

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALESSANDRA TOURINHO MAIA**

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM RACIONAL DE CONCRETOS  
DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

**CURITIBA**

**2021**

**ALESSANDRA TOURINHO MAIA**

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM RACIONAL  
DE CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

**Proposition of a racional dosing method for ultra high performance concrete**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Wellington Mazer.  
Coorientador: Alfredo Iarozinski Neto.

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Curitiba**



ALESSANDRA TOURINHO MAIA

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DOSAGEM RACIONAL DE CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 15 de Setembro de 2021

Prof Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Adauto Jose Miranda De Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Eduardo Tino Balestra, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Nayara Soares Klein, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Roberto Christ, Doutorado - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 15/09/2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico esta pesquisa à minha querida amiga Eng. Elizamary Otto, cujo apoio foi fundamental para a realização do programa experimental.

Agradeço aos meus orientadores, professores Dr. Wellington Mazer e Dr. Alfredo Iarozinski Neto, pela compreensão, dedicação, incentivo, contribuições e diretrizes dadas para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço também aos professores Dr. Roberto Christ e Dra. Nayara Soares Klein por sua inestimável contribuição no aprimoramento desta pesquisa.

Às empresas e seus representantes: GCP Applied Technologies (Denis Weidmann), Cia. de Cimento Itambé (Jorge Aoki), Mineração Jundú (Paulo Fracaro), Concrebrás (Murilo Mann), ao Maicon Prudenciano, Pedreira Guaravera e à Hobimix (Samuel C. Bataiote) que gentilmente forneceram alguns dos materiais empregados nesta pesquisa. À Supermix (Michele R. Nascimento e Neri S. Fernandes) pela contribuição no processo de retífica das amostras.

Ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo (Carlos Vasconcellos e Renato Lauria), ao Grupo IDD (César Henrique S. Daher e Felipe Machado de Jesus), à Novamix (Claiton Cremonez), à Hobimix (Diosnei F. Koman e Samuel C. Bataiote) e à Qualilab (Miguel de Andrade), pela contribuição na execução dos ensaios de caracterização das amostras.

Ao Felipe Perreto, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela contribuição na execução dos ensaios complementares de caracterização dos materiais.

Aos meus estimados: Ana Carolina Cristof, Murilo Marques, Cláudio Ferreira, Luis Gustavo de Castro, Michele Recalcatti, Patrícia S. Monteiro, Charles Jaster, Patrícia Bilotta, Idércio França das Neves, Vilson Fogaça, Thays Araújo, Luciana C. Estece, Sandra Júlia Tourinho Maia, José Luiz Maia, Danielle T. Maia, Luiz Guilherme T. Maia, Lorena T. Rocha, Caroline Rocha, Marina Maia Sbalqueiro e Marco Antônio Sbalqueiro pelo seu apoio incondicional e pela sua importante colaboração no desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

MAIA, Alessandra Tourinho. **Proposição de um método de dosagem racional de concretos de ultra-alto desempenho**. 2021. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

Esta pesquisa visou a proposição de um método racional de dosagem de concretos de ultra-alto desempenho fundamentado na associação das três abordagens: a definição do teor ideal de sílica, o emprego do mínimo volume de pasta e a incorporação do agregado miúdo artificial de basalto. Através da combinação entre métodos experimentais e modelos de empacotamento granular, um robusto programa experimental composto por oito etapas foi desenvolvido, visando a obtenção de traços de concretos de ultra-alto desempenho, com características autoadensáveis e resistência à compressão superior a 150 MPa aos 28 dias, após tratamento térmico a 90°C. Complementarmente, foram avaliados a influência do teor de sílica, do volume adicional de pasta, de diferentes tipos de cura, da idade de ensaio e da inclusão de fibras metálicas na fluidez e na resistência dos compósitos. Por meio do método proposto, a resistência média de 186 MPa foi lograda no traço contendo o mínimo volume de pasta, 484 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 25% de sílica ativa. Os resultados obtidos indicam que este método tende a apresentar a melhor proporção entre os materiais componentes, dando origem a traços que se enquadram nos parâmetros internacionais que definem o UHPC, porém com reduzidos volumes de pasta e consumo de aglomerantes inferiores àqueles identificados na literatura correlata. Por meio de uma abordagem racional, econômica e sustentável, que visa a otimização do emprego de materiais de maior custo e a minimização do uso de recursos naturais escassos, o método contribui positivamente para o desenvolvimento tecnológico do setor.

**Palavras-chave:** Concreto de ultra-alto desempenho (UHPC). Método de dosagem. Empacotamento de partículas. Mínimo volume de pasta. Areia artificial de basalto.

## ABSTRACT

MAIA, Alessandra Tourinho. **Proposition of a racional dosing method for ultra high performance concrete**. 2021. 271 p. Thesis (PhD in Civil Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

This research aimed to propose a rational method for dosing ultra-high performance concretes based on the association of three approaches: the definition of the ideal silica content, the use of the minimum paste volume and the incorporation of fine basalt artificial sand. Through the combination of experimental methods and granular packing models, a robust experimental program consisting of eight steps was developed, aiming to obtain different compositions of ultra-high performance concretes, with self-compacting characteristics and compressive strength greater than 150 MPa at 28 days, after heat water treatment at 90°C. In addition, the influence of silica content, additional paste volume, different types of cure, test ages and the addition of metallic fibers on the fluidity and strength of the composites were evaluated. Through the proposed method, the average strength of 186 MPa was achieved in the mix containing the minimum volume of paste, 484 kg/m<sup>3</sup> of cement and 25% of silica fume. The results obtained indicate that the proposed method tends to have the best proportion among the component materials, giving rise to traits that fit the international parameters that define the UHPC, but with reduced paste volumes and consumption of binders lower than those identified in the related literature. Through a rational, economic and sustainable approach, which aims to optimize the use of higher cost materials and minimize the use of scarce natural resources, the method contributes positively to the technological development of the sector.

**Palavras-chave:** Ultra high performance concrete (UHPC). Dosing method. Particle packing. Minimum paste volume. Basalt artificial sand.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério de Peirce: Valores de $Z$ .....	66
Tabela 2 - Demais parâmetros identificados em pesquisas sobre UHPC .....	73
Tabela 3 - Composição granulométrica da areia artificial.....	92
Tabela 4 - Composição granulométrica da areia natural.....	94
Tabela 5 - Composição granulométrica da areia natural fina .....	96
Tabela 6 - Composição do cimento .....	97
Tabela 7 - Parâmetros físicos e químicos do cimento.....	98
Tabela 8 - Composição da sílica ativa.....	99
Tabela 9 - Caracterização do pó de quartzo .....	100
Tabela 10 - Composição granulométrica do pó de quartzo .....	101
Tabela 11 - Teores de aditivo para os diferentes teores de sílica .....	105
Tabela 12 - Resultados do ensaio de empacotamento úmido para diferentes teores de sílica .....	110
Tabela 13 - Resultados do ensaio de empacotamento úmido para diferentes teores de sílica em função do teor de aditivo .....	112
Tabela 14 - Resultados do experimento piloto .....	118
Tabela 15 - Análise de variância da resistência média em função do valor $q$ .....	119
Tabela 16 - Parâmetros adicionais do experimento piloto.....	119
Tabela 17 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado .....	121
Tabela 18 - Análise matricial .....	122
Tabela 19 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial .....	124
Tabela 20 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira e segunda classes.....	126
Tabela 21 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura .....	127
Tabela 22 - Volume dos materiais componentes dos traços.....	128
Tabela 23 - Traços .....	130
Tabela 24 - Análise de variância da influência do teor de sílica na fluidez.....	144
Tabela 25 - Análise de variância da influência do volume de pasta na fluidez.....	147
Tabela 26 - Teste de Tukey-Kramer para a influência do volume de pasta na fluidez .....	148
Tabela 27 - Valores de resistência média à compressão .....	149

Tabela 28 - Média dos valores de resistência à compressão em função do teor de sílica e do volume adicional de pasta .....	150
Tabela 29 - Análise de variância da resistência média à compressão em função do teor de sílica e do volume de pasta .....	152
Tabela 30 - Análise de variância do volume adicional de pasta nos traços com 20%, 25% e 30% de sílica .....	157
Tabela 31 - Análise de variância do volume adicional de pasta nos traços com 15% de sílica .....	159
Tabela 32 - Binder index médio.....	161
Tabela 33 - Valores da resistência média em função do tipo de cura .....	163
Tabela 34 - Análise de variância da resistência média à compressão em função do tipo de cura.....	164
Tabela 35 - Valores da resistência média em função da idade ensaio de amostras submetidas à cura úmida.....	165
Tabela 36 - Análise de variância da resistência média à compressão em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura úmida.....	165
Tabela 37 - Valores da resistência média em função da idade de ensaio de amostras submetidas à cura térmica .....	166
Tabela 38 - Análise de variância da resistência média à compressão em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura térmica.....	167
Tabela 39 - Análise de variância dos resultados de resistência média à compressão aos 91 dias em função do volume de pasta .....	168
Tabela 40 - Teste de Tukey-Kramer para os resultados de resistência média aos 91 dias em função do volume de pasta.....	169
Tabela 41 - Valores da resistência média em função da adição de fibras .....	172
Tabela 42 - Análise de variância da resistência média em função da adição de fibras .....	173
Tabela 43 - Composição granulométrica do experimento de validação segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado.....	178
Tabela 44 - Análise matricial do experimento de validação .....	180
Tabela 45 - Composição granulométrica do experimento de validação segundo o modelo matricial .....	181
Tabela 46 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira e segunda classes para o experimento de validação .....	183
Tabela 47 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura do experimento de validação .....	184
Tabela 48 - Volume dos materiais componentes dos traços do experimento de validação .....	185
Tabela 49 - Traços do experimento de validação.....	186



Tabela 50 - Valores da resistência média à compressão do experimento de validação.....	190
Tabela 51 - Análise de variância da resistência média à compressão do experimento de validação .....	190
Tabela 52 - Simulação dos parâmetros adicionais do experimento de validação ...	194
Tabela 53 - Análise comparativa de custos.....	200
Tabela 54 - Parâmetros de saída para os teores de sílica de 10 e 15% .....	242
Tabela 55 - Parâmetros de saída para os teores de sílica de 20 e 25% .....	243
Tabela 56 - Parâmetros de saída para os teores de sílica de 30 e 35% .....	244
Tabela 57 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado para $q=0,22$ .....	247
Tabela 58 - Análise matricial para $q=0,22$ .....	248
Tabela 59 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial para $q=0,22$ .....	249
Tabela 60 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para $q=0,22$ .....	251
Tabela 61 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para $q=0,22$ .....	251
Tabela 62 - Consumo dos materiais componentes do UHPC para 25% de sílica e $q=0,22$ .....	252
Tabela 63 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado.....	253
Tabela 64 - Análise matricial para $q=0,37$ .....	254
Tabela 65 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial .....	255
Tabela 66 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira e segunda classes para $q=0,37$ .....	257
Tabela 67 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para $q=0,37$ .....	257
Tabela 68 - Consumo dos materiais componentes do UHPC para 25% de sílica e $q=0,37$ .....	258
Tabela 69 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado para $q=0,52$ .....	259
Tabela 70 - Análise matricial para coeficiente de distribuição de 0,52 .....	260
Tabela 71 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial para $q=0,52$ .....	261
Tabela 72 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para $q=0,52$ .....	263

Tabela 73 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para $q=0,52$ .....	263
Tabela 74 - Consumo dos materiais componentes do UHPC para 25% de sílica e $q=0,52$ .....	264
Tabela 75 - Traços selecionados para o experimento piloto .....	265
Tabela 76 - Resultados individuais de resistência à compressão do experimento piloto.....	269
Tabela 77 - Resultados individuais de resistência à compressão .....	271

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de diferentes traços de UHPC .....	70
Quadro 2 - Parâmetros do empacotamento granular da primeira e segunda classes .....	82
Quadro 3 - Parâmetros do empacotamento granular da mistura .....	84
Quadro 4 - Equações de regressão correspondente aos diferentes teores de sílica .....	154
Quadro 5 - Equações de regressão correspondentes à adição de fibras.....	174

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Passarela de UHPC sobre o Barranco de las Ovejas (Alicante).....	33
Figura 2 - Comparação entre as composições de UHPC: (a) Li et al. (2018); (b) Liu et al. (2020); (c) Zhu et al. (2020).....	41
Figura 3 - Representação da densidade de empacotamento.....	43
Figura 4 - Representação do empacotamento de um sistema monodisperso de esferas: (a) cúbico e (b) piramidal.....	45
Figura 5 - Interação entre partículas: (a) efeito afastamento e (b) efeito parede.....	46
Figura 6 - Correlação entre a relação de vazios e a concentração de sólidos em função da relação água/sólidos.....	56
Figura 7 - Teoria das camadas de água (a) e Teoria do empacotamento (b) .....	61
Figura 8 - Desenho esquemático da teoria de excesso pasta: (a) simplificação do sistema real; (b) volume de cada parte do sistema e volume de excesso de pasta ..	62
Figura 10 - Etapas do método de dosagem .....	75
Figura 11 - Índice de Desvio do Empacotamento.....	81
Figura 12 - Programa experimental.....	90
Figura 13 - Microscopia óptica da areia artificial de basalto .....	92
Figura 14 - Curva granulométrica da areia artificial.....	93
Figura 15 - Microscopia óptica da areia natural.....	93
Figura 16 - Curva granulométrica da areia natural .....	95
Figura 17 - Curva granulométrica da areia natural fina .....	97
Figura 18 - Curva granulométrica do cimento .....	98
Figura 19 - Curva granulométrica da sílica ativa .....	99
Figura 20 - Curva granulométrica do pó de quartzo .....	101
Figura 21 - Fibras metálicas.....	102
Figura 22 - Ponto de liquefação da pasta (relação $a/agl = 0,12$ ).....	104
Figura 23 - Pasta com relação $a/agl = 0,10$ .....	105
Figura 24 - Ensaio de empacotamento úmido - pasta com 15% de sílica, $a/agl = 0,18$ e teor médio de aditivo de 3,3% .....	106
Figura 25 - Ensaio de empacotamento úmido - pasta com 30% de sílica, $a/agl = 0,16$ e teor médio de aditivo de 3,3% .....	107
Figura 26 - Ensaio de empacotamento úmido - determinação da massa de material .....	108

Figura 27 - Relação entre a concentração de sólidos, a relação de vazios e relação a/agl em volume: (a) para 10% de sílica e (b) para 15% de sílica .....	109
Figura 28 - Relação entre a concentração de sólidos, a relação de vazios e relação a/agl em volume: (a) para 20% de sílica e (b) para 25% de sílica .....	109
Figura 29 - Relação entre a concentração de sólidos, a relação de vazios e relação a/agl em volume: (a) para 30% de sílica e (b) para 35% de sílica .....	110
Figura 30 - Relação entre os teores de sílica, a relação de vazios e a densidade de empacotamento .....	111
Figura 31 - Espessura do filme de água na pasta em função da relação a/agl e do teor de sílica .....	113
Figura 32 - Espessura do filme de água na pasta para a máxima densidade de empacotamento, em função do teor de sílica .....	114
Figura 33 - Excesso de água em função da relação a/agl e do teor de sílica .....	115
Figura 34 - Fluidez da pasta para a relação a/agl de 0,16 .....	116
Figura 35 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial .....	125
Figura 36 - Adição de fibras .....	134
Figura 37 - Fluidez do traço com o mínimo volume de pasta .....	135
Figura 38 - Ensaio de determinação da fluidez da pasta .....	137
Figura 39 - Determinação do diâmetro da pasta .....	138
Figura 40 - Procedimento de retífica .....	139
Figura 41 - Equipamento para ensaio da resistência à compressão .....	140
Figura 42 - Ensaio para determinação da fluidez: (a) preenchimento do molde e (b) determinação do diâmetro .....	143
Figura 43 - Comportamento do espalhamento em função do teor de sílica e do volume adicional de pasta .....	144
Figura 44 - Determinação da fluidez do UHPC: (a) volume mínimo de pasta, (b) 20% adicional, (c) 40% adicional, (d) 60% adicional e (e) 80% adicional de pasta .....	146
Figura 45 - Característica autoadensável do traço com 20% de sílica e 80% de volume adicional de pasta .....	147
Figura 46 - Comportamento da resistência média à compressão de cada série em função do volume adicional de pasta .....	153
Figura 47 - Comportamento da resistência média à compressão em função do volume adicional de pasta e do consumo de cimento .....	155
Figura 48 - Valor $p$ resultante do Teste de Tukey-Kramer para as séries com 20%, 25% e 30% de sílica .....	158
Figura 49 - Valor $p$ resultante do Teste de Tukey-Kramer para a série com 15% de sílica .....	160

Figura 50 - Binder index individual dos traços.....	161
Figura 51 - Comportamento da resistência em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura térmica .....	168
Figura 52 - Comportamento do espalhamento em função do volume adicional de pasta e da adição de fibras metálicas .....	170
Figura 53 - Aspecto da fluidez em função do volume adicional de pasta e da adição de fibras metálicas: (a) TR-25.0, (b) TR-25.0, (c) TR-25.60, (d) TR-25.80.....	171
Figura 54 - Tendência do comportamento da resistência à compressão em função da adição de fibras .....	174
Figura 55 - Aspecto do traço TR-25.0 com fibras.....	176
Figura 56 - Padrão de fratura das amostras com adição de fibras .....	177
Figura 57 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para o experimento de validação .....	182
Figura 58 - Comportamento da fluidez dos traços do experimento de validação em função do volume adicional de pasta: (a) TR-EV 25.0, (b) TR-EV 25.20, (c) TR-EV 25.40, (d) TR-EV 25.60, (e) TR-EV 25.80 .....	187
Figura 59 - Comportamento do espalhamento dos traços do experimento de validação em função do volume adicional de pasta .....	188
Figura 60 - Aspecto dos traços: (a) TR-25.20-EV, (b) TR-25.80-EV .....	188
Figura 61 - Aspecto das amostras: (a) TR-EV 25.0 (b) TR-EV 25.80.....	189
Figura 62 - Valor $p$ resultante do Teste de Tukey-Kramer para o experimento de validação .....	191
Figura 63 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para $q=0,22$ .....	250
Figura 64 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial .....	256
Figura 65 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para $q=0,52$ .....	262
Figura 66 - Traço piloto para $q = 0,22$ e $a/agl = 0,20$ .....	266
Figura 67 - Traço piloto para $q = 0,22$ e $a/agl = 0,20$ com o teor de aditivo ajustado .....	267

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFNOR	Association Française de Normalization
ANOVA	Análise Normal de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFUP	Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances
CAD	Concretos de Alta Resistência
CA-UHPC	Coarse Aggregates Ultra High Performance Concrete
CP	Corpo de prova
CPR	Concreto de Pós Reativos
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CUAD	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
FC	Fator de correção
IDE	Índice de Desvio do Empacotamento
ISO	International Organization for Standardization
MF	Módulo de finura
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira
NF P	Norma Francesa de Procedimentos
NM	Norma Mercosul
PVA	Policloreto de Vinila
RPC	Reactive Powder Concrete

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a/agl$	Relação água/aglomerante
$A_{CM}$	Superfície específica do conjunto de materiais cimentícios
$A'_{FA}$	Superfície específica dos grãos de agregados finos acima de 75 $\mu m$
$A_i$	Superfície específica dos sólidos
$BI$	Binder index
$BIs$	Binder index médio da série
$C_{adt}$	Consumo de aditivo
$C_{cp}$	Consumo de cimento
$C_{agi}$	Consumo do agregado $i$
$C_{sa}$	Consumo de sílica
$C_p$	Consumo de pó de quartzo
$C_w$	Consumo de água
$CaO$	Óxido de cálcio
$CO_2$	Dióxido de carbono
$d_{adt}$	Densidade do aditivo
$d_1$	Diâmetro característico da menor partícula
$d_2$	Diâmetro característico da maior partícula
$d_{50}$	Diâmetro médio
$D$	Diâmetro da partícula
$D_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo da partícula
$DMC$	Diâmetro máximo característico
$DI$	Diâmetro do corpo de prova
$D_p$	Tamanho da partícula
$D_s$	Tamanho da menor da partícula
$D_L$	Tamanho da maior da partícula
$e$	Porosidade
$e_{pex}$	Espessura da camada de pasta



$E_v$	Índice de vazios
$f$	Fator de forma da fibra
$f_{ci}$	Resistência à compressão da amostra $i$
$f_{cm}$	Resistência média à compressão
$f_{cms}$	Resistência média à compressão da série em função do teor de sílica
$f_{cmvp}$	Resistência média à compressão em função do volume adicional de pasta
$F$	Relação entre as variâncias
$F_{Crítico}$	Valor tabelado de $F$ de SNEDCOR
gL	Graus de liberdade
$[G]$	Matriz com as porcentagens retidas acumuladas dos materiais granulares
H	Altura do corpo de prova
$H_0$	Hipótese nula
$H_1$	Hipótese alternativa
$k_d$	Fator de proporção entre os diâmetros das partículas
$k_s$	Fator estatístico
$M$	Massa da pasta
$ME_i$	Massa específica relativa do material $i$
$ME_{comp.agreg.}$	Massa específica da composição de agregados
$MU_i$	Massa unitária média do material $i$
$MU_{comp.agreg.}$	Massa unitária média da composição de agregados
$n$	Número de classes
MQ	Médias quadradas
$\rho$	Coefficiente de correlação
P	Teor de pasta em massa
PQ	Percentual de pó de quartzo sob a massa de cimento
PFT	Paste Film Thickness
$q$	Coefficiente de distribuição

$r_i$	Fração volumétrica relativa da partícula $i$
$r_m$	Fração volumétrica relativa da mistura
$r'_w$	Razão volumétrica entre o excesso de pasta e o volume dos sólidos
$R_i$	Razão volumétrica do sólido $i$
$S_d$	Desvio padrão
SQ	Soma dos quadrados
t	Tonelada
$T_{fibras}$	Máximo teor de fibras a ser inserido na mistura
$V$	Volume do recipiente
$V_{ag}$	Volume total de agregados
$V_{agi}$	Volume do agregado $i$
$V_c$	Volume de sólidos dos materiais cimentícios
$V_{cp}$	Volume de cimento
$V_p$	Volume de pasta
$V_{pd}$	Volume de pasta densa
$V_{pex}$	Excesso de pasta
$V_{p\text{mín}}$	Volume mínimo de pasta
$V_q$	Volume de pó de quartzo
$V_s$	Volume de sólidos
$V_{sa}$	Volume de sílica ativa
$V_t$	Volume total
$V_v$	Volume de vazios
$V_w$	Volume de água
$\omega_{adt}$	Teor de aditivo sob a massa de aglomerantes (%)
$\omega_{sa}$	Teor de sílica sob a massa de cimento (%)
WFT	Water Film Thickness
$x$	Fator estatístico
$Z$	Razão do máximo desvio permitido de um resultado em relação à
$\alpha$	Nível probabilístico de confiança

$\alpha_t$	Densidade de empacotamento da mistura de agregados miúdos
$\alpha_m$	Densidade de empacotamento do conjunto granular da mistura com a terceira classe
$\alpha_{mexp}$	Densidade de empacotamento da mistura experimental
$\alpha_{tm}$	Densidade de empacotamento do conjunto granular
$[\varepsilon_i]$	Vetor das porcentagens de cada material granular a serem utilizadas
$[E]$	Vetor das porcentagens retidas acumuladas
$\exists$	Erro quadrado
$\Theta$	Densidade de empacotamento de partículas
$\mu$	Relação de vazios
$\mu_w$	Relação água/sólidos, em volume
$\mu'_w$	Excesso de água
$o_s$	Fração de empacotamento da areia na mistura
$o_m$	Fração de empacotamento denso da areia na mistura
$p$	Probabilidade
$\rho_i$	Densidade relativa do sólido $i$
$\rho_w$	Densidade da água
$\emptyset$	Concentração de sólidos
$\varphi_i$	Densidade de empacotamento da partícula $i$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 OBJETIVOS .....	25
1.1.1 Objetivo Geral .....	25
1.1.2 Objetivos Específicos .....	25
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	26
1.3 JUSTIFICATIVA .....	26
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	31
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	32
2.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO .....	32
2.2 EMPACOTAMENTO GRANULAR .....	42
2.2.1 Modelos de Empacotamento de Partículas .....	46
2.2.1.1 Curvas de distribuição granulométrica .....	47
2.2.1.2 Modelos Analíticos .....	50
2.2.1.3 Empacotamento úmido .....	53
2.3 TEORIA DO EXCESSO DE PASTA .....	61
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	64
2.4.1 Critério de Peirce .....	64
2.4.2 Análise de Variância .....	67
2.4.3 Teste de Tukey-Kramer .....	68
2.5 LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS CORRELATOS .....	69
<b>3 MÉTODO DE DOSAGEM DE TRAÇOS DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO</b> .....	74
3.1 Seleção e caracterização dos materiais .....	76
3.2 Determinação do Teor de Sílica Ativa .....	76
3.3 Determinação da Relação água/aglomerante .....	78
3.4 Determinação da Curva Granulométrica Ideal .....	78
3.5 Determinação do Volume Mínimo de Pasta e do Volume Adicional de Pasta ....	81
3.6 Determinação dos Traços de Concreto de Ultra-Alto Desempenho .....	85
3.7 Determinação do Teor de Fibras .....	88
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	89
4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	91
4.1.2 Agregados Miúdos .....	91
4.1.3 Aglomerantes .....	97

4.1.4	Pó de Quartzo .....	100
4.1.5	Aditivo.....	102
4.1.6	Fibras Metálicas .....	102
4.2	EXPERIMENTO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM .....	103
4.2.1	Ensaio para a Determinação do Teor de Sílica .....	103
4.2.2	Ensaio para a Determinação da Relação água/aglomerante .....	112
4.2.3	Determinação do Coeficiente de Distribuição.....	117
4.2.3.1	Resultados do Experimento Piloto .....	118
4.2.4	Determinação da Curva Granulométrica Ideal da Composição.....	120
4.2.5	Determinação do Volume Mínimo de Pasta .....	125
4.2.6	Determinação dos Traços .....	128
4.2.7	Determinação do Consumo de Fibras.....	132
4.3	DOSAGEM DOS TRAÇOS DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO 132	
4.3.1	Procedimentos de Mistura.....	133
4.3.2	Procedimentos de Moldagem e Adensamento.....	134
4.3.3	Procedimentos de Cura.....	136
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	136
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	138
4.6	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....	140
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>142</b>
5.1	ANÁLISE DA FLUIDEZ DOS TRAÇOS .....	142
5.2	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	148
5.2.1	Análise da Influência dos Teores de Sílica Ativa na Resistência à Compressão .....	150
5.2.2	Análise da Influência do Volume Adicional de Pasta na Resistência à Compressão.....	153
5.2.3	Análise da Influência do Tipo de Cura na Resistência à Compressão .....	163
5.2.4	Análise da Influência da Idade de Ensaio na Resistência à Compressão .....	164
5.2.5	Análise da Influência da Fibra Metálica na Fluidez e na Resistência à Compressão.....	169
5.3	EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM .....	177
5.3.1	Determinação da Curva Granulométrica Ideal do Experimento de Validação 178	
5.3.2	Determinação do Volume Mínimo de Pasta do Experimento de Validação ...	182

5.3.3 Determinação dos Traços do Experimento de Validação para a Dosagem do Concreto de Ultra-Alto Desempenho.....	185
5.3.4 Análise da Fluidez das Amostras do Experimento de Validação.....	186
5.3.5 Análise da Resistência à Compressão das Amostras do Experimento de Validação.....	189
5.4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO MÉTODO DE DOSAGEM .....	191
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>201</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>206</b>
<b>ANEXO A - Certificado de Análise Petrográfica da Areia Artificial .....</b>	<b>224</b>
<b>ANEXO B - Certificado de Análises Físicas e Químicas da Areia Natural .....</b>	<b>227</b>
<b>ANEXO C - Certificado de Análise do Pó de Quartzos .....</b>	<b>237</b>
<b>ANEXO D - Relatório de Ensaio de Cimento.....</b>	<b>239</b>
<b>APÊNDICE A - Parâmetros do Ensaio de Empacotamento Úmido .....</b>	<b>241</b>
<b>APÊNDICE B - Experimento Piloto para a Determinação do Coeficiente de Distribuição.....</b>	<b>245</b>
<b>APÊNDICE C - Resultados Individuais de Resistência à Compressão do Experimento Piloto .....</b>	<b>268</b>
<b>APÊNDICE D - Resultados Individuais de Resistência à Compressão.....</b>	<b>270</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os anos de 1930 muitas pesquisas têm sido desenvolvidas visando alcançar elevado desempenho mecânico de materiais compostos por matrizes cimentícias. Em 1995, Richard e Cheyrezy, tornaram possível a obtenção de um compósito de ultraelevada resistência mecânica denominado de Concreto de Pós Reativos (CPR) – *Reactive Powder Concrete* (RPC), caracterizado por apresentar não só alta tenacidade e módulo de elasticidade, como baixa fluência e fissuração, obtidas a partir de um sistema densificado de partículas ultrafinas e da aplicação de alguns princípios básicos relativos à composição, procedimentos de mistura e ao tratamento térmico do concreto (DE LARRARD E SEDRAN, 1994; LU GU *et al.*, 2016).

