribuição granulométrica dos traços	85
Figura 27 – Curva de dosagem do aditivo em traços referência por Índice de Consistência.....	86
Figura 28 - Curva de dosagem do aditivo em traços referência por cone de Kantro.	87
Figura 29 – Resistência à compressão aos 28 dias com cura úmida em 23 ± 2 °C....	90
Figura 30 - Resistência à compressão aos 28 dias com cura úmida em ~ 60 °C.....	90
Figura 31 – Levantamento fotográfico na parte interna dos corpos-de-prova selecionados	91
Figura 32 – Quantidade de clínquer por MPa.....	96
Figura 33 – Imagem da planilha criada para ajuste da proporção dos materiais finos nas pastas.....	107
Figura 34 – Tabela com as informações necessárias para curva de empacotamento	108
Figura 35 – Parte da planilha com os dados da distribuição granulométrica de cada material	108
Figura 36 – Curva de mistura ajustada e modelo de Alfred	109
Figura 37 – Detalhe da quarta parte da planilha	109
Figura 38 – Tela com ferramenta solver.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do diâmetro médio dos poros em pastas de cimento hidratado	58
Tabela 2 – Composição química, física e mecânico do cimento CII F-40.....	62
Tabela 3 – Composição química, física e mecânico do cimento CIII 32.....	63
Tabela 4 – Composição química e física da cinza volante.....	64
Tabela 5 – Característica físicas e químicas da sílica ativa	65
Tabela 6 - Composição química e física da Cal	66
Tabela 7 – Especificações técnicas – ADVA 458 UHPC.....	67
Tabela 8 – Descritivo das pastas	74
Tabela 9 – Procedimento de mistura.....	76
Tabela 10 – Caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X	79
Tabela 11 – Caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X – semiquantitativa	80
Tabela 12 – Massa Específica e Área Superficial dos materiais finos	80
Tabela 13 – Porcentagens passante de cada diâmetro dos materiais finos	82
Tabela 14 – Proposta de traços para pastas.....	85
Tabela 15 – Resultados de Consistência das pastas estudadas	88
Tabela 16 – Dados de consumo de cimento e água; consistência; resistência à compressão; IDE e Eficiência técnica aos 28 dias em diferentes tipos de cura	93
Tabela 17 – Eficiência técnica estimada em concretos.....	94
Tabela 18 – Quantidade de clínquer estimada em concretos	95

LISTA DE SIGLAS

A/AGL	Relação água/aglomerante
A/C	Relação água/cimento
A/FINOS	Relação água/materiais finos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
BET	Brunauer, Emmett e Teller
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
CaAl	Óxido de cálcio livre
CaO	Óxido de cálcio
CAR	Concreto de alta resistência
CC	Concreto convencional
CH-I	Cal Hidratada tipo I
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂	Anidro Carbônico
CPII F-40	Cimento Portland Composto por fíler calcário e resistência de característica de 40 MPa
CPIV 32	Cimento Portland Composto com alta adição de pozolana
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
f _c	Resistência à compressão, expressa em MPa
FC	Fíler calcário
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FG	Fíler granítico
FRX	Fluorescência de raios X
II FC P S A30	Pasta de Cimento Portland tipo II, fíler calcário, pozolana e sílica ativa, com 30% de água

II FG P S A30	Pasta de Cimento Portland tipo II, fíler granítico, pozolana e sílica ativa, com 30% de água
II FG P SS A45	Pasta de Cimento Portland tipo II, fíler granítico, pozolana e sílica ativa em suspensão, com 45% de água
II FG P SS C A45	Pasta de Cimento Portland tipo II, fíler granítico, pozolana, sílica ativa em suspensão e cal CH-I, com 45% de água
II FG S A30	Pasta de Cimento Portland tipo II, fíler granítico, e sílica ativa, com 30% de água
IV FC S A30	Pasta de Cimento Portland tipo IV, fíler calcário, e sílica ativa, com 30% de água
IV FG S A30	Pasta de Cimento Portland tipo IV, fíler granítico, e sílica ativa, com 30% de água
IV FG S+ A45	Pasta de Cimento Portland tipo IV, fíler granítico, sílica ativa e mais água, com 45% de água
IV FG SS A45	Pasta de Cimento Portland tipo IV, fíler granítico e sílica ativa em suspensão, com 45% de água
IV FG SS C A45	Pasta de Cimento Portland tipo IV, fíler granítico, sílica ativa em suspensão e cal CH-I, com 45% de água
k_1	constante dependente dos materiais
K_2	constante dependente dos materiais
K_2O	Óxido de potássio
Kg	quilograma
Kg/MPa	Quantidade em quilogramas de aglomerantes por m^3 para realizar 1 MPa de resistência
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
M^3	Metro cúbico
MgO	Óxido de magnésio
Na_2O	Óxido de sódio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PF	Perda ao fogo
pH	Potencial hidrogeniônico, escala logarítmica de 0 a 14, sendo ácida, neutra ou básica

POZ	Pozolana
REF II A30	Pasta de Cimento Portland tipo II, com 30% de água
REF IV A30	Pasta de Cimento Portland tipo IV, com 30% de água
RI	Resíduo Insolúvel
SA	Sílica ativa em pó
SiO ₂	Dióxido de silício
SNIC	Sindicado Nacional da Indústria do Cimento
SO ₃	Trióxido de enxofre
SS	Sílica ativa em suspensão
UHPC	<i>Ultra-High Performance Concrete</i>
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
α	grau de hidratação do cimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 JUSTIFICATIVA	23
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo Geral	25
1.2.2 Objetivos Específicos	25
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	26
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	29
2.1.1 Modelos de empacotamento de partículas	37
2.1.1.1 Modelos discretos	37
2.1.1.1.1 <i>Modelo binário</i>	38
2.1.1.1.2 <i>Modelo ternário</i>	39
2.1.1.1.3 <i>Modelo multimodal</i>	40
2.1.1.2 Modelos contínuos	41
2.1.2 Índice de Desvio de Empacotamento	46
2.2 DISPERSÃO DE PARTÍCULAS	49
2.2.2 Dispersantes	51
2.3 EFEITOS DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM CONCRETOS	54
2.3.1 Consumo de ligantes e eficiência técnica	56
3 MATERIAIS E MÉTODO	60
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	62
3.2.1 Cimentos	62
3.2.2 Cinza Volante	63
3.2.3 Sílica ativa	64
3.2.4 Filer calcário e granítico	65
3.2.5 Cal Hidratada	66
3.2.6 Água	67
3.2.7 Aditivos	67
3.3 ENSAIOS E MÉTODOS	68
3.3.1 Ensaio dos materiais finos	68

3.3.2 Determinação da proporção dos finos nas pastas	72
3.3.3 Ponto de saturação do aditivo superplastificante em pastas referência ..	75
3.3.4 Preparo, moldagem e cura das pastas	75
4 RESULTADOS.....	79
4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FINOS	79
4.2 RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO DOS FINOS NAS PASTAS	84
4.3 RESULTADOS DA SATURAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	86
4.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS PASTAS.....	87
4.4.1 Estado fresco das pastas	88
4.4.2 Estado endurecido das pastas.....	89
4.5 EFICIÊNCIA TÉCNICA DOS LIGANTES	92
5 CONCLUSÃO	97
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS.....	100
APÊNDICE A – SEQUÊNCIA PARA AJUSTE DA PROPORÇÃO DOS MATERIAIS FINOS UTILIZANDO IDE.....	107
APÊNDICE B – SEQUÊNCIA DE CÁLCULO PARA PREVISÃO DO TEOR DE CAL PARA REAGIR COM A SÍLICA ATIVA EXCEDENTE NAS PASTAS	111

1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento econômico e social, a construção civil possui importante papel, e inclusive pode ser considerada uma das atividades mais importantes. No entanto, a atividade da construção civil também é responsável por grande consumo de recursos naturais e emissões de gases do efeito estufa. E a sustentabilidade passa a ser um foco de atenção em pesquisas na área de tecnologia dos materiais de construção civil (IPCC, 2014; GRAZIA et al., 2019; CAMPOS, 2019).

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado em obras de engenharia; considerado, em escala mundial, o segundo material mais consumido, perdendo apenas para a água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). E grande parte das emissões de dióxido de carbono decorrentes do consumo do concreto é atribuída ao cimento Portland. A emissão de CO₂ durante o processo fabril de cimento Portland representa 5 a 7% das emissões globais totais (EIA-WBCSD, 2018).

Na produção do clínquer, principal insumo do cimento, é liberada uma alta quantidade de CO₂, em duas etapas, na decarbonatação do calcário e na queima de combustíveis para aquecimento dos fornos (SCHNEIDER et al., 2011; JOHN, 2011).

Dentre as estratégias de redução de emissão de CO₂ na cadeia da construção civil, considerada por Daminieli (2013), a primeira estratégia para redução de emissão está na produção do cimento Portland, aumentando a ecoeficiência e diminuindo a geração de CO₂, a partir da otimização dos fornos, substituição de combustíveis e aumento na substituição do clínquer por adições minerais. A segunda estratégia, está relacionada em melhorar a eficiência dos ligantes na produção de materiais cimentícios, mas mantendo ou até mesmo melhorando suas propriedades no estado fresco e endurecido, e a terceira estratégia consiste nas obras de engenharia consumirem esses materiais cimentícios com melhor eficiência em menor escala.

Com o avanço das novas tecnologias do cimento e nas suas características, pode-se dizer que a alteração da finura e adições incrementadas como fíleres calcário, pozolana e escórias de alto forno podem contribuir para o efeito de máxima densidade de empacotamento, e na reatividade, contribuindo para as resistências e melhoria na eficiência técnica dos ligantes dos concretos atuais (BIANCHINI, 2010).

Para a produção de concretos, com resistências maiores, os cuidados aumentam na escolha adequada dos componentes, na proporção dos insumos, com

sua boa distribuição granulométrica. E com isso, a demanda de água pode ser controlada aumentando a eficiência técnica dos ligantes (NEVILLE; AITCIN, 1998).

Podendo direcionar esforços para reduzir o teor de cimento ou clínquer na produção de concreto, pode-se diminuir a relação entre massa de cimento consumida (em kg) para cada unidade de resistência à compressão (em MPa), resultando na melhoria do índice de eficiência de ligantes (kg/MPa), mantendo o desempenho do material. Dessa maneira, afim de reduzir os impactos ecológico e econômico nos materiais cimentícios, como o concreto por exemplo, uma técnica promissora para melhorar a eficiência dos ligantes é utilizar o estudo de empacotamento de partículas, que consiste na composição otimizada de materiais com diferentes distribuições granulométricas, possibilitando assim que os espaços vazios dentro da mistura sejam preenchidos por partículas menores. Com isso a densidade de empacotamento aumenta, podendo diminuir os vazios e quantidade de água na mistura (DAMINELLI; PILEGGI; JOHN, 2017).

A técnica de empacotamento de partículas reduz a porosidade do material e diminui a demanda de água necessária para preencher os vazios da mistura, e após a hidratação dos compostos cimentícios resulta em uma mistura com microestrutura densa e homogênea que, mesmo com redução do teor de aglomerantes, melhora as propriedades mecânicas (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b).

De acordo com Regalwar et al. (2020), o empacotamento de partículas pode reduzir o número de ensaios experimentais para definição da proporção ideal de cada material na mistura, pois conhecendo as características físicas é possível ajustar a proporção dos materiais em relação a curva de distribuição do modelo de empacotamento adotado. Como numa possível mistura existe a possibilidade de diversos materiais com diferentes distribuições granulométricas, o ajuste das proporções ideais para um modelo de empacotamento pode ser uma tarefa difícil, mas que pode ser facilitado pela proposta de Christ (2019), através da minimização do Índice de Desvio de Empacotamento (IDE) de modo automático.

Neste contexto, na construção civil de maneira global, pode-se entender que a tecnologia dos materiais, assim como no presente estudo, pode contribuir de maneira sustentável. Através do aumento do empacotamento e da melhoria do índice de eficiência técnica dos ligantes, pode-se entender que menor será o impacto ambiental, pois com uma menor quantidade de cimento na mistura, menores serão as emissões de CO₂ para a produção de materiais cimentícios (WONG; KWAN, 2008).

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a globalização, vem também o crescimento econômico, e cada vez mais a demanda de materiais no mundo aumenta. Inclusive, com os materiais da construção civil, que por sua vez, é o principal responsável pelo consumo global de recursos naturais, o que impacta diretamente o meio ambiente. Somente a indústria cimenteira representa cerca de 5 a 7% das emissões de CO₂ no mundo, esse valor pode ser aumentado para 30% até 2050. Tal cenário evidencia a necessidade de medidas mitigatórias, quando se considera a emissões de gases poluentes (DAMINELI et al., 2013).

Reduzir a quantidade de clínquer no cimento pode representar a principal alternativa e desafio no setor quanto a mitigação das emissões de gases poluentes. Ou seja, com uma redução da razão de clínquer/cimento de 67% para 52%, entre os anos 2014 e 2050, seria possível retirar a emissão de 290 Mt de CO₂, o que representa 69% do potencial de redução do setor da construção civil até 2050 (SNIC, 2020).

Com esse objetivo, destacam-se como medidas mitigadoras implementadas pela indústria produtora do cimento: aumento da eficiência dos fornos utilizados na queima do clínquer; substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos como o biomassa; substituições de clínquer por adições minerais na produção de cimentos compostos; e sequestro do CO₂ (DAMINELI et al., 2013).

Entretanto, as estratégias tomadas até então para mitigar os efeitos de emissão de gases poluentes ainda são insuficientes, trazendo assim a necessidade de buscar por novas estratégias. Com isso, as novas tecnologias de produção de concreto são pressionadas para redução no teor de cimento presente nas misturas atuais, mesmo com a exigência de mercado para concretos com especificações de resistência mecânica mais altas, levando a um aumento na busca por métodos de dosagem para ganho de eficiência (LOPES, 2019).

Os métodos de dosagens de concretos são ferramentas básicas para buscar novos patamares de desempenho físico-mecânicos e maior durabilidade, o que possibilita proporcionar novos níveis de qualidades com otimização em custos (BOGGIO, 2000). A busca do aperfeiçoamento da dosagem, a partir de modelos de empacotamento, pode trazer reduções no consumo de cimento por m³, como exemplo, uma redução de 5 kg de cimento por m³ de concreto, pode resultar numa

redução de CO₂ de aproximadamente 100.000 toneladas ao ano, somente no Brasil (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O emprego de materiais suplementares, como fíler calcário, pozolanas e escórias de alto forno, podem possibilitar empacotamento da mistura, e melhorar a microestrutura do concreto, beneficiando suas propriedades no estado endurecido, sendo um ponto favorável para a redução de cimento que resultará em outras vantagens técnicas preocupantes como: calor de hidratação, retração e fissuração (LOPES, 2019).

Na sustentabilidade, dentro da cadeia da construção civil há medidas para a mitigação de emissão de CO₂, iniciando pela indústria de cimento, trabalhando na eficiência de seus fornos, coprocessamento e adições no cimento. No entanto, um aumento das emissões totais pode ser esperado, pelo aumento da produção do cimento, devido ao crescimento global. Diante disso, uma outra estratégia promissora pode ser adotada, que é aumento da eficiência técnica do uso do cimento e demais ligantes no concreto, otimizando as misturas com redução do consumo de cimento, atingindo o mesmo ou até maiores desempenhos (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

No caso, o concreto utilizando a metodologia de empacotamento de partículas para atingir maiores desempenhos, poderá possibilitar uma terceira estratégia na redução de CO₂, que consiste na redução de consumo de concreto em obras, ou seja, para determinada estrutura, as seções da estrutura poderão ser diminuídas, já que o desempenho do concreto será maior (DAMINELI, 2013). No entanto, essa estratégia deverá ser discutida, pois se subentende que as obras ficarão mais esbeltas e necessitarão de maiores cuidados quanto à estabilidade global das estruturas.

Segundo Costa (2012), concretos produzidos com CPV ARI com resistência próxima a 50 MPa, para um traço com consumo de cimento de 408 kg/m³, resultaria na emissão de 485 kgCO_{2e}/m³ de concreto, ou, em MPa, 9,7 kgCO_{2e}/MPa. Para se comparar a nocividade do CO₂ com os demais gases do efeito estufa, usa-se o termo CO₂ equivalente (CO_{2e}), relacionando as emissões dos diversos gases baseando-se no potencial do aquecimento global de cada um. Enquanto, conforme Damineli (2013), a média estimada encontrada na literatura foi de 7,1 para dados internacionais e 9,1 kgCO_{2e}/MPa para dados nacionais. Campos (2019) registra que, para misturas de concretos utilizando o empacotamento de partículas, a menor emissão registrada foi de 2,47 kgCO₂/MPa.

Na mistura de concreto, o cimento é o principal material que em seu processo de fabricação emite mais CO₂, e com técnicas para otimização de seu consumo, tem-se um grande avanço na busca pela sustentabilidade na cadeia da construção civil.

As metodologias tradicionais para dosagens de concreto geralmente não levam em conta a distribuição granulométrica dos agregados. Há espaço para estudar e verificar oportunidades nos ligantes e nas pastas de preenchimento. E não basta apenas ter uma mistura com baixo teor de cimento, é necessário ter trabalhabilidade, aplicabilidade, resistência aos esforços mecânicos e durabilidade. O futuro nos orienta para misturas com menor consumo de cimento, com melhor eficiência técnica dos ligantes, sendo mais sustentável (FLATT, ROUSSEL e CHESSEMAN, 2012).

Sendo assim, o empacotamento de partículas passa a ser um assunto cada vez mais relevante para otimização de materiais na construção civil. Não somente em materiais cerâmicos e argamassas, mas passa a ser também ponto importante para otimização para dosagem de concreto. As pesquisas com o conceito de empacotamento de partículas devem ser aprofundadas para tornar relevante a otimização das misturas, melhorando a eficiência técnica dos ligantes, reduzindo o consumo de cimento, e com isso proporcionar maior sustentabilidade e bom uso dos materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o aumento da eficiência dos ligantes em pastas através do empacotamento de partículas em microescala pelo modelo de Alfred, com substituição parcial de cimento Portland, utilizando o Índice de Desvio de Empacotamento (IDE) e balanço químico com cálculos estequiométricos para reação de hidratação dos cimentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para esse trabalho são:

- a. Avaliar o efeito do empacotamento de partículas no estado fresco verificando a trabalhabilidade por consistência das pastas;
- b. Verificar o efeito do empacotamento de partículas no estado endurecido quanto à resistência à compressão;
- c. Estudar método eficaz para propor melhores proporções dos materiais na mistura, conforme modelo de empacotamento adotado;
- d. Avaliar a relação entre o empacotamento de partículas pelo modelo Alfred e o Índice de desvio de Empacotamento (IDE);
- e. Verificar o efeito da adição de cal hidratada em pastas selecionadas, a partir de cálculos estequiométricos, visando potencializar a reação pozolânica em misturas com sílica amorfa excedente;
- f. Analisar a eficiência técnica dos ligantes para diferentes pastas e estimar a eficiência técnica dos ligantes em concretos.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O capítulo 1 abrange a introdução do trabalho, apresentando uma contextualização do assunto abordado, com sua importância, seguido pela justificativa da pesquisa e os objetivos.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre o tema proposto. Iniciando sobre aspectos teóricos relacionados ao empacotamento de partículas, com uma revisão dos primeiros trabalhos até os mais atuais. É realizada uma discussão sobre os tipos de modelos de empacotamentos de partículas. Definição de IDE (Índice de Desvio de Empacotamento), proposta utilizada por Christ (2019) que será utilizada para suporte de ajuste de otimização das misturas estudadas, com objetivo de melhoria na eficiência dos ligantes utilizados. Seguindo, por teorias para dispersão de partículas.

No capítulo 3 aborda o método experimental a ser utilizado para responder os objetivos da pesquisa, com explicação para cada etapa a ser desenvolvida.

No capítulo 4 contempla os resultados obtidos com análises e discussões. Os resultados abrangem a caracterização dos materiais finos. No estado fresco e endurecido das pastas empacotadas.

O capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa, com sugestões para trabalhos futuros. E por fim, são apresentadas as referências utilizadas no decorrer

da pesquisa. Em seguida, são disponibilizados os apêndices, contendo tabelas e gráficos auxiliares da análise e discussão de resultados.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Na pesquisa existem algumas delimitações que podem interferir nos resultados das análises.

Os cimentos escolhidos foram os tipos CPII F-40 e CPIV 32, ambos amplamente utilizados na região, e por possuírem diferentes teores de adições em suas composições. Essa decisão, baseou-se nas leituras ao longo da pesquisa, que identificou que a primeira estratégia para redução de CO₂ está na indústria cimenteira e que consiste em: melhorar a eficiência dos fornos, substituir os combustíveis fósseis e aumentar a substituição do clínquer por adições minerais. Então, optou-se em utilizar esses cimentos, em busca de dar continuidade nas estratégias adotadas para redução da emissão de CO₂, e outro fator é que esses cimentos estão disponíveis em grande escala na região sul do Brasil, podendo assim a pesquisa contribuir em escala produtiva.

Entre os materiais finos, a sílica ativa foi escolhida, sendo um material de extrema finura, e de comportamento pozolânico, contribuindo para o empacotamento de partículas. A cinza volante foi escolhida em função de sua finura e comportamento pozolânico, também é facilmente encontrada na região sul do Brasil.

Os fíleres foram escolhidos por serem resíduos de pedreiras, trazendo oportunidade de utilizar o material a um baixo custo em relação ao cimento. Dentre esses materiais, todos são resíduos o que justifica a pesquisa em termos de sustentabilidade. Com exceção à cal, por não possuir um critério sustentável em relação aos demais, foi adotada afim de corrigir alguma sobra de sílica amorfa nas misturas, buscando refino no balanço estequiométrico, além de poder contribuir com sua finura no empacotamento de partículas e retenção de água.

A relação água/materiais finos (a/mf) adotada foi de 0,30 e 0,45 em volume com o objetivo de entender se é possível atingir níveis de eficiência técnica dos ligantes em pastas com maior relação água/materiais finos. A relação a/mf foi fixada em dois patamares para correlacionar os resultados das análises: resistência mecânica e eficiência dos ligantes.

O presente estudo ficou limitado ao comportamento das pastas, e não foi aprofundado o estudo em misturas de concreto. No entanto, vale ressaltar que como continuidade de estudo, uma das pastas deste estudo está sendo utilizada para aplicação em dosagem de concreto com empacotamento de partículas, sendo conduzido por Müller (2023).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica se divide em três partes. Sendo a primeira parte uma revisão sobre empacotamento de partículas e métodos de empacotamentos. A segunda parte sobre dispersão de partículas. E a terceira parte, revisão sobre os efeitos de empacotamento de partículas em concretos.

2.1 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

A teoria de empacotamento de partículas se baseia em diminuir a porosidade do concreto, assim é interessante preencher os vazios entre as partículas maiores com partículas menores, reduzindo o índice de vazios da mistura (MENDONÇA, 2019). Caracteriza-se em utilizar frações de partículas de diferentes tamanhos, onde partículas menores vão preenchendo vazios entre as partículas maiores, gerando um sistema com redução de vazios (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

O conceito de empacotamento de partículas é de preencher um determinado volume por completo com diferentes tamanhos de partículas. A teoria do empacotamento de partículas consiste em utilizar frações de partículas de tamanhos e origens diferentes, de forma que as partículas de tamanhos maiores são circundadas por partículas menores, e assim sucessivamente até que o fechamento por completo seja efetivado (JONES; ZHENG; NEULANDS, 2002).

O empacotamento é a razão entre o volume do sólido das partículas do material e o volume total ocupado pelo mesmo material (massa específica). Ou seja, quanto maior for essa relação, maior será o empacotamento de partículas. Deduzindo pela simples expressão:

$$\text{Densidade de Empacotamento } (\phi) = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{V_s + V_v} = 1 - e \quad (1)$$

Onde:

V_s = volume de sólidos

V_t = volume total = volume de sólidos + volume de vazios

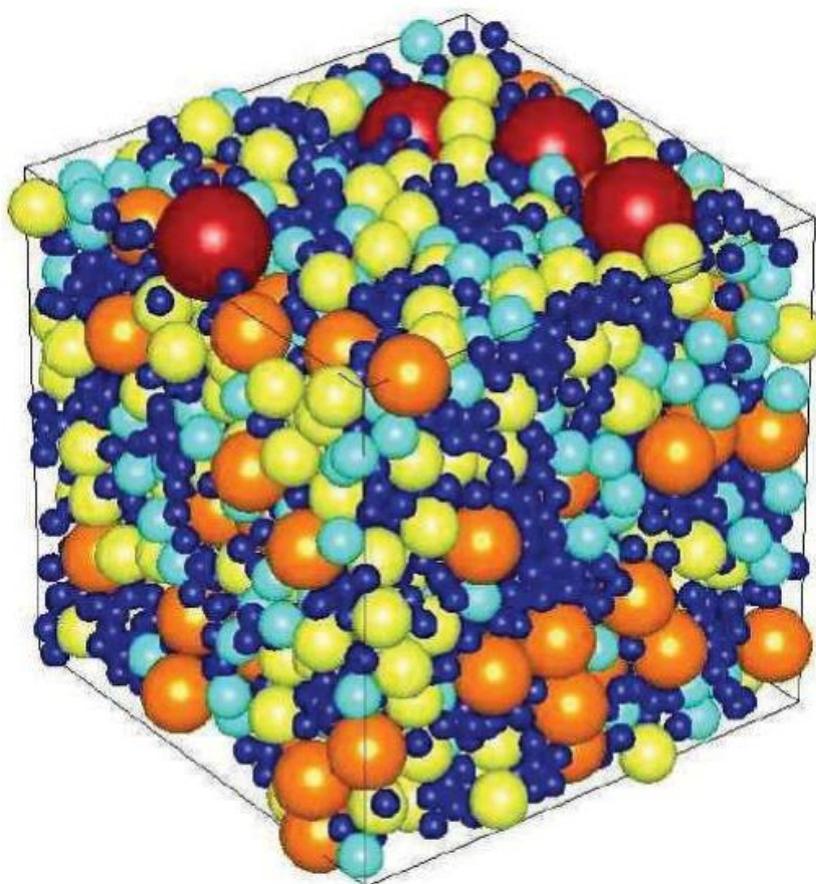
V_v = volume de vazios

e = vazios = volume de vazios sobre o volume total

A equação 1 expressa a relação entre o volume de sólidos e o volume total. Quanto maior o volume de sólidos para um determinado volume, maior será o empacotamento e, conseqüentemente, menor será o volume de vazios.

A Figura 1 demonstra o resultado de uma modelagem de um empacotamento de partículas de uma mistura, podendo observar que as partículas menores preenchem os espaços vazios entre partículas maiores.

Figura 1 – Empacotamento de partículas de uma mistura

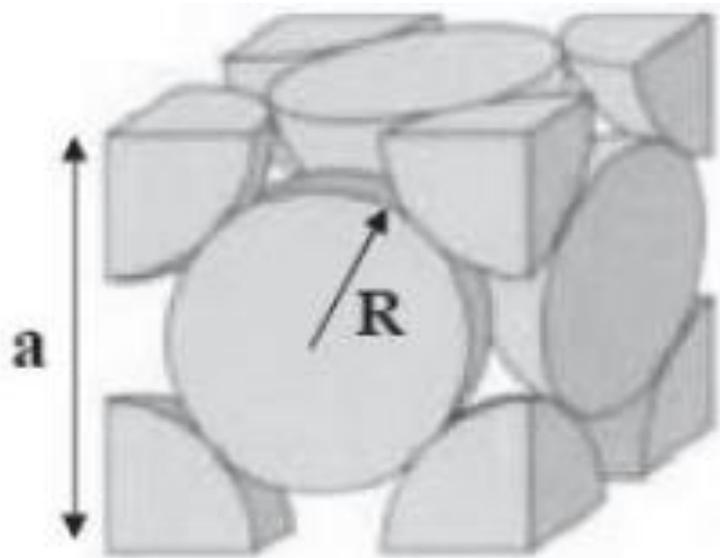


Fonte: Fidjestol, Thorsteinsen, Svennevig (2012).