Na mesma época, De Larrard e Sedran (1994) propuseram, pela primeira vez, o termo Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) – *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) e comprovaram, por meio de uma metodologia experimental, ser possível atingir resistências superiores a 200 MPa utilizando apenas agregados comuns, cimento, sílica ativa, aditivo superplastificante e uma reduzida quantidade de água, associados à cura térmica simples, sem aplicação de pressão, temperaturas muito elevadas ou umidade adicional.

Atualmente, o UHPC pode ser considerado como uma das mais importantes e progressivas tecnologias em desenvolvimento no campo da ciência dos materiais e tem demonstrado grande valor no campo da engenharia civil devido às suas excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade (HAILE *et al.*, 2019; MOHHAMED *et al.*, 2020; DINGQIANG *et al.*, 2020).

O desenvolvimento do concreto de ultra-alto desempenho tem se dado por meio de técnicas de aprimoramento da microestrutura de materiais cimentícios que incluem: a eliminação de agregados graúdos, a otimização da densidade de empacotamento da mistura, a redução da significativa relação água/aglomerante, a diminuição do teor de óxido de cálcio (CaO) em relação ao óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), além da introdução de outros materiais silicosos, geralmente resíduos de processos industriais, que promovem um denso empacotamento das partículas e a melhora da microestrutura da pasta por meio da formação de reações pozolânicas. A

incorporação de fibras descontínuas em algumas misturas tem como objetivo o aumento da resistência à tração e a obtenção dos níveis necessários de ductilidade no regime de pós fissuração (RICHARD E CHEYREZY, 1995; CHANG *et al.*, 2009; BUTTIGNOL *et al.*, 2018; SOHAIL *et al.*, 2018; IBRAHIM *et al.*, 2020).

Estudos comprovam que a performance do UHPC, no que tange suas propriedades mecânicas e durabilidade, está associada ao tipo, ao tamanho e ao proporcionamento de seus componentes, que tipicamente contempla o emprego de cimento, adição pozolânica e agregados miúdos finos (600  $\mu\text{m}$ ). No entanto, matrizes que contêm o uso de outros materiais cimentícios e/ou adições suplementares, resíduos e, eventualmente, a combinação de agregados de diferentes origens e densidades e/ou de maiores dimensões (*coarser fine aggregates*) como a areia artificial, ou ainda, de agregados graúdos (CA-UHPC – *Coarse Aggregates Ultra High Performance Concrete*) têm sido frequentemente estudadas com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e promover a sustentabilidade através do uso de materiais locais e daqueles oriundos de processos que geram menor impacto ao meio ambiente (SOHAIL *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2019; DINGQIANG *et al.*, 2020; VATANNIA *et al.*, 2020; YANG *et al.*; 2020; ZENG *et al.*; 2020; REDDY E RAMADOSS, 2021).

Diante desta perspectiva e da expectativa de minimizar a ocorrência da retração, alguns pesquisadores têm optado por incluir agregados miúdos de maiores dimensões e/ou agregados graúdos em suas pesquisas sobre UHPC. Dentre as rochas mais utilizadas como agregado na produção de Concretos de Alto Desempenho (CAD) e de UHPC, destacam-se as de origem granítica e basáltica.

O proporcionamento dos materiais que compõem o concreto de ultra-alto desempenho geralmente é determinado de forma experimental, por tentativa e erro ou pela da combinação de curvas granulométricas, ou ainda, através modelos analíticos de densidade de empacotamento dos materiais com base em equações matemáticas, ou de modelos computacionais e algoritmos embasados em Modelos de Elementos Discretos ou em Redes Neurais Artificiais (FENNIS E WALRAVEN, 2012; LU GU *et al.*, 2016; CHRIST, 2019; HAILE *et al.*, 2019; CHOUDARY *et al.*, 2020; DINGQIANG *et al.*, 2020; SOHAIL *et al.*, 2021).



Destaca-se, porém, que na maioria das pesquisas os traços de UHPC são simplesmente apresentados ou então, adaptados de outros estudos. Muitos são estabelecidos experimentalmente, porém sem a adequada orientação teórica, e como consequência do grande número de parâmetros envolvidos, tem-se maiores consumos de cimento, custos mais elevados, procedimentos complexos e uma maior variabilidade dos resultados (MANGULKAR E JAMKAR, 2013; DINGQIANG *et al.*, 2020).

Em meio a tal diversidade e em razão do elevado número de parâmetros envolvidos no proporcionamento dos materiais que compõem o concreto de ultra-alto desempenho, torna-se relevante o desenvolvimento de um método de dosagem experimental que contemple o emprego de agregados miúdos artificiais e que vise a obtenção de traços com o menor volume de pasta possível, associado à elevados níveis de resistência mecânica, baixa porosidade e fluidez adequada.

## 1.1 OBJETIVOS

Nos subitens a seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um método de dosagem racional de concretos de ultra-alto desempenho.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência de diferentes teores de sílica ativa na resistência à compressão de concretos de ultra-alto desempenho produzidos com areia artificial de basalto.

- Analisar a influência do volume de pasta na resistência à compressão de concretos ultra-alto desempenho produzidos com areia artificial de basalto.
- Analisar a influência da cura úmida e da cura térmica na resistência à compressão de concretos ultra-alto desempenho produzidos com areia artificial de basalto.
- Analisar a influência da idade na resistência à compressão de concretos ultra-alto desempenho produzidos com areia artificial de basalto.
- Analisar a influência do emprego de fibras metálicas na fluidez e na resistência à compressão de concretos ultra-alto desempenho produzidos com areia artificial de basalto.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi desenvolvida em ambiente laboratorial. Seus resultados estão condicionados ao uso de areia artificial de basalto *in natura*, areia natural quartzosa, pó de quartzo, sílica ativa, cimento CP V-ARI e aditivo superplastificante de base policarboxílica. Destaca-se que esta pesquisa não contempla a análise do comportamento do UHPC frente aos esforços de tração, bem como a sua ductilidade, entretanto esta verificação é recomendada para estudos futuros.

A temperatura, os processos de mistura, moldagem, adensamento, cura e os ensaios para a determinação das propriedades nos estados fresco e endurecido, foram os mesmos para todos os traços estudados.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, com consumo estimado em 17 bilhões de toneladas/ano (PACHECO *et al.*, 2019). Entretanto, sua produção e de seus componentes, em especial, do cimento, consome energia e água, além de resultar na geração de CO<sub>2</sub>. De acordo com o Roadmap Brasil (SNIC, 2019), a indústria do cimento é responsável pela emissão mundial de 7% do CO<sub>2</sub>, originárias

basicamente da descarbonatação da rocha calcária e da utilização de combustíveis fósseis que abastecem os fornos de produção do clínquer (POSSAN, 2019). Este percentual corresponde a 20,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a partir da produção nacional de 56,6 kt de cimento (SEEG, 2019).

Projeções indicam que a produção nacional de cimento deve saltar de 65 milhões de toneladas em 2020 para 163 milhões de toneladas em 2040. Tal crescimento de longo prazo representa um importante desafio para a indústria cimenteira em termos de demanda de energia e de emissões de CO<sub>2</sub>. Os autores destacam que, com a manutenção dos padrões atuais de emissão (564 kg CO<sub>2</sub>/t), o setor será responsável pela emissão de 66 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2050 (GUIMARÃES *et al.*, 2019).

Apesar da indústria brasileira do cimento apresentar um dos menores índices de emissão específica de CO<sub>2</sub> no mundo graças a ações mitigadoras que vêm sendo implementadas pelo setor nas últimas décadas, é importante destacar que o impacto ambiental do concreto não é causado apenas pelo cimento, uma vez que 12 bilhões de toneladas de recursos naturais não renováveis, como a areia e a brita são consumidos anualmente por este setor, além de cerca de um trilhão de litros de água potável, sem considerar aquela necessária para a lavagem das betoneiras e equipamentos complementares, bem como para a cura do concreto (PACHECO *et al.*, 2019).

Ainda que seja fundamental para a melhoria da qualidade de vida das populações por viabilizar as construções habitacionais e de infraestrutura, e apresente elevada vida útil em função de sua elevada resistência e durabilidade, todo o processo que envolve a produção do concreto é extremamente danoso ao meio ambiente (PACHECO *et al.*, 2019).

Pequisas indicam que o concreto de ultra-alto desempenho traz inúmeras vantagens, sendo a elevada resistência mecânica e o ganho de durabilidade, as mais relevantes. Mesmo que o rendimento<sup>1</sup> do UHPC (5,00 kg/m<sup>3</sup>/MPa) seja muito alto em relação ao dos concretos convencionais (10,10 kg/m<sup>3</sup>/MPa), é preciso considerar que

---

<sup>1</sup> Rendimento é o quociente entre o consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>) e a resistência (MPa).

seu custo é geralmente 20 vezes maior do que o custo de um concreto convencional e, o consumo de cimento, próximo do triplo (LI *et al.*, 2020).

Todas estas desvantagens de grande pegada ambiental, aliadas ao elevado custo acabam limitando o uso do UHPC, por isto as pesquisas mais recentes têm se concentrado em três vertentes: a busca pela redução do consumo de cimento, a incorporação de resíduos na matriz e a preferência pelo o uso de materiais locais.

No que tange a redução do consumo de cimento, alguns caminhos podem ser trilhados. O mais comum deles é a incorporação de materiais pozolânicos tais como a sílica ativa, ou de finos inertes, geralmente resíduos de outros processos industriais, que além de substituir parte do cimento promovem ganhos de resistência mecânica, além da redução da retração autógena, da porosidade e da permeabilidade da matriz, o que implica no aumento da durabilidade do compósito.

Outra vertente está relacionada com a incorporação de agregados miúdos de maiores dimensões (*coarser fine aggregates*) e/ou de agregados graúdos, e/ou ao aumento do volume de agregados nas matrizes de UHPC. Alguns estudos como os de Ma *et al.* (2002); Lai *et al.* (2015); Pyo *et al.* (2017), Sohail *et al.* (2018); Li *et al.* (2018), Haile *et al.* (2019), Yang *et al.* (2020) e Zeng *et al.* (2020) que contemplam o uso de agregados miúdos de até 5 mm e/ou agregados graúdos de origem basáltica, demonstram que o emprego de grãos de maiores dimensões no CA-UHPC tem propiciado a obtenção de níveis de resistência à tração e compressão similares aos dos concretos produzidos sem agregados graúdos, e em alguns casos nota-se o aumento do módulo de elasticidade, porém os resultados mostram que a ductilidade pode ser prejudicada. Do ponto de vista de trabalhabilidade, da ocorrência de retração e do custo, o uso mais efetivo dos agregados tem se mostrado benéfico.

O volume de agregados é geralmente determinado por meio de métodos de empacotamento que tem por princípio buscar a melhor combinação entre os materiais selecionados de forma a se obter o menor índice de vazios, que por sua vez será preenchido pela pasta de cimento e adições. Quanto maior o volume ocupado pelos agregados, menor será o volume de pasta necessário para preencher estes espaços e promover a fluidez das misturas.

Porém, contrariamente a esta premissa, a busca pela obtenção de UHPCs autoadensáveis se reflete no elevado teor de pasta presente em grande parte dos traços. Além disso, estudos comprovam que, em alguns casos a quantidade de cimento especificada é maior do que a necessária, e que o aumento no consumo de cimento pode resultar na redução da resistência quando a distribuição combinada das partículas é composta por muitas partículas de tamanhos aproximados, o que também é comum no UHPC (YURDAKUL *et al.*, 2013; VATANNIA, *et al.*, 2020).

Conforme abordado no início deste capítulo, é necessário que indústria do concreto assuma seu papel social na conservação do meio ambiente. É sabido que as reservas de areia natural têm sido excessivamente exploradas e em função disso, os órgãos responsáveis vêm coibindo essa extração em algumas regiões do país, fazendo com que o custo do material se torne cada vez mais elevado e o seu uso, mais restrito. Em função disto, a areia artificial, que durante muito tempo, indiretamente foi considerada como um resíduo do processo de produção de agregados graúdos, vem ganhando espaço na composição dos traços de concreto, inclusive nos de alto e de ultra-alto desempenho (CAMPOS, 2019).

Conciliar a necessidade da redução do consumo de cimento com a utilização de agregados artificiais se torna uma alternativa atraente na busca pela dosagem de concretos mais sustentáveis e de menor custo. Posto isto, o principal desafio passa a ser otimizar a proporção de cada um dos componentes do UHPC de modo a se obter um denso sistema de empacotamento de partículas que leve ao atendimento das propriedades desejáveis tanto no estado fresco, quanto no endurecido. De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), entende-se como estudo de dosagem os procedimentos necessários para a obtenção do proporcionamento dos materiais que constituem o traço de concreto para atendimento dos requisitos especificados pelo projeto estrutural e pelas condições da obra.

O número de pesquisas sobre UHPC vêm crescendo significativamente nos últimos anos. Uma busca na base de dados *Scopus*<sup>®</sup> considerando um conjunto de palavras chave ("*ultra-high performance concrete*"; "*ultra high-performance fiber-reinforced concrete*"; "*coarse aggregates ultra high performance concrete*"; "concreto de ultra-alto desempenho"; "*reactive poder concrete*"; "concreto de pós reativos") retornou 4102 documentos (período 1994-2021), dos quais 57% referem-se a artigos

publicados entre 2016-2021, sendo que período 2019-2021 tem-se 35% do total, mostrando o crescente interesse pelo tema.

Entretanto, muitos destes estudos têm como objetivo principal avaliar as propriedades e os benefícios do UHPC frente à alteração de um ou mais parâmetros que se referem à sua composição e/ou ao processo de produção. Para tanto, partem de traços pré-definidos, originados e/ou adaptados de outros estudos, ou então, não deixam explícita o método de dosagem empregado.

Com o avanço da computação, as pesquisas mais recentes tais como Ghafari *et al.* (2015); Koutný *et al.* (2016); Wang *et al.* (2019); Khosravani *et al.* (2019); Haile *et al.* (2019); Ragalwar *et al.* (2020); Dingqiang *et al.* (2020); Garcia (2020); Solhmirzaei (2020) e Abuodeh *et al.* (2020), têm se voltado para o desenvolvimento de modelos teóricos, de complexo entendimento. Isto posto, resta uma lacuna na apresentação de métodos de dosagem experimental que possam ser integralmente replicados, tais como o que foi proposto por Christ (2019).

Diante de todo este contexto, justifica-se a proposição desta tese de doutorado que tem por objetivo desenvolver um método de dosagem racional de concretos de ultra-alto desempenho que contempla a utilização de areia artificial de basalto, associada ao emprego do mínimo volume de pasta.

Com isto pretende-se contribuir com o desenvolvimento tecnológico a partir de uma perspectiva racional, visando:

- A redução do consumo de cimento, por meio do aumento do teor de agregados, como uma abordagem econômica e sustentável;
- A utilização de agregados miúdos de maiores dimensões visando reduzir o custo de produção;
- O emprego do agregado artificial *in natura*, da forma como é fornecido, sem qualquer peneiramento ou lavagem, também como uma abordagem econômica e sustentável;
- A otimização do emprego de materiais de custo mais elevado, tais como a areia natural, a sílica ativa e o pó de quartzo.

## 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está estruturado em cinco capítulos, a saber:

O primeiro capítulo objetiva introduzir o assunto a ser tratado, destacando a relevância do tema e ressaltando a necessidade do desenvolvimento de estudos relacionados a esta área de conhecimento. Este capítulo contempla o contexto do problema, os objetivos, a estratégia de pesquisa e a estrutura do documento.

O segundo capítulo resume os conceitos, definições e parâmetros correlatos encontrados na literatura e que são relevantes para este estudo.

O capítulo três descreve as etapas do método de dosagem racional proposto como objetivo desta pesquisa.

O quarto capítulo abrange o desdobramento do método através do programa experimental.

O capítulo cinco contempla a análise comparativa e a interpretação e dos resultados determinados no programa experimental, bem como a análise do experimento de validação, desenvolvido com o propósito de corroborar o método proposto como objetivo desta pesquisa.

O sexto capítulo apresenta as conclusões da pesquisa e estabelece recomendações para estudos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O conteúdo deste capítulo está dividido duas partes: a revisão da literatura e o levantamento de parâmetros de trabalhos correlatos. A revisão da literatura contempla quatro vertentes: apresenta uma visão geral sobre o concreto de ultra-alto desempenho; a teoria relacionada ao empacotamento de partículas, com destaque para o método de empacotamento úmido proposto por Wong e Kwan (2008) e para os modelos de empacotamento granular de Andreasen e Andersen modificado e de Toufar. Versa também sobre conceitos referentes ao volume de vazios e à teoria de excesso de pasta, e por fim, descreve as ferramentas empregadas na análise estatística dos resultados desta pesquisa.

O levantamento de parâmetros de trabalhos correlatos tem por objetivo identificar parâmetros comuns aos traços de concreto de ultra-alto desempenho apresentados em pesquisas desenvolvidas ao longo dos últimos 25 anos.

### 2.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

Desde sua concepção, o concreto de ultra-alto desempenho tem promovido significativo impacto na construção civil em função de suas características diferenciadas que podem proporcionar maior resistência à compressão, à tração, ductilidade e durabilidade frente ao ataque de agentes agressivos, tais como os cloretos, sulfatos e o dióxido de carbono (ACI, 2018; HAILE *et al.*, 2019; SOHAIL *et al.*, 2021).

Sua aplicação de maior destaque consiste na construção de estruturas esbeltas sujeitas à flexão tais como a passarela com vão de 42,81 metros, situada na foz do Barranco de las Ovejas (Alicante) na Espanha (Figura 1). Esta é a primeira passarela treliçada do mundo constituída integralmente de concreto ultra-alto desempenho reforçado com fibras metálicas (UHPFRC – *Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*) e que substituiu um projeto anterior em aço, com custos



de produção e peso semelhantes, maior durabilidade e redução nos custos de manutenção (SERNA *et al.*, 2015; BUTTIGNOL *et al.*, 2018).

**Figura 1 - Passarela de UHPC sobre o Barranco de las Ovejas (Alicante)**



Fonte: Serna *et al.* (2015); ©Prefabricados Formex S.L. (2020)

Além da crescente utilização em pontes e passarelas, o UHPC também tem sido empregado na construção elementos de fachadas e de cobertura (cascas), de torres eólicas, em estruturas que requerem elementos de elevada resistência ou elevado nível de proteção (resistência à explosão, cargas de projéteis, elementos radioativos e resistência ao impacto de embarcações em estruturas navais como eclusas), nas conexões estruturais de elementos pré-fabricados, e ainda, como material para recuperação, reforço e reabilitação estrutural (ACI, 2018; BUTTIGNOL *et al.*, 2018; CHRIST, 2019).

Nesta última aplicação, o material assume simultaneamente as funções estrutural e de proteção contra impactos e ação do fogo, reduz o desgaste devido às intempéries, e, em função de sua baixa permeabilidade, minimiza o ingresso de agentes agressivos que favorecem a instauração de manifestações patológicas. Outra característica de destaque é a excelente aderência que o compósito apresenta quando em contato com o concreto convencional (ENAMI, 2017; BUTTIGNOL *et al.*, 2018).

Apesar da existência de inúmeras pesquisas, normas, guias, especificações, padrões e procedimentos referentes ao material, ainda não existe um consenso absoluto no estabelecimento dos parâmetros que definem um concreto como UHPC.

Entretanto, é de senso comum que este material apresenta uma combinação de atributos positivos, incluindo alta resistência mecânica a baixas idades (melhorada pelo tratamento térmico), elevada fluidez, baixa permeabilidade devido à estrutura de poros descontínua e excelente durabilidade, que são alcançados devido à alta otimização do empacotamento das partículas e da microestrutura mais densa com porosidade quase inexistente (MANGULKAR E JAMKAR, 2013; PERRY, 2018; SOHAIL *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; VIANA *et al.*, 2020; AKHNOUKH E BUCKHALTER, 2021) .

Atualmente, a França dispõe de duas normas referentes ao concreto ultra-alto desempenho: a NF P 18-470 e a a NF P 18-710. A primeira versa sobre as especificações, performance, produção e conformidade do UHPFRC, enquanto a segunda está voltada ao projeto de estruturas em UHPFRC. Segundo a NF P 18-470 (AFNOR, 2016) o concreto ultra-alto desempenho reforçado com fibras, denominado *Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances* (BFUP) é caracterizado por apresentar resistência à compressão superior a 130 MPa e elevada resistência à tração pós-fissuração tal que permita a obtenção de um comportamento dúctil sob tensão. A adição de fibras à dosagem permite o dimensionamento de elementos estruturais sem o emprego de armaduras de reforço. A relação água/aglomerante é limitada a 0,25 com o objetivo de reduzir a porosidade capilar e a dimensão máxima do agregado, a 10 mm. Sua massa específica deve variar entre 2200 e 2800 kg/m<sup>3</sup>.

O BFUP pode ser classificado de acordo com o tipo de fibra empregado (Tipo M – fibras metálicas ou Tipo A – outros tipos de fibra tais como PVA, vidro, polipropileno), em função das condições ambientais do meio a que será exposto, da resistência aos agentes agressivos (porosidade à água, difusão de cloretos e permeabilidade aparente à penetração de gases), da consistência, do tratamento térmico e da abrasão hidráulica. Além disso, a NF P 18-470 (AFNOR, 2016) segmenta o BFUP em três classes de resistência à tração (mínimo de 6,0 MPa aos 28 dias) e em seis classes de resistência à compressão (130/145; 150/165; 175/190; 200/215; 225/240; 250/265 MPa aos 28 dias).

Por sua vez, o ACI 239R (2018) define o concreto de ultra-alto desempenho como uma classe de materiais cimentícios avançados com resistência à compressão mínima de 150 MPa, com ductilidade à tração, durabilidade especificada e requisitos

de tenacidade. De acordo com o relatório, fibras são geralmente incluídas visando atingir os requisitos especificados.

Perry (2018) efetuou um levantamento com base na documentação vigente sobre UHPC em países como Estados Unidos, Canadá, Suíça, França, Japão, Coreia, China e Espanha, dentre outros, e, a partir de especificações similares propôs uma definição global para o concreto de ultra-alto desempenho, a saber:

Compósito cimentício que apresenta maior resistência, durabilidade e ductilidade à tração em comparação à concretos de alto desempenho e deve conter fibras ou malha para garantir a durabilidade pós-fissuração e resistência à compressão especificada de pelo menos 120 MPa aos 28 dias (PERRY,2018, p.103).

Algumas características comuns aos estudos relacionados ao UHPC são: resistência à compressão acima de 150 MPa, relação água/aglomerante entre 0,15 e 0,25, elevado teor de aditivo superplastificante que visa promover uma fluidez igual ou superior à do concreto autoadensável (SCC – *Self-Compacting Concrete*), o uso de areias muito finas e a presença de fibras, geralmente metálicas. Além do cimento, tem-se uma mescla de materiais cimentícios suplementares com propriedades pozolânicas tais como sílica ativa, metacaulim, cinza volante, escória de alto forno e cinza de casca de arroz (WANG *et al.*, 2015; KANG *et al.*, 2018; DINGQIANG, *et al.*, 2020).

A sílica ativa é usualmente empregada com as funções de preencher os vazios existentes entre as partículas da classe superior (geralmente o cimento), melhorar as características reológicas da pasta em função do formato esférico de seus grãos e produzir hidratos secundários por meio da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação primária do cimento (RICHARD E CHEYREZY, 1995; BAJABER E HAKEEM, 2021).

Destaca-se ainda que as partículas de sílica bem dispersas atuam como centros de cristalização de hidratos de cimento, de forma ainda mais eficaz sob tratamento térmico. Esses centros são muito ativos e reagem rapidamente com os cristais de portlandita resultantes, promovendo ganhos no desenvolvimento da resistência mecânica tanto em baixas idades, como em idades avançadas. No UHPC, a presença de elevados volumes de sílica acelera a reatividade pozolânica, ou seja, a

reação da sílica com hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, cuja taxa de atividade é influenciada principalmente pela superfície específica da pozolana, a razão água/aglomerante e a temperatura de cura (HIREMATH E YARAGAL, 2017; CAMPOS *ET AL*, 2020).

Além das pozolanas, materiais inertes como o pó de quartzo e o fíler calcário têm sido utilizados com a função de contribuir para o empacotamento da mistura, além de fornecerem pontos para a nucleação e o crescimento dos produtos de hidratação, acelerando assim a hidratação do cimento (KANG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; SOHAIL *et al.*, 2021). No que diz respeito à composição mineral, o emprego do pó de quartzo é vantajoso em função da sua elevada dureza e, também, por promover uma excelente interface pasta/agregado (RICHARD E CHEYREZY, 1995).

Assim como ocorre com a sílica ativa, sob cura térmica a 90°C e a pressão atmosférica, a reatividade do pó de quartzo aumenta rapidamente e ele também passa a atuar como um material pozolânico. A força combinada destes dois compostos resulta em maior resistência e durabilidade para o UHPC (HIREMATH E YARAGAL, 2017).

A reatividade máxima do pó de quartzo durante o tratamento térmico é obtida para um tamanho médio de partículas entre 17 µm e 25 µm. Entretanto, vale destacar que quando amorfo e na presença de elevadas temperaturas, o pó de quartzo pode propiciar a formação de outras reações pozolânicas, incrementando a resistência da pasta e da zona de transição, além de reduzir a espessura desta camada, promovendo melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade do compósito (RICHARD E CHEYREZY, 1995; BIZ, 2001).

De acordo com Akhnoukh e Buckhalter (2021), a substituição parcial do cimento pelo pó de quartzo não deve exceder 30% do peso do cimento, caso contrário, a formação de ligantes será diminuída e a resistência à compressão do concreto será negativamente impactada.

A cura térmica tem efeito significativo no desenvolvimento de resistência do UHPC em função da presença de altos teores de materiais cimentícios. A elevação da temperatura nas idades iniciais tem a função de modificar a microestrutura dos hidratos formados, reduzindo as razões entre CaO/SiO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O/CaO, promovendo a formação de cristais de tobermorita (Ca<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>(OH)24H<sub>2</sub>O) em temperaturas entre

100 e 150°C. Na temperatura de 150°e 200°C ocorre a formação de partículas de *xonotlite* secundária e de *xonotlite* ( $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ ) entre 200°e 250°C. Por se tratarem de compostos da família do C-S-H, sua presença aumenta a resistência do UHPC nas primeiras idades. Estudos indicam que em temperaturas acima de 200°C, é possível se observar uma diminuição do espaçamento entre camadas de C-S-H, juntamente com um aumento da sua cristalinidade (COURTIAL *et al.*, 2013; ZDEB, 2013; HIREMATH E YARAGAL, 2017).

É importante destacar que, além da composição do UHPC, tanto o regime de cura, quanto a sua duração e a temperatura têm influência nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto de ultra-alto desempenho (ZANNI *et al.*, 1996; WU *et al.*, 2017; SHEN *et al.*, 2019). Por exemplo, Chang *et al.* (2009) identificaram um ganho de 15% na resistência à compressão de traços compostos por 553 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 15% de sílica, submetidos à cura a vapor a 85°C. As resistências alcançaram 124 MPa aos 28 dias. Para Lu *et al.* (2021), o ganho de resistência foi da ordem de 16% em um traço contendo 672 kg/m<sup>3</sup> e 25% de sílica ativa. A resistência atingiu 121 MPa após as amostras serem submetidas à cura úmida na temperatura de 45°C até a data de ensaio. Já Queiroz (2018) registrou um incremento de 18% na resistência após submeter as amostras à cura térmica em estufa a 200°C durante 24 horas. Com consumo de cimento de 900 kg/m<sup>3</sup>, 27% de sílica ativa e 28% de pó de quartzo, os exemplares atingiram 208 MPa aos 28 dias.

O concreto de ultra-alto desempenho sem a presença de fibras é considerado um material frágil, entretanto sua incorporação proporciona um ganho considerável na capacidade resistente e de deformação do compósito, resultando no aumento da tenacidade. Fibras de aço são comumente usadas em matrizes UHPC em função de sua resistência à tração superior, elevado módulo de elasticidade, alta ductilidade e elevada durabilidade frente ao meio alcalino. Contudo, outras fibras tais como as de carbono, basalto, vidro, polipropileno, polietileno e PVA também podem ser empregadas. Cada um destes materiais promove benefícios específicos em função de suas características intrínsecas (BANTHIA E GUPTA, 2004; SHI *et al.*, 2015; KANG *et al.*, 2016; BUTTIGNOL *et al.*, 2017; CHRIST, 2019).