O refino no empacotamento de partículas em mistura cimentícia pode diminuir o teor de água para uma mesma fluidez. E quanto menor for a quantidade de água na mistura, menor será a relação a/c e maior a resistência mecânica. O aumento do empacotamento e a completa dispersão de partículas pode propiciar uma melhor eficiência entre consumos de ligantes e resistência (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

Caso todas as partículas sejam de mesmo tamanho esférico, a densidade aparente máxima obtida será de 0,74 da densidade real do material, conforme o Teorema da Conjuntura de Kepler (HALES, 2005). A densidade de empacotamento é um valor que expressa o volume de sólidos presentes em uma unidade de volume total (CAMPOS, 2019). A Figura 2, representa o esquema de densidade de empacotamento com esferas de mesmo diâmetro, observa-se que em um sistema com partículas de mesmo tamanho existe a possibilidade de preenchimento com partículas menores, e as equações 2 a 5 demonstram o Teorema da Conjuntura de Kepler.

Figura 2 – Esquema de densidade com esferas rígidas de mesmo diâmetro



Fonte: Rethwisch (2012)

$$V_{\text{esf}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (2)$$

$$V_{\text{aCunit}} = 4 V_{\text{esf}} = \frac{16}{3} \pi R^3 \quad (3)$$

$$V_{\text{Cunit}} = a^3 = (2R\sqrt{2})^3 = 16R^3\sqrt{2} \quad (4)$$

$$\text{Fator de empacotamento} = \frac{\frac{16\pi R^3}{3}}{16R^3\sqrt{2}} = \frac{1}{6} \pi \sqrt{2} = 0,74 \quad (5)$$

Sendo:

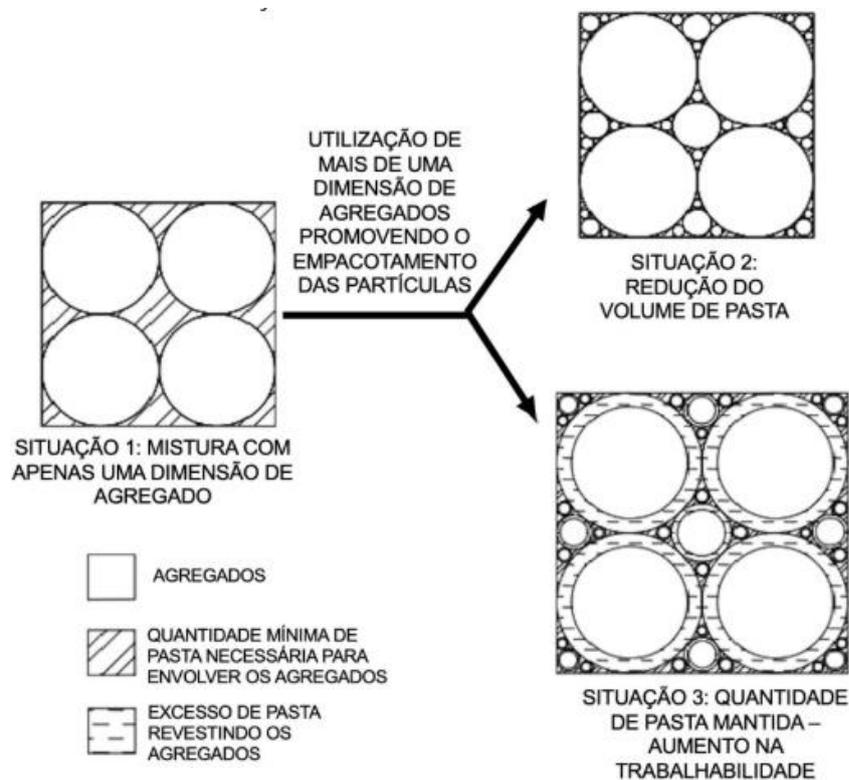
- V_{esf} : volume da esfera;
- V_{aCunit} : volume de um átomo de célula unitária;
- V_{Cunit} : volume da célula unitária

Ao utilizar granulometrias diferentes, ou partículas com diâmetros diferentes, as que possuem menor dimensão preenchem vazios entre as partículas de maior dimensão. É possível atingir a densidade de empacotamento de 0,975, preenchendo com 97,5% de volume de sólidos, utilizando apenas quatro classes faixas de tamanho, seguindo uma relação de diâmetro de 1:7:38:316 (VOGT, 2010).

A Figura 3 considera uma hipótese de mistura cimentícia com partículas esféricas com 3 situações:

- Situação 1 observa-se que as partículas de mesmo tamanho ocupam menos volume, e há a necessidade de mais pasta para dispersão;
- Situação 2, há uma redução de pasta, utilizando partículas de diferentes tamanhos para preenchimento do volume total;
- Situação 3, o volume de pasta é mantido, e com os agregados empacotados e distribuídos, permitindo uma melhora na estabilidade dimensional, há um aumento na porção de pasta em excesso necessário para preenchimento, sendo esse efeito facilitador na dispersão das partículas, aumentando a trabalhabilidade do concreto (WONG; KWAN; 2008).

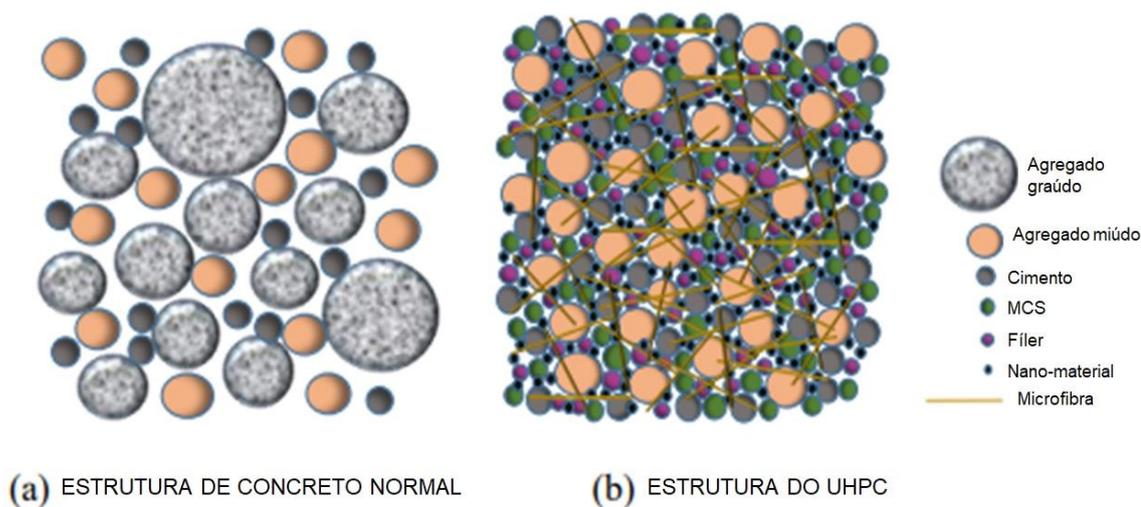
Figura 3 – Situação de Empacotamento do Concreto



Fonte: Wong e Kwan (2008) apud Heloisa Fuganti Campos (2019)

A Figura 4, demonstra a esquemática das matrizes estruturais entre concretos convencionais e UHPC, na qual pode-se observar que a estrutura do concreto de alta performance possui menos espaços vazios, pois está mais preenchida. Logo, esse preenchimento resultará no estado endurecido da mistura: resistência mecânica alta e baixa porosidade (MENDONÇA, 2019).

Figura 4 - Diferença entre a estrutura de (a) concreto convencional e (b) UHPC

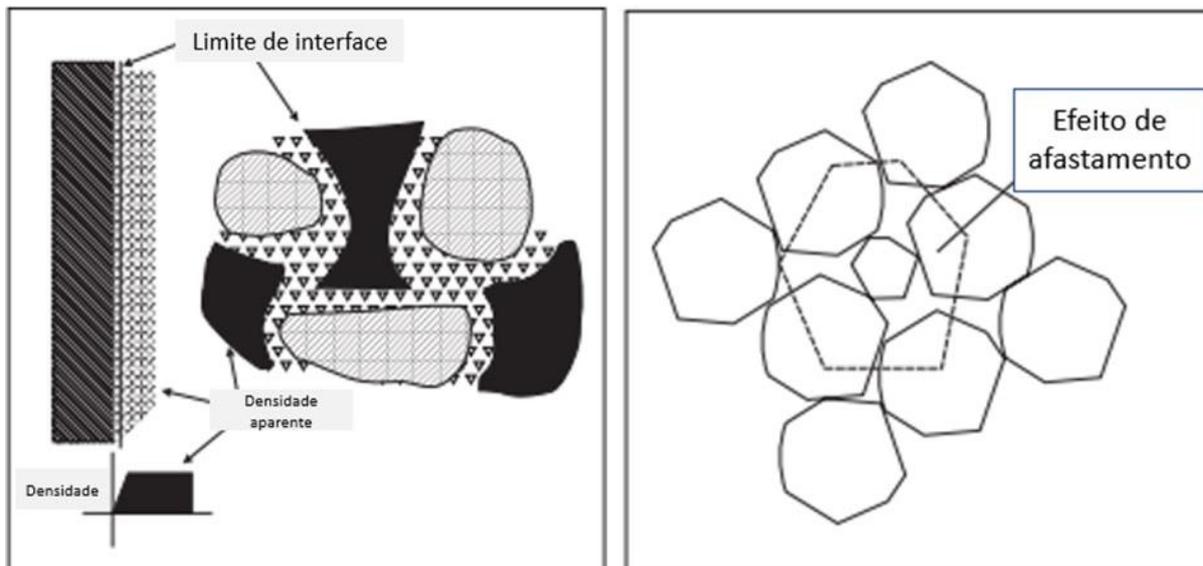


Fonte: Mendonça (2019, p. 12)

No entanto, na prática, o concreto possui materiais com diferentes morfologias, não são uma esfera perfeita, podendo ser esféricos, irregulares e lamelares. Quanto mais esféricas as partículas, maior será o empacotamento, pois quando se tem partículas não esféricas há um atrito maior entre as superfícies de cada material, resultando em menor trabalhabilidade (LOPES, 2019).

A distribuição granulométrica das partículas pode gerar dois efeitos em uma mistura, sendo: efeito parede e o efeito de afastamento (GOES et al., 2020). O efeito parede, conforme a Figura 5, pode ser explicado avaliando dois materiais de partículas com diâmetros muito diferentes, a superfície da partícula de maior diâmetro pode ser considerada como uma parede para uma partícula pequena que, quando em contato, pode haver vazios entre as partículas menores com a superfície da partícula grande. O efeito de afastamento acontece quando as partículas menores são maiores que os vazios entre as partículas maiores, aumentando o volume da mistura (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Figura 5 – O Efeito parede e afastamento na interface das frações agregado



Fonte: Adaptado de (SANTHANAM; KUMAR, 2003)

Os estudos de empacotamento de partículas envolvem a seleção de tamanhos e proporções de diferentes materiais para compor o empacotamento ideal da mistura para assim: entender a combinação dada de partículas para empacotar o sistema; desenvolver modelos para calcular porosidade e densidades de empacotamento de vários sistemas; e seus efeitos nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

De acordo com Monteiro (1993), o concreto é considerado um sistema trifásico, agregado, pasta e zona de transição. E antes de qualquer esforço para aperfeiçoar a microestrutura da matriz de cimento, buscando a melhoria das propriedades, deve-se priorizar a abordagem de estudos na melhoria da microestrutura da zona de transição interfacial existente entre o agregado e a matriz de cimento, sendo que muitas propriedades importantes do concreto são influenciadas pelas características da zona de transição.

No entanto, a zona de transição possui, além de maior porosidade e menor resistência, maior quantidade de cristais de etringita e portlandita. A explicação para a formação da zona de transição pode ser pelo fato de que as partículas de cimento não são empacotadas adequadamente em torno de grãos de agregados, resultado em uma camada de partículas de cimento menos compactada (MEHTA, 1986).

Devido a estrutura mais porosa na zona de transição em torno dos agregados, há efeitos negativos nas propriedades do concreto, pois a resistência mecânica do sistema é reduzida. E vários processos de deterioração, como ataque por sulfato, ingresso de cloretos e reação sílica alcalina, são acelerados caso a zona de transição for grande e porosa, pois essa será como facilitador no transporte de água (VOGT, 2010).

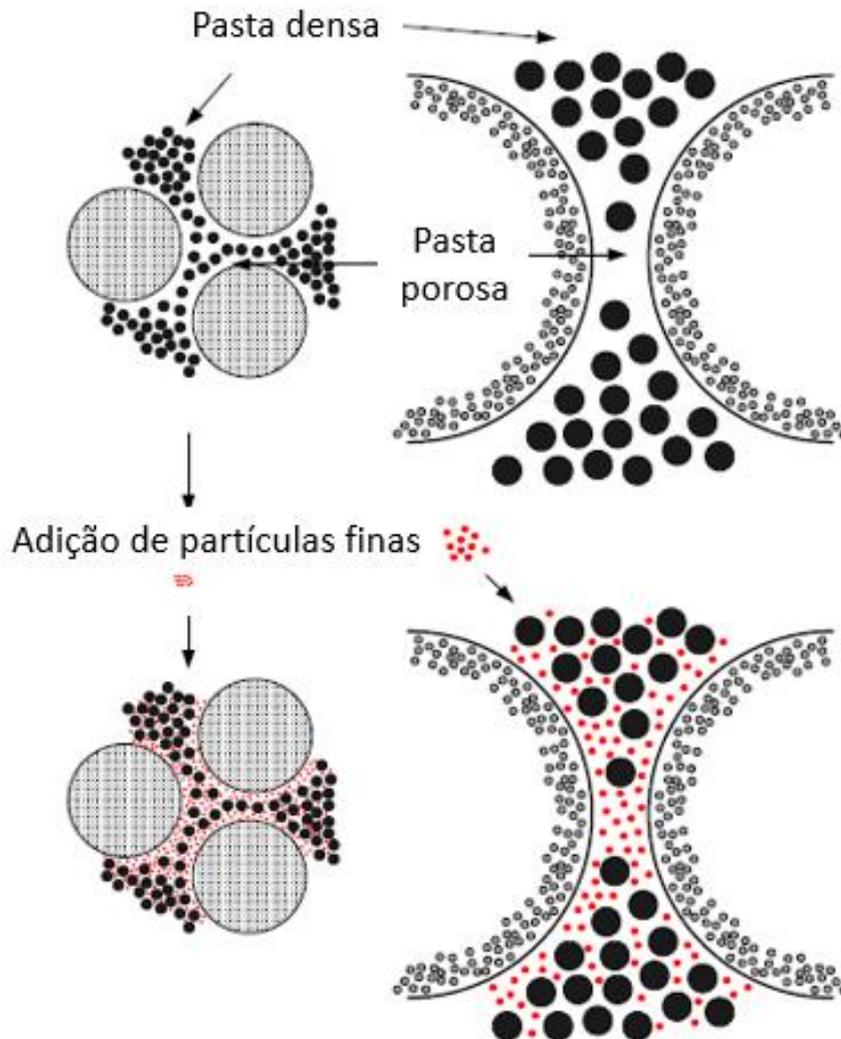
Existem 5 principais fatores que influenciam na espessura da zona de transição (KJELLEN; ATASSI, 1999):

- (i) empacotamento de partículas em torno dos agregados;
- (ii) estabilidade da pasta de cimento e a micro-argamassa;
- (iii) estabilidade volumétrica do concreto;
- (iv) composição do cimento;
- (v) finura e reações químicas dos agregados.

As propriedades de um material cimentício poderão ser influenciadas no estado endurecido pela densidade de empacotamento e pelo grau de hidratação. As primeiras idades são influenciadas, principalmente pela densidade de empacotamento, mas as idades mais avançadas são influenciadas pela densidade de empacotamento e grau de hidratação que alteram o índice de vazios (CAMPOS, 2019).

Adicionar partículas mais finas que o cimento, podem influenciar positivamente o empacotamento de partículas e a estabilidade da pasta. Essas partículas mais finas podem preencher vazios na pasta e atuar como locais de precipitação para os produtos de hidratação, trazendo maior resistência mecânica na pasta. A sílica ativa pode melhorar ainda mais a estrutura da zona de transição, pois atua como preenchimento devido a sua finura, mas também reage com a portlandita na zona de transição para formar C-S-H. A Figura 6 demonstra o princípio de melhoria nas propriedades da zona de transição adicionando partículas mais finas que o cimento.

Figura 6 – Adição de partículas mais finas que cimento no empacotamento, melhorando a zona de transição



Fonte: adaptado Moosberg-Bustnes (2003)

O empacotamento de partículas se torna relevante no concreto. Em dosagens convencionais, há um cuidado com a distribuição dos agregados com o objetivo de melhorar o empacotamento e reduzir o teor de pasta. No entanto, existem estudos relevantes que demonstram resultados interessantes quando existem adições minerais, e que essas permitem uma significativa redução da camada da zona de transição (MONTEIRO, 1993; PAULON; MONTEIRO, 1991; KJELSSSEN; WALLEVIK; FJÄLLBERG, 1998). Diante do exposto, o empacotamento de partículas na pasta, pode ser relevante, trabalhando no empacotamento de partículas em multi-escala.

Ao longo dos anos, os modelos de empacotamento de partículas foram sendo adaptados e ajustados. A seguir, serão apresentados os principais modelos de partículas.

2.1.1 Modelos de empacotamento de partículas

Iniciando pelos pesquisadores Füller e Thompson, em 1907, quando demonstraram uma curva granulométrica de distribuição com partículas em tamanhos uniformemente descontínua (FULLER; THOMPSON, 1907).

Resultaram, na literatura, a partir de estudos teóricos e experimentais relacionados a empacotamento de partículas, duas abordagens básicas: uma discreta, considerando as partículas individualmente, sendo o caso do modelo de Furnas e Westman e Hugill as mais conhecidas; e a outra contínua, considerando as partículas como distribuições contínuas, sendo essa proposta por Andreasen (MACIEL et al., 2018).

2.1.1.1 Modelos discretos

Modelo discreto é o empacotamento de sistemas resultante de duas ou mais classes de tamanhos discreto de partículas. As partículas de maiores tamanhos formam o esqueleto granular base, os vazios entre as partículas maiores serão preenchidos por partículas menores. Sendo assim, essas partículas menores também terão vazios entre elas, que serão preenchidas por partículas ainda mais finas, e assim sucessivamente na ordem decrescente do tamanho de partículas. Na abordagem discreta cada classe de partícula irá empacotar até sua densidade máxima de volume disponível (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Os modelos discretos podem ser classificados como:

- (i) binário
- (ii) ternário, e
- (iii) modelos de mistura multimodal

2.1.1.1.1 Modelo binário

Furnas iniciou as pesquisas com empacotamento de partículas considerando, inicialmente, ideal empacotamento de partículas com dois materiais, sendo um sistema binário (LOPES, 2019). Sendo uma parte fina e outra grossa, dependendo da fração de volume de material fino e grosso, dois casos podem ser considerados:

- (i) a fração de volume de partículas pequenas é grande, sendo esse caso chamado de grão fino dominante.
- (ii) A fração de volume de partículas grossas é grande, sendo esse caso chamado de grão grosso dominante.

Nesse caso, as partículas menores poderiam ser acomodadas nos vazios entre partículas maiores. O modelo de Furnas é válido somente quando uma das partes é ligeiramente mais fina do que a outra parte. Quando os diâmetros das partículas são próximos, há interação, causando efeitos já explicados anteriormente, que são: efeito parede e de afastamento (DINGER; FUNK, 1997).

Powers (1968) *apud* Mangulkar e Jamkar (2013), em seus estudos sobre empacotamento de partículas levou em consideração um sistema binário, propondo uma expressão para que se obtenha o mínimo de vazios em uma mistura.

Com base em modelos de estudos no concreto fresco e endurecido é possível representar o comportamento resistente integral do concreto, utilizando envoltórias de Mohr-Coulomb (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Powers definiu a expressão para a resistência à compressão, que depende somente da relação gel/espaco da pasta, conforme a equação:

$$\text{Modelo de Powers:} \quad f_c = k_1 \times \left[\frac{0,68 \times \alpha}{0,32 \times \alpha + \frac{a}{c}} \right]^{k_2} \quad (6)$$

Sendo:

f_c = resistência à compressão, MPa;

α = grau de hidratação do cimento (variando de 0 a 1, sendo 0 concreto recém-misturado e 1 para condições ideais de cura após tempo infinito);

k_1 = constante dependente dos materiais (em geral da ordem de 120);

k_2 = constante dependente dos materiais (em geral da ordem de 3);

a/c = relação água/cimento em massa (caso houver vazios devido ao ar aprisionado em valor superior a 1% em volume, estes devem estar somados ao volume de água).

Tutikian e Helene (2011) observam que para alterar a resistência à compressão é necessário atuar sobre o grau de hidratação ou sobre a relação água cimento. Sendo no grau de hidratação com oportunidades em: tipo de cimento quanto à composição química e características físicas; condições de cura e emprego de aditivos. E na relação água/cimento: alterando tipo de cimento quanto à sua finura ou composição física; alteração dos agregados quanto à textura, distribuição granulométrica, absorção d'água; e também nos aditivos, reduzindo a água de amassamento.

O trabalho de Aim e Goff abordou o “efeito parede”, propondo um fator de correção ao calcular a densidade de empacotamento binário. É um modelo geométrico simples que pode explicar o excesso de porosidade observado experimentalmente na superfície da camada de grãos esféricos em contato com uma parede plana e lisa (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

2.1.1.1.2 Modelo ternário

O modelo de mistura binária foi estendido para calcular a densidade de empacotamento de misturas ternárias. *Toufar, Klose e Born* calcularam a média ponderada do número total de misturas binárias para razões de diâmetro $0,22 < d_1 / d_2 < 1,0$. O conceito do modelo de *Toufar* consiste em que partículas menores com razões de diâmetro $> 0,22$, serão grandes para estarem situadas nos vazios entre as partículas de maiores diâmetros (MANGULKAR; JAMKAR, 2013). Pode ser considerado como resultado do empacotamento da matriz:

- (i) uma mistura de áreas empacotadas, com predominância de partículas maiores;
- (ii) áreas compactadas que podem, principalmente, consistir em partículas menores com partículas maiores.

Sendo que, para um sistema multi-componente, pode-se assumir que qualquer dos materiais podem gerar misturas binárias. Na sequência, a densidade de empacotamento para a mistura de múltiplos materiais é calculada pela soma da contribuição de todas as misturas binárias (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Golterman et al (1997) propuseram modificação no modelo de *Toufar*. Denominando o fator de grau de empacotamento de cada componente/material da mistura (ϕ_1 e ϕ_2) como “Empacotamento *Eigen*” (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Golterman et al (1997) compararam os resultados de empacotamento sugeridos por modelo de Aim, modelo de Toufar e modelo de Toufar modificado com o grau de empacotamento das misturas binárias. Como resultado, descobriram que o modelo que melhor correspondia aos graus de empacotamento medidos era o modelo de Toufar modificado (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

2.1.1.1.3 Modelo multimodal

De Larrard requiere diferentes aproximações para desenvolvimento de concreto, baseados na propriedade de partículas multimodais de tamanho discreto, sendo: o modelo de densidade de empacotamento linear (MDEL), modelo de suspensão sólida (MSS) e o modelo de empacotamento compressível (MEC) (NATARAJA; DAS, 2010; STOVALL; DE LARRARD; BUIL, 1986).

Conforme o artigo de Stovall et al. (1986), apresentaram um modelo de empacotamento com partículas de múltiplos tamanhos. A densidade de empacotamento pode ser expressa em função do volume sólido fracionário para cada tamanho de partícula presente. O tamanho das partículas distribuídas continuamente é derivado. Em comparação com o modelo de densidade de empacotamento linear demonstra previsões superiores relacionados com modelos de misturas binária e ternárias, alegando que o MDEL apresentou bom desempenho na previsão das proporções ótimas para materiais cimentícios.

Com algumas modificações do modelo de densidade de empacotamento linear, De Larrard e Sedran propuseram o modelo de suspensão sólida, concluindo que o modelo pode ser uma ótima ferramenta para otimizar alta densidade de empacotamento em materiais cimentícios. Esse modelo antecipou-se dizendo que seria adequado para informar a viscosidade plástica de suspensões concentradas. Sendo a principal inovação a distinção entre a densidade de empacotamento real ϕ , e a densidade de empacotamento virtual β . Mantendo cada partícula em formato original e colocada uma a uma no empacotamento máximo alcançável proposto (DE LARRARD; SEDRAN, 1994).

Presumindo que o empacotamento das misturas, dependem de outras variáveis como o processo de construção de empacotamento e esforço de compactação, De Larrard propôs o modelo de empacotamento compressível (MEC). Trata-se de um modelo derivado do modelo de empacotamento linear proposto por Lee, que é independente dos modelos de densidade de empacotamento linear e modelo de suspensão sólida, introduzindo o índice K para calcular a densidade real de empacotamento ϕ , a partir do empacotamento virtual β (DE LARRARD, 1999).

Nesse modelo de De Larrard, os modelos de empacotamento virtual são preservados. No entanto, foram modificadas as expressões empíricas para prever valores dos coeficientes de interação como coeficiente do efeito parede e efeito de afastamento, e introduzidos dois novos conceitos, o diagrama de preenchimento e potencial de segregação para caracterizar as misturas (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Dewar (1999), considera a densidade de empacotamento em condições soltas, e sugere que o diâmetro médio de microfios e material cimentício pode ser estimado a partir da finura de Blaine (ARIÖZ et al., 2007; DEWAR, 1999). A teoria da mistura de partículas (TMP) trabalha com vazios em vez de densidade de empacotamento, sendo a razão de vazios definida com razão de vazios de volume de sólidos (MANGULKAR; JAMKAR, 2013). A relação entre volume de vazios u e densidade de empacotamento ϕ , é expressa por:

$$u = \frac{1}{\phi} - 1 \quad (7)$$

2.1.1.2 Modelos contínuos

Um modelo contínuo é um sistema disperso, considerando que dentro de um sistema de distribuição de partículas possa existir tamanhos diferentes de partículas para um mesmo material (DINGER; FUNK, 1997).

Féret, Fuller e Thompson concluem que a granulometria contínua da mistura do concreto pode ajudar a melhorar as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Ferét, demonstra que quando a porosidade da estrutura é mínima a resistência máxima é atingida. Com isso, Fuller e Thompson (1907) propuseram um

modelo contínuo de empacotamento de partículas conhecida como a curva “ideal” de Fuller (GOES et al., 2020). Podendo ser obtida pela seguinte equação:

$$CPFT = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100 \quad (8)$$

Onde:

CPFT = é a porcentagem em volume de partículas menores que o diâmetro d (%);

d = diâmetro da partícula (μm);

D = é o diâmetro da maior partícula (μm);

n = é o coeficiente de distribuição. Sendo que para maior empacotamento, inicialmente, Fuller e Thompson, definiram que n deveria ser igual a 0,5, e posteriormente alteraram para 0,45, essas curvas estão para aplicação em misturas de pavimento de rodovias (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

No entanto, a expressão foi modificada por Shakhmenko e Birsh para mistura de concreto (SHAKHMENKO; BIRSH, 1998), seguindo da seguinte maneira:

$$CPFT = T_n \times (d_i - d_0)^n \quad (9)$$

Onde:

d_i = tamanho da partícula analisada

d_0 = o tamanho mínimo da partícula da distribuição;

n = grau de uma equação de curva “ideal”;

T_n = coeficiente que depende do tamanho máximo do agregado e do expoente n.