A adição de fibras metálicas tem uma influência muito positiva sobre a resistência à tração, mesmo após o aparecimento das primeiras fissuras, promovendo

o aumento da ductilidade e da tenacidade do UHPC. Porém esta ação depende do fator de forma das fibras, ou seja, da relação entre o seu comprimento e diâmetro, do teor de fibras empregado na mistura e da relação entre o comprimento das fibras e o diâmetro máximo do agregado, dentre outros (MARTINIE, ROSSI E ROUSSEL, 2010; BAJABER E HAKEEM, 2021).

Estudos mais recentes abordam a composição de matrizes híbridas através da combinação de diferentes tipos de fibras na busca pelo aprimoramento das propriedades mecânicas do UHPC (SHI *et al.*, 2015; SOHAIL *et al.*, 2018). Segundo Kang *et al.* (2016), a combinação entre macrofibras e microfibras tem influência na propagação das fissuras durante os diferentes estágios de carregamento. Os resultados apontam para uma maior resistência e tenacidade em comparação com o concreto reforçado apenas com um único tipo de macrofibra. Isso ocorre porque as microfibras induzem o retardo da formação de microfissuras, que, por sua vez, governam a resistência à tração.

Rompa e Gidrão (2020) constataram em seus estudos que o emprego de 1,2% de fibras metálicas promoveu um ganho de 21% na resistência à compressão e de 50% na tenacidade do UHPFRC em comparação ao compósito sem a fibra, enquanto Christ (2019) observou um acréscimo de 13% na resistência de matrizes contendo 2,9% de fibras e ensaiadas aos 91 dias de idade. Já Kang *et al.* (2010) demonstraram que a resistência à tração na flexão do UHPFRC aumenta linearmente com o incremento da proporção volumétrica de fibras metálicas no intervalo de 0% a 5%.

Porém, vale salientar que a fluidez das misturas geralmente é afetada pela presença das fibras. O aumento no volume de fibras reduz a trabalhabilidade e pode promover a formação de aglomerados durante o processo de mistura, aprisionando ar e, por consequência, afetando negativamente as propriedades mecânicas do compósito. Este efeito também tende a aumentar com o incremento do fator de forma da fibra (MARTINIE, ROSSI E ROUSSEL, 2010; SHI *et al.*, 2015; SOHAIL *et al.*, 2018).

Visando determinar o teor máximo de fibras possível em uma mistura de UHPFRC, sem que ocorra perda significativa de fluidez ou a formação de aglomerados na mistura, Martinie, Rossi e Roussel (2010) propuseram a Equação 1 que correlaciona o fator de forma da fibra ( $f$ ), o empacotamento da areia na mistura ( $o_s$ ) e o máximo empacotamento possível da areia na mistura ( $o_m$ ).

$$T_{fibras} = \frac{400}{f} * \left(1 - \frac{o_s}{o_m}\right) \quad (Eq. 1)$$

Em que:

$T_{fibras}$  – máximo teor de fibras a ser inserido na mistura (%);

$f$  – fator de forma da fibra;

$o_s$  – densidade de empacotamento da areia na mistura;

$o_m$  – máxima densidade de empacotamento possível da areia na mistura.

A equação indica que é possível aumentar o volume de fibras no compósito por meio da redução do fator de forma da fibra ou pela escolha de uma areia com maior densidade de empacotamento, como é o caso das areias naturais de grãos mais arredondados.

De acordo com Martinie, Rossi e Roussel (2010), se a fração de empacotamento relativa total ( $T_{fibras} * f/4 + o_s/o_m$ ) variar entre 0,8 e 1,0 pode-se considerar que a mistura está otimizada. Valores próximos a 1,0 indicam que a mistura será pouco fluida, enquanto aqueles em torno de 0,8 podem dar origem a pastas de elevada fluidez e características autoadensáveis.

Com o objetivo de evitar o limite de resistência intrínseco do agregado graúdo, superar a fragilidade entre o agregado graúdo e a matriz da pasta (zona de transição), aumentar a homogeneidade e eliminar a concentração de tensão nos pontos de contato entre esses agregados (microfissuração), a maioria dos concretos de ultra-alto desempenho são dosados apenas com o emprego de agregados miúdos finos (diâmetros entre 150 e 600  $\mu\text{m}$ ), ou daqueles que foram refinados (RICHARD E CHEYREZY, 1995; SONG E LIU, 2016; SOHAIL *et al.*, 2018).

Segundo Richard e Cheirezy (1995), tanto a areia natural quanto a areia podem ser usadas para a produção do UHPC. Enquanto a areia artificial apresenta grãos altamente angulares, os grãos da areia natural são mais esféricos, fazendo com que a demanda de água seja um pouco menor, o que é preferível. Além disso, o formato arredondado dos grãos melhora a trabalhabilidade da mistura, justificando seu uso frequente em UHPC.

A maioria das pesquisas que incorporam os agregados miúdos de maior diâmetro e/ou graúdos em UHPC opta por aqueles de origem basáltica em função da sua elevada resistência intrínseca (acima de 150 MPa), por propiciar a produção de concretos com maior resistência mecânica, módulo de deformação e resistência ao impacto em comparação às demais rochas, além da formação de uma zona de transição mais reforçada (LAI et al., 2015; ZENG et al.,2020). Leroy et al. (2017) concluíram que a substituição total de areia natural por areia artificial de basalto em concretos convencionais promoveu um ganho de 42% na resistência à compressão. Contudo a queda na fluidez também foi detectada, atestando que as propriedades mecânicas do concreto são influenciadas pela natureza e propriedades físicas do agregado

Em alguns estudos mais recentes observa-se também a inclusão de agregados miúdos mais grossos (até 5 mm) e de agregados graúdos (até 16 mm) incorporados à mistura visando efeitos como a redução do consumo de cimento, a minimização da ocorrência da retração por secagem e autógena, o aumento da resistência mecânica (em função da resistência intrínseca do agregado), além de redução dos impactos ambientais (substituição de materiais obtidos a partir de processos industriais poluentes e redução do uso de recursos naturais escassos, como a areia de rio) e do custo final do concreto (MA E DITZ, 2002; WANG *et al.*,2012; PYO *et al.*, 2017; ACI, 2018; LI *et al.*, 2018; VATANNIA *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2020; ZENG *et al.*,2020; ZHU *et al.*, 2020).

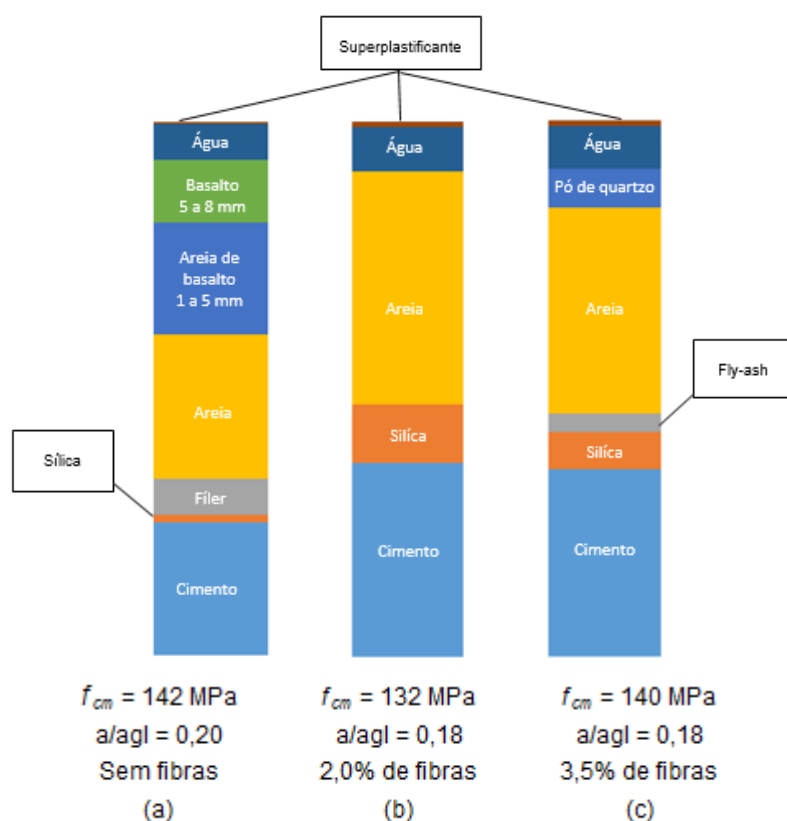
Por meio da Figura 2 pode-se observar as diferenças na composição de três traços de UHPC adotados em pesquisas recentes. O traço (a) de Li *et al.* (2018) contém basalto em sua composição, empregado nas frações de agregado miúdo grosso (1 a 5 mm) e agregado graúdo (5 a 8 mm). Já o traço (b) de Liu *et al.* (2020) representa a composição típica de um UHPC (cimento, sílica e areia fina), enquanto no traço (c) de Zhu *et al.* (2020) além das fibras, tem-se a incorporação de mais um material pozolânico e do pó de quartzo, o que acarreta no aumento do teor de superplastificante, dada a maior quantidade de finos na mistura.

É interessante destacar que apesar das composições serem distintas, a relação água/aglomerante e resistência à compressão dos três traços aos 28 dias é similar. Outro ponto a se observar é que, além de não conter fibras em sua



composição, em função do maior consumo de agregados, o traço (a) é o que apresenta a maior resistência mecânica, o menor consumo de aglomerantes, a menor quantidade de água e a maior relação água/aglomerante (a/agl) dentre os três.

**Figura 2 - Comparação entre as composições de UHPC: (a) Li *et al.* (2018); (b) Liu *et al.* (2020); (c) Zhu *et al.* (2020)**



**Fonte: Autoria própria**

É notório que o princípio mais básico de dosagem do concreto de ultra-alto desempenho está relacionado com a busca pela obtenção de um sistema de empacotamento de partículas bastante denso. Para tanto é necessário otimizar as proporções entre seus componentes com precisão e eficiência. Alguns modelos clássicos de empacotamento de partículas podem ser empregados com este objetivo (DINGQIANG *et al.*, 2020; FAN *et al.*, 2020).

## 2.2 EMPACOTAMENTO GRANULAR

Grande parte dos materiais naturais ou de origem industrial que compõem o concreto são, ou contém, partículas de diferentes formas e tamanhos e o comportamento destes materiais depende parcialmente das propriedades das partes que o compõem e das interações entre elas (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009).

O empacotamento de partículas pode ser definido como a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos por partículas ainda menores, e assim, sucessivamente. Muitos são os métodos e modelos existentes, cada um considerando os efeitos geométricos e de interação entre grãos e a eventual presença de líquidos, resultando em diferentes densidades de empacotamento (DINGER E FUNK, 1997; CASTRO E PANDOLFELLI, 2009; VOGT, 2010; LONDERO *et al.*, 2017).

A densidade de empacotamento de partículas ( $\theta$ ) é um valor numérico definido como a razão entre o volume das partículas sólidas ( $V_s$ ) e o volume total ocupado por estas partículas ( $V_t$ ). Esta relação é representada pela Equação 2, e também pode ser expressa como o valor da unidade menos a porosidade ( $e$ ) (KWAN *et al.*, 2012; MANGULKAR E JANKAR, 2013; SOHAIL *et al.*, 2018).

$$\theta = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{V_s + V_v} = 1 - e \quad (Eq. 2)$$

Em que:

$\theta$  – densidade de empacotamento de partículas;

$V_s$  – volume de sólidos;

$V_t$  – volume total;

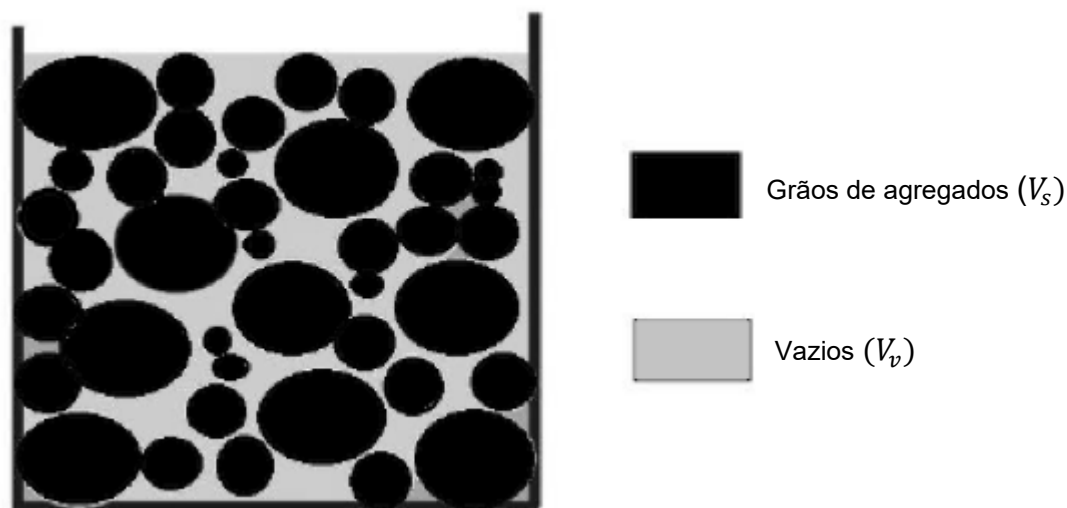
$V_v$  – volume de vazios;

$e$  – porosidade.

A Figura 3 é uma representação esquemática deste conceito onde se pode observar o volume total ( $V_t$ ), o volume ocupado pelos grãos de agregados ( $V_s$ ) e os

vazios presentes entre eles ( $V_v$ ). Nota-se que o volume de vazios nada mais é do espaço existente entre os grãos de uma determinada massa de agregados.

**Figura 3 - Representação da densidade de empacotamento**



Fonte: Adaptado de Mangulkar e Jankar (2013)

A densidade de empacotamento dos agregados ( $\varphi$ ) geralmente é definida a partir da determinação do índice de vazios ( $E_v$ ), por meio dos valores de massa específica relativa ( $ME$ ) e massa unitária ( $MU$ ) dos respectivos agregados. Este parâmetro pode ser estabelecido de acordo com as prescrições da NBR NM 45 (ABNT, 2006) ou pela ASTM C29 (ASTM, 2017) (CAMPOS, 2019; CAMPOS *et al.*, 2020). Esta relação é expressa pela Equação 3:

$$\varphi = 1 - \frac{ME - MU}{ME} = 1 - E_v \quad (Eq. 3)$$

Em que:

$\varphi$  – densidade de empacotamento do agregado;

$ME$  – massa específica relativa;

$MU$  – massa unitária média;

$E_v$  – índice de vazios.

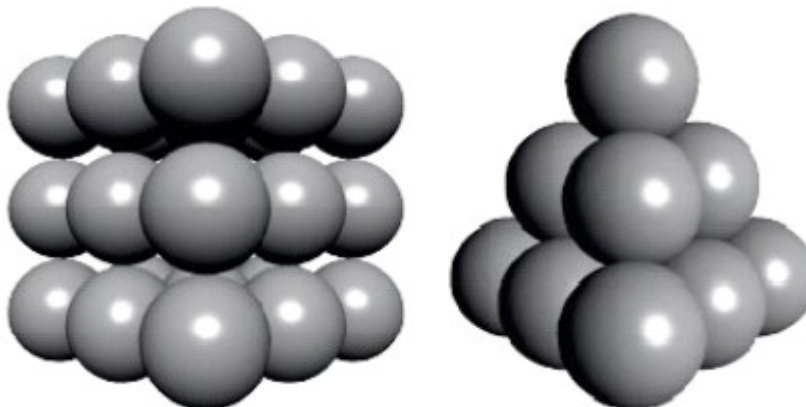
Algumas características dos agregados, tais como a distribuição granulométrica, a morfologia e a textura superficial dos grãos, podem influenciar a densidade de empacotamento sendo que quanto mais distante da forma esférica os grãos se apresentarem, maior será o espaço vazio entre as partículas, em função do atrito entre as mesmas que se dá partir do contato de suas superfícies irregulares, resultando na redução da densidade de empacotamento. Quanto menor for o tamanho das partículas irregulares, maior será esse efeito devido à maior superfície específica (DINGER E FUNK, 1997; CASTRO E PANDOLFELLI, 2009; VOGT, 2010; KWAN *et al.*, 2012; LI E KWAN, 2013; LONDERO *et al.*, 2017).

Este parâmetro também é dependente das proporções da mistura e dos diferentes tamanhos dos agregados contemplados no sistema. Na década de 1960, Powers sugeriu que sucessivos preenchimentos de vazios por partículas de tamanho menor poderiam aumentar a densidade de empacotamento dos agregados (LI E KWAN, 2013; LONDERO *et al.*, 2017).

Existem dois sistemas de empacotamento de partículas. O primeiro, considerado como monodisperso (monomodal) é aquele composto por grãos de tamanho uniforme, como se pode observar na Figura 4 (GOES *et al.*, 2020).

Se o sistema assumir a presença apenas de partículas esféricas perfeitas de apenas um tamanho, a densidade de empacotamento dependerá da estrutura formada por estas esferas. Estudos mostram que a estrutura de empacotamento cúbico (Figura 4a) resulta em uma densidade de empacotamento de 0,52, enquanto as estruturas piramidais podem alcançar 0,74 (Figura 4b) (VOGT, 2010).

**Figura 4 - Representação do empacotamento de um sistema monodisperso de esferas:  
(a) cúbico e (b) piramidal**



Fonte: Vogt (2010)

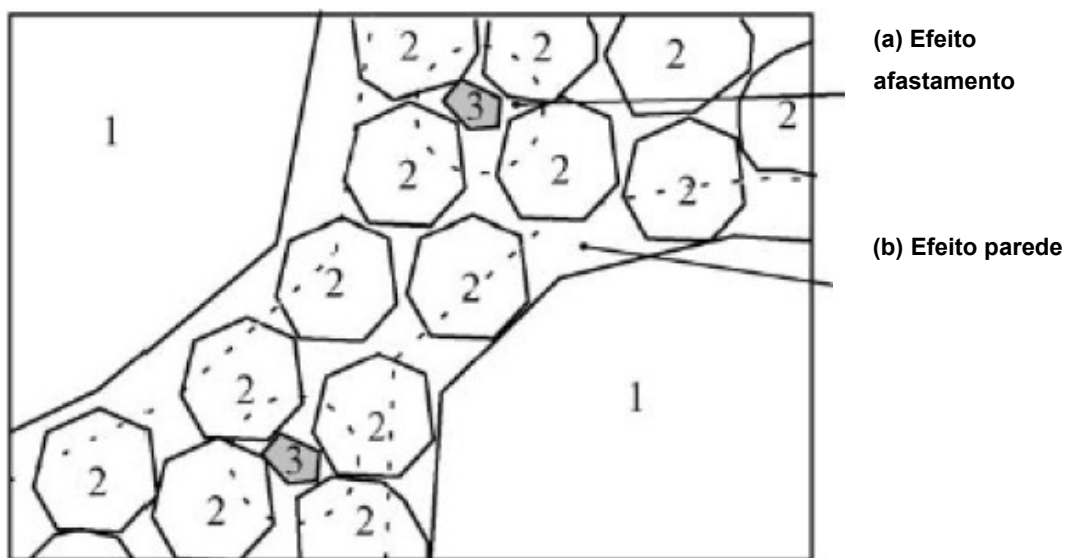
Entretanto, se houverem esferas de tamanhos menores disponíveis para preencher os espaços presentes entre as esferas maiores em uma sucessão ideal, formando misturas bimodais ou multimodais (duas ou mais classes de tamanho de esferas), a densidade de empacotamento do sistema aumenta. Por exemplo, uma mistura de quatro classes na proporção de tamanhos de 1:7:38:316 (sendo 6:10:23:61%, em volume) resulta em uma densidade de empacotamento teórica de 0.975 (VOGT, 2010; MANGULKAR E JANKAR, 2013).

Quando se considera a diversidade granulométrica dentro de uma mistura, o preenchimento dos vazios entre os agregados de maiores diâmetros pelas partículas de tamanhos menores é caracterizado pelo efeito de enchimento (MANGULKAR E JANKAR, 2013; LI E KWAN, 2014).

Porém, há de se considerar também os efeitos de interação entre as partículas. Quando o diâmetro de uma determinada classe de partículas (classe 3) for maior do que os vazios deixados pelo arranjo da classe de diâmetro imediatamente superior, ocorre um afastamento dos grãos maiores (classe 2), caracterizando o efeito de afastamento (*loosening effect*) e afetando a densidade de empacotamento das partículas maiores (Figura 5a). Na mesma imagem (Figura 5b) é possível observar o efeito parede (*wall effect*), que ocorre quando os diâmetros das partículas de duas classes são tão diferentes que a superfície de contato do grão mais grosso (classe 1)

funciona como um plano ao contato com os grãos mais finos (classe 2), aumentando os vazios no entorno das partículas finas (DE LARRARD, 1999).

**Figura 5 - Interação entre partículas: (a) efeito afastamento e (b) efeito parede**



Fonte: Adaptado de De Larrard (1999)

Estes conceitos foram incorporados em muitos dos modelos de empacotamento com o objetivo de melhorar a precisão e a aplicabilidade do empacotamento granular (CAMPOS, 2019).

### 2.2.1 Modelos de Empacotamento de Partículas

Os modelos clássicos de empacotamento de partículas são caracterizados por duas abordagens fundamentadas em diferentes princípios: a discreta, apresentada por Furnas (1931) e a contínua, proposta por Andreasen, em 1930 (DINGER E FUNK, 1997).

O modelo contínuo descreve a natureza da maioria das distribuições de partículas e considera que todos os tamanhos possíveis estão presentes. Neste contexto, grupos de partículas com uma distribuição de tamanho específico são combinados de modo que a distribuição total da mistura seja a mais próxima possível de uma curva ideal, formando um sistema polidisperso. Já os modelos de

empacotamento discreto consideram as partículas de forma individual, como monodispersões (DINGER E FUNK, 1997; CASTRO *et al.*, 2009; FENNIS E WALRAVEN, 2012; GOES *et al.*, 2020).

A abordagem discreta contempla o empacotamento de distribuições multimodais contendo dois ou mais tamanhos discretos de partículas. Nesse contexto, partículas grossas são compactadas densamente, formando uma estrutura fixa dentro da qual partículas menores são inseridas. Em um modelo de três componentes, as partículas de tamanho médio preenchem os espaços formados entre as partículas grossas e as partículas menores (finas) ocupam os vazios deixados pelas partículas médias e grossas. Uma suposição fundamental deste modelo consiste no fato de que, considerando-se um dado volume, cada classe de partículas será empacotada em sua densidade máxima (DINGER E FUNK, 1997).

Em 2006, Brouwers demonstrou que os dois modelos estão relacionados matematicamente e, na verdade podem ser considerados complementares para empacotamentos que consistem em múltiplos grupos de partículas monodispersas (FENNIS E WALRAVEN, 2012).

Considerando-se estas duas abordagens, os métodos de otimização do tamanho das partículas atualmente empregados podem ser divididos em três grupos: as curvas de distribuição granulométrica, os modelos analíticos de empacotamento e os Modelos de Elementos Discretos (DEM) que determinam, a partir de programas computacionais, a densidade de empacotamento máxima do conjunto granular de uma determinada distribuição de tamanho de partículas (FENNIS, 2011). Os dois primeiros são abordados a seguir.

### 2.2.1.1 Curvas de distribuição granulométrica

Há mais de um século diversos pesquisadores vem estudando o efeito da distribuição granulométrica dos agregados sobre o empacotamento de partículas na busca de determinar a curva granulométrica ideal. Este corpo de conhecimento começou a se formar em 1892, com o trabalho de Ferét. Na década de 1900, Fuller e Thompson propuseram uma curva granulométrica de distribuição contínua, dada pela

Equação 4, considerando o valor do módulo de distribuição ( $q$ ) - que pode variar de 0 a 1 - igual a 0,50 (MANGULKAR E JANKAR, 2013; LONDERO *et al.*, 2017; SOHAIL *et al.*, 2018).

$$CPFT = 100 * \left( \frac{D}{D_{m\acute{a}x}} \right)^q \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

$CPFT$  – porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a  $D$ ;

$D_{m\acute{a}x}$  – diâmetro máximo da partícula;

$D$  – diâmetro da partícula;

$q$  – coeficiente de distribuição que tem a função de ajustar a curva (fina à grossa).

Em 1930, Andreasen e Andersen aprofundaram os estudos de Fuller e Thompson e, tendo como base a mesma equação, apresentaram um modelo semi-empírico de empacotamento com base na distribuição contínua do tamanho das partículas. Entretanto estes autores não determinaram um valor específico para  $q$ , mas sim um intervalo, variando entre 0,33 e 0,50, de modo que os diferentes valores testados experimentalmente resultavam em variações nas curvas granulométricas (LONDERO *et al.*, 2017; SOHAIL *et al.*, 2018).

Na década de 1980, Funk e Dinger reconheceram que qualquer distribuição de tamanho real precisaria ter um limite inferior finito ( $D_{min}$ ), contrariamente à proposição de Andreasen e Andersen que assumia que a menor partícula seria infinitesimalmente pequena. O modelo de distribuição ideal proposto por aqueles autores (Equação 5), conhecido como modelo de Andreasen e Andersen modificado, ou modelo de Alfred, não contempla apenas o diâmetro do maior grão, mas também o do menor grão empregado na composição. É importante destacar que estes modelos consideram apenas o diâmetro das partículas na determinação da curva granulométrica ideal, sem ponderar o efeito da sua forma (FENNIS E WALRAVEN, 2012; MANGULKAR E JANKAR, 2013).



$$CPFT = \left( \frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) * 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

CPFT– porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a  $D_p$ ;

$D_p$ – tamanho da partícula;

$D_S$ – tamanho da menor da partícula;

$D_L$ – tamanho da maior da partícula;

$q$  – coeficiente de distribuição.

O valor do expoente  $q$  dá uma indicação da fração mais fina que poderia ser acomodada na mistura. Segundo Mangulkar e Jankar (2013), para concretos de alto desempenho este coeficiente geralmente varia entre 0,21 a 0,37, dependendo dos requisitos de trabalhabilidade da mistura. Para valores abaixo de 0,25, o empacotamento resultante é caracterizado por um elevado consumo de materiais finos (<250  $\mu\text{m}$ ), uma característica necessária na busca por misturas com propriedades autoadensáveis (SOHAIL *et al.*, 2018).

O aumento do expoente significa um aumento do volume de partículas mais grossas, e sua redução, um aumento na quantidade de finos. Funk e Dinger (1994) descobriram, através de simulações computacionais que para o valor de 0,37 obtém-se a mais elevada densidade de empacotamento. Reginato *et al.* (2013) consideram que a adoção de coeficientes de distribuição acima de 0,30 tende a impactar positivamente nos resultados de resistência mecânica.

Vanderlei (2004) ressalta que valores superiores a 0,37 podem gerar porosidade residual no empacotamento. De acordo com Yu *et al.* (2014), quando o expoente  $q$  assume valores superiores a 0,50, a mistura é calculada considerando um alto teor de partículas graúdas.

Ao longo dos últimos anos, diversos pesquisadores têm adotado este modelo para otimizar suas misturas de concreto, através do ajuste do coeficiente de distribuição com base em resultados experimentais ou na trabalhabilidade requerida (FENNIS E WALRAVEN, 2012).

Como um modelo clássico e prático, o modelo de empacotamento de partículas de Andreasen e Andersen modificado pode ser empregado para otimizar o esqueleto granular de concretos autoadensáveis, de alto desempenho e de ultra-alto desempenho (DINGQIANG *et al.*, 2020). Um breve levantamento efetuado na base de dados *Scopus*<sup>®</sup> indicou que, nos últimos cinco anos, foram publicados 40 artigos relacionados ao uso deste modelo de empacotamento na otimização de concretos de alto ou de ultra-alto desempenho.

### 2.2.1.2 Modelos Analíticos

Conforme citado anteriormente, a abordagem discreta contempla conjuntos idealizados de partículas de tamanho específico (monodispersões) na criação de modelos analíticos de empacotamento. Estes modelos podem ser classificados em bimodais (duas monodispersões), trimodais (três monodispersões) ou multimodais (mais de três monodispersões) e permitem calcular a densidade de empacotamento teórica de uma dada mistura por meio de equações matemáticas que determinam como as partículas de diferentes tamanhos interagem geometricamente (FENNIS E WALRAVEN, 2012; MANGULKAR E JANKAR, 2013; CAMPOS, 2019).

O início das pesquisas neste âmbito teve origem nos estudos de Furnas (1929). A teoria foi criada considerando a existência tão somente de partículas esféricas, e o empacotamento ideal como sendo uma mistura de dois materiais e baseou-se na suposição de que as partículas menores preenchem os vazios entre as partículas maiores sem afetar o empacotamento das partículas maiores, ou as partículas pequenas prevalecem na composição e as partículas maiores são embutidas no sistema (FENNIS E WALRAVEN, 2012; MANGULKAR E JANKAR, 2013).