Andreassen et al. trabalharam na distribuição de partícula do tamanho para empacotamento de partículas com abordagem contínua, propondo o “modelo de Andreassen”. Embora seja uma abordagem teórica, representa em parte uma teoria empírica de empacotamento de partícula (ANDREASSEN; JOHANSEN, 1993; SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Andreassen, presumiu que as partículas menores poderiam ser infinitesimalmente pequenas. Dinger e Funk reconhecem que em materiais reais a quantidade de partículas finas, são finitas, e propõem modificações na equação de Andersen, considerando um tamanho mínimo para partícula na distribuição. Posteriormente, um modelo modificado para empacotamento denso, juntando as

distribuições de Andreassen e Furnas foi criado e denominado como AFDZ (Andreassen, equação de Funk, Dinger e Zheng), (REED, 1995).

De acordo com o modelo de Andreassen,

$$CPFT = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100 \quad (10)$$

De acordo com o modelo de Andreassen modificado,

$$CPFT = \left(\frac{d - d_0}{D - d_0}\right)^q \times 100 \quad (11)$$

Onde:

CPFT = a porcentagem cumulativa, em volume, mais fina que,

d = o tamanho da partícula,

d_0 = o tamanho mais fino da partícula na distribuição,

D = o maior tamanho de partícula, e

q = o coeficiente de distribuição.

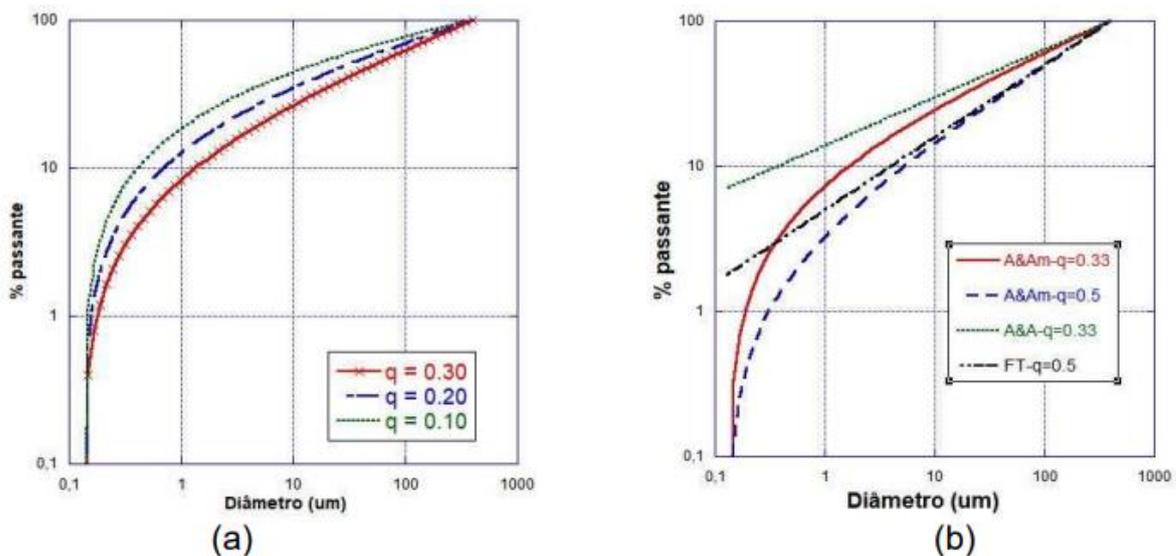
Dependendo dos requisitos de trabalhabilidade, o coeficiente “q” pode variar entre 0,21 a 0,37 na equação de Andreassen. Quanto maior o coeficiente, haverá mais material grosso, do contrário, se o coeficiente diminuir haverá uma maior quantidade de materiais finos. O expoente traz uma indicação da fração de partículas finas que poderia ser acomodada na mistura. O volume de finos controla a demanda e retenção de água na mistura, sendo o expoente da equação de Andersen uma base para a escolha da quantidade de água e de agentes modificadores de reologia, como exemplo os aditivos superplastificantes que podem ser adicionados na mistura (HÜSKEN; BROUWERS, 2008; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

O valor do coeficiente de distribuição q = 0,25 a 0,3 pode ser considerado para concreto de alto desempenho e concretos convencionais. Sendo concretos fluidos, $q < 0,23$ e para concretos compactados a rolo $q > 0,32$ (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

Funk e Dinger utilizaram simulações computacionais para demonstrar a influência do valor do coeficiente de distribuição de empacotamento, verificando que o máximo empacotamento ocorreria para $q = 0,37$ (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

A Figura 7a, demonstra que há influência na definição do coeficiente q para obtenção das curvas nos modelos de empacotamento modificado de Andreassen e Andersen (A&A), utilizando cimento, areia fina, sílica ativa, pó de quartzo em uma possível mistura de concreto de ultra alto desempenho. Quando se aumento o coeficiente q , há maior proporção de partículas grossas. Sendo a Figura 7b, a comparação das representações gráficas, em escala logarítmica, dos modelos de Fuller e Thompson, A&A e o modelo modificado de A&A. GOES et al. (2020) observam que para o modelo modificado de A&A as curvas obtidas apresentam diâmetros muito pequenos, enquanto que para os modelos de Fuller e A&A, são obtidas retas de inclinação q , então há uma incoerência entre os modelos, pois há uma ausência de um limite mínimo para o tamanho das partículas.

Figura 7 – (a) influência do coeficiente q no modelo modificado de A&A, (b) Comparação entre os modelos de Fuller, Thompson, A&A e o modelo modificado de A&A



Fonte: Goes et al. (2020)

Conforme a equação de Rosin-Rammler, os diâmetros característicos das distribuições de tamanho de partícula para componentes de concreto podem ser descritos por D' .

$$R(D) = \exp\left(\frac{-D}{D'}\right)^n \quad (12)$$

Onde:

$R(D)$ = a fração de resíduo em percentual passante

D = diâmetro

D' = diâmetro característico.

n = constante, variando entre 1,04 e 4, geralmente entre 1 e 2.

Johansen et al. utilizaram esta equação em sua abordagem discreta, para descobrir o diâmetro característico da distribuição para cálculo de densidade de empacotamento das misturas (SANTHANAM; KUMAR, 2003).

Como fechamento de capítulo, de acordo com a revisão bibliográfica em relação aos tipos de empacotamento de partículas, cabe ressaltar que o tipo modelo de empacotamento que mais se enquadra para dosagem de concreto são os modelos contínuos. Os modelos de empacotamento de partículas discretos, sendo: binário, ternário ou multimodal, consideram que os tamanhos das partículas para cada material são de mesmo tamanho, sendo essa hipótese não verdadeira para a realidade dos materiais utilizados na produção de concreto.

Os modelos de empacotamento de partículas contínuos são modelos que podem assumir que cada material existente na mistura possui distribuição granulométrica distinta e com diferentes tamanhos de partículas, e são esses modelos que se enquadram para a dosagem de concreto, pois os materiais de uma mistura de concreto possuem distribuição granulométrica de partículas com diferentes tamanhos. Dentre os tipos de modelos de empacotamento de partículas contínuos, destaca-se o modelo de Alfred, uma adaptação do modelo de Andreasen, incorporando um valor mínimo de tamanho de partícula, que é uma característica de sistemas reais. A equação de Alfred, considerada atualmente o modelo de empacotamento de partículas mais adequado aos sistemas reais, está expressa pela seguinte equação:

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad (13)$$

Na equação, CPFT diz respeito à porcentagem volumétrica das partículas menores que o diâmetro D . D_S é o diâmetro da menor partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula. O coeficiente “ q ” é o coeficiente de distribuição e segundo Funk e Dinger (1993) *apud* Oliveira et al. (2000) o valor $q=0,37$ pode apresentar máximo

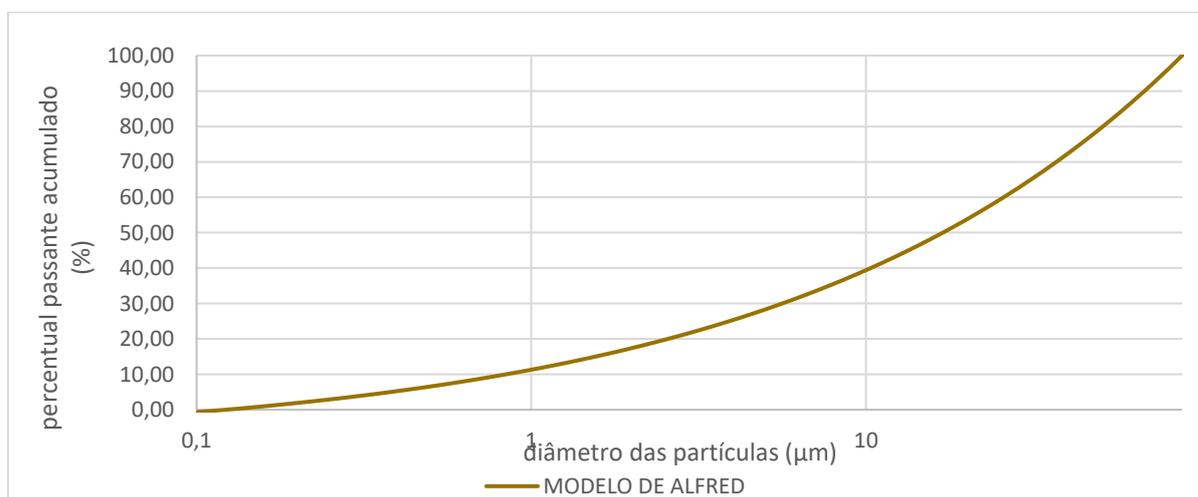
empacotamento de partículas. A equação de Alfred com o coeficiente de distribuição de partículas $q=0,37$ será utilizada na presente pesquisa.

2.1.2 Índice de Desvio de Empacotamento

O Índice de Desvio de Empacotamento (IDE), realizado por Christ (2019), desenvolve uma relação entre a curva ideal do modelo de empacotamento de partículas adotado com a curva real dos materiais utilizados na mistura. Quando mais próxima a curva real da mistura proposta está em relação ao modelo de empacotamento adotado, menor será o IDE. A aplicação do IDE, resulta na melhor combinação física entre os materiais propostos para uma mistura.

O modelo de empacotamento de Alfred, determina a quantidade ideal em volume para cada diâmetro a ser empregado na mistura, conforme Equação 13. Baseado nesses resultados é traçada a curva proposta pelo modelo que indica empacotamento de partículas perfeito da mistura. A Figura 8 traz como exemplo a aplicação do modelo de empacotamento de Alfred, utilizando menor partícula $0,122 \mu\text{m}$, maior partícula $88 \mu\text{m}$ e coeficiente de distribuição (q) = $0,37$.

Figura 8 – Curva teórica utilizando modelo de empacotamento de Alfred

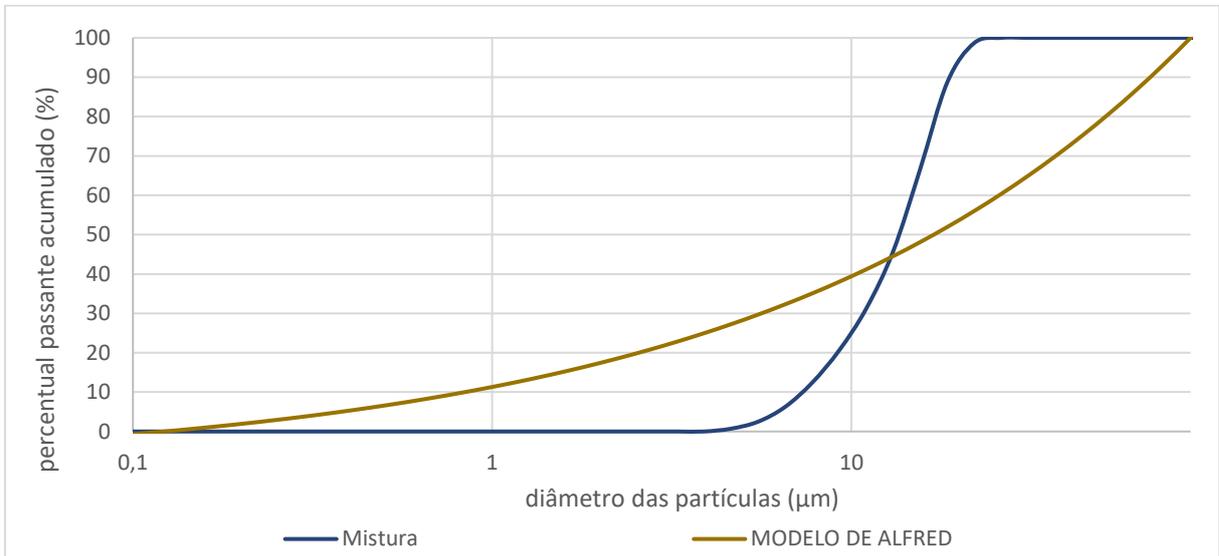


Fonte: o autor (2023)

A Figura 9 apresenta duas curvas, uma é a curva ideal conforme o modelo de Alfred, e a outra curva é a distribuição de uma mistura qualquer, adotado nesse caso para exemplo. Existe uma diferença entre as curvas, abrindo oportunidade para

inclusão de mais materiais afim de otimizar a curva da mistura, a ferramenta de IDE permite ajustar a proporção.

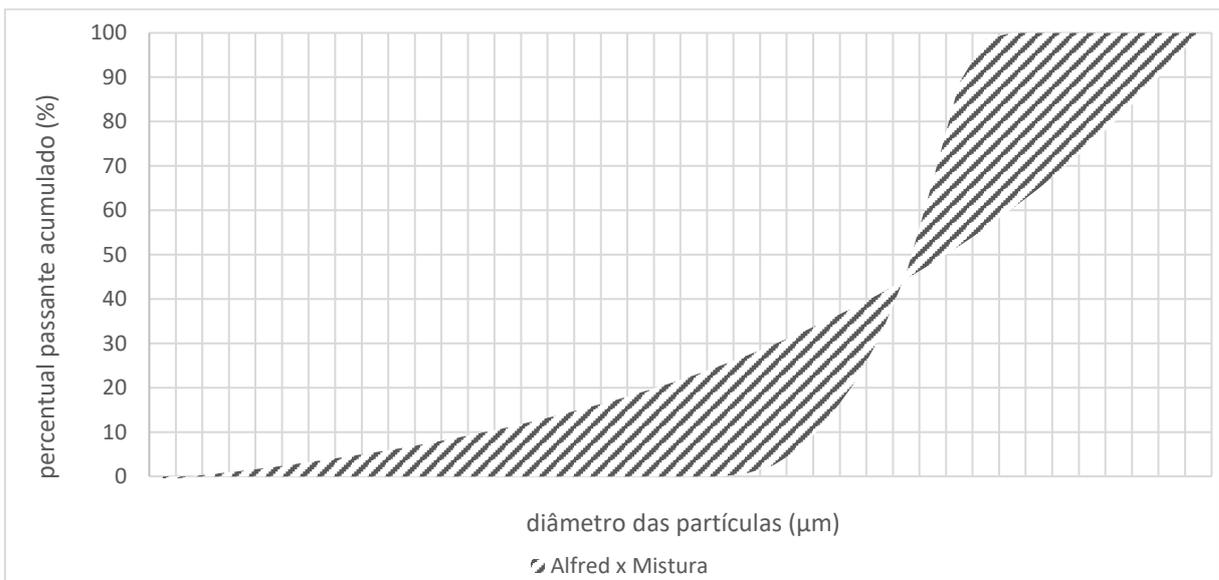
Figura 9 – Curvas de empacotamento ótimo e mistura



Fonte: o autor (2023)

Na Figura 10, a região hachurada mostra a diferença entre as curvas, abrindo oportunidade para inclusão de mais materiais afim de otimizar a curva da mistura, e avaliando o IDE é possível ajustar a proporção.

Figura 10 – Índice de Desvio de Empacotamento

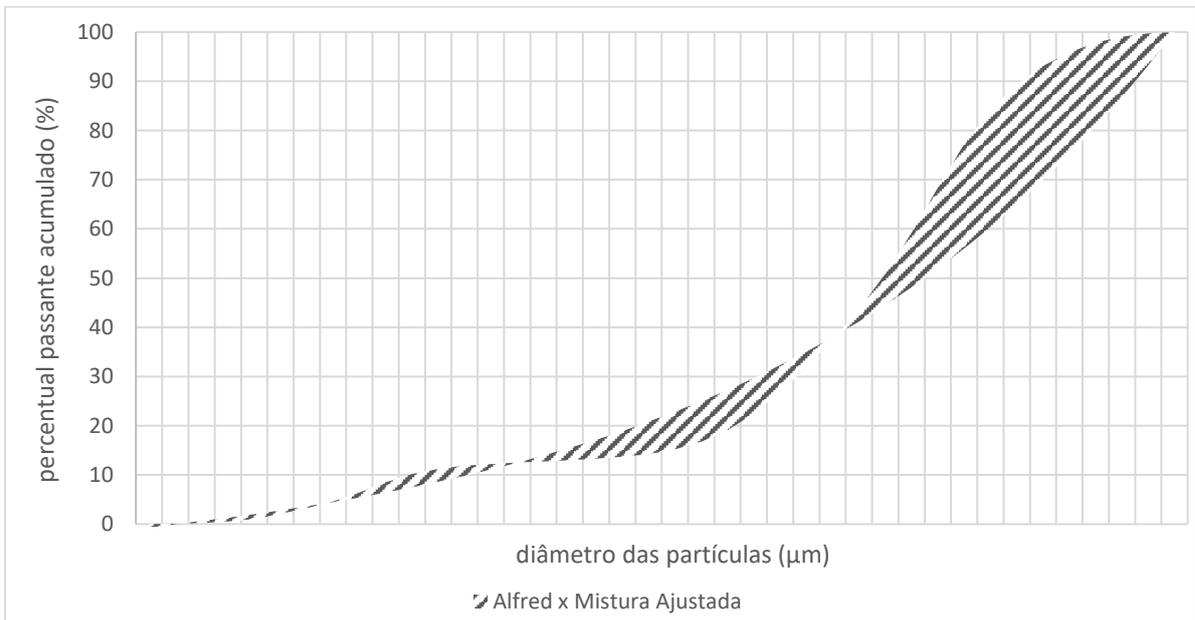


Fonte: o autor (2023)

De acordo com Christ (2019), não é possível inserir a quantidade de cada material para obter o empacotamento perfeito. Em uma mistura, com diversos

materiais o IDE propõe melhorar a proporção da mistura, é complexo igualar a curva teórica com a da mistura, no caso zerar a área hachurada da Figura 10. Mas, realizar ajustes para melhorar a proporção de uma mistura em relação ao modelo de empacotamento adotado é possível. A Figura 11 mostra uma mistura ajustada, melhorando o IDE. No exemplo a área hachurada está menor em relação a Figura 10, o IDE melhorou e a curva proposta está mais próxima do modelo de empacotamento ideal.

Figura 11 – Índice de Desvio de Empacotamento ajustado



Fonte: o autor (2023)

Em termos numéricos o IDE pode ser descrito pela Equação 14:

$$IDE = \sum \left(\frac{ABS(D_E - D_M)}{100} \right) \quad (14)$$

Onde:

D_E = percentual do diâmetro analisado esperado pelo modelo de empacotamento;

D_M = percentual do diâmetro analisado da mistura analisada.

A equação demonstra que o IDE é o somatório absoluto da diferença entre o percentual do diâmetro analisado esperado pelo modelo de empacotamento e o percentual do diâmetro analisado da mistura analisada. Quando menor for o IDE, mais ajustada estará a mistura proposta em relação ao modelo de empacotamento adotado.

2.2 DISPERSÃO DE PARTÍCULAS

Com o empacotamento de partículas, há aumento da área superficial da mistura proposta para refino do concreto desejado, devido ao incremento de finos, então, inicialmente, entende-se que pode ter uma tendência de aumento na demanda de água para dispersar as partículas, já que o empacotamento denso é influenciado pela demanda de água na mistura. Num primeiro momento, todos os vazios são preenchidos pela água da mistura, nesse processo formam-se filmes de água em torno das partículas (CAMPOS, 2019).

Após o processo de preenchimento dos vazios pela água, a relação da área total de superfície específica para quantidade restante de água determina a exequibilidade da mistura, ou seja, há um aumento da espessura de camadas de água que define a localização das partículas no sistema. Como há um aumento do teor de água, aumenta-se a distância entre as partículas (FENNIS, 2011).

Há uma tendência de aglomeração das partículas finas, fenômeno devido ao aumento de forças coesivas interparticulares. A aglomeração acaba interferindo no empacotamento das partículas, pois as partículas finas aglomeram-se gerando partículas de tamanhos maiores, trazendo porosidade na combinação (OLIVEIRA et al., 2018).

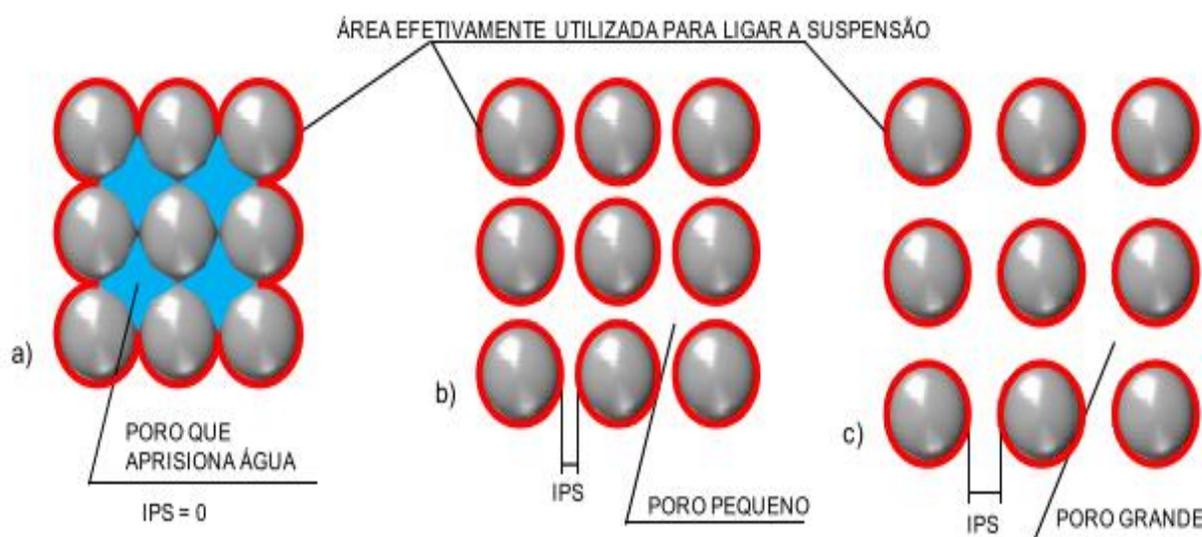
Pela teoria DLVO (*Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek*), a soma das energias potenciais de atração e repulsão de partículas governa o estado de dispersão de um sistema de partículas carregadas eletricamente em uma suspensão (OLIVEIRA et al., 2018). Sendo que essas energias potenciais podem ser influenciadas por três características principais: cargas elétricas superficiais; pH do meio; e área superficial (DAMINELI, 2013).

Como nas suspensões cimentícias as partículas finas tendem a aglomerar, fato associado à sua baixa massa e alta área superficial, as forças superficiais predominam sobre as forças gravitacionais. As cargas elétricas superficiais de diferentes partículas não ficam em equilíbrio, gerando forças de atração maiores do que as de repulsão. Desta forma, em suspensão, os aglomerados acabam agindo como partículas maiores, interferindo: na distribuição granulométrica; na mobilidade das linhas de fluxo, pois os aglomerados se movem lentamente e bloqueiam as partículas menores, aumentando a viscosidade na distribuição de vazios dentro dos aglomerados, aumentando o consumo de água; e na eficiência dos ligantes que

diminui, pois a área superficial disponível para as reações pozolânicas e de hidratação são diminuídas. Esse efeito de aglomeração das partículas pode ser visualizado na Figura 12 (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

A distância de separação entre partículas finas (IPS) é determinada pelo teor de água, pois o fluido afasta e também pelas características físicas das partículas finas, como área superficial (OLIVEIRA et al, 2000).

Figura 12 – Efeito de partículas aglomeradas no empacotamento e dispersão: (a) partículas aglomeradas, com capacidade de ligar a suspensão diminuída e obstrução ao fluxo; (b) partículas desaglomeradas com baixo IPS; (c) partículas desaglomeradas com alto IPS



Fonte: Daminieli (2013)

Entende-se que para o empacotamento granulométrico funcionar é necessário que a dispersão total das partículas funcione. Não faz sentido físico para o empacotamento projetado se a condição de dispersão total não acontecer, logo a utilização de dispersantes de partículas é necessária. O uso de dispersantes é interessante quanto ao ponto de vista econômico e a utilização mínima do teor de dispersante necessária, para atender a maior fluidez possível no sistema, pode ser verificado com o auxílio de um reômetro de pasta (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

2.2.2 Dispersantes

No refino da densidade de empacotamento, com incremento de partículas cada vez menores nas misturas, há uma tendência de aumento da área superficial, coesão e aglomeração das partículas. Com isso, conforme já citado, é necessária a utilização de dispersantes para correção da aglomeração, esses dispersantes são conhecidos como aditivos superplastificantes ou redutores de água (DAMINELI, 2013).

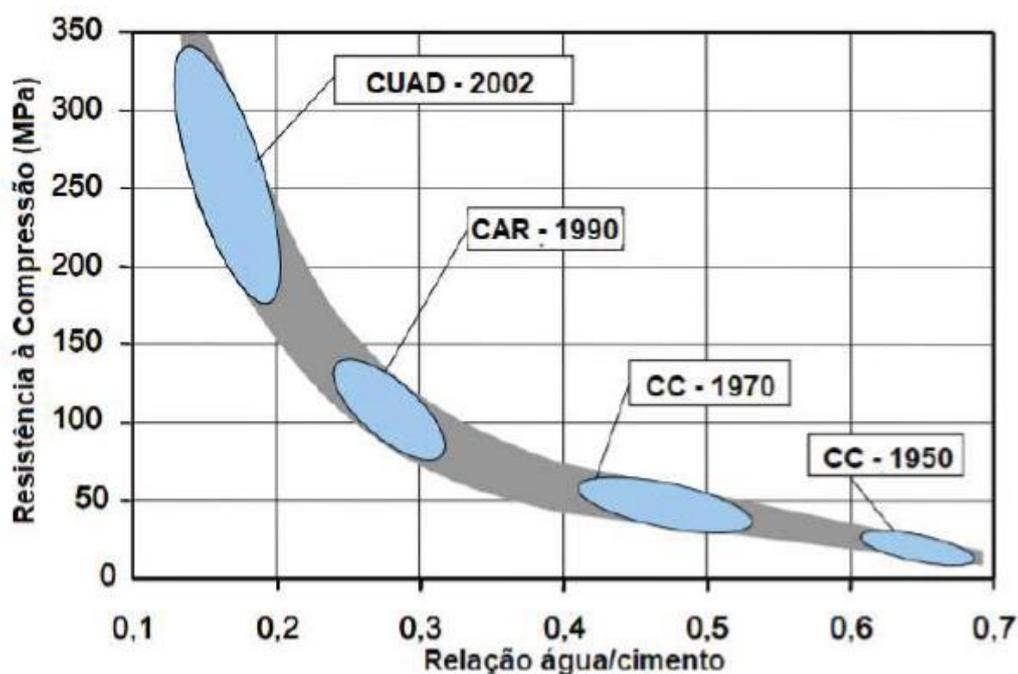
Em sistemas de alta densidade de empacotamento com partículas finas, os aditivos superplastificantes à base de policarboxilato se mostram mais eficazes. Enquanto que os aditivos à base de melamina e naftaleno demonstraram efeitos de dispersão muito menores, ou seja, a dosagem necessária para atingir a trabalhabilidade suficiente seria muito maior (VOGT, 2010).