Entretanto, sendo a obtenção de um sistema como esse relativamente difícil, Furnas (1931) aperfeiçoou a sua teoria e determinou que o máximo empacotamento ocorreria com três ou mais tamanhos de partículas discretas presentes em uma mistura. Neste cenário, a densidade de empacotamento dependeria das quantidades

e tamanhos das partículas presentes na composição (FENNIS E WALRAVEN, 2012; MANGULKAR E JANKAR, 2013; CAMPOS, 2019; GOES *et al.*, 2020).

Ao longo dos anos, outros modelos analíticos foram propostos. A diferença entre eles se dá no modo de interação das partículas, na energia de compactação empregada nos ensaios e nas equações matemáticas que os representam. Dentre eles destacam-se os modelos de Schwanda (1966), Aim e Gof (1967), Powers (1968); Toufar *et al.* (1976), Stovall *et al.* (1986); Yu and Standish (1987), Dewar (1999), Glavind e Pedersen (1999) e De Larrard (1999), denominado de modelo CPM (*Compressive Packing Model*) que permite determinar a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos compostos por  $n$  classes de tamanhos de grãos (FENNIS E WALRAVEN, 2012; LONDERO *et al.*, 2017; CAMPOS, 2019).

O Modelo de Toufar *et al.*, criado na década de 1970 e, posteriormente, modificado nos anos de 1990 (Goltermann *et al.*, 1997) tem como objetivo a maximização do grau de empacotamento de misturas multimodais. Fundamenta-se na premissa de que as partículas finas ( $d_1$ ) não são capazes de preencher os interstícios entre partículas grossas ( $d_2$ ), e, como resultado, toda a matriz consiste de dois sistemas: o primeiro, composto principalmente de partículas grossas densamente compactadas, e aquele que considera a existência de áreas de partículas finas compactadas com partículas grossas discretamente distribuídas (MAMIROV, 2019).

A densidade de empacotamento do conjunto granular é determinada por meio das Equações 6 a 8 (GOLTERMANN *et al.*, 1997; MAMIROV, 2019):

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{r_1}{\varphi_1} + \frac{r_2}{\varphi_2} - r_2 \left( \frac{1}{\varphi_2} - 1 \right) k_d * k_s} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$k_d = \left( \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$x = \frac{r_1}{r_2} * \frac{\varphi_2}{\varphi_1 (1 - \varphi_2)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

$\alpha_t$  – densidade de empacotamento do conjunto granular;

$\varphi_1$  – densidade de empacotamento da menor partícula;

$\varphi_2$  – densidade de empacotamento da maior partícula;

$d_1$  – diâmetro característico da menor partícula;

$d_2$  – diâmetro característico da maior partícula;

$r_1$  – fração volumétrica relativa da menor partícula;

$r_2$  – fração volumétrica relativa da maior partícula;

$k_d$  – fator de proporção entre os diâmetros das partículas;

$k_s$  – fator estatístico.

Nota-se, por meio da Equação 6, que a densidade de empacotamento é dependente da razão entre o diâmetro das duas classes de partículas, representado pelo fator  $k_d$  (FENNIS, 2011; MANGULKAR e JANKAR, 2013). O fator estatístico  $k_s$ , por sua vez, foi introduzido por Goltermann *et al.* (1997). Segundo os autores, comparações realizadas por meio de experimentos mostraram que a densidade de empacotamento de uma amostra de partículas não aumenta, conforme o esperado, quando uma pequena quantidade de partículas finas é adicionada ao sistema.

Para tanto, as Equações 9 e 10 passaram a ser utilizadas e o modelo veio a ser chamado de Toufar modificado (FENNIS, 2011).

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753} \text{ para } x < 0,4753 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$k_s = 1 - \frac{1 + 4x}{(1 + x)^4} \text{ para } x \geq 0,4753 \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que:

$x$  e  $k_s$  – fatores estatísticos.

Na prática, tanto o modelo de Toufar, quanto o de Toufar modificado podem ser empregados para estimar o empacotamento de sistemas de múltiplos componentes (FENNIS, 2011).

Em um sistema de múltiplos componentes pode-se assumir que quaisquer dois componentes formam misturas binárias. Logo, a densidade de empacotamento da mistura total é determinada pela soma da contribuição de todas as misturas binárias. Para misturas de três classes, inicialmente, as duas classes com a maior relação  $d_1/d_2$  são combinadas e sua densidade de empacotamento é calculada. Tem-se, então, um novo grupo de partículas que é combinado com a terceira classe (FENNIS, 2011; MANGULKAR E JANKAR, 2013).

Goltermann *et al.* (1997) compararam os valores de empacotamento determinados segundo os modelos de Aim e Gof, Toufar e Toufar modificado para o empacotamento experimental de misturas binárias e concluíram que o modelo Toufar modificado correspondeu muito bem aos graus de empacotamento medidos experimentalmente (MANGULKAR E JANKAR, 2013; MAMIROV, 2019).

Nos últimos anos, com o objetivo de determinar a densidade de empacotamento da forma mais precisa possível, novos métodos experimentais fundamentados em diferentes princípios, têm sido desenvolvidos. Wong e Kwan (2008) propuseram um método de empacotamento úmido em que se misturam os materiais cimentícios (cimento, sílica ativa, cinza volante, dentre outros) com água e, geralmente, o aditivo cuja função é reduzir a aglomeração e dispersar as partículas. A densidade aparente da pasta é medida para a posterior determinação da densidade de empacotamento, que passa a apresentar valores substancialmente superiores àqueles do empacotamento na condição seca (KWAN *et al.*, 2012; LU GU *et al.*, 2016; SOHAIL *et al.*, 2018).

### 2.2.1.3 Empacotamento úmido

O método experimental proposto por Wong e Kwan (2008) se baseia na produção de pastas com diferentes relações água/sólidos, que variam de insuficiente a mais do que suficiente para preencher os vazios entre as partículas sólidas (aglomerantes, e, eventualmente, adições inertes), seguida da determinação da massa de um volume previamente conhecido das pastas produzidas (KWAN E CHEN,

2012). A partir destes resultados calcula-se a concentração de sólidos ( $\phi$ ) e a relação de vazios ( $\mu$ ).

Ao longo de seus estudos, os autores perceberam que a forma como os materiais são misturados, bem como o tempo de mistura afetam os resultados e então, propuseram uma sequência para a produção das pastas, a saber:

1. Pré misturar os materiais cimentícios durante dois minutos;
2. Adicionar toda a água no misturador;
3. Adicionar metade dos materiais cimentícios e o superplastificante à cuba e misturar, em velocidade lenta, durante três minutos;
4. Dividir os materiais cimentícios restantes e o superplastificante em quatro partes iguais. Adicionar cada uma destas porções na cuba e misturar, em velocidade lenta, por três minutos;
5. Transferir a mistura para um recipiente cilíndrico (aproximadamente 180 cm<sup>3</sup>) e preenchê-lo em excesso para que posteriormente seja nivelado;
6. Determinar a massa do conjunto;
7. Repetir os passos anteriores para diferentes relações água/aglomerante (a/agl) até que a máxima concentração de sólidos seja encontrada (WONG E KWAN, 2008).

Existe uma relação água/sólidos correspondente à máxima concentração de sólidos, que ocorre quando as partículas estão fortemente compactadas umas às outras (KWAN E CHEN, 2012). Para que este valor possa ser determinado, o ensaio deve ser realizado dentro de uma faixa de a/agl tal que este ponto seja contemplado. Quando não há um intervalo específico a ser analisado, Wong e Kwan (2008) sugerem iniciar os ensaios com a relação água/aglomerante igual a 1,00, em volume, e ir reduzindo este valor até que se atinja a máxima concentração de sólidos.

Para a determinação da concentração de sólidos ( $\phi$ ) e a relação de vazios ( $\mu$ ), o volume de sólidos dos materiais cimentícios ( $V_c$ ) e o volume de água ( $V_w$ ), devem ser calculados por meio das Equações 11 e 12, respectivamente:

$$V_c = \frac{M}{\rho_w \mu_w + \sum_{i=1}^n \rho_i R_i} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$V_w = \mu_w * V_c \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que:

$V_c$  – volume de sólidos dos materiais cimentícios;

$V_w$  – volume de água;

$M$  – massa da pasta;

$\rho_w$  – densidade da água;

$\mu_w$  – relação água/sólidos, em volume;

$\rho_i$  – densidade relativa dos sólidos;

$R_i$  – razão volumétrica do sólido  $i$ .

Tendo sidos estabelecidos estes valores, a concentração de sólidos ( $\emptyset$ ) é dada pela Equação 13 e a relação de vazios ( $\mu$ ) é determinada por meio da Equação 14. A concentração de sólidos pode ser definida como a relação entre o volume de materiais sólidos e o volume da pasta, enquanto a relação de vazios é a razão entre o volume de vazios e o volume sólidos dos materiais (WONG E KWAN, 2008).

$$\emptyset = V_c / V \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\mu = \frac{(V - V_c)}{V_c} \quad (\text{Eq. 14})$$

Em que:

$\emptyset$  – concentração de sólidos;

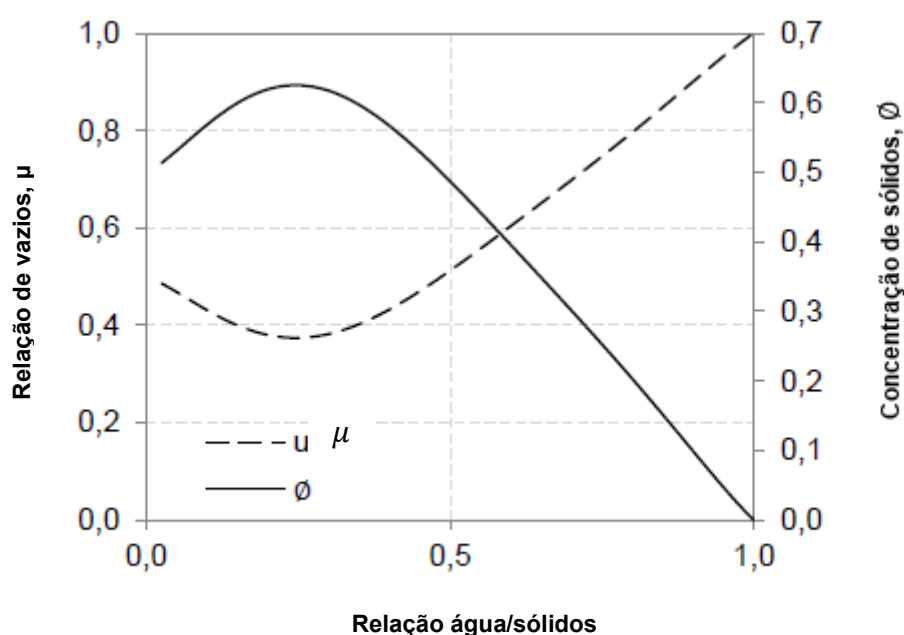
$\mu$  – relação de vazios;

$V$  – volume do recipiente;

$V_c$  – volume de sólidos dos materiais cimentícios.

O comportamento da relação de vazios e da concentração de sólidos em função da variação da relação água/aglomerante pode ser demonstrado graficamente (Figura 6).

**Figura 6 - Correlação entre a relação de vazios e a concentração de sólidos em função da relação água/sólidos**



Fonte: Adaptado de Andrade (2015)

Conforme pode-se observar, a concentração de sólidos inicialmente aumenta com o incremento da relação água/aglomerante e, então passa a diminuir à medida que a quantidade de água adicionada é mais do que suficiente para preencher os vazios existentes (KWAN E CHEN, 2012; WANG *et al.*, 2019).

Quando a relação a/agl é elevada, a relação de vazios também é alta indicando que as partículas estão mais afastadas umas das outras em função da presença do filme de água, formando uma suspensão com baixa concentração de sólidos. À medida que a relação água/aglomerante diminui, ocorre uma mudança na inflexão das duas curvas, indicando que a concentração de sólidos tende a atingir seu ponto de máximo e o índice de vazios, o ponto mínimo. Se a relação a/agl for reduzida



a partir deste ponto, a concentração de sólidos passa a reduzir também. Este comportamento indica que a camada de água ao redor dos grãos não é contínua e a água está se concentrando nos pontos de contato entre as partículas, e, devido à tensão superficial, afastando-as e provocando um elevado aprisionamento de ar na pasta. Neste cenário não há mais água suficiente para molhar a totalidade da superfície das partículas na mistura (KWAN E WONG, 2008; ANDRADE, 2015; KLEIN *et al.*, 2016).

Dentro do intervalo variável estabelecido para a relação  $a/agl$ , o método considera o ponto em que a concentração de sólidos é mais alta, assim como a relação de vazios mais baixa, como a densidade de empacotamento daquela mescla de materiais na condição úmida. A relação água/aglomerante correspondente a este ponto é considerada a mínima necessária para que ocorra a molhagem das partículas do sistema (WONG E KWAN, 2008; KWAN E CHEN, 2012; KLEIN *et al.*, 2016).

Os conceitos que relacionam a densidade de empacotamento e espessura do filme de água datam de 1980, quando Helmuth sugeriu que a espessura do filme de água envolvendo os grãos de cimento governa a consistência da pasta (WONG E KWAN, 2008).

A água existente nas pastas de materiais cimentícios está dividida em duas porções. A primeira é a água de enchimento, que irá ocupar os vazios entre as partículas sólidas, sem contribuir para a fluidez da pasta. A outra porção é formada pelo excesso de água, que irá formar um filme sobre a superfície das partículas sólidas e contribuir para a fluidez da pasta (FUNG E KWAN, 2010).

Segundo Kwan e Chen (2008), o excesso de água ( $\mu'_w$ ) que fisicamente representa o volume de água em excesso necessário para preencher os vazios entre as partículas sólidas, pode ser calculado por meio da Equação 15:

$$\mu'_w = \mu_w - \mu \quad (Eq. 15)$$

Em que:

$\mu'_w$  – excesso de água;

$\mu_w$  – relação água/sólidos, em volume;

$\mu$  – relação de vazios.

Os resultados negativos de  $\mu'_w$  indicam que a quantidade de água adicionada à pasta é inferior à demanda, ou seja, não é suficiente para preencher os vazios entre os grãos da pasta, levando ao aprisionamento de ar no seu interior, que por sua vez irá induzir a sucção capilar, fazendo com que a pasta fique mais seca e apresente fluidez, geralmente, muito baixa. À medida que o valor do parâmetro aumenta, a quantidade de vazios decresce, conseqüentemente a sucção capilar também diminui e a pasta se torna mais trabalhável. Quando o parâmetro se torna positivo, tem-se a indicação de que a pasta passa a apresentar níveis mais elevados de fluidez (KWAN E WONG, 2008; WONG E KWAN, 2008a; KWAN E CHEN, 2012)

Os valores situados no intervalo positivo assinalam que a água disponível é mais do que suficiente para preencher os vazios existentes e seu excesso, proveniente da condição de saturação da pasta formou filmes na superfície das partículas que servirão para lubrificar a mistura, resultando em diferentes taxas de fluidez para as distintas combinações, sendo que quanto menor for o valor de  $\mu'_w$ , menor será a fluidez da pasta. Independentemente de o valor do excesso de água ser positivo ou negativo, seu aumento promoverá alterações positivas na fluidez da pasta (KWAN E WONG, 2008; WONG E KWAN, 2008a; KWAN E CHEN, 2012; GHASEMI *et al.*, 2019).

Este fenômeno pode ser observado por meio da espessura do filme de água (*Water Film Thickness – WFT*) que reveste os sólidos e está diretamente relacionado com a superfície específica dos grãos ( $A_{CM}$ ) e com a densidade de empacotamento da matriz, e pode ser considerado o fator de maior importância na fluidez e na reologia da pasta, de argamassas e de concretos (FUNG E KWAN, 2010; KWAN E WONG, 2008; KWAN E CHEN, 2012; KWAN E LI, 2012; KLEIN *et al.*, 2016; GHASEMI *et al.*, 2019).

A superfície específica do conjunto de materiais cimentícios ( $A_{CM}$ ) por unidade de volume ( $m^2/m^3$ ), é dada pela Equação 16:

$$A_{CM} = A_{\tau}R_{\tau} + A_{\varphi}R_{\varphi} + A_{\omega}R_{\omega} \quad (Eq. 16)$$

Em que:

$A_i$ – superfície específica dos sólidos;

$R_i$ – razão volumétrica do volume do sólido  $i$ .

A partir dos valores de  $A_{CM}$  e de  $\mu'_w$ , a espessura média do filme de água que envolve as partículas ( $WFT$ ) pode ser calculada como (Equação 17):

$$WFT = \frac{\mu'_w}{A_{CM}} \quad (Eq. 17)$$

O relacionamento entre estes parâmetros mostra que o excesso de água forma um filme na superfície das partículas e a espessura deste filme é diretamente proporcional a  $\mu'_w$  e inversamente proporcional à superfície específica dos materiais cimentícios ( $A_{CM}$ ). Os valores da espessura do filme de água que resultam negativos indicam que a água adicionada não é suficiente para preencher os espaços vazios entre as partículas, levando ao aprisionamento de ar na pasta, a baixos níveis de fluidez, e, conseqüentemente, à provável redução da resistência mecânica (KWAN E WONG, 2008; KWAN E CHEN, 2012; LI *et al.*, 2018).

A pesquisa de Kwan e Chen (2012) mostra que existe um valor ótimo de  $WFT$  que leva à máxima resistência. Para espessuras acima desta, e que estão diretamente relacionadas ao aumento da relação  $a/agl$ , a resistência diminui. Por outro lado, quando a espessura do filme de água é muito baixa, a mistura perde homogeneidade, o que pode provocar o preenchimento incompleto dos vazios fazendo com que a resistência flutue em torno de um elevado desvio padrão. Para garantir a normalidade dos resultados, os autores sugerem a adoção de um  $WFT$  superior ao ideal.

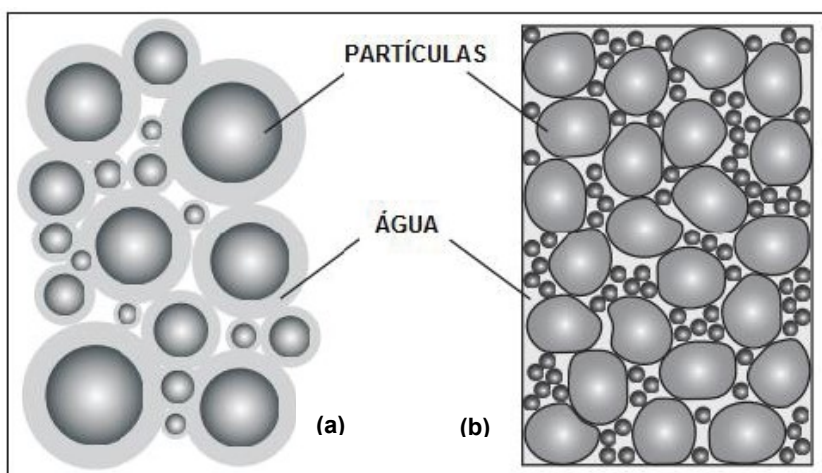
Como a água adicionada deve primeiro preencher os vazios entre as partículas sólidas e o seu excesso é que lubrifica as partículas sólidas, para um determinado volume de água, um aumento na densidade empacotamento reduz a quantidade de vazios a serem preenchidos, aumentando o volume de água em excesso, e, por conseguinte, melhorando a fluidez da mistura. Assim como, para um determinado nível de fluidez, a redução do volume de água promove benefícios em termos de resistência e durabilidade (KWAN E WONG, 2008; LI E KWAN, 2013).

Kwan e Wong (2008) observam que além desta relação entre os conceitos de excesso de água, densidade de empacotamento e superfície específica, outros parâmetros como o formato e o tamanho das partículas também podem afetar a fluidez da pasta, embora em menor intensidade. Partículas de formato esférico irão aliviar o intertravamento do esqueleto granular e melhorar a fluidez, enquanto a elevada finura irá aumentar a coesão e conseqüentemente, reduzir a fluidez.

A adição de sílica ativa ou outros materiais finos promove dois efeitos principais na fluidez da pasta. O primeiro (teoria do empacotamento) está relacionado com a elevada finura das partículas que passarão a preencher os espaços vazios entre os grãos de cimento, aumentando assim a densidade de empacotamento da mistura e, conseqüentemente, a parcela de água em excesso ( $\mu'_w$ ) disponível para lubrificar a pasta e promover a fluidez. Ou ainda, para uma dada fluidez permite a adoção de uma menor relação água/aglomerante, o que traz benefícios em termos de resistência mecânica e durabilidade (WONG E KWAN, 2008; FUNG E KWAN, 2010; LI E KWAN, 2013; KLEIN *et al.*, 2016; CAMPOS, 2019).

Por outro lado, devido à sua elevada finura, estes materiais irão promover um significativo aumento na superfície específica do conjunto ( $A_{CM}$ ) e, portanto, para o mesmo montante de água em excesso, a espessura do filme de água ( $WFT$ ) que recobre as partículas irá diminuir, assim como a fluidez da pasta (teoria das camadas de água). Logo, pode-se concluir que o aumento da densidade de empacotamento e da superfície específica promovem efeitos contrários sobre a fluidez da pasta, que poderão ser positivos ou negativos, dependendo da magnitude de cada um (WONG E KWAN, 2008; FUNG E KWAN, 2010; KLEIN *et al.*, 2016; CAMPOS, 2019). Estas teorias estão representadas na Figura 7.

Figura 7 - Teoria das camadas de água (a) e Teoria do empacotamento (b)



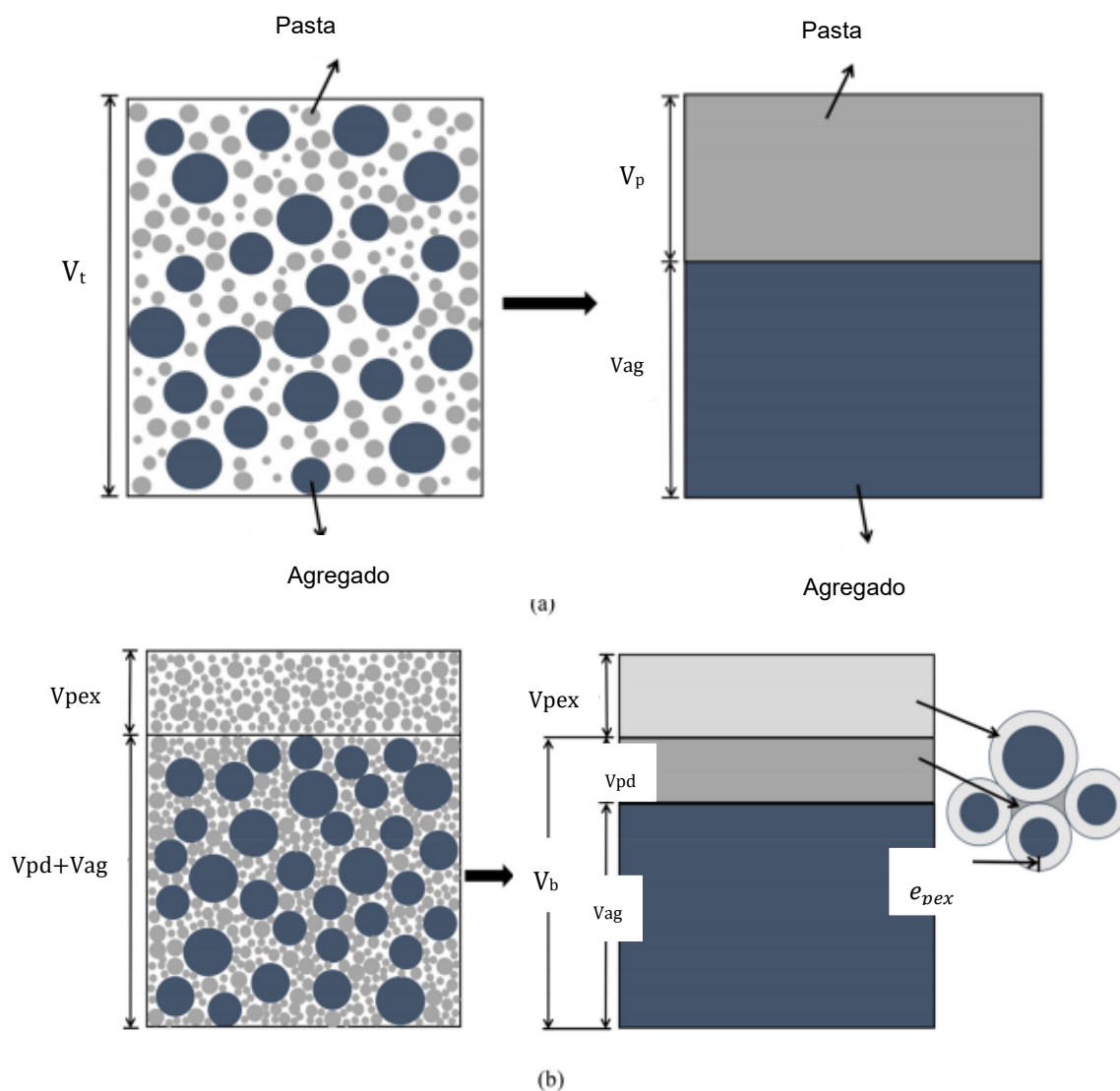
Fonte: Adaptado de Fennis (2011)

### 2.3 TEORIA DO EXCESSO DE PASTA

A água é o fluido que move as partículas finas. A união destas partículas forma a pasta, que por sua vez é responsável pela movimentação dos agregados. O concreto pode ser considerado uma mistura composta de agregados e pasta de cimento, logo pode-se dizer que o volume total ( $V_t$ ) é igual a soma do volume de pasta ( $V_p$ ) e do volume de agregados ( $V_{ag}$ ), conforme ilustrado na Figura 8 (a) (DAMINELI, 2013; ZHANG *et al.*, 2020).

Como se pode observar na Figura 8 (b), segundo a teoria de excesso de pasta proposta por Kennedy (1940), o volume de pasta é dividido em duas partes: a pasta densa ( $V_{pd}$ ) e o excesso de pasta ( $V_{pex}$ ). A pasta densa é aquela que preenche os vazios entre os agregados, enquanto o excesso de pasta, que desempenha um papel na dispersão e lubrificação das partículas de agregado, é efetivamente distribuído em torno de cada partícula de agregado formando uma camada de espessura constante ( $e_{pex}$ ) que irá promover a fluidez do concreto (WONG E KWAN, 2008; KWAN *et al.*, 2012; LI E KWAN, 2013; Yurdakul *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2020).

**Figura 8 - Desenho esquemático da teoria de excesso pasta: (a) simplificação do sistema real; (b) volume de cada parte do sistema e volume de excesso de pasta**



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020)

Ainda, dentro dos conceitos que circundam a teoria de excesso de pasta pode-se dizer que se a quantidade de pasta for insuficiente para preencher todos os vazios entre as partículas do agregado, o desempenho do concreto provavelmente será comprometido. Entretanto, uma vez determinada a quantidade de pasta adequada para preencher os vazios e separar as partículas dos agregados, a qualidade da pasta é que passa a ser o fator de maior relevância nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido (YURDAKUL et al., 2013).

Powers (1968) sugeriu que o excesso de pasta é o único parâmetro que influencia a trabalhabilidade. Em 1999, Oh *et al.* incorporaram o conceito de espessura do filme de pasta (*Paste Film Thickness - PFT*) na dosagem de concretos autoadensáveis. Posteriormente, Kwan e Li (2012) concluíram que tanto o excesso de água, quanto o excesso de pasta aumentam a fluidez e alteram a reologia do concreto. (YURDAKUL *et al.*, 2013).

Segundo os estudos de Kwan e Li (2012), a espessura do filme de pasta pode ser definida como a espessura média do filme de pasta que reveste as partículas de agregado maiores do que 75µm. Vale ressaltar que a metodologia para a determinação deste parâmetro se assemelha àquela proposta por Kwan e Wong (2008) para determinação da espessura do filme de água, entretanto os autores consideram na composição da pasta não só os materiais cimentícios e a água, mas também as partículas de agregado com dimensões inferiores a 75µm. Devido à sua elevada finura, estes grãos acabam se misturando aos grãos de cimento e, com isso, passam a integrar a pasta.

A espessura do filme de pasta definida por Kwan e Li (2012), é representada pela Equação 18:

$$PFT = \frac{r'_w}{A'_{FA}} \quad (Eq. 18)$$

Em que:

$r'_w$  – razão volumétrica entre o excesso de pasta e o volume dos sólidos da porção restante dos agregados finos;

$A'_{FA}$  – superfície específica dos grãos de agregados finos acima de 75 µm.

Ao final da pesquisa, os autores concluíram que este parâmetro deve ser positivo para que haja pasta suficiente para preencher os vazios e formar o filme que reveste os agregados, de modo a garantir a reologia da pasta. Os resultados mostraram ainda que espessuras mais elevadas levam a uma maior fluidez, porém reduzem a coesão e a viscosidade da mistura, enquanto espessuras relativamente pequenas podem levar a uma fluidez mais baixa, porém com elevada coesão e viscosidade. Portanto, a determinação deste parâmetro requer que o estabelecimento

de um ponto de equilíbrio em que ambas as propriedades possam ser alcançadas (KWAN E LI, 2012).

De forma geral, partindo-se do princípio que a densidade de empacotamento dos agregados pode ser maximizada, a quantidade de pasta necessária para preencher os vazios e promover a fluidez requerida pode ser reduzida. Portanto, uma densidade de empacotamento granular mais elevada para um dado volume de pasta leva a uma melhor trabalhabilidade, assim como, para uma trabalhabilidade pré-fixada tem-se uma menor demanda de pasta, e, conseqüentemente uma redução no consumo de cimento (WONG E KWAN, 2008; KWAN *et al.*, 2012; LI E KWAN, 2013; CAMPOS *et al.*, 2020).

A alta eficiência no empacotamento dos aglomerantes, caracterizada pela diminuição dos vazios intergranulares da pasta mediante a combinação de materiais finos de diferentes distribuições granulométricas, associada à otimização do esqueleto granular dos agregados é o que leva à redução do consumo de pasta e à obtenção de concretos de melhor desempenho, tanto no estado plástico quanto no estado endurecido. Isto posto pode-se dizer que encontrar o teor de pasta ideal é fundamental para otimizar as propriedades do concreto (KWAN E WONG, 2008; LI E KWAN, 2013; DAMINELI, 2013; CAMPOS, 2019).

## 2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Este subitem descreve as ferramentas estatísticas utilizadas nesta pesquisa, a saber: o Critério de Peirce, a Análise de Variância e o Teste de Tukey-Kramer.

### 2.4.1 Critério de Peirce

O tratamento de dados é a primeira etapa de qualquer análise estatística (ALMEIDA, 2017). No decurso da obtenção de dados em programas experimentais, muitas vezes ocorre a situação em que um ou mais dos valores parecem estar fora da normalidade esperada. Quaisquer que sejam as razões para esta ocorrência



alguns métodos racionais, tais como o Critério de Peirce e o Critério de Chauvenet, podem ser empregados com o propósito de eliminar o(s) valor(es) em questão (ROSS, 2003).

O critério de Peirce é um método fundamentado na teoria da probabilidade que pode ser usado para eliminar *outliers* de dados ou dados espúrios de forma racional em uma amostra com comportamento normal. Este método é considerado mais exato do que o Critério de Chauvenet, largamente utilizado em pesquisas, por não assumir um valor arbitrário para a rejeição dos *outliers*, além de ser considerado mais preciso para pequenas amostras. O texto original data de 1852, contudo o método é amplamente utilizado nos dias atuais (CALLEGARO, 2014).

Segundo Ross (2003) o método baseia-se no princípio de que "as observações devem ser rejeitadas quando os desvios reais da média obtidos por mantê-los for menor do que os desvios obtidos por sua rejeição, multiplicada pela probabilidade de fazer tantas e não mais, observações anormais" (ROSS, 2003, p.4),

Em outras palavras, Callegaro (2014) explica que:

O objetivo de sua técnica era gerar probabilidades de erro que ocorrem no sistema onde todas as "n" observações são mantidas versus as "k" amostras rejeitadas. Este modelo então rejeita "k" observações e verifica se a amostra é mais próxima da normal que a anterior. O Critério de Peirce, prevê a detecção de mais de um dado discordante na amostra (CALLEGARO, 2014, p. 54).

Entretanto, o método de cálculo originalmente determinado por Peirce era matematicamente complicado de se usar. Posteriormente, em 1855, B.A. Gould, o reapresentou por meio de tabelas derivadas do trabalho original (ROSS, 2003). A Tabela 1 contém os resultados obtidos por Gould para 20 observações, sendo que, no máximo nove delas podem ser duvidosas.

**Tabela 1 - Critério de Peirce: Valores de Z**

Nº. Observações	Número de observações duvidosas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	1.196								
4	1.383	1.078							
5	1.509	1.200							
6	1.610	1.299	1.099						
7	1.693	1.382	1.187	1.022					
8	1.763	1.453	1.261	1.109					
9	1.824	1.515	1.324	1.178	1.045				
10	1.878	1.570	1.380	1.237	1.114				
11	1.925	1.619	1.430	1.289	1.172	1.059			
12	1.969	1.663	1.475	1.336	1.221	1.118	1.009		
13	2.007	1.704	1.516	1.379	1.266	1.167	1.070		
14	2.043	1.741	1.554	1.417	1.307	1.210	1.120	1.026	
15	2.076	1.775	1.589	1.453	1.344	1.249	1.164	1.078	
16	2.106	1.807	1.622	1.486	1.378	1.285	1.202	1.122	1.039
17	2.134	1.836	1.652	1.517	1.409	1.318	1.237	1.161	1.084
18	2.161	1.864	1.680	1.546	1.438	1.348	1.268	1.195	1.123
19	2.185	1.890	1.707	1.573	1.466	1.377	1.298	1.226	1.158
20	2.209	1.914	1.732	1.599	1.492	1.404	1.326	1.255	1.190

Fonte: Adaptado de Ross (2003)

Na tabela,  $Z$  representa a razão do máximo desvio permitido de um resultado em relação à média, pelo desvio padrão da amostra (Equação 19).

$$Z = \frac{|f_{ci} - f_{cm}|_{\max}}{Sd} \quad (Eq. 19)$$

Os procedimentos necessários para se determinar se os valores devem ser rejeitados envolve os seguintes passos:

- I. Calcular a média ( $f_{cm}$ ) e o desvio padrão ( $Sd$ ) da amostra do conjunto de dados, sendo  $f_{ci}$  o valor de cada um dos resultados individuais.

- II. Obter o valor de  $Z$  correspondente ao número de medições feitas na tabela de Peirce. Inicialmente, assumir o caso de uma observação duvidosa, mesmo que pareça haver mais de uma.
- III. Calcular o máximo desvio permitido  $|f_{ci} - f_{cm}|_{máx}$
- IV. Para quaisquer outros dados suspeitos, determinar:  $|f_{ci} - f_{cm}|$
- V. Eliminar as medições suspeitas se:  $|f_{ci} - f_{cm}| > |f_{ci} - f_{cm}|_{máx}$
- VI. Se essa ação resultar na rejeição de uma medida, assumir o caso de duas observações duvidosas, mantendo os valores originais da média e desvio padrão e o número original de medições. Pular para o passo VIII.
- VII. Se mais de uma medição for rejeitada no teste acima, assumir o próximo maior valor das observações duvidosas. Por exemplo, se duas medições forem rejeitadas no passo V, assumir o caso de três observações duvidosas, mantendo os valores originais de média, desvio padrão e o número original de medições.
- VIII. Repetir os cálculos dos passos II a V, aumentando sequencialmente o número de possibilidades de medição duvidosas, até que não hajam mais dados a serem eliminados.
- IX. Recalcular o valor da média e o desvio padrão da amostra do conjunto de dados reduzido (ROSS, 2003).

As limitações da utilização do Critério de Peirce por meio das tabelas estão relacionadas com o tamanho do conjunto de dados (no máximo 60), bem como o número observações duvidosas (no máximo 9). Estas restrições podem se tornar um problema quando a análise contempla grandes amostras.

#### 2.4.2 Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico amplamente utilizado na avaliação de resultados experimentais, empregado com o propósito de verificar a

existência de diferenças significativas entre algumas ou todas as médias dos grupos, por meio da análise das fontes de variação que podem ocorrer em um conjunto de dados (CAETANO, 2013; DANCEY E REIDY, 2013).

O resultado da análise é definido por um teste de hipóteses, ou seja, a validação da hipótese nula ( $H_0$ ) indica que não existe diferença significativa entre os grupos testados, enquanto a corroboração da hipótese alternativa ( $H_1$ ) indica que existe variação significativa entre os grupos testados (CAETANO, 2013; DANCEY E REIDY, 2013).

Para que se confirme a hipótese nula, o valor de  $F$  (relação entre as variâncias) deve ser menor ou igual a  $F_{crítico}$  (determinado para um nível de rejeição probabilístico  $\alpha$ ). Para a confirmação da hipótese  $H_1$ ,  $F > F_{crítico}$  (CATEN e RIBEIRO, 2000).

Outro parâmetro a ser avaliado na ANOVA é o valor  $p$  (probabilidade de significância). Em geral, se trabalha com um nível probabilístico de confiança  $\alpha = 95\%$ , ou seja, com um nível de rejeição de 0,05 (5%). Com isso, se  $p < \alpha$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$  e confirma-se a hipótese  $H_1$  (CATEN e RIBEIRO, 2000).

Porém vale destacar que a ANOVA apenas informa a existência entre algumas ou todas as condições, sem apontá-las. Para tanto é necessária a realização de testes *post hoc* (DANCEY E REIDY, 2013).

#### 2.4.3 Teste de Tukey-Kramer

Há uma grande variedade de testes *post hoc* disponíveis, entretanto, quando há a necessidade de se efetuar um número elevado de comparações, é necessário empregar um que seja mais conservador tal como o teste de Diferenças Honestamente Significativas (DHS) de Tukey (DANCEY E REIDY, 2013).

O teste de Tukey fundamenta-se na amplitude total studentizada e pode ser utilizado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. O teste é exato e de uso muito simples quando o número de repetições é o mesmo para todos os tratamentos (OLIVEIRA, 2008). Para tamanhos amostrais diferentes, o

resultado do teste de Tukey deixa de ser exato pois haverá um aumento da probabilidade da ocorrência de uma diferença de significância dentro de um subconjunto de dados previamente classificados como homogêneos (KRAMER, 1956). Neste caso deve-se adotar o teste de múltiplas comparações de Tukey-Kramer (DUNNETT, 1980).

Segundo Nogueira (2017) “este teste não é exato, mas é considerado minimamente conservativo, uma vez que o nível de significância conjunto, é muitas vezes, menor que o valor  $\alpha$  fixado” (NOGUEIRA, 2017, p.51).

## 2.5 LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS CORRELATOS

Com o objetivo de se verificar alguns parâmetros comuns aos traços de UHPC foi efetuada uma pesquisa na base de dados Scopus® de 66 trabalhos correlatos publicados entre os anos de 1995 e 2021. O Quadro 1 consolida o conjunto de parâmetros disponibilizados pelos respectivos autores, a saber:  $[C_{cp}]$  consumo de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $[\omega_{sa}]$  percentual de sílica ativa sobre a massa de cimento;  $[a/agl]$  relação água/aglomerante;  $[PQ]$  percentual de pó de quartzo sobre a massa de cimento e  $[P]$  teor de pasta em massa é dado pela relação entre as massas dos materiais componentes (Equação 20):

$$P = \frac{(\text{cimento} + \text{adições pozolânicas} + \text{água})}{(\text{cimento} + \text{adições pozolânicas} + \text{outras adições} + \text{agregados} + \text{água})} \quad (\text{Eq. 20})$$

Quadro 1 - Parâmetros de diferentes traços de UHPC

(continua)

Referência	$C_{cp}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\omega_{sa}$ (%)	a/agl	PQ (%)	P (%)
Werder, J.V.; Simon, S.; Gardei, A.; Fontana, P.; Meng, B. (2021)	832	16%	0,22	--	50%
Zhang, Y.; Haohui, X.; Correia, J.A.F.O. (2021)	657	18%	0,28	--	57%
Hanifhezadeh, M.; Aryan, H.; Gencturk, B.; Akyniyazov, A. (2021)	--	50%	0,27	--	64%
Preinstorfer, P.; Huber, T.; Kromoser, B.; Kollegger, J. (2021)	750	41%	0,20	27%	55%
Kalthoff, M.; Raupac, M. (2021)	832	16%	0,23	26%	45%
Lu, D.; Zhong, J.; Yan, B.; Gong, J.; He, Z.; G.; Song, C. (2021)	672	25%	0,25	--	44%
Yoo, D.Y.; You, I. (2021)	789	25%	0,20	30%	51%
Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M., de Brito, J. (2021).	670	30%	0,20	42%	44%
Sohail, M. G., Kahraman, R., Al Nuaimi, N., Gencturk, B., Alnahhal, W. (2021).	820	23%	0,15	--	56%
Dong, S.; Wang, Y.; Ashour, A.; Han, B.; Ou, J. (2021).	620	30%	0,24	--	56%
Liu, J.; Lai, Z.; Chen, B., Xu, S. (2020).	833	30%	0,18	--	56%
Jung, M., Park, M., Hong, S., Moon, J. (2020).	--	25%	0,24	35%	51%
Jiao, Y., Zhang, Y., Guo, M., Zhang, L., Ning, H., Liu, S. (2020).	850	23%	0,15	39%	49%
Dingqiang, F., Rui, Y., Zhonghe, S., Chunfeng, W., Jinnan, W., Qiqi, S. (2020).	500	25%	0,28	--	36%
Bae, Y., Pyo, S. (2020).	--	18%	0,22	14%	43%
Hung, C., Chen, Y., Yen, C. (2020).	--	22%	0,14	39%	66%
Qu, S., Zhang, Y., Zhu, Y., Huang, L., Qiu, M., Shao, X. (2020).	--	20%	0,18	20%	53%
Reddy, G.G.K., Ramadoss, P. (2020).	800	25%	0,25	30%	50%
Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H.H., Liu, H., Chen, G. (2020).	771	20%	0,18	20%	54%
Wang, Z., Yan, J., Lin, Y., Fan, F., Yang, F. (2020).	886	25%	0,16	60%	57%
Xu, S., Wu, P., Wu, C. (2020).	750	55%	0,21	--	58%
Qian, D., Yu, R., Shui, Z., Sun, Y., Jiang, C., Zhou, F., Ding, M., Tong, X., He, Y. (2020).	400	50%	0,18	--	53%
Gurusideswar, S., Shukla, A., Jonnalagadda, K.N., Nanthagopalan, P. (2020).	1100	20%	0,19	9%	70%
Qiu, M., Zhang, Y., Qu, S., Zhu, Y., Shao, X. (2020).	--	20%	0,18	20%	53%
Li, P.P.; Brouwers H.J.H., Chen, W. Yu, Q. (2020)	1071	11%	0,17	--	62%
Kalthoff, M., Raupach, M. (2020).	832	16%	0,19	45%	48%
Zhang, Y., Zhu, Y., Qu, S., Kumar, A., Shao, X. (2020).	--	20%	0,18	20%	53%
Yan, J., Chen, A., Wang, T. (2020).	--	25%	0,23	30%	51%
Zhang, X., Li, X., Liu, R., Hao, C., Cao, Z. (2020).	875	29%	0,17	--	59%
Zhang, Y., Zhu, Y., Qu, S., Kumar, A., Shao, X., Fan, D., Chen, Z.,	780	25%	0,17	--	56%
Cai, X., Taerwe, L.R. Yuan, Y. (2020).	--	30%	0,20	--	57%

**Nota:**  $C_{cp}$  = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);  $\omega_{sa}$  = percentual de sílica ativa sob a massa de cimento); a/agl = relação água/aglomerante; PQ = percentual de pó de quartzo sob a massa de cimento; P = teor de pasta em massa; -- = valor não informado pelo pesquisador.

Quadro 1 - Parâmetros de diferentes traços de UHPC

(conclusão)

Zhang, Y., Cai, S., Zhu, Y., Fan, L., Shao, X. (2020).	771	20%	0,18	20%	54%
Jung, M., Lee, Y., Hong, S., Moon, J. (2020).	--	25%	0,23	35%	51%
Tong, L., Chen, L., Wen, M., Xu, C. (2020).	--	30%	0,20	--	57%
Zhang, Y., Zhang, C., Zhu, Y., Cao, J., Shao, X. (2020).	771	20%	0,18	20%	53%
Li, X., Li, J., Lu, Z., Hou, L., Chen, J. (2020).	493	16%	0,20	--	37%
Shen, P., Zheng, H., Xuan, D., Lu, J., Poon, C.S. (2020)	640	28%	0,22	--	49%
Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., Hou, D. (2019).	400	25%	0,18	--	50%
Haile, B.F.; Jin, D.W.; Yang, B.; Park, S.; Lee, H.K. (2019).	--	27%	0,23	35%	51%
Zdeb (2019).	903	20%	0,20	34%	56%
Kim, J., Yoo, D. (2019).	789	25%	0,20	--	51%
Song, Q., Yu, R., Shui, Z., Rao, S., Wang, X., Sun, M., Jiang, C. (2018).	750	19%	0,17	--	56%
Li, P.P.; Yu, K.L.; Brouwers, H.J.H. (2018).	675	7%	0,20	--	43%
Pyo, S., Kim, H.K., Lee, B.Y. (2017).	--	18%	0,22	14%	47%
Aoude, H., Dagenais, F. P., Burrell, R. P., Saatcioglu, M. (2015).	917	25%	0,18	--	48%
Wille, K., Boisvert-Cotulio, C. (2015).	778	25%	0,23	25%	50%
Alkaysi, M., El-Tawil, S. (2015).	775	25%	0,17	--	48%
Yao, D., Jia, J., Wu, F., Yu, F. (2014).	420	15%	0,23	--	30%
Mullen, C. (2013).	710	33%	0,17	--	47%
Willey, J. (2013).	712	32%	0,13	--	46%
Willey, J. (2013).	786	33%	0,22	--	48%
Azad, H. (2013).	900	25%	0,15	--	56%
Graybeal, B. A., Russell, H. G. (2013).	712	18%	0,13	--	46%
Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., Pu, X. (2012).	450	10%	0,18	--	23%
Deeb, R., Ghanbari, A., Karihaloo, B. L. (2012).	544	40%	0,17	--	57%
Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., Pu, X (2012).	810	10%	0,18	--	41%
Akhnoukh, A. K., Xie, H. (2010).	664	21%	0,14	--	47%
El-Dieb, A. S. (2009).	900	18%	0,19	--	55%
Yang, S. L., Millard, S. G., Soutsos, M. N., Barnett, S. J., Le, T. T. (2009).	657	18%	0,14	--	57%
Yunsheng, Z., Wei, S., Sifeng, I., Chujie, J., Jianzhong, L. (2008).	--	25%	0,15	--	47%
Habel, K., Gauvreau, P. (2008).	967	25%	0,20	--	68%
Habel <i>et al.</i> (2006).	1050	26%	0,15	--	67%
Ma e Dietz (2002).	609	30%	0,15	43%	37%
Ma e Dietz (2002).	480	30%	0,20	43%	31%
Reda, M. M., Shrive, N. G., Gillott, J. E. (1999).	1010	29%	0,18	--	67%
Richard e Cheyrezy (1995).	959	25%	0,14	--	56%

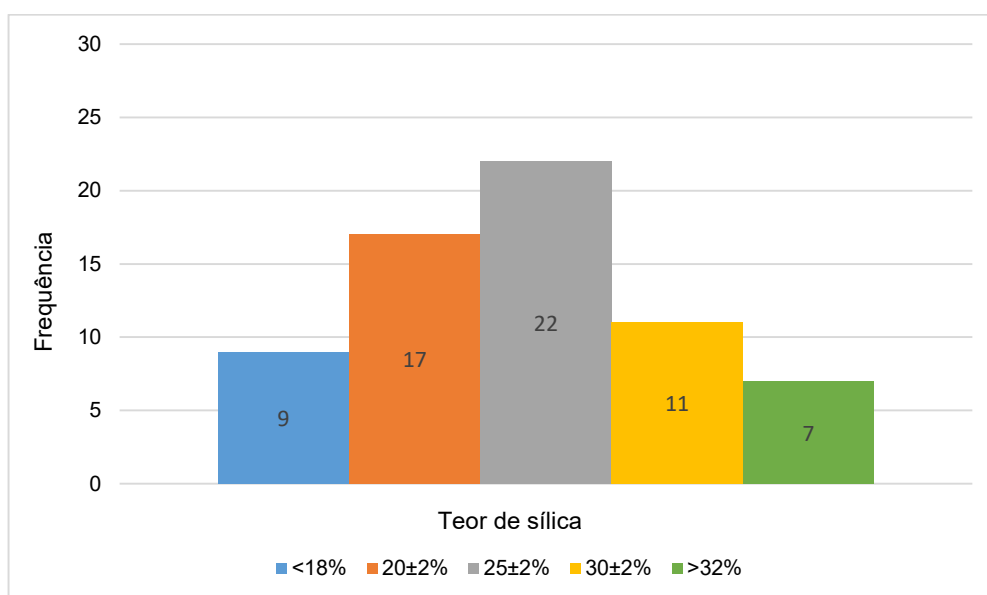
**Nota:**  $C_{cp}$  = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);  $\omega_{sa}$  = percentual de sílica ativa sob a massa de cimento);  $a/agl$  = relação água/aglomerante; PQ = percentual de pó de quartzo sob a massa de cimento; P = teor de pasta em massa; -- = valor não informado pelo pesquisador.

**Fonte:** Autoria própria

A análise dos dados mostra que o teor de sílica adotado pelos pesquisadores varia no intervalo de 7 a 55%, sendo 25% o teor que mais se repete, como se pode observar na Figura 9. O segundo teor mais empregado é o de 20%, e, em terceiro lugar, o teor de 30%.

Segundo autores como Richard e Cheyrezy (1995), Yu *et al.* (2014), Ahmad *et al.* (2015), Vanderberg e Wille (2018), a proporção sílica/cimento normalmente mais utilizada é de 0,25. Para Ma e Dietz (2008), teores próximos de 25% de sílica devem ser adicionados à matriz com o objetivo de se obter misturas granulares mais densas.

**Figura 9 - Teor de sílica em pesquisas sobre UHPC**



**Fonte: Autoria própria**

Já para Shi *et al.* (2015) e Akhnoukh e Buckhalter (2021), o teor médio de sílica ativa em misturas UHPC varia entre 20% e 30% da massa de materiais cimentícios. Estudos anteriores comprovaram que esta quantidade de sílica aumenta a viscosidade, melhora as ligações fibra-matriz e promove ganho na resistência à compressão e flexão de o concreto.

Outros estudos concluíram que teores mais baixos (entre 5% e 15%) podem levar à diminuição da viscosidade e a um ganho marginal no desempenho do concreto (AKHNOUKH E BUCKHALTER, 2021). Campos *et al.* (2020a) demonstraram que o conteúdo de sílica necessário para consumir a totalidade do hidróxido de cálcio é de



aproximadamente 16% em substituição à massa do cimento CP V-ARI. No entanto, em função da baixa quantidade de água empregada, a hidratação no UHPC é incompleta e a quantidade de sílica disponível é superior àquela exigida pela reação pozolânica, passando então o excedente a contribuir para o aumento da densidade de empacotamento da matriz (MA E DIETZ, 2002).

O consumo de cimento adotado nos trabalhos listados varia entre 420 e 1100 kg/m<sup>3</sup> enquanto a relação água/aglomerante varia de 0,13 a 0,28. No que tange o emprego do pó de quartzo, foram identificados teores dentro do intervalo de 9 a 60% em relação à massa de cimento. Por fim, o percentual de pasta em massa adotado nas pesquisas oscilou entre 30 e 70%.

O intervalo, a moda e a média dos parâmetros observados estão consolidados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Demais parâmetros identificados em pesquisas sobre UHPC**

Parâmetro	$C_{cp}$	$\omega_{sa}$	a/agl	PQ	P
Intervalo	400 a 1100 kg/m <sup>3</sup>	7 a 55%	0,13 a 0,28	9 a 60%	23 a 70%
Moda	771 kg/m <sup>3</sup>	25%	0,18	20%	56%
Média	755 kg/m <sup>3</sup>	25%	0,19	30%	51%

**Nota:**  $C_{cp}$  = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);  $\omega_{sa}$  = percentual de sílica ativa sob a massa de cimento); a/agl = relação água/aglomerante; PQ = percentual de pó de quartzo sob a massa de cimento; P = teor de pasta em massa.

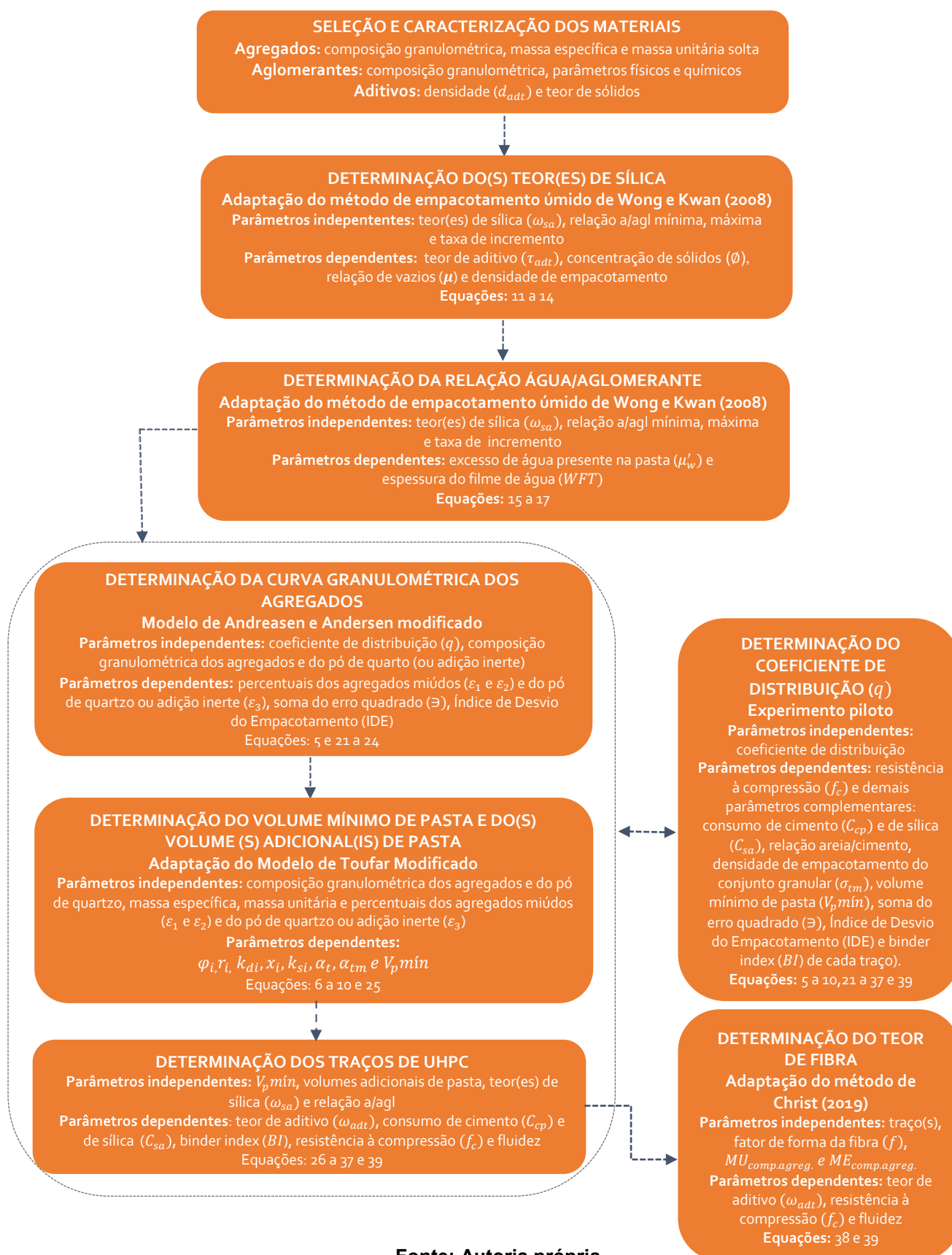
**Fonte: Autoria própria**

### **3 MÉTODO DE DOSAGEM DE TRAÇOS DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**

Conforme ilustrado na Figura 10, para se chegar à definição dos traços de UHPC segundo o método proposto, algumas etapas devem ser executadas, a saber: a seleção e caracterização dos materiais; a determinação do(s) teor(es) de sílica ativa e a determinação da relação água/aglomerante por meio do empacotamento dos aglomerantes na condição úmida; a determinação do coeficiente de distribuição ( $q$ ) por meio de um experimento piloto; a determinação da composição ideal entre os agregados miúdos e pó de quartzo (ou outra adição inerte) através do modelo de empacotamento granular de Andreasen e Andersen modificado e a determinação do volume mínimo de pasta através do modelo de empacotamento granular de Toufar modificado. Com o objetivo de suprir a eventual necessidade de adequação das características de trabalhabilidade do traço, volumes adicionais de pasta podem ser estabelecidos a critério do pesquisador.

A partir dos resultados obtidos nestas etapas tem-se a definição do(s) traço(s), em que é possível se combinar o(s) teor(es) de sílica e o(s) volume(s) de pasta. A especificação do teor de fibras se dá de acordo com uma adaptação do método proposto por Christ (2019).