Pode-se reduzir o teor de água de mistura sem alterar a consistência da mistura melhorando sua fluidez a partir da utilização de aditivos superplastificantes. Para a produção de concretos de ultra-alto desempenho o superplastificante policarboxilato possui um maior eficiência, sendo que à base de metacrilato tem maior interação com o cimento, enquanto que os aditivos à base de éter acrílico maior interação com a sílica ativa (SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012).

Wong e Kwan (2008) utilizaram dois tipos de superplastificantes, sendo um baseado em policarboxilato e reticulado polímero, tendo uma estrutura caracterizada por uma espinha dorsal ligada com correntes laterais de copolímero, em solução aquosa com teor de sólidos de 20% sendo capaz de dispersar os materiais cimentícios por eletrostática e ação esférica. Enquanto o outro superplastificante utilizado, considerado um aditivo de 2ª geração quimicamente sendo um formaldeído à base de naftaleno condensado, em pó com densidade relativa de 1,60, mostra-se capaz de dispersar os materiais cimentícios por repulsão eletrostática. Portanto, mesmo o segundo aditivo ser mais comumente utilizado por muito tempo, se comportou melhor o primeiro aditivo, sendo o de 3ª geração.

A redução da demanda de água das misturas em materiais cimentícios é possível mediante ao avanço das novas tecnologias dos aditivos. Com a redução do teor de água nas misturas, foi possível desenvolver diferentes tipos de concretos para diferentes aplicações, com propriedades mecânicas e reológicas distintas (CHRIST, 2019). A Figura 13 representa a evolução dos concretos quanto à resistência e demanda de água ao longo dos anos.

Figura 13 – Comparativo das relações água/cimento em diferentes tipos de concretos



Fonte: Müller (2006)

Sendo:

CUAD – concreto de ultra alto desempenho

CAR – concreto de alta resistência

CC – Concreto convencional.

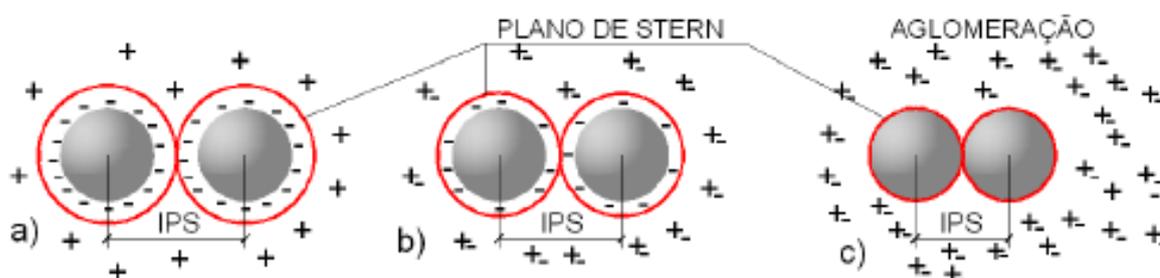
Existem cargas superficiais distintas nas principais fases do clínquer (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), e para o pH próximo de 12 (pH das suspensões cimentícias), C_3S , C_2S apresentam zeta negativo enquanto C_3A e C_4AF zeta positivo. Nesse contexto, os aditivos para as suspensões cimentícias são em geral aniônicos, pois possuem o objetivo de induzir zeta negativo no C_3A e C_4AF para gerar repulsão elétrica e dispersar as partículas. Sendo esse motivo para a dispersão de suspensões cimentícia ser governada, por: 1) principalmente pela fase C_3A ; e 2) pelas fases decorrentes das reações do C_3A com os sulfatos da gipsita durante a hidratação, como monossulfoaluminato e a etringita. No entanto, as fases de hidratação decorrentes de C_3S e C_2S , como a singenita e a portlandita, apresentam potencial zeta nulo ou negativo, ocorrendo em casos com teores muito baixos a adsorção de dispersantes

(DAMINELI, 2013; JOLICOEUR; SIMARD, 1998; SCHRÖFL; GRUBER; PLANK, 2012; YOSHIOKA et al., 2002).

Diferentes tipos de dispersantes foram desenvolvidos com diferentes tamanhos de moléculas e cargas elétricas para se estudar na interação com diferentes compostos anidros e hidratados de cimento, e porque há uma diversidade de clínqueres existentes com diferentes teores de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , entre outros fatores de aplicação, como: viscosidade e tensão de escoamento, tempo de início de aplicação, tempo da aplicação e outros. O aumento da área superficial das fases do cimento durante a hidratação é um fator que pode alterar a demanda no consumo de dispersante para chegar na fluidez necessária. Sendo assim, a entrada de outros materiais, alguns até mais finos que o cimento, para promover o empacotamento, acaba dificultando o cenário para dispersão das partículas, pois esses finos possuem cargas superficiais diferentes (DAMINELI, 2013).

Para realizar a dispersão das partículas os dispersantes eletrostáticos possuem cargas elétricas adsorvidas à superfície da partícula, chamado de plano de Stern gerando repulsão elétrica e afastando, inicialmente, as partículas. Conforme demonstrado na Figura 14 a) nos primeiros instantes, quando o cimento é disperso e água, são gerados íons por dissolução e precipitação dos compostos; b) as cargas elétricas destes dispersantes acabam sendo gradativamente consumidos pelos íons, diminuindo as cargas elétricas de repulsão; c) até que fiquem nulas, gerando a aglomeração, conforme demonstrado na Figura 14 (OLIVEIRA et al., 2018).

Figura 14 – Evolução da carga elétrica dos dispersantes em mistura cimentícia



Fonte: Daminelí (2013)

Uma barreira física à tração das partículas impostas pelos dispersantes estéricos é formada normalmente por moléculas poliméricas. E esse mecanismo, com uma espessura de camada adsorvida maior que a atuação das forças de Van der Waals, impede aglomeração. No entanto, as moléculas poliméricas por apresentarem

cargas superficiais, podem ter maior afinidade com a partícula ou com o meio, dependendo do polímero utilizado e das forças de suspensão ao longo da hidratação. Assim, se as moléculas poliméricas forem muito extensas podem ter alta afinidade com as partículas e podem se ligar à superfície de outras partículas, gerando o processo de “ponte”, e assim aglomera o sistema ao invés de dispersar (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

Existe uma relação sobre o efeito dos dispersantes e a área superficial das matérias-primas, sendo o teor ótimo de dispersante somente atingido quando cobrir todos os pólos de carga inversa da superfície da partícula. Como os materiais são diferentes, esses terão diferentes cargas superficiais e logo irão adsorver diferentes teores de dispersantes. Com a defloculação diferente entre os componentes da mistura, pode-se mudar o comportamento reológico do sistema misto em comparação com sistemas compostos por matérias-primas (DAMINELI, 2013; DINGER; FUNK, 1997; YAVUZ; KÜÇÜKBAYRAK, 2001).

A água, sendo um solvente universal, também é um dispersante, mas com eficiência baixa, pois com seu incremento em uma mistura de concreto outras propriedades são perdidas como a redução da resistência mecânica e o aumento da porosidade, perdendo durabilidade, além de não impedir a aglomeração. A água possui como objetivo participar do processo de hidratação, recobrando as partículas com leve dispersão, mas sem ser o principal dispersante (DAMINELI, 2013).

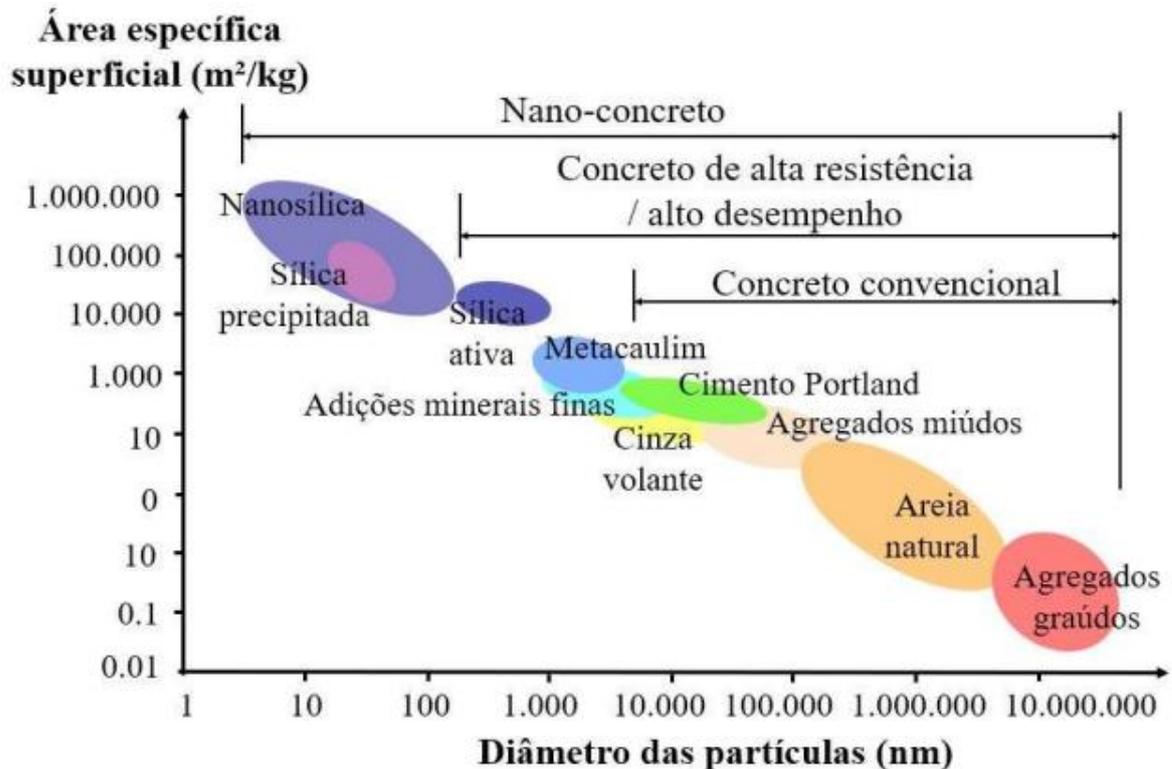
O tempo para a utilização da mistura deve estar associado ao tempo de manutenção da estabilidade do dispersante, fator importante ligado a eficiência dos ligantes. Caso, essa condição não seja atendida, haverá correção nos parâmetros reológicos, que na prática pode ser com água, diminuindo o desempenho do sistema. A perda de dispersão está relacionada a três fatores: 1) aumento da dissolução dos íons na suspensão; 2) tamanho molecular e concentração das cargas diminuindo a eficiência do dispersante, que interagem com variadas cargas de partículas e 3) início das reações de hidratação gerando consolidação do sistema.

2.3 EFEITOS DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS EM CONCRETOS

O empacotamento de partículas tem efeito positivo obtenção de concretos com resistências maiores, tendo reflexo no preenchimento de vazios e, conseqüentemente, diminuindo a porosidade. Para preencher os vazios em escalas cada vez menores, é

necessária a adição de novos insumos ao concreto, a exemplo das adições minerais finas, como: metacaulim, sílica ativa, nanosílica, entre outras. A Figura 15, demonstra diferentes diâmetros e as áreas superficiais das partículas de alguns materiais para a produção de diferentes tipos de concretos.

Figura 15 – Diâmetro e área superficial específica de materiais utilizados para produzir diferentes concretos



Fonte: adaptado de Sobolev e Gutiérrez (2005) *apud* Goes et al. (2020)

Entende-se, pela Figura 15, que a área específica e diâmetro das partículas dos materiais posicionados mais à esquerda são mais finos, contribuindo para a densidade de empacotamento da mistura.

Os materiais usualmente utilizados em concretos com refino no empacotamento de partículas são: ligantes, agregados, água e aditivos. Podendo-se estender para a adição de mistura híbrida de fibras, no caso da produção de concreto UHPC, que vem sendo vastamente estudado para melhoria de suas propriedades no estado endurecido (CHRIST, 2019).

São vários os efeitos do empacotamento de partículas em concretos, pois seu adequado uso permite alterar propriedades no estado fresco e endurecido das misturas, otimizando o índice de eficiência dos ligantes (kg/MPa), reduzindo o

consumo de cimento por m^3 , sendo esse um ponto muito positivo para a sustentabilidade, pois há uma redução da emissão de CO_2 (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

De mesma maneira em que os efeitos da densidade de empacotamento geram reduções do consumo dos ligantes, se bem aplicados, aumentam sua eficiência. No entanto, há a necessidade de redução do teor de água nas misturas, para que tenham uma menor porosidade, gerando um maior desempenho mecânico e dificultando a penetração de agentes agressivos na rede de poros do concreto, o que é favorável para a durabilidade do sistema (CAMPOS, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Diversos pesquisadores avaliaram os efeitos na densidade de empacotamento de partículas aplicados no desenvolvimento de concretos, destacando resumidamente, como os principais: consumo e eficiência técnica dos ligantes, durabilidade e, conseqüentemente, a sustentabilidade na cadeia da construção civil (CAMPOS, 2019; CHRIST, 2019; DAMINELI et al., 2013; DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017; DE LARRARD; SEDRAN, 1994; LOPES, 2019; MANGULKAR; JAMKAR, 2013; OLIVEIRA et al., 2018; SANTHANAM; KUMAR, 2003; SHAKHMENKO; BIRSH, 1998; VOGT, 2010; WONG; KWAN, 2008; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014).

2.3.1 Consumo de ligantes e eficiência técnica

O efeito do empacotamento de partículas, reduzindo a porosidade combinado com os aditivos para trazer fluidez nas misturas pode apresentar boa trabalhabilidade e no estado endurecido um bom desempenho mecânico, melhorando a eficiência técnica e consumo dos ligantes na mistura (CAMPOS, 2019; DAMINELI, 2013).

Em concretos convencionais, a eficiência técnica é descrita comumente pela literatura por resultados variando entre 9 a 14 kg/MPa (DE GRAZIA et al., 2019). Em dados do mercado brasileiro, Damineli (2013), sugere que concretos com resistência à compressão até 40 MPa apresentam entre 10 a 12 kg/MPa e para concretos de alta resistência, acima de 60 MPa, o menor índice foi de 5 kg/MPa. O trabalho citado, levantou uma pesquisa com 156 artigos publicados entre 1988 e 2009, de diversos países e o menor valor observado foi de 4,3 kg/MPa. Em estudo mais recente, Grazia et al. (2019), alcançaram a eficiência técnica de 3,3 kg/MPa aplicando o Modelo de Alfred Modificado, com consumo de cimento de 161 kg/m^3 e fíler calcário inerte.

Campos (2019) obteve em sua pesquisa, como melhor resultado entre os traços analisados uma eficiência técnica no consumo de cimento em 2,77 kg/MPa de resistência à compressão, utilizando sua dosagem de concreto otimizada por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra e sílica ativa. Uma redução no consumo de cimento muito significativa, 34% aos 28 dias, quando comparamos ao renomado método de Mehta e Aïtcin (1990).

Diferentes artigos e pesquisas foram avaliados, e pode-se assumir que os pesquisadores encontraram diferentes classes de eficiência técnica. Segue, resumo das classes de eficiência técnica em kg de cimento por MPa (kg/MPa):

- Concretos convencionais – 9 a 14 kg/MPa (DE GRAZIA et al., 2019);
- Concretos até 40 MPa – 10 e 2 kg/MPa (DAMINELI, 2013);
- Concretos acima de 60 MPa – 5 kg/MPa, de acordo com Damineli (2013) que analisou 156 artigos, com menor índice em 4,3 kg/MPa.
- Concreto de alto desempenho, Campos (2019) encontra em sua pesquisa 2,77 kg/MPa.

Em geral, concretos com maior resistência mecânica tendem a possuir melhor eficiência, o que torna difícil a tarefa de desenvolver concretos convencionais até 40 MPa com eficiência técnica abaixo de 9kg/MPa. Então, há a necessidade de aprofundar as técnicas de empacotamentos de partículas para dosagens de concretos, não somente nos agregados, mas avaliando o empacotamento em multi-escala, buscando uma melhor eficiência técnica e aproveitamento dos ligantes. A presente pesquisa busca aprofundar a eficiência técnica dos ligantes em pastas.

Quanto a durabilidade, conforme a NBR 6118, pode ser definida pela capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo projetista estrutural e pelo contratante no início dos trabalhos e elaboração o projeto (ABNT, 2014a). Sendo a durabilidade relacionada com a interação entre o material e ao meio de condição de exposição.

Para resistir aos agentes agressivos externos, uma das condições necessárias é a alta compacidade para se obter concretos duráveis. A realização da mistura com refino de seu empacotamento, permite redução no teor de água da mistura, o que é favorável para redução de porosidade, deve-se ter, também, a preocupação com a trabalhabilidade para não interferir na aplicação, o que traz durabilidade ao material e ao sistema (CAMPOS, 2019; LOPES, 2019).

Os fenômenos físico-químico associados ao transporte de água em materiais porosos são controlados pela permeabilidade do material, ou seja, um material permeável permite com maior facilidade a entrada de água no sistema. A entrada de água pode dissolver componentes solúveis do concreto, ocorrendo a deterioração do concreto e, com isso, o alto teor de água na mistura de concreto gera excessivos poros grandes e conectados, aumentando a permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No concreto, os poros de maior dimensão estão localizados a zona de transição, na pasta a dimensão dos poros situa-se entre 10 e 100 μm , enquanto nos agregados a média está próxima de 10 μm .

A influência do tamanho dos poros nas propriedades da pasta pode ser analisada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do diâmetro médio dos poros em pastas de cimento hidratado

Designação	Diâmetro	Descrição	Função da água	Propriedades afetadas na pasta
Poros Capilares	10 μm – 50 nm	Capilares grandes (macroporos)	Comporta como água e enchimento	Resistência Mecânica Permeabilidade
	50nm – 10nm	Capilares médios (mesoporos)	Gera moderadas forças de tensão superficial	Resistência Mecânica Permeabilidade Retração em umidades elevadas
Poros de gel	10nm ~ 2,5 nm	Capilares pequenos (gel)	Gera fortes forças de tensão superficial	Retração em umidade relativa de 50%
	2,5 nm ~ 0,5 nm	Microporos	Forte adsorção de água sem formação de meniscos	Retração Fluência
	< 0,5 nm	Microporos interlamelares	Água ligada por pontes de hidrogênio	Retração Fluência

Fonte: adaptado de MINDESS; YOUNG (1981) apud CAMPOS (2019)

A análise de parâmetros de permeabilidade passa a ser uma tarefa essencial para a avaliação da durabilidade do concreto, para tal, pode-se determinar a

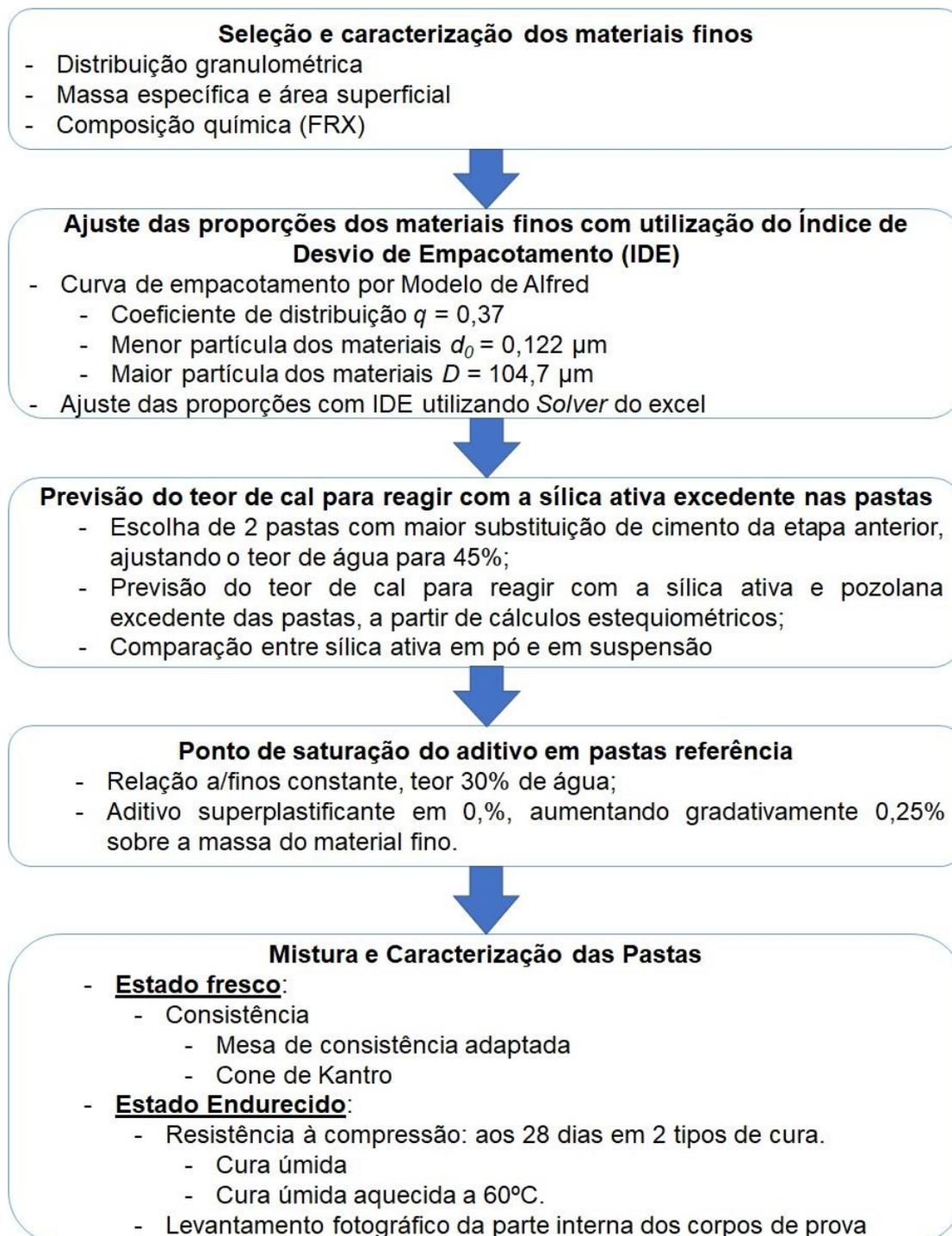
distribuição de poros do material a partir do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Ainda, entre os ensaios para avaliação de durabilidade, se destacam, os não destrutivos, pois não causam danos ao elemento ensaiado, que são: mensuração da velocidade de propagação de ondas de ultrassom e resistividade elétrica (CAMPOS, 2019).

Campos (2019) obteve em sua pesquisa, utilizando o empacotamento de partículas em concreto velocidades de pulso ultrassônico superiores a 4500 m/s, valores que são classificados como qualidade excelente por Cánovas (1998). E na resistividade elétrica encontrou bons resultados em todos os concretos estudados, concluindo que os concretos analisados possuem risco a corrosão insignificante. O risco de corrosão das armaduras se torna insignificante para valores de resistividade elétrica maiores que 100K Ω m (AZARSA; GUPTA, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODO

O presente capítulo descreve o programa experimental para atendimento aos objetivos propostos, abordando condicionantes que contemplam planejamento do programa experimental, conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma do programa experimental



A primeira etapa foi a seleção e caracterização dos materiais. Serão envolvidos na pesquisa 8 materiais finos. Nesse contexto, é interessante avaliar os materiais finos em termos físicos e de reações químicas.

A segunda etapa, foi ajustado a curva de empacotamento das pastas quanto às características físicas dos materiais finos, utiliza-se como método de empacotamento, o modelo de Alfred, utilizando como coeficiente de distribuição $q=0,37$. O modelo é associado ao IDE, com utilização da ferramenta *solver*. Quanto menor o IDE, mais próxima a curva de distribuição granulométrica dos finos combinados estará da curva ideal de empacotamento, como visto na revisão bibliográfica.

Nessa etapa foi definida a composição ideal de pasta composta por 2 tipos de cimento e materiais finos, como: sílica ativa em pó, sílica ativa em suspensão, filer calcário, filer granítico, cinza volante e cal hidratada, levando em conta apenas a distribuição granulométrica das partículas de cada material, definindo 7 pastas, sendo 2 pastas consideradas referências, pois são apenas com cimento CII F-40 ou CII V 32, e mais 5 pastas com a proporção dos finos ajustadas pelo programa, diminuindo o IDE. Essas pastas foram realizadas com 30% de água, e o restante material fino.

Na etapa 3, foram escolhidas 2 pastas da etapa anterior, as quais obtiveram maior percentual de substituição de cimento, aumentando o teor de água para 45%, buscando maior dispersão, gerando mais 2 pastas. Avaliou-se, as mesmas, quanto a reações química da hidratação do cimento, a partir de cálculos estequiométricos, calculando o teor de adições minerais para consumir o hidróxido de cálcio, buscando uma pasta com menor porosidade. Assim, relacionando a melhor distribuição granulométrica para densidade de empacotamento, em termos físicos, e balanço estequiométrico quanto a estabilidade química da mistura. Como as pastas possuíam um percentual relevante de substituição de cimento e um teor alto de sílica ativa, foi necessário incrementar o hidróxido de cálcio (cal hidratada do tipo CH-I) na mistura das pastas, gerando mais 2 pastas. Nessa etapa, as pastas foram realizadas com sílica ativa em suspensão, mas melhor dispersão da sílica ativa. Uma pasta foi repetida com sílica ativa em pó, afim de comparação. Gerando nessa etapa um total de 5 pastas.

Na etapa 4 consistiu em definir o teor de saturação do aditivo nas pastas referência, aumentando gradativamente o teor e verificando a consistência das pastas pelo índice de consistência adaptado e cone de Kantro.

Na etapa 5 as pastas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais finos utilizados na pesquisa para desenvolvimento das pastas foram: cimento CII F40, cimento CIIV 32, cinza volante, sílica ativa em pó, sílica ativa em suspensão, fíler granítico, fíler calcário e cal hidratada, além de água e aditivo superplastificante. Os materiais são detalhados a seguir.

3.2.1 Cimentos

Dois tipos de cimentos foram utilizados: CII F-40 e CIIV 32. O cimento CII F-40, atende aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018). Esse cimento foi utilizado devido a fácil aquisição e pela vasta utilização na região sul do Brasil. As propriedades químicas, físicas e desempenho mecânico do cimento estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química, física e mecânico do cimento CII F-40

Composição Química e Física		Resultados do lote	Limites NBR 16697
Trióxido de enxofre (SO ₃) (%)		3,57	≤ 4,5
Óxido de magnésio (MgO) (%)		4,99	N/A
Resíduo Insolúvel (RI) (%)		1,21	≤ 7,5
Perda ao fogo (PF) (%)		5,40	≤ 12,5
Finura (%)	#200	0,00	≤ 10,0
	#325	0,83	N/A
Água de Consistência (%)		31,05	N/A
Tempo de Pega (min)	Início	247,92	≥ 60
	Fim	312,92	≤ 600
Expansibilidade à quente (mm)		0,13	≤ 5,0
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	23,6	N/A
	3 dias	34,2	≥ 15,0
	7 dias	39,5	≥ 25,0
	28 dias	48,4	≥ 40,0
Massa específica (g/m ³)	3,08		N/A
Superfície específica (cm ² /g)	5116		≥ 2800

Fonte: Dados do fabricante referente ao boletim de ensaios de cimento – dezembro/2021.

Analogamente, o cimento CPIV 32 também atende aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018). Esse cimento é de fácil acesso e possui uma vasta utilização na região sul do Brasil. Além disso, pode ser uma alternativa sustentável devido a sua alta adição de pozolana em sua composição. As propriedades químicas, físicas e desempenho mecânico do cimento estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química, física e mecânico do cimento CPIV 32

Composição Química e Física		Resultados do lote	Limites NBR 16697
Trióxido de enxofre (SO ₃) (%)		2,23	≤ 4,5
Óxido de magnésio (MgO) (%)		5,21	N/A
Resíduo Insolúvel (RI) (%)		26,82	N/A
Perda ao fogo (PF) (%)		3,95	≤ 6,5
Finura (%)	#200	0,69	≤ 8,0
	#325	2,55	N/A
Água de Consistência (%)		31,62	N/A
Tempo de Pega (min)	Início	271,92	≥ 60
	Fim	340,38	≤ 600
Expansibilidade à quente (mm)		0,00	≤ 5,0
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	23,62	≥ 10,0
	7 dias	28,72	≥ 20,0
	28 dias	42,08	≥ 32,0 a <49,0
Massa específica (g/m ³)	2,86		N/A
Superfície específica (cm ² /g)	4401		N/A

Fonte: Dados do fabricante referente ao boletim de ensaios de cimento – maio/2022.

3.2.2 Cinza Volante

A cinza volante é obtida através da queima do carvão mineral utilizada em usinas termoelétricas, sendo de Capivari de Baixo – SC.

Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014b), a adição mineral é classificada como Classe C, sendo cinza volante (fly ash) produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.

As propriedades químicas, físicas e desempenho mecânico da cinza volante estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química e física da cinza volante

Composição Química e física		Resultados do lote	Especificações NBR 12653
Dióxido de silício (SiO ₂) (%)		59,75	N/A
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) (%)		21,29	N/A
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) (%)		5,90	N/A
Somatório SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (%)		86,95	> 70,0
Óxido de cálcio (CaO) (%)		0,12	N/A
Óxido de magnésio (MgO) (%)		0,78	N/A
Óxido de potássio (K ₂ O) (%)		2,78	N/A
Óxido de potássio (TiO ₂) (%)		0,97	N/A
Trióxido de enxofre (SO ₃) (%)		< 5,0	<5,0
Resíduo Insolúvel (RI) (%)		93,58	N/A
Perda ao fogo (PF) (%)		2,25	<6,0
Teor de Umidade (%)		< 0,05	< 3,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)		< 1,5	< 1,5
Finura (%)	#200	34,30	N/A
	#325	45,30	N/A
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28dias (%)		82	>75
Índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)		>6	>6
Água requerida (%)		< 110	<100
Massa específica (g/m ³)	2,32		N/A
Superfície específica (cm ² /g)	3540		N/A

Fonte: fornecedor – formulário de ensaios jan/2022.

3.2.3 Sílica ativa

A sílica ativa é um material de origem metalúrgica, proveniente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. No processo de fabricação do silício metálico, origina-se um gás (SiO) que ao sair do forno elétrico oxida transformando-se em um pó fino de sílica amorfa (SiO₂), esse é captado por filtros manga, e armazenado em silos adequados e embalados em big-bags ou sacos de craft.

As partículas de sílica ativa são esféricas e finas, possuindo partículas de diâmetro médio menores do que 1 μm . A característica física e química da sílica ativa pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 – Característica físicas e químicas da sílica ativa

Ensaio	Unidade	Limite Inferior	Limite Superior	Resultado
Teor SiO_2	%	85%	-	94,18
Superfície específica	m^2/kg	-	-	20000
Formato	-	-	-	esférico
Massa específica	kg/m^3	-	-	2220
Perda de ignição	%	-	6,00	1,99
Tamanho partícula 0,045 MM	%	-	10	1,92
Teor umidade	%	-	3	0,38
Equivalente alcalino Na_2O_3	%	-	1,50	1,14
Densidade aparente	g/cm^3	-	-	0,51

Fonte: fabricante (2022)

Além da sílica ativa em pó, há a sílica ativa em suspensão que se trata de uma solução aquosa de sílica ativa, facilitando o manuseio e a utilização. Na pesquisa, serão utilizados os dois tipos de sílica.

A sílica ativa em suspensão encontra-se dispersa com teor de sólidos em 50%, quando utilizada, na pesquisa, a água da mistura foi ajustada.

3.2.4 Fíler calcário e granítico

Como micropartículas escolheu-se dois materiais, sendo considerados como: fíler calcário e fíler granítico.

O fíler granítico é um material alternativo, pó de pedra de origem granítica, sendo um material resíduo do processo de britagem de britas da região de São José-SC, da Cedro Engenharia, Comércio e Mineração, obtido a partir da areia artificial que passa por um novo processo de refinamento e o material fino é captado por filtros manga.

E o fíler calcário é obtido da extração de rocha calcária, proveniente da cidade de Rio Branco do Sul, no estado do Paraná, o material é obtido através do processo

de britagem de rocha calcária e vastamente utilizado para a produção de cimentos e como calcário agrícola para correção de solo na agricultura.

Por ambos se caracterizarem por materiais de extrema finura e resíduos, podem ser materiais alternativos para serem utilizados em substituição ao cimento Portland, beneficiando a densidade de empacotamento, preenchendo vazios.

3.2.5 Cal Hidratada

A cal hidratada do tipo CH-I é um pó micropulverizado de óxido de cálcio de magnésio, atende aos requisitos da NBR 6473 (ABNT, 2003).

A cal hidratada é da região de Colombo-PR, da Cal Cem Indústria e foi escolhida devido a fácil acesso na região sul e pelas suas propriedades químicas e físicas, descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química e física da Cal

Análise Química		
Ensaio	Unidade	Resultado
Perda ao fogo (PF)	%	26,1
Sílica e resíduo insolúvel (SiO ₂ +RI)	%	2,8
Óxido de cálcio (CaO)	%	40,9
Óxido de Magnésio (MgO)	%	29,7
Óxidos totais (CaO+MgO)	%	95,4
Anidrido Carbônico Co ₂	%	3,2
Óxidos Totais não hidratados	%	5,0
Água combinada	%	23,0
CaO não hidratado	%	0,0
CaO + MgO	%	70,5
Análise Física		
Ensaio	Unidade	Resultado
Granulometria #30 (0,60 mm)	%	0,0
Granulometria #200 (0,075 mm)	%	4,9
Umidade	%	0,1

Fonte: fabricante (2021)

Além de ser um material de extrema finura, contribuindo para o empacotamento de partículas da pasta, caso necessário poderá corrigir, a partir de cálculos estequiométricos, o balanço químico da combinação dos materiais na pasta, no caso de sílica amorfa em excesso. Assim, beneficiando a densidade de empacotamento, e também quimicamente as pastas otimizadas.

3.2.6 Água

Para realização do programa experimental, a água utilizada nos testes experimentais das pastas é proveniente da rede de abastecimento local, sendo dispensável sua caracterização para controle de aceitação, conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2019^a).

3.2.7 Aditivos

O aditivo dispersante utilizado na pesquisa será o ADVA 458 UHPC da marca GCP Applied Technologies que é um aditivo superplastificante à base de policarboxilato desenvolvido para possibilitar alta fluidez em concretos de ultra alto desempenho, os quais a relação água/ligantes é baixa.

Segundo a ficha técnica do fabricante, o aditivo possibilita o alcance de altas resistências mecânicas finais e redução significativa da tensão de cisalhamento, apresentando alto poder de dispersão das partículas de cimento no início da mistura, garantindo manutenção de abatimento.

As especificações do aditivo podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Especificações técnicas – ADVA 458 UHPC

Denominação o teste	Unidade	Especificação	
		Mínima	Máxima
Cor	-	Amarelo	Âmbar
pH (25°C)	-	4,00	6,00
Massa específica (25°C)	g/cm ³	1,075	1,115
Teor de sólidos	%	45,13	49,88
Teor de cloretos	%	0,00	0,15

Fonte: fabricante (2022).

Classificado, conforme NBR 11768, como redutor de água tipo 2 – Acelerador de pega RA2-A/ Acelerador de resistência – AR (ABNT, 2019).

3.3 ENSAIOS E MÉTODOS

Os ensaios e métodos definidos para a sequência da pesquisa são abordados nesse capítulo, sendo todos realizados na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), seguindo a seguinte proposta:

- 1) ensaios dos materiais finos;
- 2) determinação da proporção das pastas;
- 3) determinação do teor ótimo de aditivo sobre o cimento;
- 4) mistura, caracterização das pastas no estado fresco e endurecido.

3.3.1 Ensaios dos materiais finos

Previamente todos os materiais foram separados e preparados para os ensaios de caracterização que são:

- Massa específica e área superficial (BET);
- Distribuição granulométrica à laser.
- Fluorescência de raios X (FRX);

A caracterização dos materiais foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat da Unisinos.

A área superficial e massa específica dos materiais finos foram determinadas por dois métodos diferentes. Sendo a área superficial específica por adsorção de nitrogênio (BET), realizada pelo equipamento TriStar II Plus da marca Micromeritics®, Figura 17. E a massa específica utilizando o equipamento Picnômetro modelo AccuPyc II 1340 da marca Micromeritics® por metodologia de picnometria a gás hélio, Figura 18.

Figura 17 - Equipamento Tri Star II Plus para determinação da área superficial específica



Fonte: o autor (2023)

Figura 18 - Equipamento Pícnômetro modelo AccuPyc II 1340 para determinação da massa específica



Fonte: o autor (2023)

A determinação da dimensão das partículas, bem como a distribuição granulométrica de cada material foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser, utilizando como equipamento o Microtrac modelo S3500, Figura 19.

Figura 19 – Equipamento Microtrac S3500 para verificação da granulometria a laser



Fonte: Autor (2023)

Os materiais foram analisados via úmida, utilizando como solvente álcool isopropílico. A solução foi submetida a agitação para a dispersão das partículas em ultrassom externo por 5 minutos e ultrassom interno (equipamento) por 5 minutos. Devido à alta finura da sílica ativa em pó, foram utilizadas 5 diferentes técnicas para preparação da amostra. Mantendo o tempo de ultrassom externo, mas alterando o tempo de ultrassom do equipamento. Uma das técnicas alterou o solvente álcool isopropílico para o aditivo superplastificante GCP 458 UHPC, para dispersar as partículas. Seguem técnicas utilizadas:

- Ultrassom interno 5 minutos, solvente álcool isopropílico;
- Ultrassom interno 20 minutos, solvente álcool isopropílico;
- Ultrassom interno 25 minutos, solvente álcool isopropílico;

- Ultrassom interno 25 minutos, solvente aditivo superplastificante GCP 458 UHPC;

- Ultrassom interno 30 minutos, solvente álcool isopropílico;

O procedimento adotado foi com ultrassom interno de 20 minutos, utilizando como solvendo o álcool isopropílico. Essa técnica dispersou mais as partículas mais finas da sílica ativa. Entendendo como o resultado real do tamanho das partículas, pois as partículas muito finas, possuem tendência de aglomeração, conforme visto na revisão bibliográfica.

A caracterização química foi determinada pelo ensaio de Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX) por dispersão de energia, com análise qualitativa e quantitativa da composição química dos materiais finos utilizados na pesquisa. Utilizando como equipamento um modelo EDX 720 HS, marca Shimadzu, Figura 20.

Figura 20 – Equipamento EDX 720HS para caracterização química



Fonte: o autor (2023).

Com os resultados de caracterização física é possível utilizar o empacotamento de partículas, para ajustar a proporção dos materiais finos, melhorando o IDE em relação ao modelo de empacotamento adotado.

3.3.2 Determinação da proporção dos finos nas pastas

A determinação da proporção dos finos avaliou as características físicas e químicas dos materiais utilizados, sendo a proporção ajustada pelas características físicas dos materiais segundo o modelo de empacotamento de Alfred. O método de empacotamento de Alfred foi adotado por considerar limites para os tamanhos das partículas, permitindo aplicar na equação a partícula de menor tamanho, conforme visto na revisão bibliográfica. O melhor refino da pasta empacotando os materiais finos para melhor ajuste da curva de empacotamento foi utilizando como módulo de distribuição (q), $q=0,37$. Esse coeficiente foi utilizado baseado na mínima porosidade calculada pelo modelo de Westmann; Hugill modificado, que pode resultar na maior densidade de empacotamento, essas se forem esferas perfeitas (DAMINELLI; PILEGGI; JOHN, 2017).

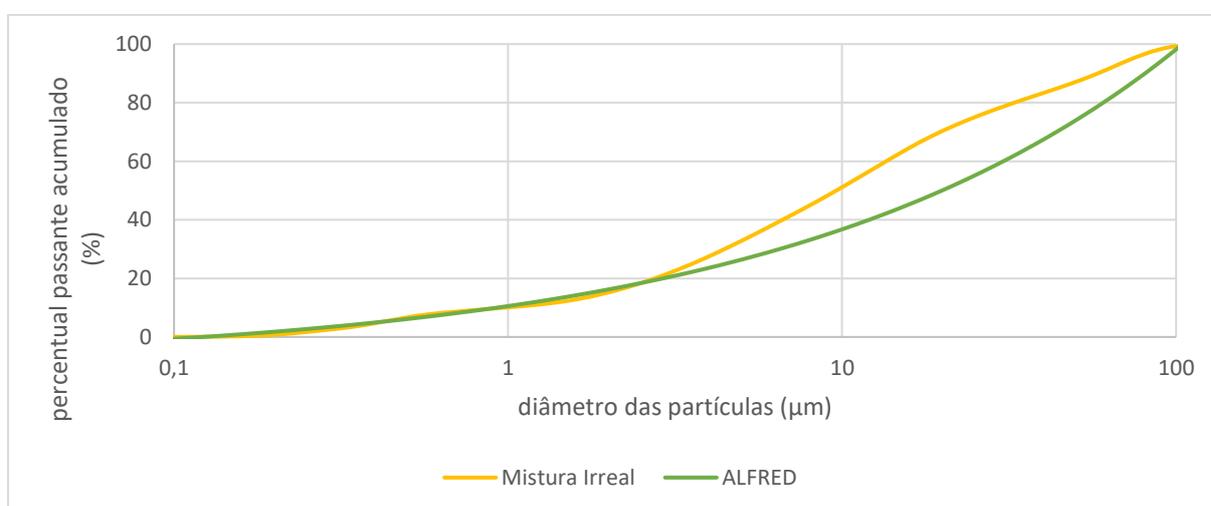
Associado ao modelo de empacotamento, utilizou-se como ferramenta o Índice de Desvio de Empacotamento (IDE), proposto por (CHRIST, 2019), definindo que quanto menor esse índice, maior será a aproximação da curva utilizada com a curva ideal do modelo de empacotamento. Sendo o IDE, o somatório da diferença entre a mistura experimental e a mistura teórica por diâmetro de partícula.

A otimização da proporção dos materiais finos, levando em consideração o modelo de empacotamento como alvo para definição do menor IDE, em busca da curva de distribuição mais próxima do modelo enunciado, utilizou-se como ferramenta computacional o *Solver*, presente no software Excel, para ajustar a curva teórica (modelo de Alfred) com a curva experimental de referência, ajustando a proporção dos materiais finos. A sequência para ajuste da proporção dos materiais finos utilizando o IDE é detalhado no Apêndice A.

Nesta etapa do trabalho, foram determinados 5 traços com proporções de finos diferentes, variando as proporções dos materiais entre as misturas, todas com menor IDE em relação aos 2 traços de referência que são com apenas cimento, totalizando 7 diferentes traços de pastas. A quantidade de água nesses traços, ficou fixada em 30% do volume, sendo o restante do volume 70%, completado pelos materiais finos.

Vale ressaltar, o programa utilizado leva em consideração a distribuição granulométrica de cada material em volume, e não leva em consideração a rugosidade superficial, porosidade e índice de forma de cada material. O programa desconhece o comportamento de cada material fino na mistura a ser realizada e isso pode induzir a um erro, devolvendo como resposta do problema uma possível proporção de finos irreal, sem cimento e com excelente IDE. Esse problema pode ser observado na Figura 21, onde o programa devolveu como resposta uma mistura com IDE de 265,0 contendo apenas sílica ativa em pó (13,3%) e fíler granítico (86,7%).

Figura 21 – Distribuição Granulométrica de mistura irreal



Fonte: o autor (2023).

Afim de solucionar esse problema, limitou o programa para cada tipo de cimento, considerando para variável de resposta teores mínimos de cimento, sendo 50% e/ou 70% para o cimento CII F-40 e de 70% para as misturas com o cimento CIV 32. Esses teores foram definidos e colocados pensando também no balanço químico. Realizado alguns testes preliminares no programa, o teor de sílica ativa ficou alto, isso resultaria em incremento ainda maior de hidróxido de cálcio.

Dos 7 traços de pastas foram escolhidas as 2 pastas com maior substituição de cimento, alterando a proporção de água para 45% e materiais finos 55%. Desses 2 novos traços, realizou-se cálculos estequiométricos para prever o teor máximo de hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento Portland, com base no teor e na composição do clínquer nos cimentos, utilizando as reações de hidratação do C_3S e do C_2S , apresentadas por Mehta e Monteiro (2014). Com isso, foi possível calcular o teor de sílica ativa para reagir com hidróxido de cálcio. Como as pastas estão com um percentual relevante de substituição de cimento, verificou-se que o teor

de hidróxido de cálcio seria todo consumido pelas adições minerais, e houve a necessidade de incremento de hidróxido de cálcio para reagir com a sílica ativa remanescente. Ou seja, foram calculadas mais 2 pastas com adição de cal hidratada. Essas pastas, foram realizadas com a sílica em suspensão, afim de facilitar a dispersão da sílica ativa. A quantidade de água contida na sílica em suspensão foi descontada da água dos traços. Uma das pastas foi repetida com a sílica ativa em pó, afim de comparação, gerando mais 5 traços de pastas, totalizando 12 traços.

Na Tabela 8, segue o descritivo dos 12 traços das pastas que foram confeccionadas.

Tabela 8 – Descritivo das pastas

Identificação	Descritivo
REF II A30	Pasta referência, Cimento CPII F-40, com 30% de água.
II FC P S A30	Pasta com cimento CPII F-40, fíler calcário, pozolana e sílica ativa em pó, com 30% de água.
II FG P S A30	Pasta com cimento CPII F-40, fíler granítico, pozolana e sílica ativa em pó, com 30% de água.
II FG S A30	Pasta com cimento CPII F-40, fíler granítico e sílica ativa em pó, com 30% de água.
REF IV A30	Pasta referência, Cimento CPIV 32, com 30% de água.
IV FC S A30	Pasta com cimento CPIV 32, fíler calcário e sílica ativa em pó, com 30% de água.
IV FG S A30	Pasta com cimento CPIV 32, fíler granítico e sílica ativa em pó, com 30% de água.
II FG P SS A45	Pasta com cimento CPII F-40, fíler granítico e sílica ativa em suspensão, com 45% de água.
II FG P SS C A45	Pasta com cimento CPII F-40, fíler granítico, sílica ativa em suspensão e cal hidratada, com 45% de água.
IV FG S A45	Pasta com cimento CPIV 32, fíler granítico e sílica ativa em pó, com 45% de água.
IV FG SS A45	Pasta com cimento CPIV 32, fíler granítico e sílica ativa em suspensão, com 45% de água.
IV FG SS C A45	Pasta com cimento CPIV 32, fíler granítico, sílica ativa em suspensão e cal hidratada, com 45% de água.

Fonte: autor (2023).

3.3.3 Ponto de saturação do aditivo superplastificante em pastas referência

A partir dos resultados de caracterização dos materiais finos, foram confeccionados inicialmente, os traços das pastas referência de cimento e água, com o intuito de buscar a dosagem adequada do superplastificante utilizado, entendendo como ideal o ponto de saturação do aditivo. A relação a/finos foi mantida constante, mantendo o teor de água da pasta em 30%, variando a dose do aditivo superplastificante, iniciando em: 0%, e aumentando em 0,25% sobre a massa do material fino, gradativamente, até o limite da fluidez. A fluidez foi observada pelos ensaios:

- Cone de Kantro (1980);
- Índice de consistência adaptado, realizando o ensaio em 1 camada e sem os golpes, pois as pastas são fluidas.

Observou-se que para ambos os cimentos, tanto CII F-40, como CIII 32, o teor mínimo de aditivo ficou em 0,75%.

Os traços II FC P S A30, II FG P S A30 e II FG S A30, com CII F40, foi necessário 2,25% de aditivo sobre o peso dos materiais finos para manter consistência próxima ao traço referência REF II A30. E os traços IV FC S A30 e IV FG S A30 com teor de 2,75% para manter consistência próxima ao traço referência REF IV A30. Possivelmente, esse efeito é devido ao incremento de finos e aumento na área superficial.

Para os traços com quantidade de água de 45%, o teor de aditivo se manteve em 0,5%. Sendo esse teor necessário e suficiente para dispersão e boa consistência.

3.3.4 Preparo, moldagem e cura das pastas

A partir dos resultados de saturação do aditivo em pastas referência, foram confeccionados os demais traços das pastas. Utilizando como equipamento de mistura argamassadeira eletro-mecânica, misturadora de argamassa para mistura de cimentos e argamassas, com cuba de capacidade de 5 litros, pá em aço inoxidável com sistema de engate rápido e com duas velocidades de mistura, sendo lenta e rápida.

As misturas das pastas ocorreu conforme recomendações e adaptações da NBR 7681-1 (ABNT, 2013).

A Tabela 9 apresenta o procedimento de mistura das pastas na argamassadeira. O aditivo foi disperso em 80% da água do traço antecipadamente, afim de melhorar a dispersão.

Tabela 9 – Procedimento de mistura

Materiais	Tempo de Mistura	Velocidade da mistura
Materiais finos	60s	Baixa
Materiais finos + 80% água + aditivo	120s	Baixa
Raspagem	60s	Parado
Completar 100% água	30s	Baixa
Manter em Velocidade baixa até pasta visualmente fluida	?	Baixa
Após consistência visualmente fluida	180s	Alta

Fonte: autor (2022)

A velocidade foi mantida em baixa após a colocação de todos os materiais, e em tempo variável, pois as pastas com empacotamento com teor de água em 30% levavam mais tempo para dispersar. Após mistura visualmente homogênea e dispersa, a velocidade foi aumentada durante 180s.

O teor de aditivo superplastificante se manterá sobre a massa dos materiais finos, e para verificação da consistência de espalhamento no estado fresco utilizou-se o cone de Kantro e o índice de consistência adaptado, após a mistura.

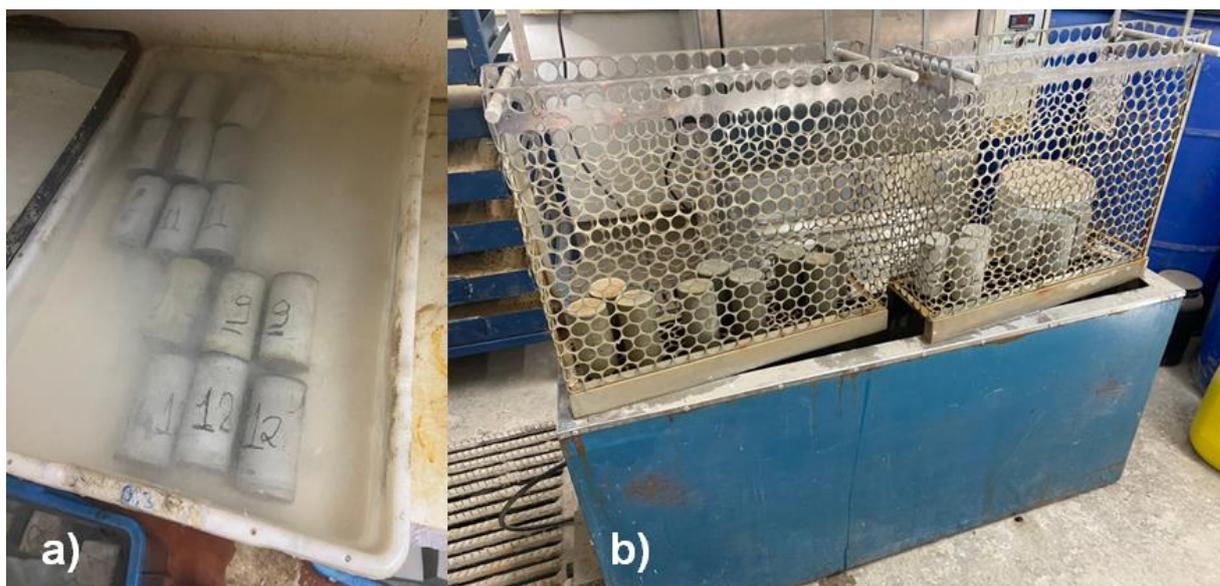
As pastas foram moldadas em corpos de prova 5x10cm e caracterizadas quanto à resistência à compressão nas idades aos 28 dias, conforme (ABNT, 2019c). Para cada traço foram moldados 6 corpos-de-prova, em duas camadas com 30 golpes na mesa de queda, cada camada. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas. Na Figura 22, observam-se os corpos-de-prova moldados.

Figura 22 – Corpos de prova moldados



Dos 6 corpos-de-prova moldados, 3 foram levados à câmara úmida com umidade relativa $\sim 100\%$ e temperatura de $23\pm 2^\circ\text{C}$, e 3 foram levados à cura úmida com água aquecida a 60°C , sendo mantidos sob cura até a idade indicada para caracterização da resistência à compressão. Na Figura 23, pode-se observar os tipos de cura: a) úmida em de $23\pm 2^\circ\text{C}$ e b) úmida aquecida em $\sim 60^\circ\text{C}$.

Figura 23 – Cura dos corpos-de-prova: a) úmida normal e b) aquecida em banho térmico



Fonte: o autor (2023).

A cura úmida com água aquecida a 60°C foi realizada com o objetivo de acelerar as reações de hidratação.

Os corpos-de-prova rompidos, após a caracterização da resistência a compressão, também foram selecionados para levantamento fotográfico na parte interna com o objetivo de observar se as partículas dispersaram na pasta no momento da mistura. O levantamento fotográfico foi realizado com máquina fotográfica CANON EOS REBEL XT, com lente de 100mm, utilizando em conjunto uma régua de 30cm, com divisão em milímetros, como apoio para escala.

Para análise em termos de sustentabilidade foram considerados consumo de cimento por m³ das pastas confeccionadas, e utilizou-se como parâmetro, a relação da resistência mecânica e a quantidade de cimento em kg/m³. Conforme descrito na equação 15.

$$\text{kg/MPa} = \frac{\frac{\text{kg de cimento}}{\text{m}^3}}{\text{Resistência Mecânica potencial}} \quad (15)$$

A eficiência do consumo de cimento foi calculada considerando o consumo de cimento para obter 1 MPa da resistência à compressão para cada pasta analisada. Quanto menor for o índice, menor será o consumo de cimento e mais eficiente será a mistura, tanto tecnicamente quanto em relação a sustentabilidade, como visto na revisão bibliográfica.