Figura 10 - Etapas do método de dosagem



Fonte: Autoria própria

### 3.1 Seleção e caracterização dos materiais

O início do desenvolvimento deste experimento se deu com a seleção e a caracterização dos materiais utilizados na dosagem do UHPC. Conforme já justificado no capítulo introdutório desta pesquisa, optou-se pelo emprego de um agregado miúdo grosso (areia artificial de basalto), do modo como é comercializado, ou seja, sem qualquer tipo de beneficiamento ou peneiramento adicional. Visando aumentar a densidade de empacotamento, foram incorporados à mistura a areia natural quartzosa (agregado miúdo fino) e o pó de quartzo. Estes materiais foram caracterizados segundo sua composição granulométrica, massa unitária e massa específica.

Como aglomerantes, foram escolhidos o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, em função do baixo teor de adições que contém comparativamente aos demais e a sílica ativa, devido à sua elevada finura e propriedades pozolânicas. Com o objetivo de dar fluidez ao UHPC, optou-se pela utilização de um aditivo superplastificante do Tipo II.

### 3.2 Determinação do Teor de Sílica Ativa

A definição da proporção entre a sílica ativa e o cimento é fundamental para que se alcance a mínima porosidade da matriz. A determinação do teor ideal de sílica se deu por meio de uma adaptação do método de empacotamento úmido proposto por Wong e Kwan (2008), já detalhado no item 2.2.2.3.

O início do experimento se deu com a escolha de diferentes teores de sílica e das relações água/aglomerante ( $a/agl$ ) mínima e máxima, bem como do seu respectivo intervalo de variação. Estes parâmetros foram determinados com base no levantamento de parâmetros correlatos apresentada em 2.5.

Para a produção da cada uma das pastas partiu-se da mínima relação água/aglomerante previamente estabelecida. O consumo de aditivo correspondente a cada teor de sílica foi definido experimentalmente, tendo como ponto de partida o teor

máximo estipulado pelo fabricante, conforme recomendado por Wong e Kwan (2008), sendo adotado aquele que permitiu atingir o ponto de liquefação da pasta.

Os procedimentos de mistura dos materiais seguiram sequência similar àquela proposta Wong e Kwan (2008). Os materiais cimentícios foram pré misturados a seco durante três minutos na argamassadeira. Toda a água foi adicionada à cuba com 50% dos materiais cimentícios e 20% do aditivo superplastificante. A mistura foi executada na velocidade lenta durante o período de dois minutos e por mais um minuto na velocidade rápida.

Os 50% restantes dos materiais cimentícios foram divididos em quatro partes iguais, assim como o aditivo remanescente. Cada uma das porções foi adicionada à cuba e misturada durante dois minutos, sempre em velocidade lenta com o objetivo de atenuar a incorporação de ar.

Finalizada a etapa de produção, verteu-se a pasta em um recipiente cilíndrico metálico de volume  $0,394 \text{ dm}^3$ . Após o preenchimento, o recipiente foi nivelado com uma régua metálica de forma a retirar-se o excesso de material e a massa do conjunto (recipiente + pasta) foi determinada com o auxílio de uma balança eletrônica de precisão.

Diferentemente do proposto pelos autores que executaram uma nova mistura para cada relação água/aglomerante considerada, a continuidade do ensaio se deu por meio de sucessivos acréscimos de água na mesma pasta com o objetivo de aumentar a relação  $a/agl$  a uma taxa de incremento de 0,02 e determinar as respectivas concentrações de sólido. Desta forma foi possível reduzir o consumo de materiais empregados e o período de tempo necessários para a realização dos ensaios. A cada adição de água a pasta foi misturada em velocidade lenta durante o período de um minuto. O ciclo completo de ensaio teve duração média de 60 minutos e foi realizado em ambiente com temperatura controlada de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , não sendo observado o início de pega do cimento, que segundo o boletim do fabricante (ANEXO D) ocorre, em média, aos 175 minutos.

Os parâmetros concentração de sólidos ( $\phi$ ) e relação de vazios ( $\mu$ ) resultantes do ensaio foram determinados por meio das Equações 13 e 14. De acordo com o método proposto por Wong e Kwan (2008), variando-se a relação

água/aglomerante em volume dentro do intervalo analisado, a pasta que resultar na menor relação de vazios e na maior concentração de sólidos é aquela que apresenta a maior densidade de empacotamento.

Com base nos resultados dos teores avaliados definiu-se como objetivo específico desta pesquisa, a análise do comportamento do UHPC composto por três teores de sílica, a saber: aquele que resultou na máxima densidade de empacotamento e os teores imediatamente abaixo e acima deste. Entretanto, é possível adotar como teor ideal de sílica aquele que apresentou a maior densidade de empacotamento dentre os avaliados.

### 3.3 Determinação da Relação água/aglomerante

A relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) também foi estabelecida a partir do ensaio de empacotamento úmido descrito em 3.2. Para tanto determinou-se, por meio das Equações 15 e 17, o excesso de água presente na pasta ( $\mu'_w$ ) e a espessura do filme de água ( $WFT$ ) para cada uma das diferentes relações  $a/agl$ , em massa, empregadas no ensaio.

A relação água/aglomerante para cada teor de sílica foi definida como sendo aquela correspondente aos valores de  $\mu'_w$  e  $WFT$  imediatamente maiores ou iguais a zero, visando-se a obtenção de misturas com elevado nível de fluidez (características autoadensáveis).

### 3.4 Determinação da Curva Granulométrica Ideal

A determinação da composição ideal entre os agregados miúdos e pó de quartzo se deu por meio do modelo de Andreasen e Andersen modificado, apresentado em 2.2.1.2. De acordo com Fan *et al.* (2020), este pode ser considerado um dos melhores modelos de empacotamento para a dosagem concretos de ultra-alto desempenho.

A escolha pela composição de dois agregados, um mais grosso e outro fino, com o pó de quartzo se fundamentou no pressuposto de que uma faixa mais ampla de distribuição do tamanho das partículas na curva granulométrica resulta em uma densidade de empacotamento mais alta, independentemente da forma das partículas (FENNIS E WALRAVEN, 2012).

A primeira etapa consistiu na determinação da distribuição granulométrica ideal segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado. Para tanto utilizou-se a Equação 5, considerando-se como  $D_p$  o tamanho da maior partícula (agregado miúdo grosso) e como  $D_s$  o tamanho da menor partícula (pó de quartzo). Para a definição do coeficiente de distribuição  $q$ , foi conduzido previamente um experimento piloto, apresentado no APÊNDICE B, em que foram analisados três valores de  $q$  com o objetivo de se determinar a proporção entre as partículas finas e grossas presentes na mistura que leva ao melhor empacotamento.

A partir da curva granulométrica ideal, determinada em função do coeficiente de distribuição escolhido e, com base nas curvas granulométricas dos materiais granulares utilizados, foi desenvolvida uma análise matricial, representada pelas Equações 21 a 23, visando definir composição otimizada entre os agregados miúdos e o pó de quartzo de modo a se obter a curva granulométrica mais próxima possível daquela originada pelo modelo de Andreasen e Andersen modificado, que atua como uma função alvo para a otimização da composição da mistura dos materiais granulares.

O procedimento consiste em se efetuar o produto matricial entre a matriz contendo as porcentagens retidas acumuladas dos materiais granulares ( $[G]$ ) e o vetor das porcentagens retidas acumuladas da curva ideal determinada pelo modelo de Andreasen e Andersen modificado ( $[E]$ ), resultando nas porcentagens de cada material granular a ser utilizado ( $[\varepsilon]$ ). Este mecanismo permite realizar o ajuste simultâneo do percentual retido acumulado de todo o conjunto de peneiras de modo a se obter o menor desvio possível entre os valores teóricos e aqueles correspondentes aos materiais utilizados.

$$[\varepsilon] * [\mathbf{G}] = [E] \quad (Eq. 21)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{2,1} & G_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{1,n} & G_{2,n} & G_{3,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (Eq. 22)$$

$$[\varepsilon] = ([\mathbf{G}]^T [\mathbf{G}])^{-1} * ([\mathbf{G}]^T [E]) \quad (Eq. 23)$$

Em que:

$\varepsilon_i$  – vetor com a porcentagem de cada material granular;

$G_i$  – matriz com as porcentagens retidas acumuladas de cada material granular;

$E_i$  – vetor com a porcentagem retida acumulada do modelo da Andreasen e Andersen modificado.

Após a determinação do vetor com a porcentagem de cada material granular a ser utilizada é feito o cálculo da porcentagem retida acumulada em cada peneira que a mistura irá fornecer e estes valores são comparados com os valores da curva ótima do modelo da Andreasen e Andersen modificado. Calcula-se então, por meio da Equação 24, o somatório do erro quadrado em cada peneira ( $\exists$ ) com a finalidade de verificar os desvios apresentados pelo ajuste.

$$\exists = (E_i - (G_1 \cdot \varepsilon_1 + G_2 \cdot \varepsilon_2 + G_3 \cdot \varepsilon_3))^2 \quad (Eq. 24)$$

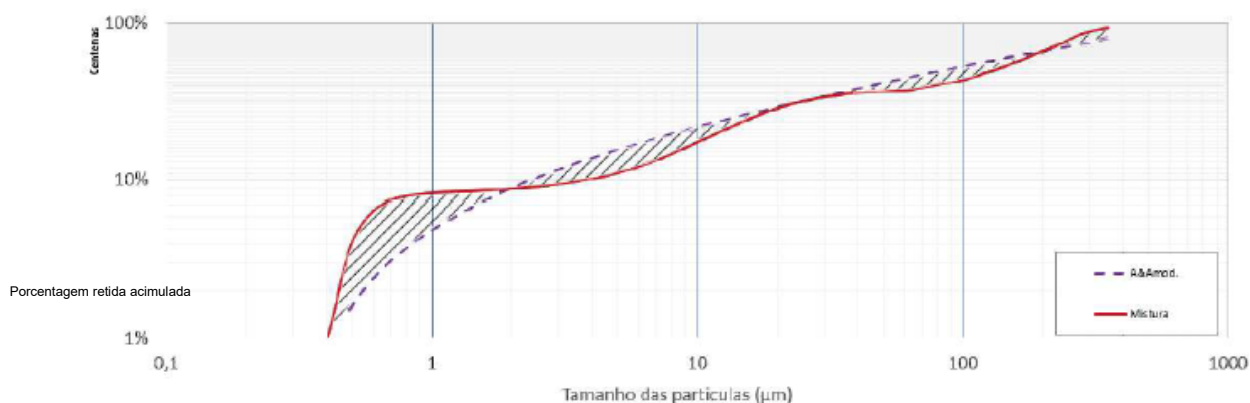
O sistema também estabelece o valor do módulo de finura da mistura que é comparado ao o módulo de finura da curva ideal.

Ainda com o objetivo de se verificar a diferença entre a curva granulométrica ideal e a curva resultante do sistema matricial, determinou-se o Índice de Desvio do Empacotamento (IDE). O cálculo foi efetuado por meio de uma adaptação do método proposto por Christ (2019) que, por sua vez, contempla um número maior de peneiras do que as utilizadas na determinação da curva granulométrica dos agregados e do pó de quartzo empregados nesta pesquisa.



De acordo com o autor, o IDE é determinado pela diferença entre as duas curvas, representada pela linha hachurada na Figura 11. Quanto menor for a área hachurada, menor será o desvio, e, conseqüentemente melhor o empacotamento da mistura. Vale destacar que, em sua pesquisa, Christ (2019) não determinou o valor ideal de IDE que se deve buscar, mas concluiu que quanto mais baixo for o IDE maior tende a ser a resistência à compressão do concreto.

**Figura 11 - Índice de Desvio do Empacotamento**



**Fonte: Christ (2019)**

Estabelecidos os percentuais dos agregados miúdos ( $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ ) e do pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ ) que compõem os diferentes traços de UHPC, empregou-se o modelo de Toufar modificado com o objetivo de se chegar à definição do índice de vazios da mistura granular, que deverá ser preenchido pela pasta formada pelos aglomerantes, água e aditivo.

### 3.5 Determinação do Volume Mínimo de Pasta e do Volume Adicional de Pasta

Em função da utilização de três materiais na composição do empacotamento, para a determinação da densidade de empacotamento do conjunto granular, e, por conseguinte, do volume mínimo de pasta empregou-se uma adaptação do modelo de Toufar modificado em três classes. Na primeira etapa combinou-se o agregado miúdo fino e o agregado miúdo grosso. Por meio do emprego das Equações 6 a 10, obtêm-se os resultados dos parâmetros listados no Quadro 2.

**Quadro 2 - Parâmetros do empacotamento granular da primeira e segunda classes**

Parâmetro	Designação
$\varphi_1$	Densidade de empacotamento da menor partícula (agregado miúdo fino)
$\varphi_2$	Densidade de empacotamento da maior partícula (agregado miúdo grosso)
$r_1$	Fração volumétrica relativa da menor partícula (agregado miúdo fino)
$r_2$	Fração volumétrica relativa da maior partícula (agregado miúdo grosso)
$k_d$	Fator de proporção entre os diâmetros das partículas
$x$	Fator estatístico
$k_s$	Fator estatístico
$\alpha_t$	Densidade de empacotamento da mistura de agregados miúdos

**Fonte: Autoria própria**

Para o empacotamento da terceira classe, considerou-se como  $r_3$  a fração volumétrica de pó de quartzo estabelecida por meio modelo de Andreasen e Andersen modificado e como  $r_m$  (mistura entre os agregados miúdos), a diferença necessária para totalizar a unidade.

Diferentemente da premissa do modelo de Toufar modificado que estabelece que o valor ( $\alpha_t$ ) resultante do empacotamento da primeira e segunda classes deve ser adotado como o valor da densidade de empacotamento da mistura ( $\alpha_m$ ) na execução do empacotamento com a terceira classe, optou-se por determinar o valor de  $\alpha_m$  a partir da Equação 25, que correlaciona, por meio do cálculo de média ponderada, as massas específicas e unitárias de cada um dos agregados com a sua respectiva fração volumétrica na composição.

$$\alpha_m = \frac{ME_1 * r_1 + ME_2 * r_2}{MU_1 * r_1 + MU_2 * r_2} \quad (Eq. 25)$$

Em que:

$ME_i$  – massa específica do agregado  $i$ ;

$MU_i$  – massa unitária solta do agregado  $i$ ;

$r_i$  – fração volumétrica relativa da partícula  $i$ .

Considerando-se de que o modelo de Toufar foi estabelecido a partir da premissa de que todas as partículas são esféricas e de distribuição monomodal (MAMIROV, 2019) e que nesta pesquisa está sendo utilizada areia artificial, de formato predominantemente anguloso, decidiu-se por empregar o procedimento supracitado, cujo resultado foi comprovado experimentalmente através da determinação laboratorial da massa específica e da massa unitária da composição entre a areia natural e artificial e do cálculo da densidade de empacotamento da mistura experimental ( $\alpha_{mexp}$ ), por meio da Equação 3.

Ademais, simulações matemáticas do método aqui proposto demonstraram que a adoção do valor de  $\alpha_t$  no empacotamento da terceira classe daria origem a traços, para o volume mínimo de pasta, com consumos de cimento variando entre 350 e 410 kg/m<sup>3</sup> em função do teor de sílica.

Três estudos listados nos trabalhos correlatos foram executados com consumos de cimento próximos a 400 kg/m<sup>3</sup>, contudo nenhum deles atingiu patamares de resistência à compressão próximos a 150,0 MPa aos 28 dias. Wang *et al.* (2019) alcançaram a resistência média de 127,0 MPa com o consumo de 400 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 100 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa e 400 kg/m<sup>3</sup> de pó de calcário. Já Qian *et al.* (2020) obtiveram a resistência média de 110,0 MPa com a composição de 400 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 200 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa e 500 kg/m<sup>3</sup> de pó de calcário. Por sua vez, Yao *et al.* (2014) com o traço contendo 420 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 120 kg/m<sup>3</sup> de cinza pozolânica, 60 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa e agregado graúdo atingiram a resistência média de 108,0 MPa aos 28 dias.

Assim sendo e tendo-se em vista o objetivo de se produzir UHPC com resistências da ordem de 150,0 MPa aos 28 dias, estabeleceu-se a densidade de empacotamento do conjunto granular ( $\alpha_{tm}$ ), ou seja, da mistura entre os três materiais, a partir do valor de  $\alpha_m$  e não do valor  $\alpha_t$ , como prevê o modelo de Toufar modificado. Os parâmetros matemáticos resultantes da análise estão listados no Quadro 3.

**Quadro 3 - Parâmetros do empacotamento granular da mistura**

<b>Parâmetro</b>	<b>Designação</b>
$\varphi_3$	Densidade de empacotamento da adição inerte
$\alpha_m$	Densidade de empacotamento da mistura entre os agregados miúdos
$r_3$	Fração volumétrica relativa da adição inerte
$r_m$	Fração volumétrica relativa da mistura entre os agregados miúdos
$k_{dm}$	Fator de proporção entre os diâmetros das partículas
$x_m$	Fator estatístico
$k_{sm}$	Fator estatístico
$\alpha_{tm}$	Densidade de empacotamento do conjunto granular
$V_p^{mín}$	Volume mínimo de pasta

**Fonte: Autoria própria**

A diferença entre a densidade de empacotamento do conjunto granular ( $\alpha_{tm}$ ) e o valor da unidade representa o índice de vazios da mistura, ou seja, o volume mínimo de pasta ( $V_p^{mín}$ ).

A partir do volume mínimo de pasta, foram fixados os acréscimos de 20, 40, 60 e 80% (denominados de volume adicional de pasta). Estes percentuais foram determinados por meio de simulações matemáticas em que se buscou obter um conjunto de traços cujo teor de pasta, em massa, variasse dentro dos limites (30 a 60%) identificados no levantamento de parâmetros correlatos.

É importante destacar que estes teores estão diretamente relacionados aos materiais empregados nesta pesquisa e que, portanto, podem não ser os mais adequados para outras composições. Posto isto, a determinação dos percentuais de acréscimo de volume adicional a ser estudada para outros materiais deve ser estabelecida pelo pesquisador.

A última etapa do processo de dosagem consiste na determinação dos traços de UHPC, em que se combinam o(s) teor(es) de sílica e o(s) volume(s) adicional(is) de pasta previamente estabelecidos.

### 3.6 Determinação dos Traços de Concreto de Ultra-Alto Desempenho

A primeira etapa da determinação dos traços de UHPC visou estabelecer o volume de cada um dos componentes da pasta, a partir do volume de pasta ( $V_p$ ), do teor de sílica e da relação água/ágglomerante determinados no ensaio de empacotamento úmido. As Equações 26 a 28 foram empregadas no cálculo dos volumes de cimento, sílica e água, respectivamente.

$$V_{cp} = \frac{V_p}{\left(1 + \omega_{sa} * \frac{ME_{cp}}{ME_{sa}}\right) + (1 + \omega_{sa}) * ME_{cp} * a/agl} \quad (Eq. 26)$$

$$V_{sa} = (V_{cp} * ME_{cp} * \omega_{sa}) / ME_{sa} \quad (Eq. 27)$$

$$V_w = a/agl * (V_{cp} * ME_{cp} + V_{sa} * ME_{sa}) \quad (Eq. 28)$$

Em que:

$V_p$  – volume de pasta;

$V_{cp}$  – volume de cimento;

$V_{sa}$  – volume de sílica ativa;

$V_w$  – volume de água;

$\omega_{sa}$  – teor de sílica sob a massa de cimento;

$ME_{cp}$  – massa específica do cimento;

$ME_{sa}$  – massa específica da sílica.

O volume total de agregados ( $V_{ag}$ ) é estabelecido pela diferença entre o valor da unidade e o volume de pasta ( $V_p$ ). Por meio da Equação 29 determinam-se os volumes dos respectivos agregados miúdos.

$$V_{agi} = V_{ag} \cdot r_i \cdot r_m \quad (Eq. 29)$$

Em que:

$V_{agi}$  – volume do agregado  $i$ ;

$V_{ag}$  – volume total de agregados;

$r_i$  – fração volumétrica relativa da partícula  $i$ ;

$r_m$  – fração volumétrica relativa da mistura de agregados miúdos.

O volume de pó de quartzo foi definido por meio da Equação 30.

$$V_q = V_{ag} \cdot r_3 \quad (Eq. 30)$$

Em que:

$V_q$  – volume de pó de quartzo;

$V_{ag}$  – volume total de agregados;

$r_3$  – fração volumétrica relativa da adição inerte.

Por meio do produto entre o volume e o valor da massa específica de cada um dos materiais, determinou-se seu consumo em kg por m<sup>3</sup> de concreto (Equações 31 a 36).

$$C_{cp} = V_{cp} * ME_{cp} \quad (Eq. 31)$$

$$C_{sa} = V_{sa} * ME_{sa} \quad (Eq. 32)$$

$$C_q = V_q * ME_q \quad (Eq. 33)$$

$$C_{ai} = V_{ai} * ME_{ai} \quad (Eq. 34)$$

$$C_w = V_w * ME_w \quad (Eq. 35)$$

$$C_{adt} = (C_{cp} + C_{sa}) * \omega_{adt} * d_{adt} \quad (Eq. 36)$$

Em que:

$C_{cp}$  – consumo de cimento;

$C_{sa}$  – consumo de sílica ativa;

$C_p$  – consumo de pó de quartzo;

$C_{ci}$  – consumo do agregado  $i$ ;

$C_w$  – consumo de água;

$C_{adt}$  – consumo de aditivo;

$ME_i$  – massa específica do material  $i$ ;  
 $\omega_{adt}$  – teor de aditivo sob a massa de algerantes;  
 $d_{adt}$  – densidade do aditivo.

Por fim, dividindo-se o consumo de cada material pelo consumo de cimento obteve-se o Traço Unitário em Massa Seca (TUMS).

A relação água/aglomerante empregada foi aquela definida previamente no ensaio de empacotamento úmido, enquanto a determinação do teor de aditivo ( $\omega_{adt}$ ) se deu de maneira experimental, uma vez a proporção dos materiais tem impacto direto sobre a fluidez da mistura. Neste quesito, o intuito principal foi a obtenção de traços com características autoadensáveis.

O raciocínio supracitado repetiu-se para os diferentes teores de sílica estabelecidos e para os progressivos acréscimos de volume de pasta (20 a 80%). A etapa final consistiu na produção dos traços de UHPC para a comprovação das propriedades desejáveis para os estados fresco e endurecido. Os procedimentos de mistura, moldagem e cura, bem como os ensaios de caracterização e as ferramentas estatísticas utilizadas na análise dos resultados estão descritas nos subitens de 4.3 a 4.6.

Os critérios tomados para a definição do teor ideal de pasta devem compreender a análise de alguns parâmetros resultantes da dosagem, a saber: a fluidez, a resistência à compressão média aos 28 dias, os consumos de cimento e de sílica ( $\text{kg/m}^3$ ) e o *binder index* ( $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$ ), que nada mais é do que a relação entre o consumo de algerantes ( $\text{kg/m}^3$ ) e a resistência média (MPa), dado pela Equação 37:

$$BI = \frac{C_{cp} + C_{sa}}{f_{cm}} \quad (Eq. 37)$$

Em que:

$BI$  – *binder index* do traço ( $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$ );

$C_{cp}$  – consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

$C_{sa}$  – consumo de sílica ( $\text{kg/m}^3$ );

$f_{cm}$  – resistência à compressão média (MPa).

### 3.7 Determinação do Teor de Fibras

A determinação do máximo teor de fibras a ser inserido na mistura (Equação 38) se deu por meio de um ajuste da equação proposta por Christ (2019), que por sua vez é uma adaptação da Equação 1, proposta por Martinie, Rossi e Roussel (2010):

$$T_{fibras} = \frac{400}{f} * \left( 1 - \frac{MU_{comp. agreg.}}{ME_{comp. agreg.}} \right) \quad (Eq. 38)$$

Em que:

$T_{fibras}$  – máximo teor de fibras a ser inserido na mistura (%);

$f$  – fator de forma da fibra;

$MU_{comp. agreg.}$  – massa unitária da composição de agregados miúdos (kg/m<sup>3</sup>);

$ME_{comp. agreg.}$  – massa específica da composição de agregados miúdos (kg/m<sup>3</sup>).

O ajuste efetuado na equação proposta por Christ (2019) se fez necessário pois, em sua pesquisa, o autor utilizou apenas um agregado miúdo na determinação do teor máximo de fibras, enquanto nesta pesquisa optou-se pela composição entre dois agregados miúdos.

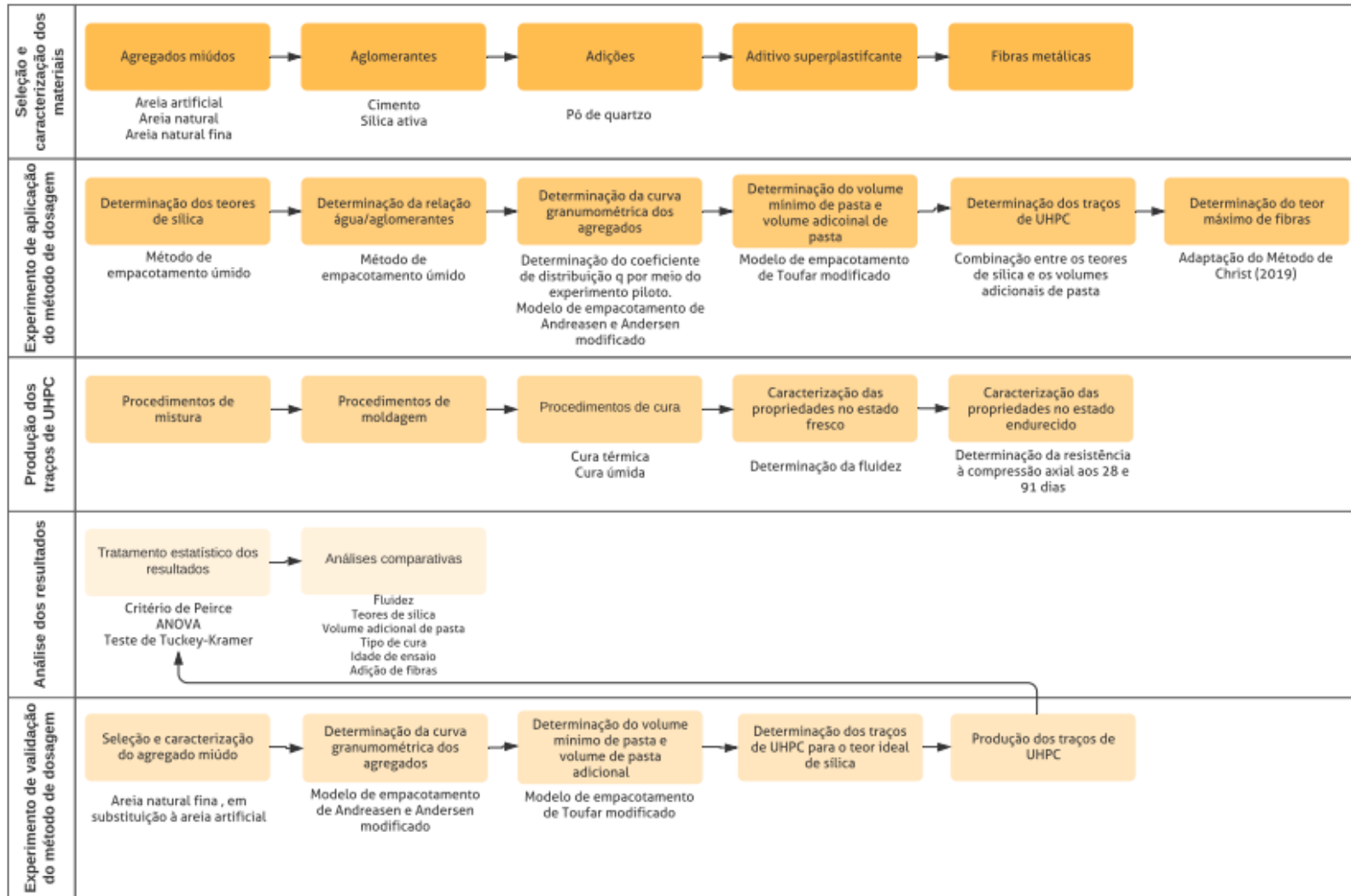


## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

No decorrer deste capítulo são apresentados os materiais e métodos adotados no desenvolvimento do programa experimental que tem por fim validar o método de dosagem experimental proposto como objetivo desta pesquisa e de respaldar a análise das proposições apresentadas como objetivos específicos.

A Figura 12 resume os passos metodológicos que compõem o programa experimental, a saber: [4.1] a seleção e caracterização dos materiais, [4.2] o experimento de aplicação do método de dosagem, [4.3] os procedimentos de produção, moldagem e cura e a determinação das propriedades do UHCP nos estados fresco e endurecido e [4.4] o tratamento estatístico e o escopo da análise comparativa dos resultados, posteriormente apresentada no Capítulo 5. Neste capítulo também é apresentado o experimento de validação do método proposto [4.5].