4 RESULTADOS

O capítulo em questão contempla os seguintes resultados:

- Caracterização dos materiais finos;
- Definição da proporção dos materiais finos das pastas utilizando modelo de empacotamento de Alfred;
- Ajuste da proporção dos materiais finos das pastas, levando em conta cálculos estequiométricos para consumo do hidróxido de cálcio ou sílica ativa;
- Resultados da caracterização das pastas em estado fresco;
- Resultados da caracterização das pastas em estado endurecido;
- Cálculo da eficiência técnica dos ligantes

4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FINOS

Os materiais foram caracterizados quanto a fluorescência de raios X (FRX), massa específica, área superficial (BET) e distribuição granulométrica à laser.

Na Tabela 10, estão os resultados da caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X.

Tabela 10 – Caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X

Óxidos (%)	CPII F-40	CPIV 32	Sílica Ativa
CaO	50,191	30,592	0,35
SiO₂	16,05	20,007	94,783
MgO	5,66	3,059	-
Al₂O₃	4,519	7,487	-
Fe₂O₃	2,406	3,682	0,006
SO₃	2,261	0,774	-
K₂O	0,889	1,172	0,825
Na₂O	0,288	0,021	0,03
TiO₂	0,266	0,579	0,076
SrO	0,086	0,206	-
P₂O₅	0,072	0,062	0,351
MnO	0,06	0,098	-
ZnO	0,016	0,038	-
Cr₂O₃	0,008	0,015	-
Loi	6,319	6,71	1,421

Fonte: o autor (2023)

Alguns dos materiais de estudo não possuíam amostras padrão, com isso a análise de resultados de FRX foi semiquantitativa. Na Tabela 11, resultados.

Tabela 11 – Caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X – semiquantitativa

Material	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos minoritários (< 5%)
Fíler calcário	Ca	-	Mg, Si, Fe, Al, K, Sr, S, Mn
Fíler granítico	Si	Fe, Al, K, Ca	Ti, Mn, Zr, S, Rb, Sr, P, Zn, Y
Pozolana	-	Si, Al, Fe, Ca, K	Ti, Ba, Mg, S, Zr, Mn, Zn, Sr, Rb, Y, Nb
Cal CH-I	Ca	Mg	Si, Fe, Al, K, Mn, S, Sr, Cu

Fonte: o autor (2023)

Os resultados de massa específica e área superficial podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Massa Específica e Área Superficial dos materiais finos

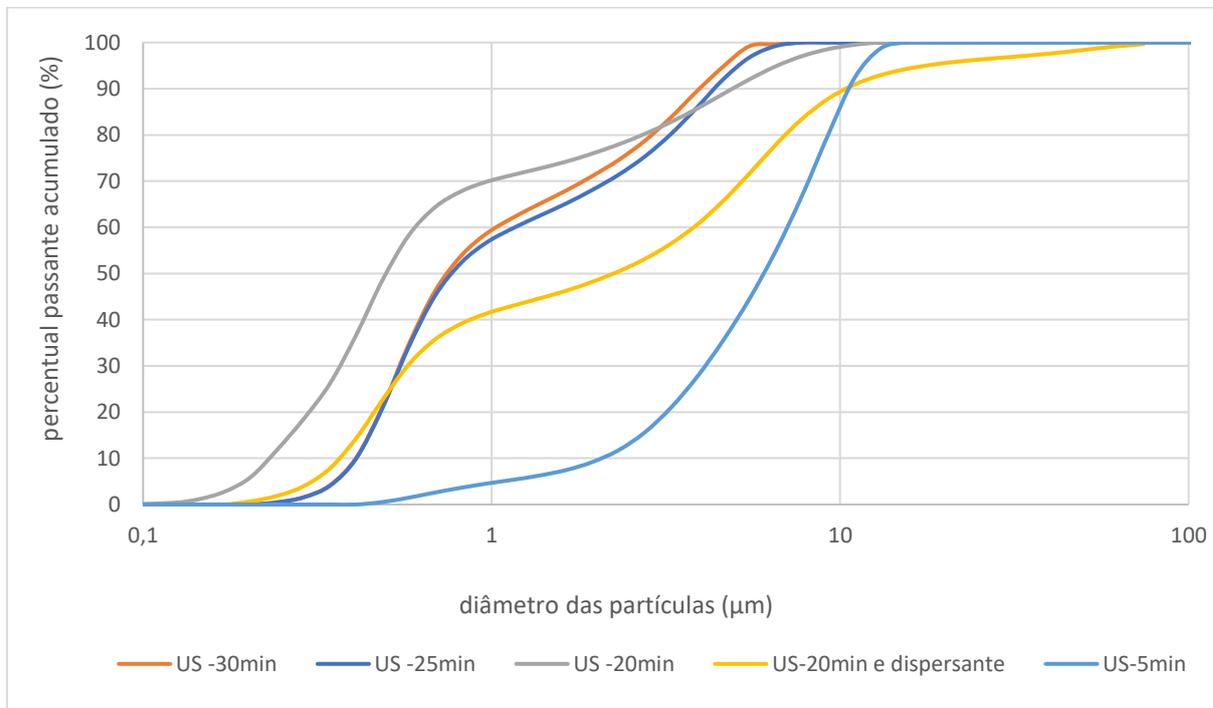
Amostra	Massa específica (g/cm³)	Área Superficial (m²/g)
CIMENTO CP II – F40	2,9544	1,7385
POZOLANA	2,1824	0,8900
SILICA	2,2134	17,0686
CIMENTO CPIV 32	2,7336	1,3354
Fíler granítico	2,6468	1,0967
Fíler calcário	2,7083	1,6510
Cal – CH-I	2,2200	10,6947

Fonte: o autor (2023).

Para determinação da distribuição granulométrica da sílica ativa, devido a sua alta finura, foram utilizadas 5 técnicas diferentes, variando o tempo de ultrassom (US) e dispersante, conforme descritas no item sobre “ensaios dos materiais finos (3.3.1)”.

A distribuição granulométrica à laser da sílica ativa em pó pode ser visualizada na Figura 24.

Figura 24 – Distribuição granulométrica da sílica ativa



Fonte: o autor (2023).

A técnica, para determinação da distribuição granulométrica da sílica ativa em pó, foi considerada a com tempo de ultrassom interno de 20 minutos utilizado como solvente o álcool isopropílico, devido a maior dispersão das partículas mais finas. Encontrando como maior diâmetro de partícula na distribuição da sílica ativa 11 μm e menor partícula 0,122 μm .

Campos (2019) também utilizou diferentes procedimentos de ensaios para caracterizar a finura da sílica ativa, variando o tempo de ultrassom e corroborando com o presente estudo, mas obtendo uma menor dispersão, devido a aglomeração das partículas. Conforme apresentado anteriormente, quando maior a superfície específica das partículas, menores serão as forças gravitacionais, consequentemente as forças de tração irão sobrepor-se. Romano et al. (2008) destacaram dificuldades na obtenção da curva de distribuição real da sílica ativa, devido a aglomeração de partículas, obtendo diâmetros na ordem de 45 a 55 μm .

A Tabela 13 apresenta a distribuição granulométrica com o percentual passante de cada diâmetro dos materiais finos e a Figura 25 apresenta a distribuição discreta.

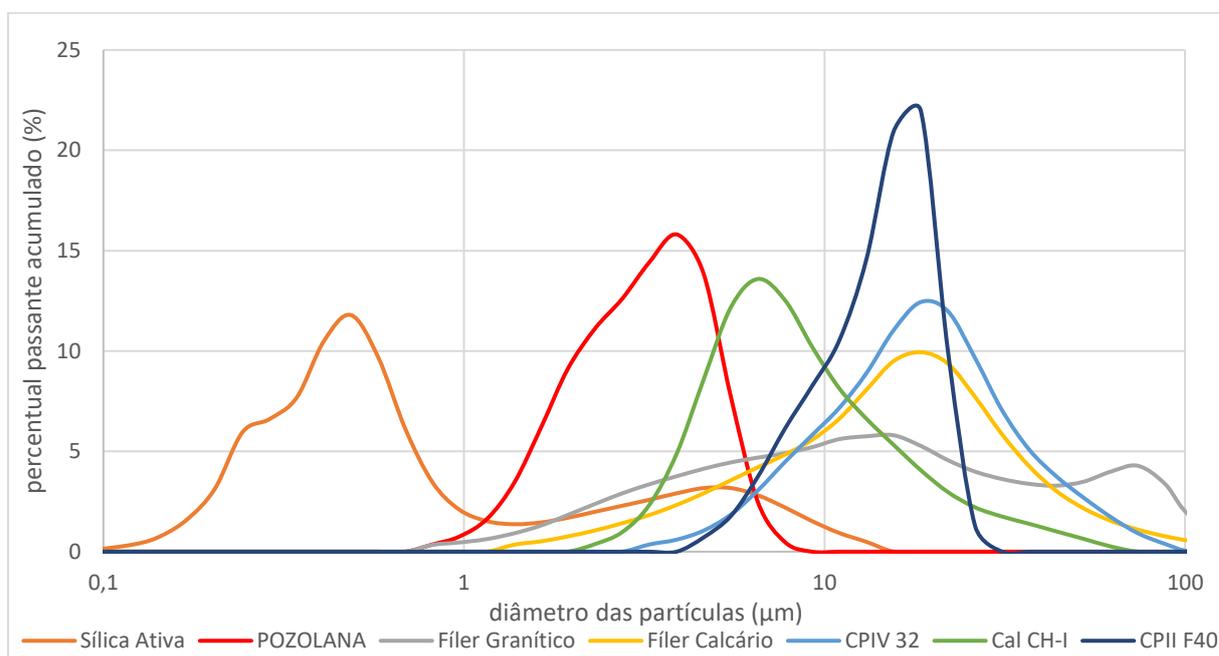
Tabela 13 – Porcentagens passante de cada diâmetro dos materiais finos

Diâmetros (µm)	Sílica Ativa	Pozolana	Fíler Granítico	Fíler Calcário	Cimento CPIV 32	Cimento CPII F40	Cal CH-I
104,7	100	100	99,41	100	100	100	100
88	100	100	97,7	99,8	100	100	100
74	100	100	94,32	98,5	99,61	100	100
62,23	100	100	90,04	97,4	98,69	100	100
52,33	100	100	86,05	95,86	96,96	100	99,74
44	100	100	82,56	93,7	94,27	100	99,1
37	100	100	79,27	90,68	90,52	100	98,09
31,11	100	100	75,89	86,43	85,44	100	96,7
26,16	100	100	72,27	80,59	78,4	100	94,95
22	100	100	68,28	72,88	68,75	98,71	92,74
18,5	100	100	63,72	63,51	56,77	88,71	89,77
15,56	100	100	58,45	53,57	44,33	66,74	85,71
13,08	100	100	52,65	44,07	33,29	45,79	80,39
11	99,51	100	46,9	36	24,39	31,2	73,77
9,25	98,58	100	41,29	29,37	17,22	20,6	65,64
7,78	97,06	100	36,08	23,79	11,4	12,39	55,44
6,54	94,86	99,53	31,17	18,95	6,92	6,24	42,92
5,5	92,05	97,07	26,48	14,74	3,86	2,49	29,33
4,62	88,88	88,36	22,03	11,18	2,01	0,71	17,15
3,89	85,71	75,5	17,9	8,27	0,96	0	8,58
3,27	82,8	59,6	14,14	5,94	0,36	0	3,7
2,75	80,21	45,26	10,78	4,11	0	0	1,36
2,31	77,92	32,65	7,87	2,69	0	0	0,38
1,94	75,93	21,53	5,49	1,63	0	0	0
1,64	74,24	12,43	3,66	0,87	0	0	0
1,38	72,78	6,2	2,35	0,35	0	0	0
1,16	71,41	2,75	1,43	0	0	0	0
0,97	69,89	1,11	0,8	0	0	0	0
0,818	67,79	0,36	0,34	0	0	0	0
0,688	64,33	0	0	0	0	0	0
0,578	58,22	0	0	0	0	0	0
0,486	48,52	0	0	0	0	0	0
0,409	36,73	0	0	0	0	0	0
0,344	26,23	0	0	0	0	0	0
0,289	18,54	0	0	0	0	0	0
0,243	11,93	0	0	0	0	0	0
0,204	5,98	0	0	0	0	0	0
0,172	2,83	0	0	0	0	0	0
0,145	1,17	0	0	0	0	0	0
0,122	0,37	0	0	0	0	0	0

Fonte: o autor (2023)

Observa-se, para o cimento tipo CPIV 32 há 56,77% e o cimento CII F40 88,71% de partículas passante avaliando o diâmetro de 18,5 μm , enquanto que para o filer calcário 63,51% e o filer granítico 63,72%. Percentuais parecidos, avaliando o cimento CPIV e os fileres nesse mesmo diâmetro, mas vale ressaltar que o filer granítico é ligeiramente mais distribuído. Campos (2019) avaliando o pó de pedra em sua pesquisa, obteve 50% de partículas passando pelo diâmetro de 10,649 μm e para o cimento 12,046 μm .

Figura 25 – Distribuição discreta dos materiais finos



Fonte: o autor (2023)

Na Tabela 13 e na Figura 25, pode-se observar que:

- Cimentos: há diferenças na distribuição das partículas dos cimentos. Sendo o cimento CII F-40 de maior finura, pois sua maior partícula está com 22 μm , enquanto o cimento CPIV 32 possui a maior partícula com 104,70 μm . No entanto, o cimento CPIV 32 está mais distribuído, possui partículas mais finas que no cimento CII F-40, podendo contribuir para a densidade de empacotamento.
- Pozolana e sílica ativa: são mais finas que os dois cimentos analisados. Ponto favorável ao empacotamento, pois irão preencher vazios não preenchidos pelos cimentos. A sílica ativa possui partículas maiores que a pozolana, no entanto apresenta distribuição com partículas mais finas, abaixo de 0,122 μm , enquanto a pozolana possui maior concentração de

partículas abaixo de 0,818 μm . A distribuição granulométrica da sílica ativa em suspensão foi considerada a mesma da sílica ativa em pó.

- Fíleres: tanto o fíler calcário como o fíler granítico possuem uma granulometria mais distribuída que os cimentos analisados. Possuindo partículas maiores, mas também partículas menores. Podendo entrar como possíveis candidatos na substituição dos cimentos, buscando melhor empacotamento e continuidade na curva de distribuição granulométrica.

Damineli (2017) utilizou diferentes tipos de fíleres como substitutos da substituição parcial do cimento Portland utilizando empacotamento de partículas, possuindo partículas menores que o cimento, corroborando com a presente pesquisa.

Portanto, para o estudo de pastas pode-se considerar que o cimento CII F-40 possui fíler em sua composição, e para a pasta, a sílica ativa e pozolana poderão dar continuidade na distribuição contribuindo para a densidade de empacotamento. No entanto, para o estudo de pastas com o CIIV 32, cimento que possui pozolana em sua composição, a sílica ativa poderá dar continuidade na densidade de empacotamento, e os fíleres contribuindo na substituição de ambos os cimentos, visto que os fíleres possuem partículas mais distribuídas em diversos diâmetros em relação aos demais materiais.

4.2 RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO DOS FINOS NAS PASTAS

Para empacotamento dos materiais finos, com resultados da caracterização dos mesmos, buscou-se o refino na proporção de cada material na pasta, promovendo maior densidade de empacotamento, utilizando a metodologia enunciada no capítulo 3.3.2.

Conforme, visto na revisão bibliográfica o IDE indica quanto que a curva proposta de traço das pastas está em relação a curva de distribuição ideal pelo modelo de empacotamento de Alfred. Quanto menor o IDE, mais próximo da curva ideal do modelo de empacotamento adotado. Avaliando a Tabela 14, pode-se verificar que as pastas referência com apenas cimento possuem maior IDE.

Na Tabela 14 apresenta a proposta de traços das pastas que foram confeccionadas, contendo a proporção dos materiais finos, percentual de água, IDE, menor e maior partícula para cada traço.

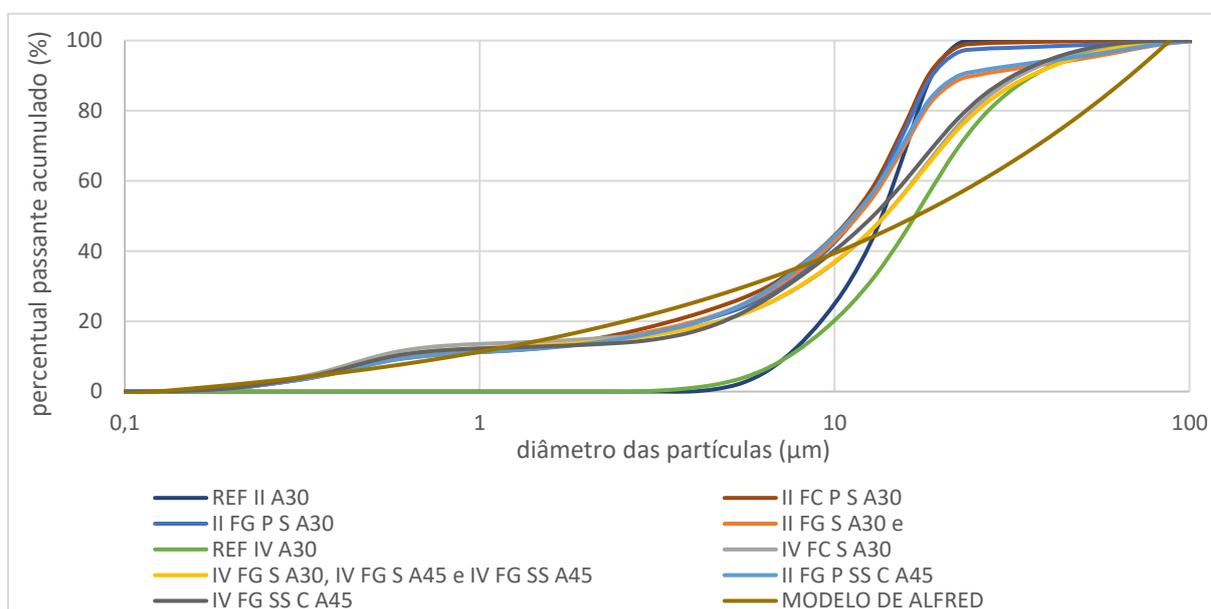
Tabela 14 – Proposta de traços para pastas

Identificação	Composição (% em volume)									IDE	MENOR PART. (µm)	MAIOR PART. (µm)
	Materiais Finos								Água			
	SA	SS	POZ	FG	FC	CPIV 32	CPII F-40	Cal CH-I				
REF II A30	-	-	-	-	-	-	100,0	-	30,0	636,4	4,620	22,0
II FC P S A30	15,9	-	9,9	-	4,2	-	70,0	-	30,0	390,9	0,122	88,0
II FG P S A30	15,9	-	5,5	8,6	-	-	70,0	-	30,0	384,4	0,122	104,7
II FG S A30	15,6	-	-	34,4	-	-	50,0	-	30,0	331,3	0,122	104,7
REF IV A30	-	-	-	-	-	100,0	-	-	30,0	507,5	3,270	74,0
IV FC S A30	19,3	-	-	-	10,7	70,0	-	-	30,0	290,2	0,122	88,0
IV FG S A30	17,5	-	-	12,5	-	70,0	-	-	30,0	274,1	0,122	104,7
II FG P SS A45	-	15,6	-	34,4	-	-	50,0	-	45,0	331,3	0,122	104,7
II FG P SS C A45	-	15,6	-	29,5	-	-	50,0	4,9	45,0	347,2	0,122	104,7
IV FG S A45	17,5	-	-	12,5	-	70,0	-	-	45,0	274,1	0,122	104,7
IV FG SS A45	-	17,5	-	12,5	-	70,0	-	-	45,0	274,1	0,122	104,7
IV FG SS C A45	-	17,5	-	0,0	-	70,0	-	12,5	45,0	307,2	0,122	72,0

Fonte: o autor (2023).

As curvas de distribuição dos traços propostos podem ser visualizadas na Figura 26.

Figura 26 – Distribuição granulométrica dos traços



Fonte: o autor (2023).

Considerando que:

- As pastas II FG S A30 e II FG P SS A45 possuem mesma proporção dos finos e mesmo IDE, mas o traço II FG P SS A45 está com teor de água de 45% e com sílica ativa em suspensão.

- As pastas IV FG S A30, IV FG S A45 e IV FG SS A45 possuem mesma proporção dos finos e mesmo IDE, mas as pastas IV FG S A45 e IV FG SS A45 com teor de água de 45%. Pastas IV FG S A30 e IV FG S A45 com sílica ativa em pó e a IV FG SS A45 com sílica ativa em suspensão.

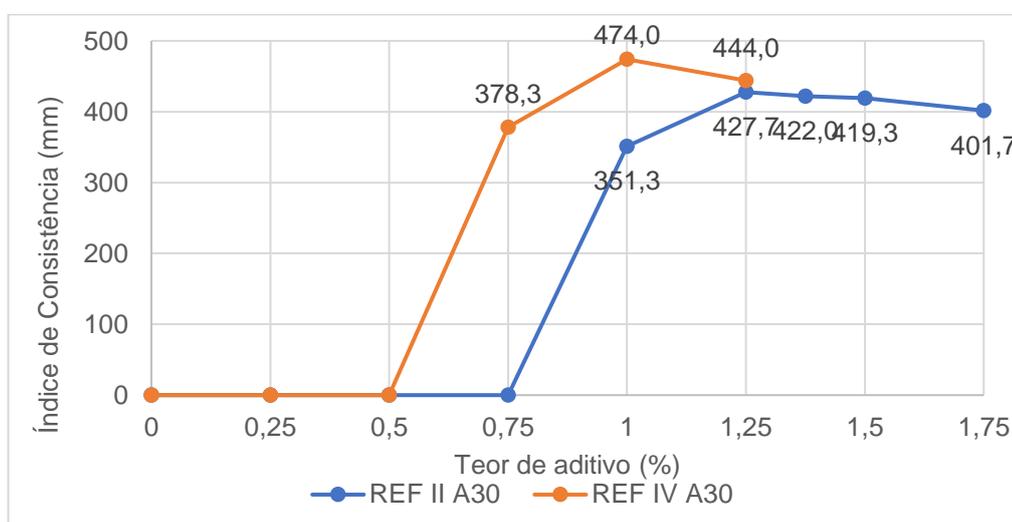
- As pastas II FG P SS C A45 e IV FG SS C A45, são tentativas de traços ajustando quimicamente os traços II FG P SS A45 e IV FG SS A45, respectivamente. Devido a sobra de sílica ativa durante a hidratação do cimento. O incremento da cal, acabou interferindo no aumento do IDE em relação aos traços II FG P SS A45 e IV FG SS A45.

Pode-se visualizar que conforme o IDE aumenta, a distância entre as curvas também aumenta em relação a curva de empacotamento de Alfred.

4.3 RESULTADOS DA SATURAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

As pastas REF II A30 e REF IV A30 são os traços referência, utilizam apenas como material fino os cimentos, CII F-40 e CIII 32, respectivamente. Esses traços foram submetidos a curva de dosagem do aditivo superplastificante com o objetivo de encontrar a dosagem ideal para cada cimento. Como método de verificação da consistência, utilizou-se o índice de consistência e o cone de Kantro. Na Figura 27, é possível visualizar a curva de consistência das pastas REF II A30 e REF IV A30, utilizando como método o índice de consistência.

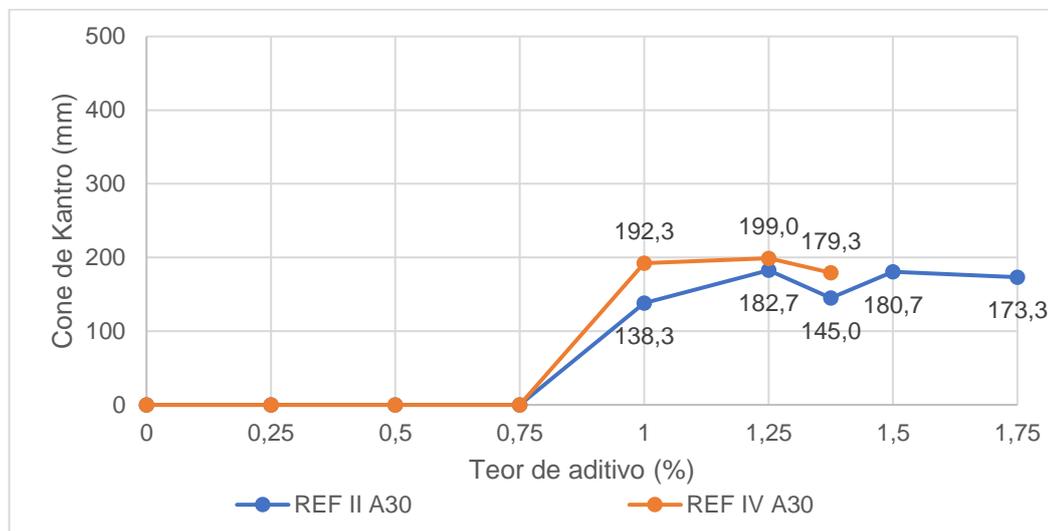
Figura 27 – Curva de dosagem do aditivo em traços referência por Índice de Consistência



Fonte: o autor (2023).

E na Figura 28, os resultados da consistência obtida das pastas REF II A30 e REF IV A30, utilizando o cone de Kantro.

Figura 28 - Curva de dosagem do aditivo em traços referência por cone de Kantro



Fonte: o autor (2023)

Pelas figuras 27 e 28 é possível observar que REF IV A30, utilizando cimento CPIV 32, obteve maior consistência a partir de 0,75% de aditivo em relação a REF II A30 que utiliza cimento CPII F-40. Para moldagem foi considerado o teor de aditivo 1,25% para REF II A30 e 1,0% para REF IV A30, porque apresentaram maior consistência pelo método do índice de consistência adaptado. De acordo com Daminieli (2013), doses além do teor determinado, considerado como teor ótimo de superplastificante, aumenta-se o custo e seria útil para dispersar as partículas e diminuir a viscosidade. Isto se deve porque o aditivo adicionado se liga à superfície das partículas atuando no afastamento destas, melhorando a fluidez (OLIVEIRA et al, 2000); no entanto quando há saturação do aditivo sobre a superfície das partículas, o excesso ficará em suspensão não contribuindo para a fluidez da mistura.

4.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS PASTAS

O presente capítulo, contemplam resultados da caracterização no estado fresco e endurecido das pastas.

4.4.1 Estado fresco das pastas

Como visto no capítulo 3.3.4, as pastas foram caracterizadas no estado fresco quanto à consistência, por dois métodos: índice de consistência e cone de Kantro.

O resultado da consistência encontrada em cada traço pode ser visualizado na Tabela 15. O Resultado médio foi obtido considerando três leituras (L1, L2 e L3) individuais.

Tabela 15 – Resultados de Consistência das pastas estudadas

TRAÇO	IC (mm)				Kantro (mm)				Teor Aditivo(%)
	L1	L2	L3	Média	L1	L2	L3	Média	
REF II A30	439	410	434	428	180	182	186	183	1,25
II FC P S A30	415	415	420	417	162	164	162	163	2,25
II FG P S A30	424	428	429	427	158	157	161	159	2,25
II FG S A30	432	443	436	437	182	182	181	182	2,25
REF IV A30	472	470	480	474	190	191	196	192	1,00
IV FC S A30	366	372	375	371	156	157	157	157	2,75
IV FG S A30	415	420	402	412	161	163	165	163	2,75
II FG P SS A45	412	408	408	409	125	135	128	129	0,50
II FG P SS C A45	368	356	366	363	137	133	132	134	0,50
IV FG S A45	435	440	445	440	155	150	155	153	0,50
IV FG SS A45	357	352	355	355	110	105	105	107	0,50
IV FG SS C A45	328	340	330	333	103	104	105	104	0,50

Fonte: o autor (2023).

Nas pastas com teor de água de 30%, demandou mais aditivo e tempo para abertura da fluidez, em relação às pastas com 45% de água. As pastas com substituição do cimento por materiais finos também demandaram mais aditivo.

De acordo com Lopes (2019) que obteve em sua pesquisa concretos com menor fluidez ao utilizar empacotamento de partículas. Comportamento que pode ser explicado devido a sílica ativa possuir uma área superficial maior que os demais materiais finos e o efeito do aditivo superplastificante é influenciado, pois o teor do aditivo pode não ter sido suficiente para envolver as partículas de sílica ativa. Esse comportamento favorece para a formação de aglomerados, provocando afastamento das partículas ao invés do efeito fíler (HERMANN et al., 2016)

Entre as pastas com teor de água de 45%, necessitaram menos aditivo para dispersão, em relação as pastas com 30% de água. No entanto, obtiveram menor consistência por ambos os métodos.

Avaliando as pastas com ajuste “químico” com adição da cal, pastas II FG P SS C A45 e IV FG SS C A45, em relação as pastas II FG P SS A45 e IV FG SS A45, observa-se que apresentam menor consistência pelo método do índice de consistência, esse aspecto não foi notado pelo operador do ensaio, até pelo contrário, as pastas II FG P SS C A45 e IV FG SS C A45 estavam mais trabalháveis. O mesmo ocorre quando são comparadas as pastas IV FG S A45 e IV FG SS A45 que possuem como diferença a sílica ativa em pó e a em suspensão. Visualmente, a pasta IV FG SS A45 com sílica ativa em suspensão apresentava mais trabalhabilidade. Esse comportamento pode ser explicado nas pastas com a sílica em suspensão não houve concentração de sólidos. Conforme Rebmann (2016), a concentração de sólidos amplia o contato entre as partículas, condicionando tensões maiores para manter o fluxo nos materiais cimentícios, com aumento da viscosidade, não permitindo, a dispersão da mistura.

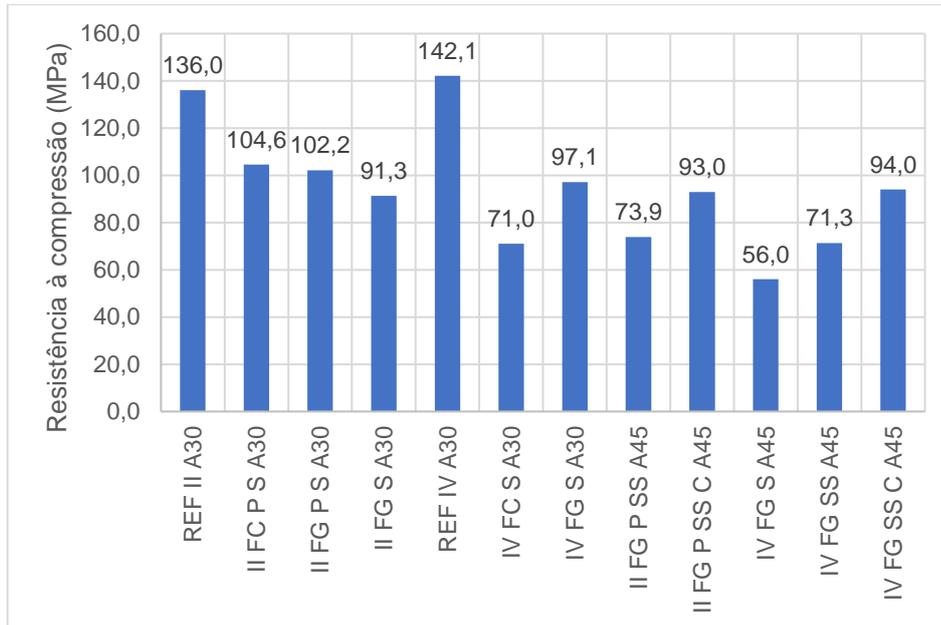
Entretanto, Damineli (2017) obteve diferentes comportamentos quanto aos parâmetros reológicos de trabalhabilidade, alguns casos avaliando mesmo teor de água, obteve misturas com empacotamento com teores de aditivo menor e maior fluidez em relação a mistura referência. Mas em misturas com menor teor de água e maior substituição de cimento obteve menor fluidez. Vale ressaltar que a presente pesquisa, utilizou além de fíleres a sílica ativa que é um material de extrema finura e o material pode ter potencializado o efeito na redução da fluidez.

4.4.2 Estado endurecido das pastas

As pastas foram caracterizadas quanto à resistência à compressão, com corpos-de-prova mantidos em 2 tipos de cura. Após, o rompimento dos corpos-de-prova, foi realizado um levantamento fotográfico da parte interna dos mesmos, a fim de verificar a dispersão dos materiais constituintes da pasta em questão. Ainda, no momento do rompimento, foi retirada uma pequena amostra da parte interna do corpo-de-prova de cada traço para realização do ensaio de análise térmica.

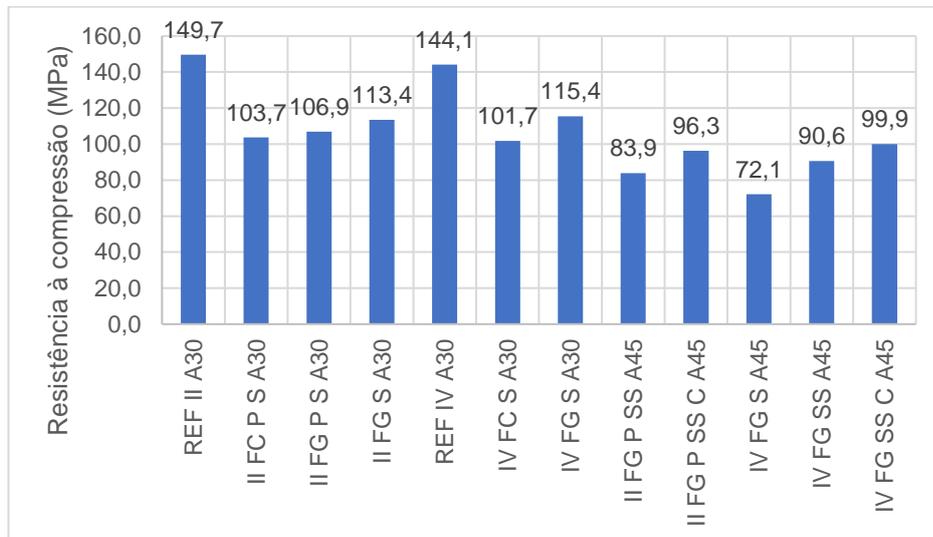
A Figura 29 e 30 apresentam os resultados de resistência à compressão potencial para cada traço aos 28 dias em cura úmida em temperatura 23 ± 2 °C e cura úmida em temperatura ~ 60 °C, respectivamente.

Figura 29 – Resistência à compressão aos 28 dias com cura úmida em $23\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fonte: o autor (2023).

Figura 30 - Resistência à compressão aos 28 dias com cura úmida em $\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

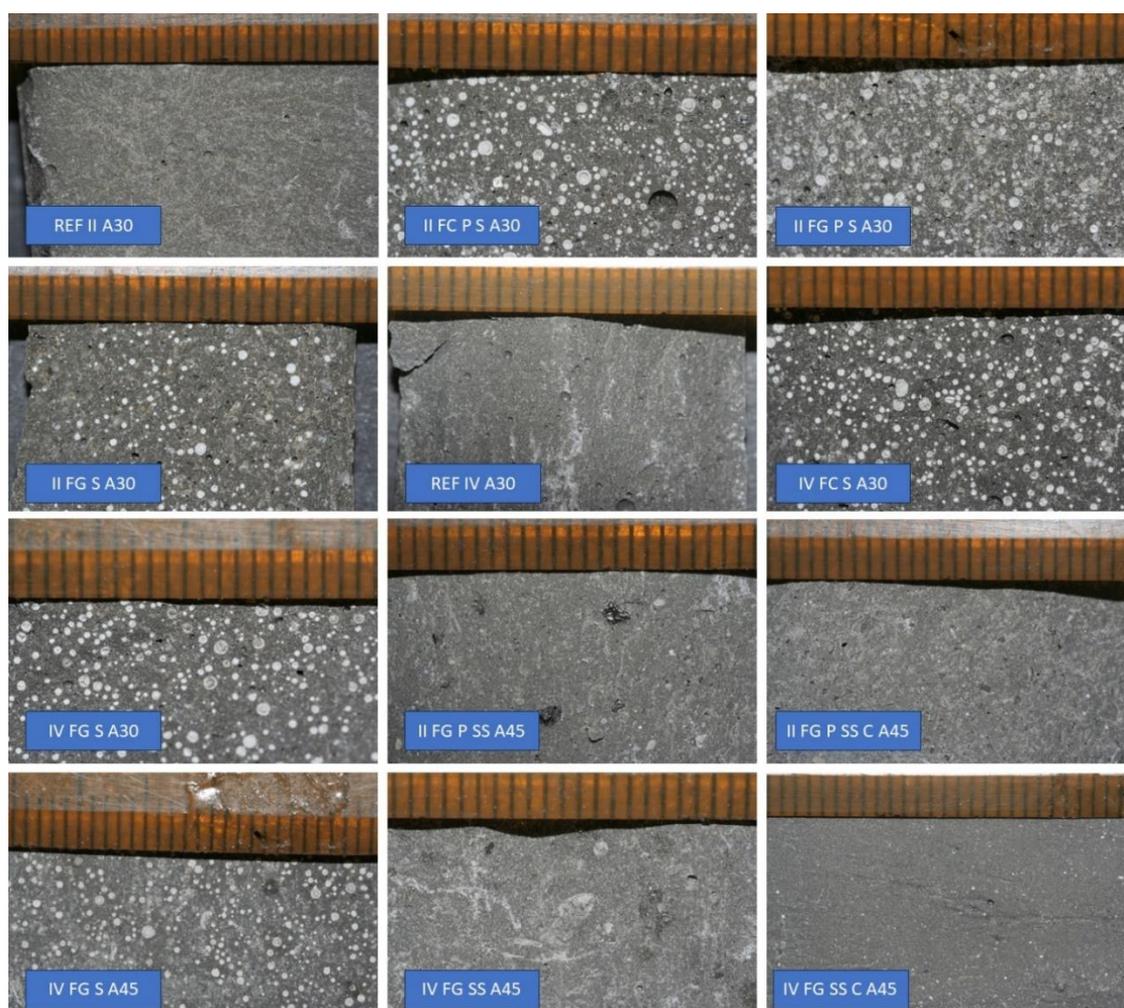


Fonte: o autor (2023).

Apesar das pastas referência obterem maiores resistências à compressão, há um comportamento interessante entre as pastas II FC P S A30, II FG P S A30 e II FG S A30, pois são pastas com mesmo tipo de cimento e teor de água, e conforme o IDE diminui, a resistência à compressão aumenta em 28 dias com cura úmida em temperatura $\sim 60^{\circ}\text{C}$. O mesmo ocorre quando avaliamos as pastas IV FC S A30 e IV FG S A30, sendo a pasta IV FG S A30 com resultado superior na resistência à compressão, e tem menor IDE em relação a pasta IV FC S A30.

Avaliando o grupo de pastas com 30% de água, as pastas referências REF II A30 e REF IV A30, mostram resultados superiores na resistência à compressão quando são comparadas com as demais. Como hipótese, as pastas com empacotamento podem ter tido influência na falta de dispersão da sílica ativa em pó. E esse comportamento pode ser explicado, avaliando os resultados das pastas IV FG S A45 e IV FG SS A45, pastas que possuem mesmos parâmetros de dosagem, alterando apenas a sílica ativa em pó pela sílica ativa em suspensão, nos dois tipos de cura, a pasta IV FG SS A45 obteve resistência à compressão superior em 27,3% na cura úmida em 23 ± 2 °C e 25,6% na cura úmida em ~ 60 °C. A dispersão da sílica ativa em pó pode ser visualizada no levantamento. Na Figura 31 segue o levantamento fotográfico realizado na parte interna dos corpos-de-prova, após a caracterização da resistência à compressão.

Figura 31 – Levantamento fotográfico na parte interna dos corpos-de-prova selecionados



Fonte: o autor (2023).

Observando as imagens da Figura 31 é possível verificar que nos traços em que foi utilizado a sílica ativa em pó, há aglomerados de até aproximadamente 1mm. Sendo essa medida acima da maior partícula encontrada no ensaio de distribuição granulométrica deste material que é 11 μ m. Isso indica a falta de dispersão da sílica ativa em pó na mistura e pode explicar que as pastas em que utilizaram o material obtiveram menor resistência mecânica devido a esse comportamento.

Esse comportamento também pode ser facilmente explicado avaliando as imagens das pastas IV FG S A45 e IV FG SS A45, pois são traços com a mesma proporção de finos, teor de água e teor de aditivo, alterando apenas a sílica ativa em pó por sílica ativa em suspensão. Conseqüentemente, a pasta IV FG SS A45 não há indícios de aglomeração das partículas e a resistência mecânica foi superior a pasta IV FG S A45.

Em corroboração a pesquisa de Campos (2019) as pastas com empacotamento e substituição parcial de cimento Portland obtiveram menores patamares de resistência, comportamento que é explicado pelo material utilizado no empacotamento de partícula das pastas que é o filer, um material inerte. Damireli (2017) também obteve patamares de resistência à compressão menores em suas misturas cimentícias utilizando empacotamento de partículas, pois utilizou substituições relevantes de cimento Portland por fileres, obtendo resistências próxima, mas com consumo de cimento quase na metade da quantidade da mistura referência. Então, diante do exposto, vale ressaltar que para uma melhor análise dos resultados é necessário avaliar parâmetros da mistura em função da eficiência dos ligantes em kg/MPa.

4.5 EFICIÊNCIA TÉCNICA DOS LIGANTES

Para avaliar a contribuição da técnica de empacotamento de partículas pelo modelo de Alfred, associado ao IDE, na redução do uso do cimento nas pastas do presente trabalho, foi utilizado o indicador kg/MPa, explicado na revisão bibliográfica capítulo 2.3.1, sendo esse calculado entre a razão do consumo dos ligantes e o desempenho mecânico da pasta, considerando a resistência à compressão potencial. Quanto maior for o indicador, maior será o consumo de cimento, sendo uma mistura com menor eco-eficiência (DAMIRELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

Os quantitativos dos traços das pastas realizadas em laboratório foram desdobrados em m³, facilitando a visualização do consumo de cimento em m³, possibilitando o cálculo do indicador de eficiência técnica que podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados de consumo de cimento e água; consistência; resistência à compressão; IDE e Eficiência técnica aos 28 dias em diferentes tipos de cura

Identificação	Parâmetros de dosagem				Parâmetros Reológicos		Resistência à Compressão		IDE	Eficiência técnica Rc 28 (kg/MPa)	Eficiência técnica Rc 28 A (kg/MPa)
	C (kg/m ³)	Água (l/m ³)	a/agl (massa)	a/c (massa)	IC (mm)	Kantro (mm)	Rc 28 (MPa)	Rc 28 A (MPa)			
REF II A30	2068	300	0,145	0,145	428	183	136,0	149,7	636,4	15,2	13,8
II FC P S A30	1448	300	0,156	0,207	417	163	104,6	103,7	390,9	13,8	14,0
II FG P S A30	1448	300	0,155	0,207	427	159	102,2	106,9	384,4	14,2	13,5
II FG S A30	1034	300	0,157	0,290	437	182	91,3	113,4	331,3	11,3	9,1
REF IV A30	1914	300	0,157	0,157	474	192	142,1	144,1	507,5	13,5	13,3
IV FC S A30	1339	300	0,163	0,224	371	157	71,0	101,7	290,2	18,9	13,2
IV FG S A30	1339	300	0,163	0,224	412	163	97,1	115,4	274,1	13,8	11,6
II FG P SS A45	812	450	0,300	0,554	409	129	73,9	83,9	331,3	11,0	9,7
II FG P SS C A45	812	450	0,302	0,554	363	134	93,0	96,3	347,2	8,7	8,4
IV FG S A45	1052	450	0,311	0,428	440	153	56,0	72,1	274,1	18,8	14,6
IV FG SS A45	1052	450	0,312	0,428	355	107	71,3	90,6	274,1	14,8	11,6
IV FG SS C A45	1052	450	0,318	0,428	333	104	94,0	99,9	307,2	11,2	10,5

Fonte: o autor (2023).

Avaliando a eficiência técnica das pastas com cimento CII F-40, percebe-se uma redução de 27,6% na cura normal e 29,7% na cura em 60°C do indicador comparando a pasta II FG P SS A45 em relação a pasta REF II A30. No caso da pasta II FG P SS C A45, com incorporação de cal hidratada, calculada para reagir com a sílica restante das adições, essa redução chegou a 42,7% e 39,1%, para a cura ambiente e para a cura térmica, respectivamente.

Na avaliação dos traços das pastas com o cimento CIV 32, o indicador de eficiência técnica aumenta em todos os traços aos 28 dias com cura normal. No entanto, quando é avaliado o indicador da eficiência com cura úmida aquecida em 60°C, há ganhos nas pastas IV FG S A30 e IV FG SS A45, com redução do indicador de eficiência técnica em torno de 12,8%. Esse comportamento pode ser considerado normal, por se tratar de um cimento composto e de reação lenta. E a cura em 60°C poderia simular, por exemplo, o rompimento dos corpos-de-prova em idade mais avançada, pelo fato da temperatura acelerar as reações pozolânicas. No caso da pasta IV FG SS C A45, com incorporação de cal hidratada, essa redução do consumo de cimento foi de 17% e 21%, para a cura ambiente e para a cura térmica, em relação à pasta de referência REF IV A30.

Interessante avaliação, pode ser a comparação entre as pastas II FC P S A30, II FG P S A30 e II FG S A30 com o cimento CII F-40 e comparação entre as pastas IV FC S A30 e IV FG S A30, com CIIV 32. Em ambos os grupos o IDE diminui juntamente com o indicador da eficiência técnica em cura aquecida.

O teor de pasta ideal em concretos, como visto na revisão bibliográfica, pode variar de acordo com os agregados utilizados. Baseando-se no renomado método de dosagem de Mehta&Aïtcin, ao decorrer das etapas, é indicado o teor de 0,35m³, o que representa 35% do volume. Ou seja, para estimar a eficiência técnica das pastas estudadas em concretos, sugere-se uma multiplicação direta do indicador de eficiência técnica pelo volume de pasta. Na Tabela 17, resultados da estimativa da eficiência técnica em concretos.

Tabela 17 – Eficiência técnica estimada em concretos

Identificação	IDE	% Pasta ideal	Eficiência técnica Rc 28 (kg/MPa)	Estimativa Eficiência técnica no concreto aos 28 dias (kg/MPa)	Eficiência técnica Rc 28 A (kg/MPa)	% Pasta ideal	Estimativa Eficiência técnica no concreto aos 28 dias cura 60°C(kg/MPa)
REF II A30	636,4	35%	15,2	5,3	13,8	35%	4,8
II FC P S A30	390,9	35%	13,8	4,8	14,0	35%	4,9
II FG P S A30	384,4	35%	14,2	5,0	13,5	35%	4,7
II FG S A30	331,3	35%	11,3	4,0	9,1	35%	3,2
REF IV A30	507,5	35%	13,5	4,7	13,3	35%	4,6
IV FC S A30	290,2	35%	18,9	6,6	13,2	35%	4,6
IV FG S A30	274,1	35%	13,8	4,8	11,6	35%	4,1
II FG P SS A45	331,3	35%	11,0	3,8	9,7	35%	3,4
II FG P SS C A45	347,2	35%	8,7	3,1	8,4	35%	3,0
IV FG S A45	274,1	35%	18,8	6,6	14,6	35%	5,1
IV FG SS A45	274,1	35%	14,8	5,2	11,6	35%	4,1
IV FG SS C A45	307,2	35%	11,2	3,9	10,5	35%	3,7

Fonte: o autor (2023).

Em conjunto com o presente trabalho, Müller (2023) realizou estudos experimentais de concretos alterando o empacotamento dos agregados, e utilizando a pasta IV FG S A30, obteve como melhor resultado a eficiência técnica aos 28 dias em cura normal de 3,8 kg/MPa, sendo o indicador próximo da estimativa com a pasta IV FG S A30.

Relembrando, de acordo com Daminieli (2013), dentre as estratégias para reduzir a emissão de CO₂ na construção civil, estão:

- Eficiência na produção do cimento;
- Eficiência de consumo do cimento na produção de concretos e argamassas, sendo esse item de abordagem na pesquisa;
- E redução do consumo de concreto em obras.

Considerando que a produção de concreto estaria como segunda estratégia, posterior a produção de cimento, entende-se que maiores teores de adições estarão presentes nos cimentos.

Por isso, a presente pesquisa buscou desenvolver traços de pastas com os cimentos CII F-40 e CII V 32. Isso, pode abrir uma oportunidade de estimar e avaliar a quantidade de clínquer presente para cada traço, pois a quantidade de clínquer dos cimentos foi estimada e está apresentado no Apêndice B.

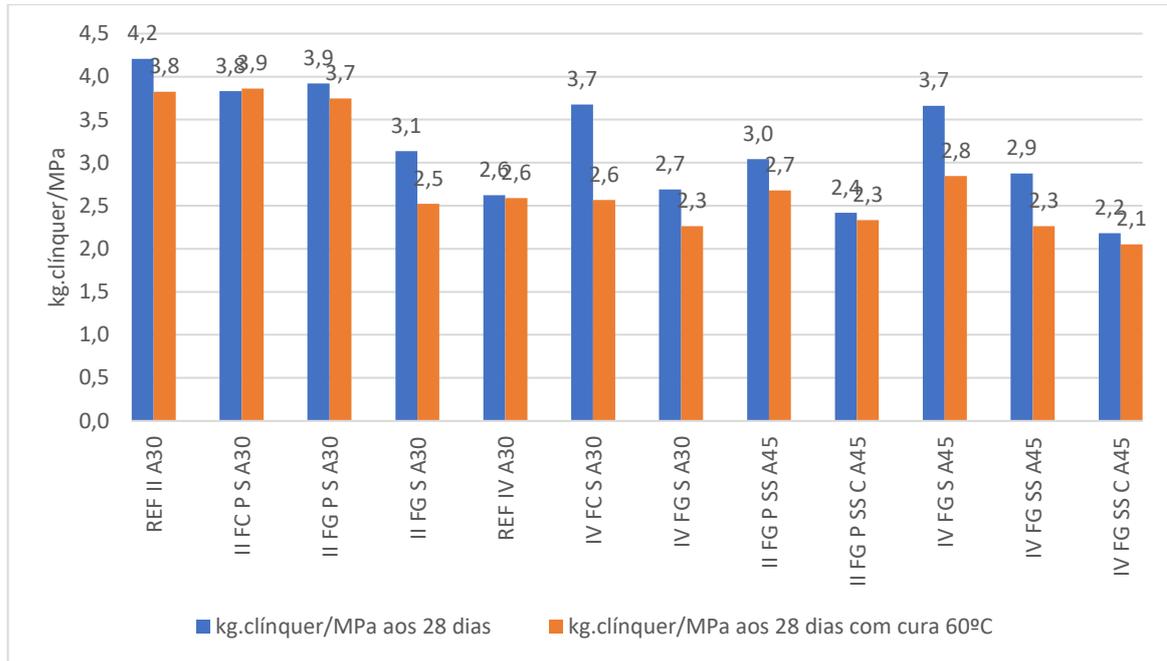
A Tabela 18 e a Figura 32 apresentam a quantidade estimada de clínquer em cada traço em kg de clínquer por MPa desenvolvido, realizando a multiplicação direta entre o percentual de pasta, percentual de clínquer para cada cimento e a eficiência técnica das pastas.

Tabela 18 – Quantidade de clínquer estimada em concretos

Identificação	Pasta ideal (%)	Clínquer (%)	Eficiência técnica Rc 28 (kg/MPa)	kg.clínquer/MPa aos 28 dias	Eficiência técnica Rc 28 A (kg/MPa)	kg.clínquer/MPa aos 28 dias com cura 60°C
REF II A30	35%	79,1%	15,2	4,2	13,8	3,8
II FC P S A30	35%	79,1%	13,8	3,8	14,0	3,9
II FG P S A30	35%	79,1%	14,2	3,9	13,5	3,7
II FG S A30	35%	79,1%	11,3	3,1	9,1	2,5
REF IV A30	35%	55,7%	13,5	2,6	13,3	2,6
IV FC S A30	35%	55,7%	18,9	3,7	13,2	2,6
IV FG S A30	35%	55,7%	13,8	2,7	11,6	2,3
II FG P SS A45	35%	79,1%	11,0	3,0	9,7	2,7
II FG P SS C A45	35%	79,1%	8,7	2,4	8,4	2,3
IV FG S A45	35%	55,7%	18,8	3,7	14,6	2,8
IV FG SS A45	35%	55,7%	14,8	2,9	11,6	2,3
IV FG SS C A45	35%	55,7%	11,2	2,2	10,5	2,1

Fonte: o autor (2023)

Figura 32 – Quantidade de clínquer por MPa



Fonte: o autor (2023).

Nesse caso, avaliando o indicador da eficiência sobre o clínquer, as misturas com cimento CPIV 32, ficam interessantes. Comparando apenas as pastas REF II A30 e REF IV A30, a pasta REF IV A30 apresenta uma redução de 31,5% e está muito relacionado com o teor de clínquer do cimento CPIV. Avaliando as pastas com empacotamento de partículas, as pastas IV FG S A30 e IV FG SS A45 apresentam uma redução de 39,5% de kg de clínquer por MPa em relação a REF II A30. E uma redução de 11,5% em relação a pasta REF IV A30.

5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo estudar o aumento da eficiência dos ligantes em pastas através do empacotamento de partículas, pelo método de Alfred, em microescala, com substituição parcial de cimento Portland. Grande parte das pesquisas envolvendo modelos de empacotamento estão voltadas para materiais cerâmicos, com honrosas exceções, o que abre oportunidade para ampliar as pesquisas em materiais cimentícios. Como visto na revisão bibliográfica, a produção do cimento é uma atividade de grande impacto ambiental com grandes emissões de gases poluentes.

Nesse contexto, o empacotamento de partículas em conjunto com o IDE é aplicável para os diversos tipos de materiais existentes, reduzindo o número de experimentos realizados em laboratório e contribuindo na elaboração das dosagens pela sua fácil aplicação, pois já direciona a proporção ideal conforme cada material em uma mistura, reduzindo a quantidade de tentativas e erros.

A utilização do empacotamento de partículas de Alfred em conjunto com o IDE e, ainda, fazendo balanços químicos resultantes de cálculos estequiométricos, mostrou-se eficaz para obter pastas com boa trabalhabilidade, com elevada resistência à compressão e – principalmente – melhor eficiência técnica, ponto importantíssimo quanto à sustentabilidade. Além disso, os fileres utilizados são resíduos de pedreiras, contribuindo na gestão de resíduos. Reforçando que fileres são financeiramente mais econômicos que cimentos.