Figura 12 - Programa experimental



Fonte: Autoria própria

## 4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram especificados o uso de cimento Portland de alta resistência inicial, sílica ativa, areia artificial de basalto, areia natural, pó de quartzo e aditivo superplastificante.

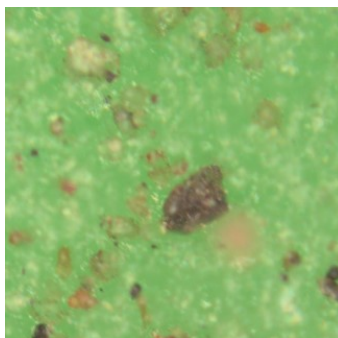
A caracterização dos materiais foi realizada no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Parte dos dados foi fornecida pelos fabricantes. As características destes materiais, comercialmente disponíveis em território nacional, são apresentadas a seguir.

### 4.1.2 Agregados Miúdos

Para a produção do UHPC utilizou-se como agregado miúdo, uma composição entre areia artificial de basalto e areia natural quartzosa.

A areia artificial, encontrada na região de Ibiporã, no norte do Paraná, é originada de rocha de granulação fina, constituída essencialmente por cristais de labradorita, augita e opacos, com presença de microfenocristais de labradorita e augita, sendo classificada como basalto, conforme o certificado de análise petrográfica apresentado no ANEXO A. O material tem massa específica de  $2.910 \text{ kg/m}^3$ , determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa unitária solta de  $1.820 \text{ kg/m}^3$  e índice de vazios de 37,5%, estabelecidos conforme as prescrições da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A Figura 13 é uma imagem determinada com o auxílio de um microscópio óptico marca Olympus, modelo BX51, com aproximação de  $50 \mu\text{m}$  em que é possível identificar o típico formato anguloso e lamelar dos grãos de areia artificial.

**Figura 13 - Microscopia óptica da areia artificial de basalto**

**Fonte: Autoria própria**

Os resultados da composição granulométrica do material, determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), estão dispostos na Tabela 3, em que se pode observar que o agregado apresenta diâmetro máximo característico de 4,75 mm e módulo de finura de 3,49.

**Tabela 3 - Composição granulométrica da areia artificial**

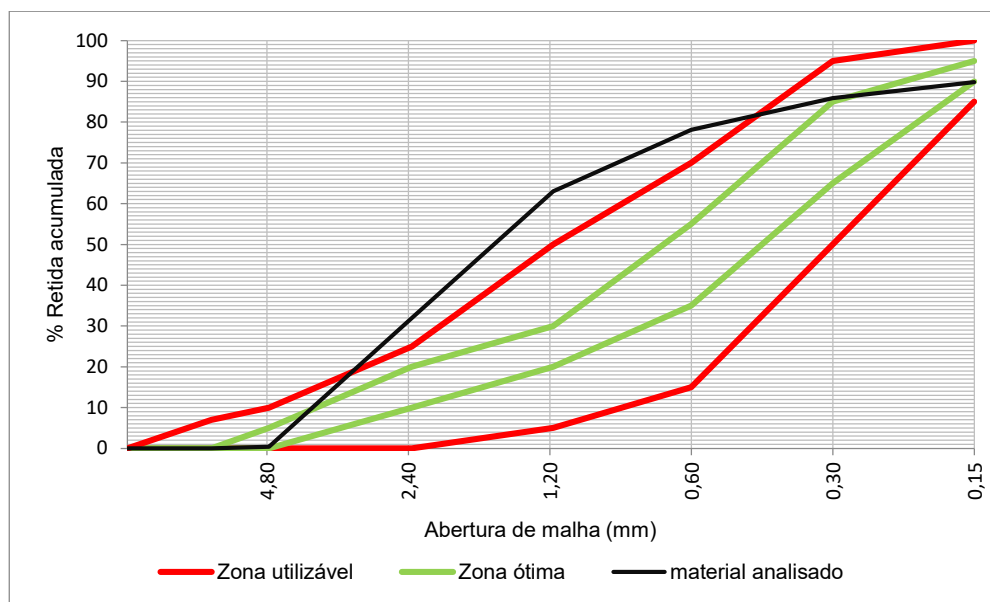
<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
4,75	1,20	0	0
2,36	94,50	32	32
1,18	92,90	31	63
0,60	45,10	15	78
0,30	23,30	8	86
0,15	11,80	4	90
Fundo	30,50	---	---
Total	299,30	---	---
	Diâmetro máximo característico (mm)		4,75
	Módulo de Finura		3,49

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 14 exibe a curva granulométrica do agregado em estudo. Observa-se que o traçado da curva está parcialmente situado acima do limite superior da zona

utilizável estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Segundo a série de Taylor, é classificada como areia grossa devido ao seu módulo de finura ser superior a 3,20.

**Figura 14 - Curva granulométrica da areia artificial**

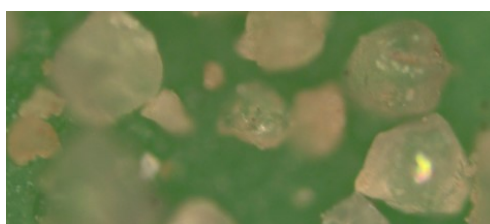


**Fonte: Autoria própria**

A areia natural, encontrada na região do litoral do Paraná, contém a predominância de 98% de sílica, como mostra o boletim de ensaios apresentado no ANEXO B. Sua massa específica é igual a 2.640 kg/m<sup>3</sup>, estabelecida segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009). A massa unitária solta é igual a 1.470 kg/m<sup>3</sup> e seu índice de vazios é de 44,3%, parâmetros determinados segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Por meio da Figura 15 pode-se observar, com aproximação de 100 µm, o formato mais arredondado dos grãos da areia natural.

**Figura 15 - Microscopia óptica da areia natural**



**Fonte: Autoria própria**

Os resultados do ensaio de análise granulométrica do material, realizado segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), estão dispostos na Tabela 4. O resultado do ensaio indica que o agregado apresenta diâmetro máximo característico de 0,60 mm e módulo de finura de 0,90.

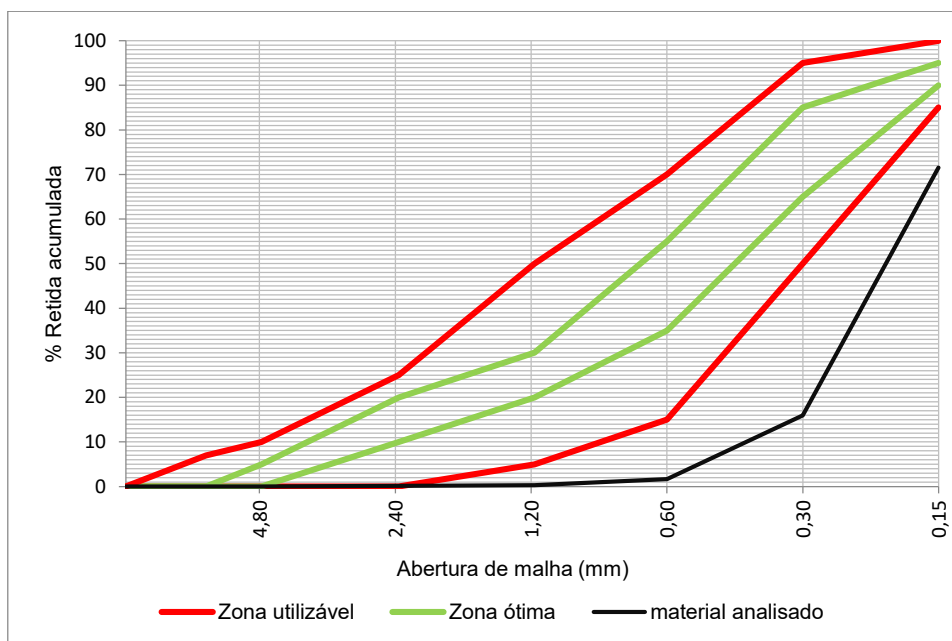
**Tabela 4 - Composição granulométrica da areia natural**

<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
4,75	0,00	0	0
2,36	0,50	0	0
1,18	0,40	0	0
0,60	4,20	1	2
0,30	42,80	14	16
0,15	166,50	56	72
Fundo	85,40	---	---
Total	299,80	---	---
	Diâmetro máximo característico (mm)		0,60
	Módulo de Finura		0,90

**Fonte: Autoria própria**

A Figura 16 apresenta a curva granulométrica da areia estudada. Nota-se que curva da areia natural está situada abaixo do limite inferior da zona utilizável apresentada na NBR 7211 (ABNT, 2009). Em função do seu módulo de finura, de acordo com a Série de Taylor, esta areia é classificada como muito fina.

**Figura 16 - Curva granulométrica da areia natural**



**Fonte: Autoria própria**

Para o desenvolvimento do experimento de validação do método, descrito em 5.3, optou-se pela substituição da areia artificial por areia natural. Este material, proveniente de União da Vitória/PR é utilizado na produção de concretos e argamassas. Apresenta massa específica de  $2.650 \text{ kg/m}^3$ , estabelecida segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa unitária solta de  $1.580 \text{ kg/m}^3$  e índice de vazios de 40,4%, ambos determinados segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A composição granulométrica do material, igualmente determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) é apresentada na Tabela 5, na qual se observa que este material apresenta diâmetro máximo característico de 1,18 mm e módulo de finura de 1,91.

Tabela 5 - Composição granulométrica da areia natural fina

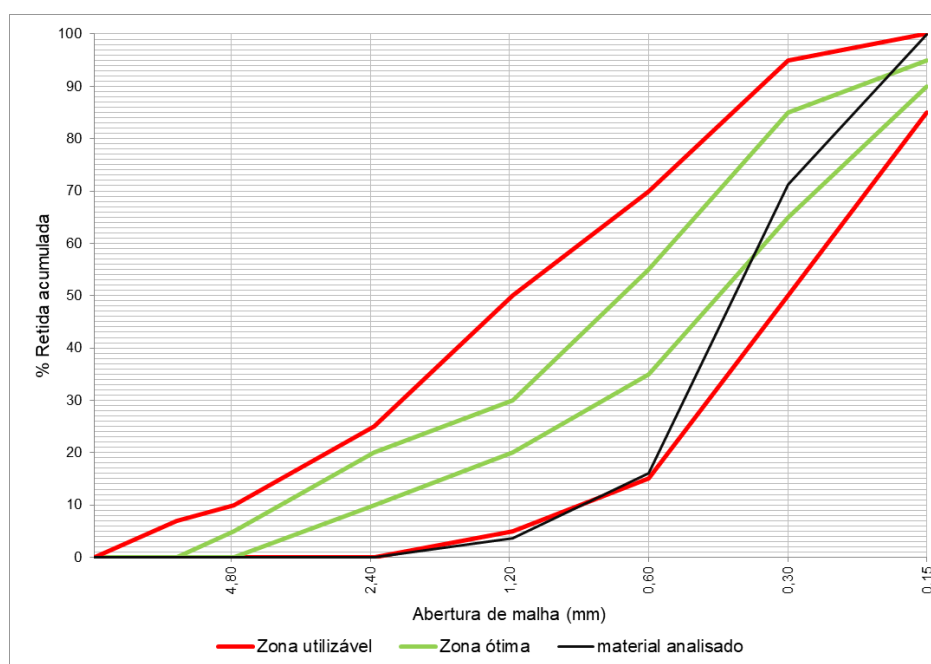
Abertura nominal da malha da peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retido individual	% Retido acumulado
4,75	0,00	0	0
2,36	0,15	0	0
1,18	13,30	4	4
0,60	45,45	12	16
0,30	201,30	55	71
0,15	104,70	29	100
Fundo	0,6	---	---
Total	365,50	---	---
	Diâmetro máximo característico (mm)		1,18
	Módulo de Finura		1,91

Fonte: Autoria própria

Na Figura 17 tem-se a curva granulométrica deste agregado. Observa-se que entre as peneiras 0,6 mm e 2,4mm a curva tangencia o limite inferior da zona utilizável, estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), enquanto nas peneiras mais finas situa-se dentro da zona ótima. Segundo a Série de Taylor, esta areia é classificada como fina.



**Figura 17 - Curva granulométrica da areia natural fina**



**Fonte: Autoria própria**

#### 4.1.3 Aglomerantes

Os aglomerantes empregados foram o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e a sílica ativa. Segundo o relatório de ensaios emitido pelo fabricante (ANEXO D) o material contém adição de até 10% de fíler calcário, apresenta massa específica de 3.090 kg/m<sup>3</sup>, superfície específica de 4.363 cm<sup>2</sup>/g resistência à compressão média de 46,3 MPa aos sete dias e 56,1 MPa aos 28 dias de idade. A Tabela 6 resume a composição do cimento segundo informações do fabricante.

**Tabela 6 - Composição do cimento**

Óxido	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	19,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,28
SO <sub>3</sub>	2,68
MgO	2,90
CaO	62,72

**Fonte: Fabricante (2020)**

Os principais parâmetros físicos e químicos do cimento são apresentados na Tabela 7. De acordo com o fabricante, o material atende às especificações da NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018).

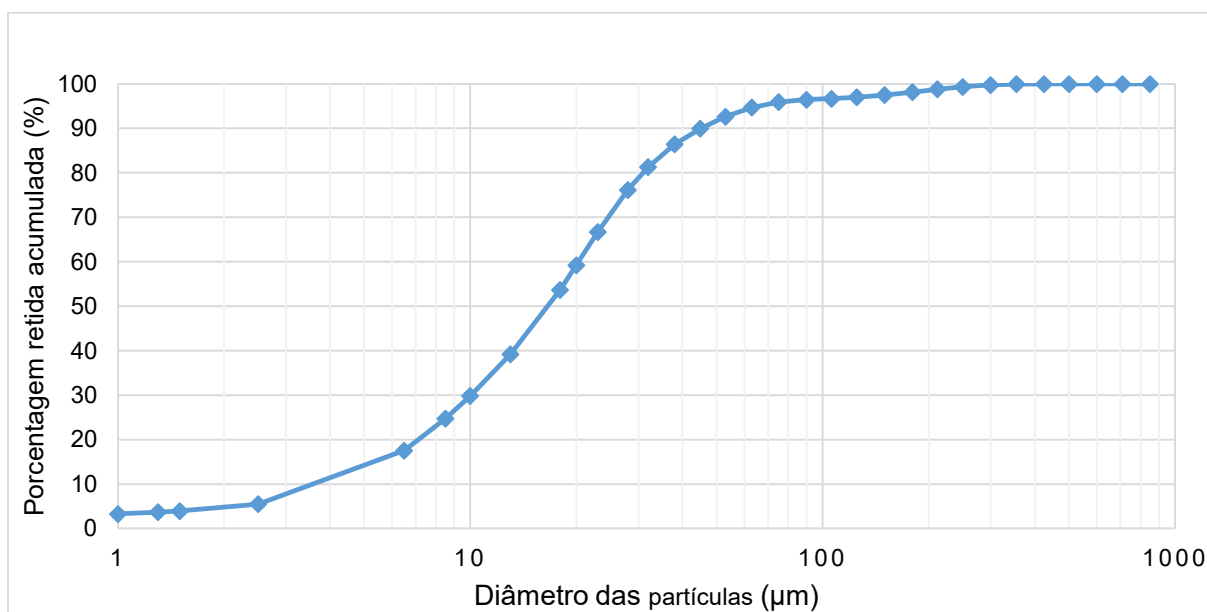
**Tabela 7 - Parâmetros físicos e químicos do cimento**

Parâmetro	Valor
Tempo de início de pega (min.)	175
Perda ao fogo (%)	3,62
Resíduo insolúvel (%)	0,82
CaO livre (%)	0,97

**Fonte: Fabricante (2020)**

A curva granulométrica do cimento está representada na Figura 18.

**Figura 18 - Curva granulométrica do cimento**



**Fonte: Autoria própria**

A sílica ativa empregada como adição pozolânica é comercializada pela Tecnosil Indústria de Produtos Químicos Ltda. Segundo o fabricante, o material não densificado apresenta massa específica de 2.220 kg/m<sup>3</sup>, teor de SiO<sub>2</sub> superior a 90%,

superfície específica (B.E.T.) de 19.000 m<sup>2</sup>/kg e partículas esféricas com 0,20 µm de diâmetro médio ( $d_{50}$ ).

Na Tabela 8 tem-se a composição do material determinada por meio do espectrofotômetro de fluorescência de raios-X, marca Shimadzu, modelo EDX-720/800HS.

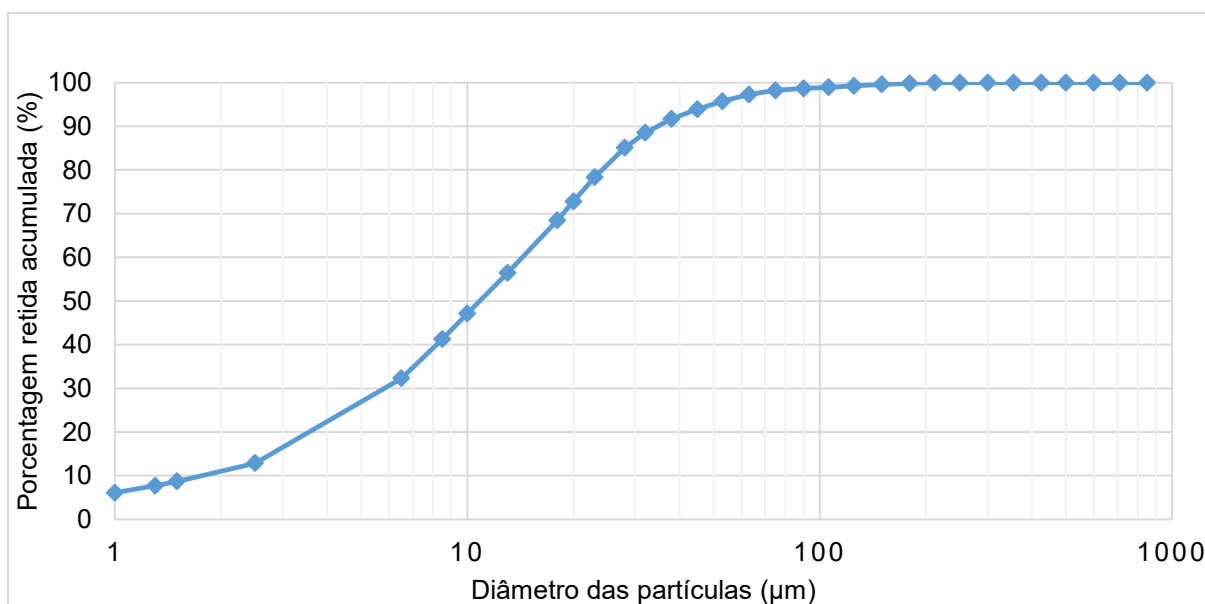
**Tabela 8 - Composição da sílica ativa**

Óxido	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	93,02
K <sub>2</sub> O	1,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,22
SO <sub>3</sub>	0,98
Na <sub>2</sub> O	0,89
CaO	0,31

Fonte: Autoria própria

Na Figura 19 tem-se a curva granulométrica da sílica ativa.

**Figura 19 - Curva granulométrica da sílica ativa**



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.4 Pó de Quartzo

O pó de quartzo foi considerado na composição do empacotamento granular dos agregados com a função de fíler, ou seja, de preenchimento de vazios, tendo como objetivo atuar na redução da porosidade do conjunto granular, aumentando a densidade de empacotamento.

O pó de quartzo utilizado é comercializado como areia quartzosa de sílica moída #400 e apresenta massa específica de 2.620 kg/m<sup>3</sup>, determinada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017) e massa unitária solta de 0,913 kg/m<sup>3</sup>, segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006). De acordo com Baião *et al.* (2018, p. 6), este menor valor da densidade aparente é justificado pela “presença de interações interparticulares mais acentuadas em meios porosos com partículas menores, provocando a formação de aglomerados com espaços vazios em seu interior o que resulta em uma menor densidade aparente”.

A composição do material, de acordo com o certificado de análise emitido pelo fabricante (ANEXO C) está resumida na Tabela 9.

**Tabela 9 - Caracterização do pó de quartzo**

<b>Parâmetro</b>	<b>Composição</b>
Umidade (%)	0,040
Perda ao fogo a 1000°C (%)	0,170
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	>99,00
Teor de TiO <sub>2</sub> (%)	<0,035
Teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<0,500
Teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<0,500

**Fonte: Fabricante (2020)**

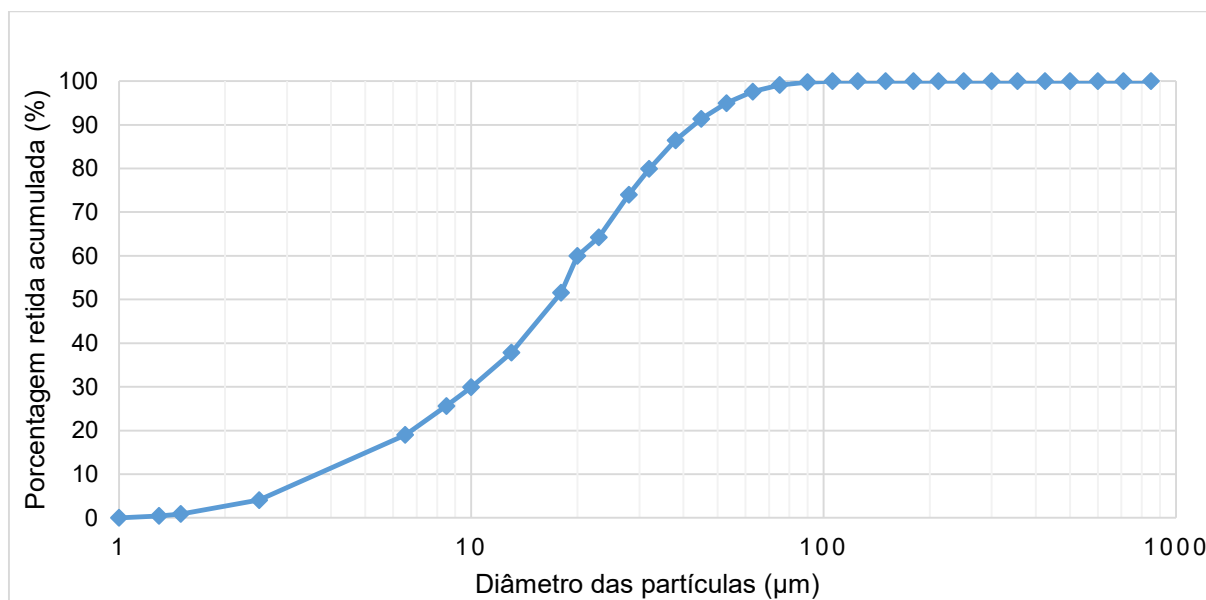
A Tabela 10 exhibe a composição granulométrica do material determinada por meio de um analisador de partículas a laser modelo Battersize/S3 Plus, cujos grãos apresentam diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 17,4 µm.

**Tabela 10 - Composição granulométrica do pó de quartzo**

Abertura nominal malha da peneira (µm)	% Passante acumulado	Abertura nominal malha da peneira (µm)	% Passante acumulado	Abertura nominal malha da peneira (µm)	% Passante acumulado	Abertura nominal malha da peneira (µm)	% Passante acumulado
850	100,00	212	100,00	53	94,98	13	37,85
710	100,00	180	100,00	45	91,37	10	29,90
600	100,00	150	100,00	38	86,47	8,5	25,61
500	100,00	125	100,00	32	79,91	6,5	19,00
425	100,00	106	99,98	28	74,01	2,5	4,09
355	100,00	90	99,79	23	64,23	1,5	0,90
300	100,00	75	99,11	20	56,96	1,3	0,43
250	100,00	63	97,60	18	51,59	1,0	0,02

Fonte: Autoria própria

A Figura 20 reproduz a curva granulométrica do pó de quartzo.

**Figura 20 - Curva granulométrica do pó de quartzo**

Fonte: Autoria própria

#### 4.1.5 Aditivo

Em função da baixa relação água/aglomerante característica dos concretos de ultra-alto desempenho, optou-se pelo uso do aditivo superplastificante base policarboxilato ADVA 458, produzido pela GCP Applied Technologies para a produção de concretos autoadensáveis. De acordo com o fabricante, este produto possui densidade de  $1.095 \text{ kg/m}^3$  e concentração de sólidos de 47%. Os teores recomendados variam de 0,7% a 1,3% em relação à massa de cimento.

#### 4.1.6 Fibras Metálicas

Para efeito desta pesquisa optou-se pelo emprego das fibras de aço Dramix® OL 13/20 (Figura 21). Segundo o fabricante, esta fibra, produzida em aço de alto carbono apresenta comprimento de 13mm, diâmetro médio de 0,2mm, resistência à tração de  $2,160 \text{ N/mm}^2$ , módulo de elasticidade de  $210.000 \text{ N/mm}^2$  e densidade de  $7,85 \text{ g/cm}^3$ .

**Figura 21 - Fibras metálicas**



**Fonte: Autoria própria**

## 4.2 EXPERIMENTO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM

Neste item estão detalhadas as etapas da aplicação do método de dosagem (Figura 10) empregado para a determinação dos traços de UHPC, incluindo o experimento piloto que foi executado para a definição do coeficiente de distribuição  $q$ , necessário para o estabelecimento da curva granulométrica ideal.

### 4.2.1 Ensaios para a Determinação do Teor de Sílica

Conforme definido em 3.2, os ensaios para a determinação do teor de sílica foram executados considerando-se os percentuais de 10, 15, 20, 25, 30 e 35% de sílica sobre a massa de cimento, a partir de uma adaptação do método de empacotamento úmido estabelecido por Wong e Kwan (2008). A relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) estudada variou de 0,10 a 0,22, em incrementos de 0,02. Este intervalo foi determinado com base nos valores observados nos parâmetros correlatos.

Para cada um dos teores de sílica foi produzida uma pasta. O teor de aditivo de cada pasta foi estabelecido experimentalmente, tendo como ponto de partida o valor de 1,3% recomendado pelo fabricante. O aditivo foi sendo adicionado em incrementos de 0,5% até que a pasta atingisse o ponto de liquefação, conforme se pode observar na Figura 22.

**Figura 22 - Ponto de liquefação da pasta (relação a/agl = 0,12)**



**Fonte: Autoria própria**

É importante destacar que para a relação  $a/agl$  de 0,10, a quantidade de água adicionada foi insuficiente para a produção de uma pasta minimamente homogênea, afetando a ação do aditivo e dando origem a uma pasta sem fluidez (Figura 23). Como não foi adotado o mecanismo de compactação em nenhum dos ensaios, a pasta não preencheu integralmente o recipiente de ensaio, alterando significativamente os resultados da concentração de sólidos e da relação de vazios. Por este motivo optou-se por determinar o teor de aditivo de todas as pastas para  $a/agl$  de 0,12.



**Figura 23 - Pasta com relação a/agl = 0,10**

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 11 consolida os teores de aditivo estabelecidos para cada pasta. Vale ressaltar que, segundo Wong e Kwan (2008), uma dosagem acima da recomendada pelo fabricante pode ser usada se comprovada como satisfatória por meio de mistura experimental. Outro ponto que merece destaque é o fato de que os teores recomendados pelo fabricante se referem tão somente à dosagem em relação à massa de cimento e não à massa total de aglomerantes.

**Tabela 11 - Teores de aditivo para os diferentes teores de sílica**

<b>Teor de sílica sob a massa de cimento (%)</b>	<b>Teor de aditivo sob a massa de aglomerantes (%)</b>
10	2,8
15	2,8
20	3,3
25	3,3
30	3,8
35	4,1

**Fonte: Autoria própria**

Nota-se que a medida que o teor de sílica aumenta, é necessário aumentar o teor de aditivo para que o ponto de liquefação da pasta seja mantido constante. Este fenômeno é explicado pela influência da elevada superfície específica da sílica na fluidez da pasta.

É fundamental destacar que um conjunto de ensaios previamente realizados mostrou que a adoção de um teor médio de aditivo (3,3%) para todos os teores de sílica afetou de forma significativa a reologia de algumas pastas. Por exemplo, para 15% de sílica, o teor médio de aditivo se mostrou elevado, ocasionando exsudação, segregação e uma leve incorporação de ar na pasta a partir da relação água/aglomerante de 0,18, como se pode observar na Figura 24.

**Figura 24 - Ensaio de empacotamento úmido - pasta com 15% de sílica,  $a/agl = 0,18$  e teor médio de aditivo de 3,3%**



**Fonte: Autoria própria**

Já para a pasta contendo de 30% de sílica, ocorreu o oposto. O teor médio de 3,3% de aditivo se mostrou insuficiente para a completa dispersão dos materiais que compõem a pasta, provocando a aglomeração dos finos como se pode observar na região destacada pelo círculo amarelo na Figura 25.