As considerações do presente trabalho orientam para que se tenham opções de misturas de pastas, levando em consideração o empacotamento de partículas do modelo de Alfred, otimização química da mistura, sendo favorável quando a durabilidade e possivelmente aplicáveis para dosagem de concretos, sendo que pode ser concluído que:

- a) No estado fresco, as pastas com menor IDE obtiveram menor dispersão pelos ensaios de caracterização da consistência, fato está ligado ao aumento da área superficial das misturas otimizadas;
- b) No estado endurecido, as pastas REF II A30 e REF IV A30, possuindo apenas cimento como material fino, obtiveram maior resistência à compressão, e pode estar relacionado a falta de dispersão das partículas mais finas nas pastas com sílica ativa em pó. Esse comportamento, pode ser provado avaliando o levantamento fotográfico da parte interna dos corpos de prova que mostra que as pastas com sílica ativa em pó possuem aglomerados de até ~1mm, sendo esse diâmetro muito superior ao diâmetro característico do material. O mesmo comportamento não ocorre em pastas que utilizaram a sílica ativa em suspensão, e essas pastas obtiveram maior resistência à compressão.
- c) O método para avaliar como variável de resposta a melhor proporção dos materiais na mistura, devido a distribuição granulométrica, se mostrou mais eficaz quando avaliado em função da eficiência dos ligantes.
- d) Avaliando o IDE, conclui-se que o uso do índice pode ser uma boa alternativa para proporcionar as pastas. Avaliando as pastas II FC P S A30, II FG P S A30 e II FG S A30 que possuem o cimento CPII F-40, conforme o IDE diminui, a eficiência técnica melhora, indicando um melhor empacotamento da mistura. O mesmo comportamento ocorre avaliando as pastas IV FC S A30 e IV FG S A30.
- e) As pastas II FG P SS C A45 e II FG P SS C A45 com otimização no empacotamento de partículas e com balanço químico por cálculos estequiométricos obtiveram maior resistência à compressão entre as pastas com teor de água de 45%, e obtiveram melhor eficiência técnica em consumo de cimento quando avaliando por tipo de cimento, independente do teor de água. Nesse caso, as pastas obtiveram IDE levemente maior em relação as pastas base, II FG P SS A45 e II FG P SS C A45 respectivamente. Isso se deve a distribuição granulométrica da cal.
- f) O índice de kg de clínquer por MPa estimado para concreto, se destacam pastas que utilizaram na composição o cimento CPIV 32, pois esse cimento já possui grandes quantidades de adições, possibilitando viabilizar misturas de concreto com 2,2 kg de clínquer por MPa aos 28 dias. Vale ressaltar, que

utilizando o empacotamento de partículas e balanço químico foi possível reduzir em 42,5% o índice para pastas com o cimento CII F-40 e 16,9% para pastas com cimento CII 32.

De maneira geral, os objetivos propostos na pesquisa foram atingidos, e a eficiência dos ligantes nas pastas foi consideravelmente melhorada utilizando o empacotamento de partículas pelo modelo de Alfred em conjunto com IDE e balanço químico.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos e das discussões realizadas, observa-se que existem oportunidades para aprofundar as pesquisas quanto ao assunto. Podem ser sugeridos como trabalhos futuros, por exemplo:

- a) Continuidade do estudo utilizando as pastas com melhor eficiência técnica em concretos com diferentes proporções dos agregados;
- b) Avaliar as possíveis pastas com empacotamento e balanço químico no estado endurecido, podendo avaliar os compostos hidratados se formaram de acordo com os cálculos estequiométricos;
- c) Avaliar os possíveis concretos empacotados em termos de durabilidade;
- d) Buscar aplicar o método de empacotamento em teores diferentes de água, buscando além de empacotamento de partículas, balanço químico e água combinada ideal;
- e) Aplicar o método de empacotamento de partículas objetivando misturas de concreto com classe de resistência menores que 40 MPa, por serem mais usuais em diversos mercados;
- f) E com muito respeito, adaptar ou até mesmo revisar o renomado método de dosagem de Mehta&Aïtcin (1990), ajustando a “Etapa 3: Fração de Volume dos Componentes da Pasta de Cimento”, realizando o balanço químico dos materiais e utilizando o método de empacotamento de partículas associado ao IDE para definição da pasta, como visto no presente trabalho. E na “Etapa 4: Estimativa de conteúdo do Agregado”, utilizar o modelo de empacotamento de Alfred para definição da proporção dos agregados.

REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, P. J.; JOHANSEN, V. A guide to determining the optimal gradation of concrete aggregates. **Contract**, v. 100, p. 206, 1993.
- ARIÖZ, Ö. et al. Web-based quality control of ready mixed concrete. **Building and environment**, v. 42, n. 3, p. 1465–1470, 2007.
- ARNDT, J. A.; DE SOUZA, J.; BIANCHINI, M. **Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonsálves, RS-2007. **Anais...2007**
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**. Rio de Janeiro: 1996a
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 56 - Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar, pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: 1996b
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46 - Agregados - Determinação do Material Fino que passa através da Peneira 75 micrometros por lavagem**. Rio de Janeiro: 2001
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: 2003
- 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. **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: 2009a
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53 - Agregado Graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: 2009b
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681-1 - Calda de Cimentos para injeção - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: 2013
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, Brasil: 2014a
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro: 2014b
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova**. 2015
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697 - Cimento**

Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1 - ÁGUA PARA AMASSAMENTO DO CONCRETO - PARTE 1: REQUISITOS.** Rio de Janeiro: 2019a

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1 -ADITIVOS QUÍMICOS PARA CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND - PARTE 1: REQUISITOS.** Rio de Janeiro: 2019b

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão de Corpos de Prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: 2019c

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802 - Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro: 2019d

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e índice de vazios.** Rio de Janeiro: 2021a

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973 - Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 um por lavagem.** Rio de Janeiro: 2021b

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6473: cal virgem e cal hidratada-Análise química.** 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland-Requisitos.** 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland-Requisitos.** 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos-Requisitos.** 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos.** 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto-Parte 1: Requisitos.** 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland-Requisitos.** 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos-Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos-Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 43: Cimento Portland-Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland-Requisitos.** 2018..

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

BIANCHINI, M. Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto. 2010.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland.** [s.l.] UFRGS, 2000.

CAMPOS, H. **DOSAGEM DE CONCRETO SUSTENTÁVEL E DE ALTA RESISTÊNCIA, OTIMIZADA POR MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR PÓ DE PEDRA E SÍLICA ATIVA.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2019.

CESAR, P. et al. Efficiency of Portland-pozzolana cements : Water demand , chemical reactivity and environmental impact. v. 247, 2020.

CHANGE, Intergovernmental Panel On Climate. Ippc. **Climate change**, 2014.

CHRIST, R. **PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC).** [s.l.] UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS, 2019.

CIMENTO, S. N. D. I. DO. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.** SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Anais...2020** Disponível em: <resou>

DAMINELI, B. L. et al. CIB 2013 World Congress Mitigating CO2 emissions from the cement industry: potential of feasibility versus the market challenge. **Brisbaine, Australia**, 2013.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.** Universidade de São Paulo, , 2013.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e**

Materials, v. 10, n. 5, p. 998–1024, 2017.

DE GRAZIA, M. T. et al. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524–536, 2019.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. [s.l.] CRC Press, 1999.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and concrete research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.

DE LIMA RAMIRES, J. C. O processo de verticalização das cidades brasileiras. **Boletim de Geografia**, v. 16, n. 1, p. 97–106, 1998.

DEWAR, J. **Computer modelling of concrete mixtures**. [s.l.] CRC Press, 1999.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle-packing phenomena and their application in materials processing. In: **Mrs Bulletin**. 22. ed. [s.l.: s.n.]. p. 19–23.

FENNIS, S. Design of ecological concrete by particle packing optimization. 2011.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. The laws of proportioning concrete. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 59, n. 2, p. 67–143, 1907.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing. VI: Applications of particle size distribution concepts. **Interceram**, v. 43, n. 5, p. 350-353, 1994.

GRAZIA, M. T.; SANCHEZ, L. F. M.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524–536, 2019.

GOES, C. M. W. DE et al. Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho. **Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto**, n. November, p. 16, 2020.

GOLTERMANN, P.; JOHANSEN, V.; PALBØL, L. Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. **Materials Journal**, v. 94, n. 5, p. 435–443, 1997.

HALES, T. C. A proof of the Kepler conjecture. **Annals of Mathematics**, v. 162, n. 3, p. 1065–1185, 2005.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: [s.n.].

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1246–1259, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap-Low-carbon Transition in the Cement Industry**. World Business Council for Sustainable Development, France, 66pg, 2018. Disponível em.: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>. Acesso em: 23 de março de 2023.

JONES, M. R.; ZHENG, Li; NEWLANDS, M. D. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio. **Materials and structures**, v. 35, p. 301-309, 2002.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M.-A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete composites**, v. 20, n. 2–3, p. 87–101, 1998.

KJELLEN, K. O.; WALLEVIK, O. H.; FJÄLLBERG, L. Microstructure and microchemistry of the paste—aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete. **Advances in Cement Research**, v. 10, n. 1, p. 33-40, 1998.

KJELLEN, K. O.; ATLISSI, E. H. Pore structure of cement silica fume systems Presence of hollow-shell pores. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 1, p. 133–142, 1999.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2019.

MACIEL, M. H. et al. Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 245–259, 2018.

MANGULKAR, M.; JAMKAR, S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **International Journal Of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 5, p. 143–148, 2013.

MEHTA, P. K. Concrete. Structure, properties and materials. 1986.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto. **Microestrutura, propriedades e materiais**, v. 3, 2014.

MENDONÇA, F. R. F. DE. **Proportion and Evaluation of Ultra-High Performance Concrete Using Local Materials**. [s.l.] University of Nebraska-Lincoln, 2019.

MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração. 1993.

MOOSBERG-BUSTNES, H. **Fine particulate by-products from mineral and metallurgical industries as filler in cement-based materials**Luleå tekniska universitet, , 2003.

NATARAJA, M. C.; DAS, L. Concrete mix proportioning as per IS 10262: 2009– Comparison with IS 10262: 1982 and ACI 211.1-91. **The Indian Concrete Journal**, p. 64–70, 2010.

- NEVILLE, A.; AITCIN, P.-C. High performance concrete—An overview. **Materials and structures**, v. 31, n. 2, p. 111–117, 1998.
- NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. [s.l.] Longman London, 1995. v. 4
- OLIVEIRA, C. O. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria (rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.
- ORTEGA, Fernando dos Santos et al. Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica**, v. 43, p. 185-191, 1997.
- PAULON, Vladimir Antonio; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. 1991.
- RAGALWAR, Ketan et al. On enhancing the mechanical behavior of ultra-high performance concrete through multi-scale fiber reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103422, 2020.
- REED, J. S. Principles of ceramics processing. 1995.
- SANTHANAM, M.; KUMAR, S. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning : A review. **The Indian Concrete Journal**, n. September 2003, p. 17, 2003.
- SCHRÖFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 11, p. 1401–1408, 2012.
- SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Characterization of interfacial microstructure. **Interfacial transition zone in concrete**, v. 2, n. 1, p. 3–18, 1996.
- SHAKHMENKO, G.; BIRSH, J. **Concrete mix design and optimization**. Proceedings of the 2nd International Symposium in Civil Engineering. **Anais...**1998
- SOBOLEV, Konstantin; GUTIÉRREZ, Miguel Ferrada. How nanotechnology can change the concrete world: Part two of a two-part series. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 84, n. 11, p. 16-19, 2005.
- STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M. Linear packing density model of grain mixtures. **Powder technology**, v. 48, n. 1, p. 1–12, 1986.
- TUTIKIAN, B.; DAL MOLIN, D. **Concreto Autoadensável**. [s.l.: s.n.].
- TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, n. 1927, p. 439–471, 2011.
- VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete - Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. [s.l.: s.n.].
- WILLIAN D. CALLISTER, J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência dos materiais - Callister - 8ª Ed - Livro - Português.pdf**. [s.l.: s.n.].

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: Part 1- measurement using a wet packing method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 4, p. 689–701, 2008.

YAVUZ, R.; KÜÇÜKBAYRAK, S. An investigation of some factors affecting the dispersant adsorption of lignite. **Powder technology**, v. 119, n. 2–3, p. 89–94, 2001.

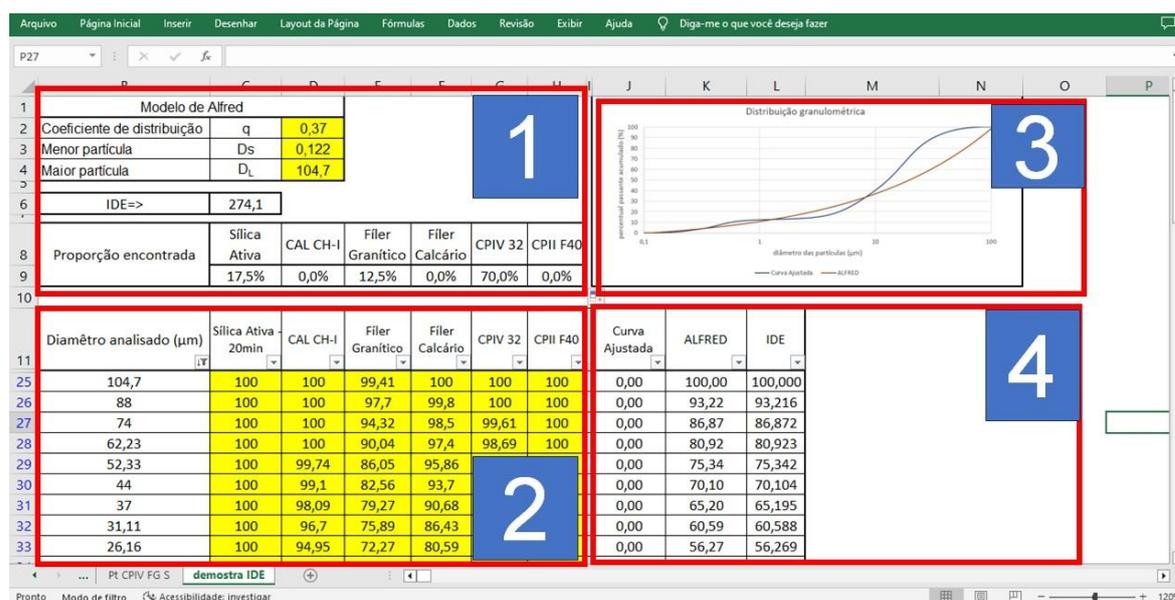
YOSHIOKA, K. et al. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. **Cement and concrete research**, v. 32, n. 10, p. 1507–1513, 2002.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 158–171, 2014.

APÊNDICE A – SEQUÊNCIA PARA AJUSTE DA PROPORÇÃO DOS MATERIAIS FINOS UTILIZANDO IDE

Para o ajuste da proporção dos materiais finos de cada pasta utilizando o modelo de empacotamento de partículas pelo método de Alfred e associado ao Índice de Desvio de Empacotamento (IDE), neste trabalho utilizou-se a ferramenta *solver* do *software* excel. Para isso, foi desenvolvido uma planilha com dados necessários dos materiais finos utilizados, como distribuição granulométrica e massa específica. E dados do modelo de empacotamento adotado, como: coeficiente de distribuição (q), diâmetro de maior partícula (D_L) e diâmetro de menor partícula (D_s). A Figura 33 mostra a tela da tabela criada.

Figura 33 – Imagem da planilha criada para ajuste da proporção dos materiais finos nas pastas



A Figura 33 apresenta uma imagem geral da planilha desenvolvida na pesquisa, no entanto, temos quatro partes da planilha que serão apresentadas detalhadamente na sequência. A primeira parte, detalhada na Figura 34, trata-se de dados e informações referente ao modelo de empacotamento adotado. Imputando informações nas células em amarelo referente a coeficiente de distribuição (q), diâmetro de menor partícula (D_s) e diâmetro de maior partícula (D_L). Nessa mesma parte, o programa traz como resposta o Índice de Desvio de Empacotamento (IDE) e a proporção para cada material fino indicada pelo programa.

Figura 34 – Tabela com as informações necessárias para curva de empacotamento

Modelo de Alfred						
Coeficiente de distribuição	q	0,37				
Menor partícula	D _s	0,122				
Maior partícula	D _L	104,7				
IDE=>		274,1				
Proporção encontrada	Sílica Ativa	CAL CH-I	Fíler Granítico	Fíler Calcário	CPIV 32	CPII F40
	17,5%	0,0%	12,5%	0,0%	70,0%	0,0%

O coeficiente de distribuição pode variar, e como visto na revisão bibliográfica, o coeficiente de distribuição com maior densidade de empacotamento é 0,37. Por isso foi adotado em 0,37.

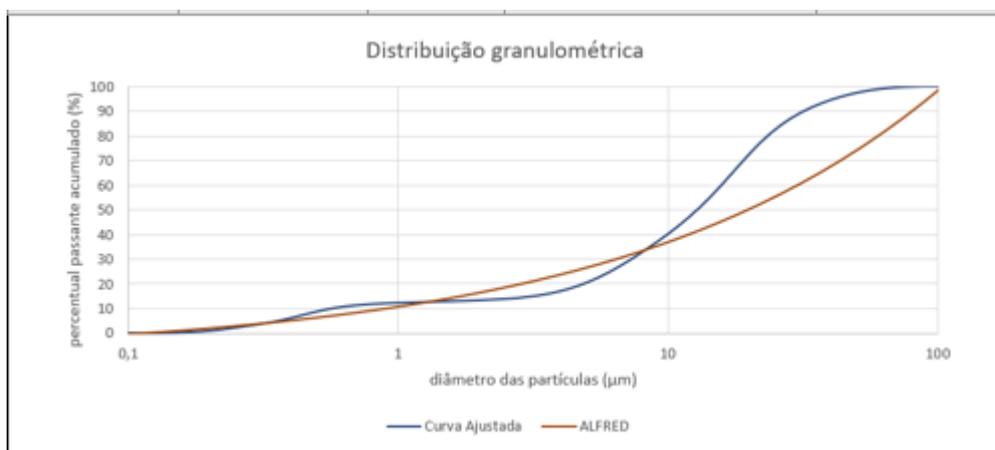
A segunda parte da planilha são dados do ensaio de distribuição granulométrica de cada material fino. Para cada diâmetro analisado é informado no programa o resultado do percentual passante. A Figura 35 apresenta a segunda parte da planilha.

Figura 35 – Parte da planilha com os dados da distribuição granulométrica de cada material

	B	C	D	E	F	G	H
	Diamêtro analisado (µm)	Sílica Ativa 20min	CAL CH-I	Fíler Granítico	Fíler Calcário	CPIV 32	CPII F40
11							
25	104,7	100	100	99,41	100	100	100
26	88	100	100	97,7	99,8	100	100
27	74	100	100	94,32	98,5	99,61	100
28	62,23	100	100	90,04	97,4	98,69	100
29	52,33	100	99,74	86,05	95,86	96,96	100
30	44	100	99,1	82,56	93,7	94,27	100
31	37	100	98,09	79,27	90,68	90,52	100
32	31,11	100	96,7	75,89	86,43	85,44	100
33	26,16	100	94,95	72,27	80,59	78,4	100
34	22	100	92,74	68,28	72,88	68,75	98,71
35	18,5	100	89,77	63,72	63,51	56,77	88,71
36	15,56	100	85,71	58,45	53,57	44,33	66,74
37	13,08	100	80,39	52,65	44,07	33,29	45,79
38	11	99,51	73,77	46,9	36	24,39	31,2
39	9,25	98,58	65,64	41,29	29,37	17,22	20,6
40	7,78	97,06	55,44	36,08	23,79	11,4	12,39
41	6,54	94,86	42,92	31,17	18,95	6,92	6,24
42	5,5	92,05	29,33	26,48	14,74	3,86	2,49
43	4,62	88,88	17,15	22,03	11,18	2,01	0,71

A terceira parte da planilha, conforme Figura XX, é o gráfico com as curvas de distribuição granulométrica pelo método de Alfred e a curva da mistura. É através dessas curvas que se obtêm o IDE da mistura.

Figura 36 – Curva de mistura ajustada e modelo de Alfred



Como visto na revisão bibliográfica, quanto mais próxima a curva da mistura ajustada estiver da curva do modelo adotado, menor será o IDE.

A quarta parte representada pela Figura 37, mostra um exemplo do percentual esperado pelo modelo de Alfred, o percentual da mistura, e o IDE que é a diferença absoluta entre o modelo adotado e o percentual da mistura. No caso, é possível visualizar esses dados por diâmetro analisado.

Figura 37 – Detalhe da quarta parte da planilha

	A	H	I	J	K
	Diamêtro analisado (μm)		Curva Ajustada	ALFRED	IDE
11					
25	104,7		0,00	100,00	100,000
26	88		0,00	93,22	93,216
27	74		0,00	86,87	86,872
28	62,23		0,00	80,92	80,923
29	52,33		0,00	75,34	75,342
30	44		0,00	70,10	70,104
31	37		0,00	65,20	65,195
32	31,11		0,00	60,59	60,588
33	26,16		0,00	56,27	56,269
34	22		0,00	52,22	52,221

A partir do preenchimento dos dados referente ao maior diâmetro de partícula, menor diâmetro de partícula, coeficiente de distribuição adotado, e distribuição granulométrica de cada material é utilizada a ferramenta solver do excel, realizando a interação entre os quantitativos de cada material, ajustando a curva da mistura para mais próxima possível da curva do modelo de empacotamento adotado.

A ferramenta solver está localizada no caminho de dados do excel, acessando a partir da aba análise. Após clicar no comando é aberto a janela no software, conforme mostra a Figura 38.

Figura 38 – Tela com ferramenta solver

The image shows an Excel spreadsheet with the Solver tool open. The spreadsheet has the following data:

Modelo de Alfred					
2	Coeficiente de distribuição	q			0,37
3	Menor partícula	Ds			0,122
4	Maior partícula	D _L			104,7
6	IDE=>				274,1
8	Proporção encontrada	Sílica Ativa	CAL CH-I	Filer Granítico	Filer Calcário
9		17,5%	0,0%	12,5%	0,0%
11	Diametro analisado (µm)	Sílica Ativa 20min	CAL CH-I	Filer Granítico	Filer Calcário
12		0,086	0	0	0
13		0,122	0,37	0	0
14		0,145	1,17	0	0
15		0,172	2,83	0	0
16		0,204	5,98	0	0
17		0,243	11,93	0	0
18		0,289	18,54	0	0
19		0,344	26,23	0	0
20		0,409	36,73	0	0

The Solver dialog box is open, showing the following configuration:

- Definir Objetivo: \$B\$6
- Para: Máx. MÍN. Valor de: 0
- Alterando Células Variáveis: \$B\$5:\$G\$6
- Sujeito às Restrições:
 - \$D\$5\$5 = 0
 - \$E\$5\$5 = 0
 - \$F\$5\$5 >= 0,7
 - \$G\$5\$5 = 0
 - \$I\$5\$5 = 1
- Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas
- Selecionar um Método de Solução: GRG Não Linear

No solver também pode-se adicionar algumas regras, como por exemplo limitar a quantidade de um material utilizado no estudo. Após a definição das regras, clica-se no botão “resolver” que o programa inicia as interações entre células indicadas para que sejam modificadas com o objetivo definido que no caso é o valor mínimo de IDE.

Assim, aplicando o método de empacotamento de partículas utilizado na presente pesquisa, foi solicitado a alteração das células correspondentes aos quantitativos para cada material a ser adicionado na mistura, objetivando que a curva da mistura se ajuste mais próxima a curva do modelo de empacotamento.

APÊNDICE B – SEQUÊNCIA DE CÁLCULO PARA PREVISÃO DO TEOR DE CAL PARA REAGIR COM A SÍLICA ATIVA EXCEDENTE NAS PASTAS

Antecipadamente foi estimado o teor de clínquer dos cimentos avaliando o boletim técnico com os dados dos mesmos. Na sequência o passo a passo para estimar o teor de clínquer do cimento CII F-40 utilizado na pesquisa.

Para se obter o teor de clínquer estimado foi reduzindo os percentuais do teor fíler, trióxido de enxofre (SO₃), Óxido de magnésio (MgO) e resíduo insolúvel (RI) do cimento, conforme Tabela 2.

Teor de fíler considerado o dobro do resultado de resíduo insolúvel (RI): 10,8%.

Teor de trióxido de enxofre (SO₃): 3,57%.

Óxido de magnésio (MgO): 4,99%.

Resíduo insolúvel (RI): 1,57%.

Portanto, o teor de clínquer estimado foi de 79,07%.

Conforme a informe do fabricante, os teores de alita (C₃S) e belita (C₂S) são 54,44 e 10,8%, respectivamente. O teor de hidróxido de cálcio pode ser obtido a partir desses teores de alita e belita. Portanto, a Equação (16) é para relacionar o teor de substituição do cimento pela sílica ativa para consumo total de hidróxido de cálcio com uma reatividade 100% da sílica ativa.

$$\frac{(100 - T_s) \cdot (0,487 \cdot \%C_3S + 0,215 \cdot \%C_2S)}{\%S \cdot T_s} = 1,85 \quad (16)$$

Sendo:

- T_s: teor de sílica ativa em substituição à massa do cimento (%);
- %C₃S: teor de silicato tricálcico presente no cimento;
- %C₂S: teor de silicato dicálcico presente no cimento;
- %S: teor de dióxido de silício presente na sílica ativa;

Aplicando a Equação (16) temos como resultado T_s = 14,10%

No entanto, na prática nem toda sílica ativa reage com hidróxido de cálcio e considerando a sílica ativa utilizada no presente estudo, com atividade pozolânica de 1.542 mg Ca(OH)₂/g sílica ativa (SOUZA, 2016). Diante disso, a Equação 17 prevê o teor de sílica ativa, considerando a reatividade da mesma.

$$\frac{(100 - T_{SR}) \cdot (0,487 \cdot \%C_3S + 0,215 \cdot \%C_2S)}{\%T_{SR}} = 1,542 \quad (17)$$

Sendo:

- T_{SR} : teor de sílica ativa em substituição à massa do cimento (%), considerando reatividade da sílica ativa;
- $\%C_3S$: teor de silicato tricálcico presente no cimento;
- $\%C_2S$: teor de silicato dicálcico presente no cimento;

Aplicando a Equação (17) temos como resultado $T_s = 15,75\%$

Porém, avaliando a pasta II FG P SS A45, contendo a seguinte proporção dos materiais finos: cimento CPII F-40 (50%), fíler granítico 34,4% e sílica ativa em suspensão (15,6%). Desconsiderando o fíler, pode-se considerar que a substituição da sílica por cimento foi de 23,78%, sendo acima do calculado. Então, houve a necessidade de incrementar hidróxido de cálcio como cal hidratada para ajustar a combinação para reagir com a sílica ativa excede.

Diferença entre calculado e teórico = $23,78\% - 15,75\% = 8,03\%$. Sendo ajustada na proporção dos finos da pasta, substituindo parcialmente o fíler granítico, considerado inerte, pela cal hidratada. Por isso, na proporção global entre os materiais da pasta, a cal possui 4,9%.

Para o cimento CPIV 32 foi utilizado o mesmo racional de cálculo para estimar o teor de clínquer. E no cálculo para previsão do teor de cal para reagir com a sílica ativa excedente, também foi considerado o teor de pozolana no cimento, considerando o efeito da pozolana em 82%.