**Figura 25 - Ensaio de empacotamento úmido - pasta com 30% de sílica,  $a/agl = 0,16$  e teor médio de aditivo de 3,3%**



**Fonte: Autoria própria**

Mesmo com o aumento da relação água/aglomerante ao longo do ensaio, alguns aglomerados ainda se mantiveram, sendo que sua dispersão quase total se deu apenas para a relação  $a/agl$  de 0,22. Em função destes resultados optou-se por fixar o ponto de liquefação da pasta e não um teor único de aditivo na realização do ensaio de empacotamento úmido.

Isto posto, tendo sido definido o teor de aditivo correspondente a cada teor de sílica deu-se início aos ensaios descritos em 3.2 para cada uma das pastas. A Figura 26 mostra a etapa de determinação da massa do conjunto para a pasta com teor de sílica de 20% e relação  $a/agl = 0,22$ , em massa. Destaca-se que nesta pesquisa foi empregado um recipiente cilíndrico com capacidade de 400 cm<sup>3</sup>. Observa-se que o teor de aditivo empregado nesta pasta também foi de 3,3% (Tabela 11) e diferentemente das outras pastas, mostrou-se adequado para este teor de sílica.

Outro ponto a se destacar é o fato de que apesar da máxima relação água/aglomerante e do teor de aditivo estar acima daquele indicado pelo fabricante, não foram identificados quaisquer sinais de exsudação, segregação, incorporação de ar ou formação de aglomerados de finos nas demais pastas. Logo, conclui-se que o ajuste no teor de aditivo permitiu que o comportamento favorável se repetisse para todos os teores de sílica estudados.

**Figura 26 - Ensaio de empacotamento úmido - determinação da massa de material**

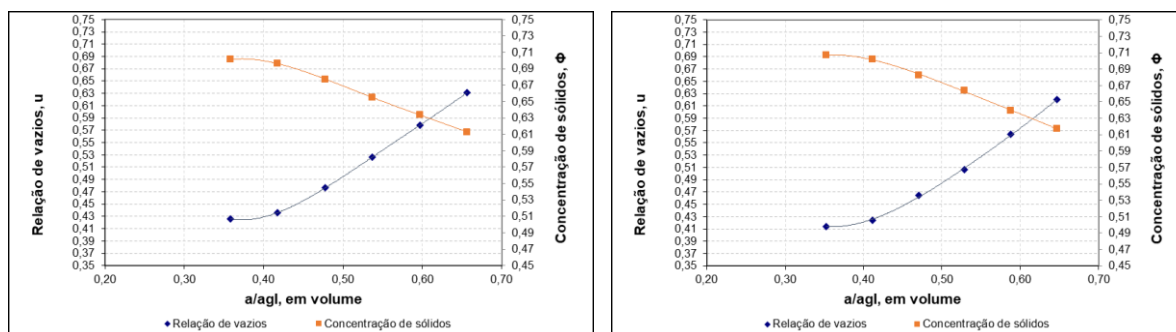


**Fonte: Autoria própria**

Os consumos e volumes de materiais utilizados na produção de cada uma das pastas, assim como a determinação, por meio das Equações 13 e 14, dos parâmetros concentração de sólidos ( $\phi$ ) a relação de vazios ( $\mu$ ) resultantes do ensaio estão apresentados no APÊNDICE A.

Na Figura 27(a) a Figura 27(b) pode-se observar os resultados do ensaio para os teores de 10 e 15% de sílica. Nota-se que com a maior incorporação de sílica à pasta ocorre uma discreta redução da relação de vazios, o que era esperado dada a maior superfície específica desta adição.

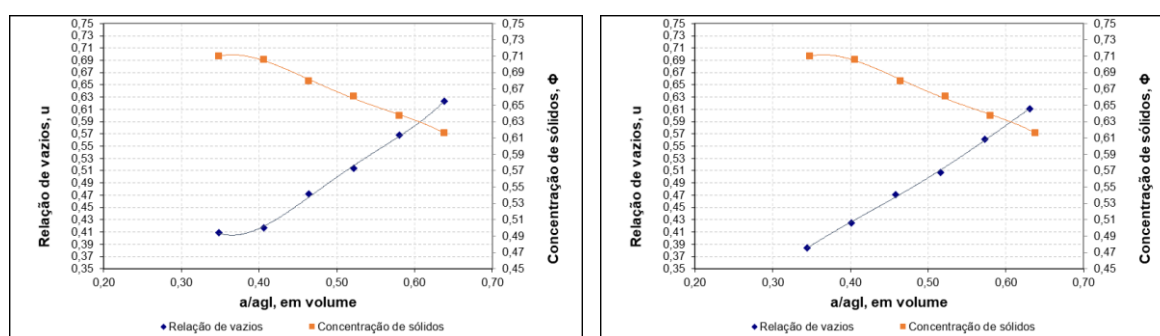
**Figura 27 - Relação entre a concentração de sólidos, a relação de vazios e relação a/agl em volume: (a) para 10% de sílica e (b) para 15% de sílica**



Fonte: Autoria própria

A Figura 28(a) e a Figura 28(b) representa os resultados do ensaio de empacotamento úmido para os teores de 20 e 25% de sílica em que se pode observar comportamento similar aos demais teores, entretanto, considerando-se as condições fixadas nesta pesquisa, no teor de 25% tem-se a maior concentração de sólidos dentre todos os teores, obtida para a relação água/aglomerante em volume igual a 0,34, ou 0,12 em massa e o teor de aditivo de 3,3%. Isso ocorre porque uma maior concentração de sólidos leva a uma menor quantidade de água necessária para preencher os vazios.

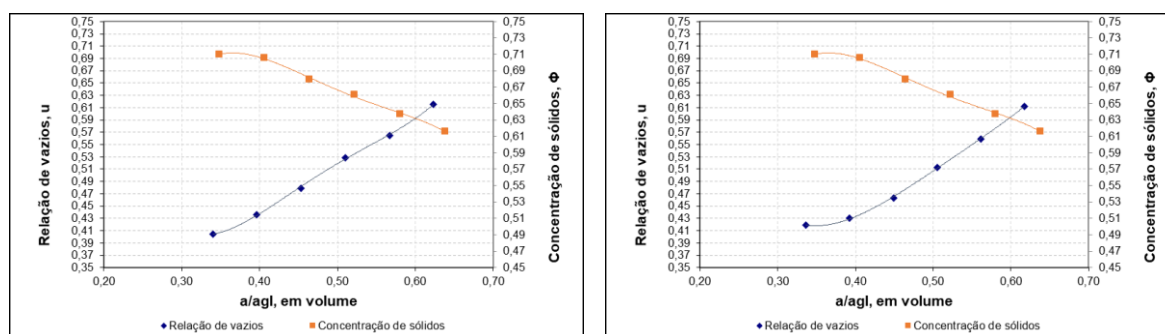
**Figura 28 - Relação entre a concentração de sólidos, a relação de vazios e relação a/agl em volume: (a) para 20% de sílica e (b) para 25% de sílica**



Fonte: Autoria própria

Na Figura 29(a) e Figura 29(b) tem-se os resultados do ensaio de empacotamento úmido para os teores de 30 e 35%. A partir do teor de 30% é possível observar-se a queda na máxima concentração de sólidos da pasta em relação aos demais teores.

**Figura 29 - Relação entre a concentração de sólidos, a relação de vazios e relação a/agl em volume: (a) para 30% de sílica e (b) para 35% de sílica**



Fonte: Autoria própria

A Tabela 12 consolida o resultado dos ensaios executados, indicando o teor de sílica, o teor de aditivo, a relação água/aglomerante correspondente à máxima densidade de empacotamento e a respectiva relação de vazios de cada um dos teores de sílica avaliados.

**Tabela 12 - Resultados do ensaio de empacotamento úmido para diferentes teores de sílica**

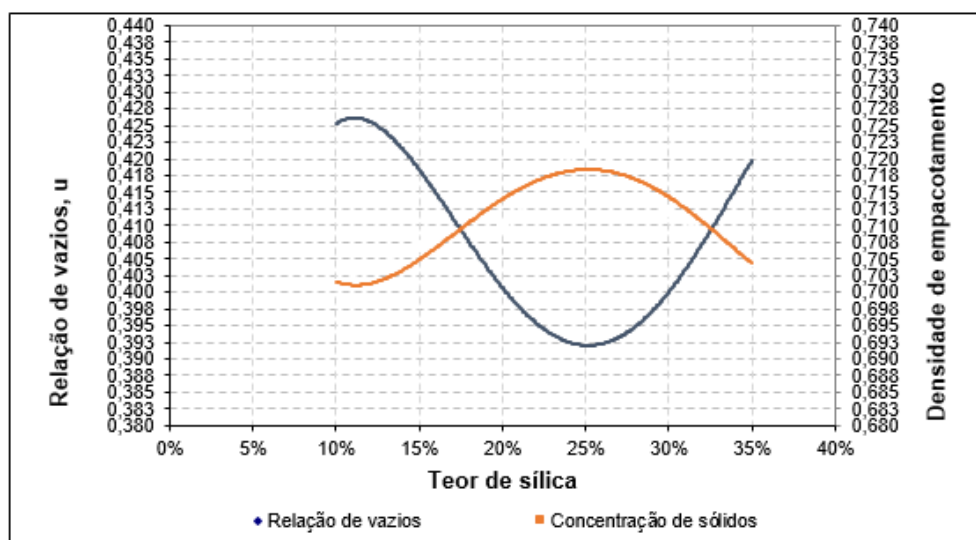
Teor de sílica sob a massa de cimento $\omega_{sa}$ (%)	Teor de aditivo sob a massa de aglomerantes (%)	a/agl	Relação de vazios ( $\mu$ )	Densidade de empacotamento
10	2,8	0,12	0,4261	0,7012
15	2,8	0,12	0,4143	0,7070
20	3,3	0,12	0,4088	0,7098
25	3,3	0,12	0,3839	0,7226
30	3,8	0,12	0,4041	0,7122
35	4,1	0,12	0,4190	0,7047

Fonte: Autoria própria

Conforme pode-se verificar na Figura 30, à medida que aumenta o teor de sílica, a relação de vazios diminui e a densidade de empacotamento cresce até determinado ponto. A melhora na densidade de empacotamento pode ser atribuída tanto ao teor de aditivo superplastificante, como à presença da sílica, que reduz o índice de vazios pelo efeito de preenchimento das lacunas existentes entre as

partículas cimento, assim como à sua forma esférica que promove um melhor empacotamento do sistema (WONG E KWAN, 2008).

**Figura 30 - Relação entre os teores de sílica, a relação de vazios e a densidade de empacotamento**



**Fonte: Autoria própria**

A análise da Figura 30 indica que o teor de sílica de 25%, sob as condições de produção de todas as misturas estudadas, é o que leva à maior densidade de empacotamento dentro do intervalo estudado, e, a partir deste teor, a densidade de empacotamento passa a decrescer e o índice de vazios aumenta.

Posto isto, em função dos resultados apresentados, optou-se por estabelecer como objetivo específico desta pesquisa a análise do comportamento do UHPC para os teores de sílica de 20, 25 e 30%, uma vez que este intervalo compreende a máxima densidade de empacotamento, o teor imediatamente inferior e o teor sucessivamente superior a esta, em que a densidade de empacotamento passa a apresentar queda.

Adicionalmente, o teor de 15% também foi verificado por se tratar daquele que, em termos de cálculos estequiométricos, é próximo do necessário para consumir a totalidade do hidróxido de cálcio resultante da reação de hidratação do cimento. O valor de 15,6% foi determinado por Campos (2020a) e pode ser aqui considerado dada a elevada similaridade entre a composição química e as propriedades físicas do cimento e da sílica, de mesmos fabricantes e empregados nas duas pesquisas.

Por último, há que se considerar que a variação do consumo do aditivo em função do teor de sílica promoveu alterações na relação de vazios e na densidade de empacotamento das pastas, como pode-se observar na Tabela 13. Quando se eleva o teor de aditivo para um dado consumo de sílica, ocorre uma maior dispersão dos grãos e a densidade de empacotamento aumenta. Já quando o aditivo é insuficiente a aglomeração dos finos promove a redução na densidade de empacotamento, uma vez que ocorre o aprisionamento de ar nos aglomerados.

**Tabela 13 - Resultados do ensaio de empacotamento úmido para diferentes teores de sílica em função do teor de aditivo**

Teor de sílica sob a massa de cimento $\omega_{sa}$ (%)	a/agl	Teor de aditivo (%)	Relação de vazios ( $\mu$ )	Densidade de empacotamento
15	0,12	2,8	0,4143	0,7070
15	0,12	3,3	0,4057	0,7114
30	0,12	3,8	0,4041	0,7122
30	0,12	3,3	0,4629	0,6836

**Fonte: Autoria própria**

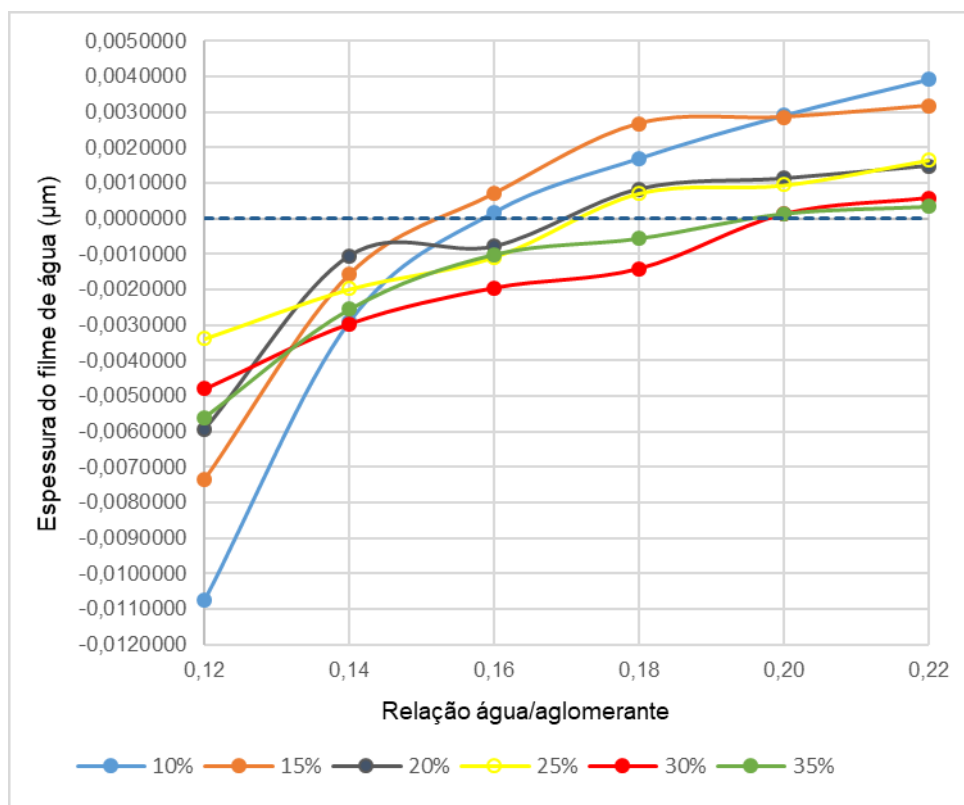
Contudo é importante destacar que as densidades de empacotamento obtidas para os teores de 15 e 30% de sílica com o consumo médio de aditivo (3,3%) são inferiores à densidade de 0,7226 correspondente ao teor de 25% de sílica, igualmente determinada para o teor de 3,3% de aditivo (Tabela 12), ratificando, portanto, o resultado estabelecido nesta etapa da pesquisa, ou seja, a escolha do teor de 25% de sílica como o ideal.

#### 4.2.2 Ensaio para a Determinação da Relação água/aglomerante

A Figura 31 relaciona, para cada um dos teores de sílica estudados, a espessura média dos filmes de água (*WTF*) que envolvem as partículas com as diferentes relações a/agl em massa empregadas no ensaio.



**Figura 31 - Espessura do filme de água na pasta em função da relação a/agl e do teor de sílica**



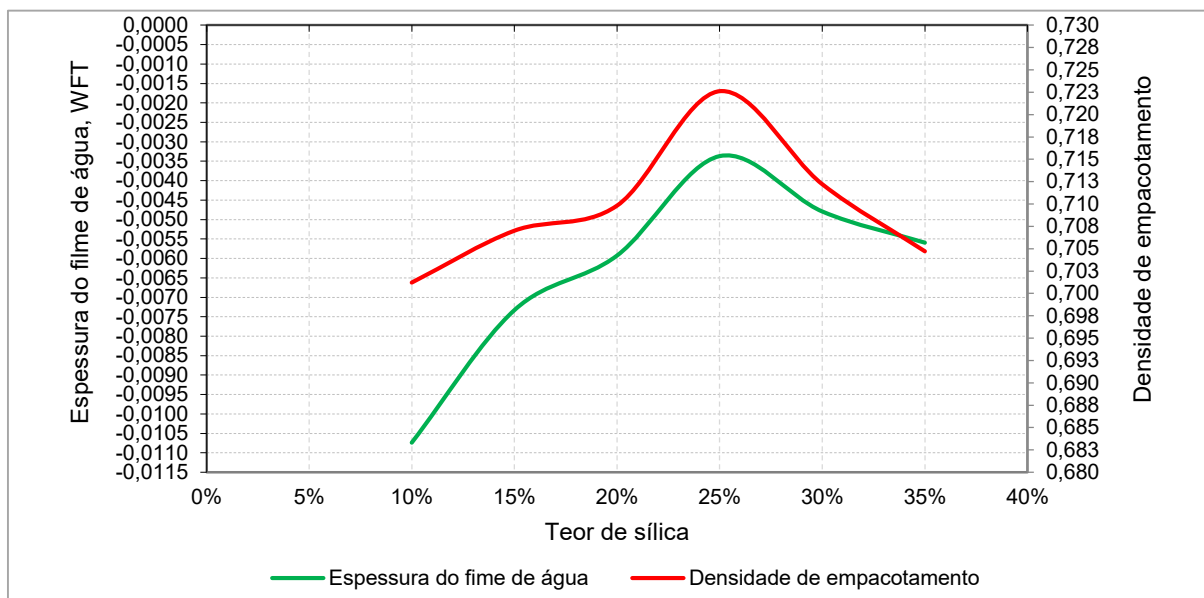
**Fonte: Autoria própria**

Os valores negativos indicam que a quantidade de água adicionada à pasta é insuficiente para preencher os vazios existentes, resultando em pastas com níveis mais baixos de fluidez.

A relação entre o teor de sílica, a espessura do filme de água e a máxima densidade de empacotamento (correspondente à relação a/agl igual a 0,12 em massa) está apresentada na Figura 32. Nota-se que até o teor de 25%, em função do incremento do volume de sílica, um maior número de vazios passou a ser preenchido, aumentando a densidade de empacotamento e reduzindo a quantidade de água necessária para preenchê-los e consequentemente, aumentando a quantidade de água disponível para a formação do filme. O mesmo comportamento foi identificado nos trabalhos de Fung e Kwan (2010), Kwan e Chen (2012), Kwan e Li (2012) e Klein *et al.* (2016). E, ainda que a variação na densidade de empacotamento não seja muito extensa, nota-se que sua influência tem impacto na espessura do filme de água. Por exemplo, enquanto a variação da densidade de empacotamento entre os teores de 20

e 25% é de 1,8%, a diferença entre a *WTF* é de 42%. Este mesmo fenômeno foi igualmente identificado na pesquisa de NG *et al.* (2016).

**Figura 32 - Espessura do filme de água na pasta para a máxima densidade de empacotamento, em função do teor de sílica**

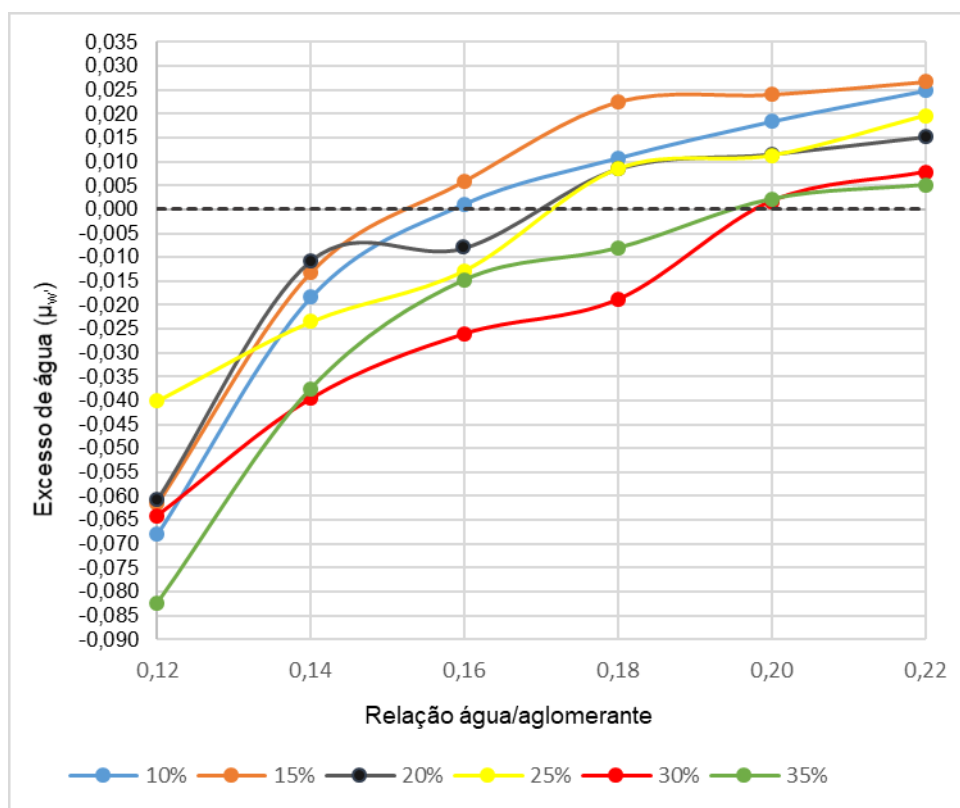


**Fonte: Autoria própria**

Entretanto, a partir de 25% de sílica a densidade de empacotamento e espessura do filme de água passaram a reduzir. Conforme citado por Kwan e Chen (2012), o aumento no teor de sílica quase nunca promove o aumento do *WTF*. Isso se deve à sua maior superfície específica, o que aumenta a demanda de água necessária para molhar as partículas.

Na Figura 33 tem-se a relação entre o excesso de água presente em cada uma das pastas ( $\mu w'$ ) e a relação água/aglomerante para cada teor de sílica.

**Figura 33 - Excesso de água em função da relação a/agl e do teor de sílica**



Fonte: Autoria própria

Nota-se que para os teores de sílica de 10 e 15%, a partir da relação água/aglomerante de 0,16, tanto a espessura do filme de água (Figura 31) quanto o parâmetro que representa o excesso de água (Figura 33) assumem valores positivos, indicando que, a partir deste ponto os poros estão totalmente preenchidos e o excesso de água passa a ser observado entre as partículas, promovendo níveis mais elevados de fluidez, como se pode observar na Figura 34.

A medida que o percentual de sílica aumenta (20 e 25%), a demanda de água também aumenta e a relação a/agl mínima passa a ser 0,18 para que haja água em excesso. Para os teores de sílica de 30 e 35% o padrão se repete e o excesso de água disponível se dá a partir da relação água/aglomerante de 0,20. Este fenômeno, igualmente identificado nos estudos de Fung e Kwan (2010) e Campos (2019) se justifica em função da maior superfície específica da sílica em relação ao cimento, o que eleva a demanda de água. Os demais parâmetros resultantes do ensaio estão apresentados no APÊNDICE A.

**Figura 34 - Fluidez da pasta para a relação a/agl de 0,16**



**Fonte: Autoria própria**

A medida que o percentual de sílica aumenta (20 e 25%), a demanda de água também aumenta e a relação a/agl mínima passa a ser 0,18 para que haja água em excesso. Para os teores de sílica de 30 e 35% o padrão se repete e o excesso de água disponível se dá a partir da relação água/aglomerante de 0,20. Este fenômeno, igualmente identificado nos estudos de Fung e Kwan (2010) e Campos (2019) se justifica em função da maior superfície específica da sílica em relação ao cimento, o que eleva a demanda de água. Os demais parâmetros resultantes do ensaio estão apresentados no APÊNDICE A.

Como esta pesquisa tem por objetivo analisar a influência de diferentes volumes de pasta e dos distintos teores de sílica na resistência à compressão, optou-se por estabelecer uma única relação água/aglomerante para todos os traços, de modo a evitar sua influência nas propriedades do concreto endurecido. Considerando-se que as análises foram efetuadas para os teores de 15, 20, 25 e 30% de sílica, a relação a/agl adotada foi 0,20 com o objetivo de se obter elevados níveis de fluidez (características autoadensáveis) para todas as misturas de UHPC.

Destaca-se ainda que as relações água/aglomerante supracitadas são condizentes com aquelas identificadas nos trabalhos correlatos. A análise dos dados

mostra que para teores de sílica entre 20 e 25% a relação  $a/agl$  mais empregada é 0,18 e para teores maiores ou iguais a 30%, este valor é de 0,20.

#### 4.2.3 Determinação do Coeficiente de Distribuição

Conforme citado no capítulo anterior, um experimento piloto foi previamente conduzido com o objetivo de determinar o coeficiente de distribuição ( $q$ ) necessário para o estabelecimento da curva granulométrica ideal segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado. Para tanto, os passos descritos de 3.4 a 3.6 foram replicados considerando-se valores de  $q$  iguais a 0,22; 0,37 e 0,52.

Estes três teores foram definidos tendo como referência os estudos de Soares *et al.* (2013) que efetuaram uma análise comparativa da resistência à compressão de diferentes traços de UHPC em que se variaram os coeficientes de distribuição em dosagens determinadas segundo os modelos de Andreasen e de Andreasen e Andersen modificado.

Destaca-se que o valor de  $q$  igual a 0,37 é comumente empregado na metodologia de empacotamento granular, uma vez que Funk e Dinger (1994) demonstraram que para  $q = 0,37$  é possível se obter a máxima densidade de empacotamento do conjunto granular e um maior potencial de resistência mecânica (REGINATO *et al.*; 2013).

Kim *et al.* (2016), assim como Li *et al.* (2018) adotaram o coeficiente  $q$  igual a 0,22, com base nos estudos de Hunger (2010) e Yu (2015), que por sua vez consideraram que valores entre 0,20 e 0,25 são adequados para a produção de UHPCs autoadensáveis, uma vez que a redução do valor do coeficiente de distribuição promove um aumento da quantidade de materiais finos, que exercem influência na interação entre as partículas. Por outro lado, valores mais altos do módulo de distribuição ( $q > 0,50$ ) levam a misturas mais grossas (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009; YU *et al.*, 2014; CHRIST, 2019). Segundo Reginato *et al.* (2013), este coeficiente tem interferência direta no formato da curva e, desta forma, a distribuição granulométrica ideal será distinta para cada valor de  $q$ .

A memória de cálculo que subsidiou o experimento piloto, assim como as demais informações relacionadas à sua execução, estão apresentadas no APÊNDICE B deste documento.

#### 4.2.3.1 Resultados do Experimento Piloto

Findo o experimento piloto, a escolha do coeficiente de distribuição se deu por meio da análise das médias dos resultados de resistência à compressão dos respectivos corpos de prova ensaiados aos sete dias de idade, segundo os procedimentos descritos em 4.5. Os resultados, disponíveis no APÊNDICE C, foram tratados por meio do Critério de Peirce e comparados por meio da análise normal de variância (ANOVA).

A Tabela 14 contém a média das resistências à compressão dos três traços, bem como o respectivo desvio padrão e o coeficiente de variação do ensaio.

**Tabela 14 - Resultados do experimento piloto**

<b>Parâmetro</b>	<b><math>q = 0,22</math></b>	<b><math>q = 0,37</math></b>	<b><math>q = 0,52</math></b>
Resistência à compressão média - $f_{cm}$ (MPa)	154,6	156,4	161,4
Desvio padrão – $Sd$ (MPa)	10,3	15,6	13,2
Coeficiente de variação do ensaio – $CV$ (%)	7	10	8

**Fonte: Autoria própria**

É importante destacar que segundo os resultados da ANOVA (Tabela 14), não há diferença estatística significativa entre as médias das resistências dos três traços, uma vez que o Valor  $p$  resultante é superior ao nível de rejeição de 5%. Portanto, neste caso em específico, o valor da resistência à compressão não pode ser considerado como um fator decisório na escolha do coeficiente de distribuição.

**Tabela 15 - Análise de variância da resistência média em função do valor  $q$** 

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F crítico	Comparação
Entre grupos	132,6244	2	66,3122	0,35699	0,70643	3,80557	Efeito não significativo
Dentro dos grupos	2414,805	13	185,7542				
Total	2547,429	15	169,8286				

Fonte: Autoria própria

Como parâmetros adicionais, visando melhor subsidiar a análise, são apresentados na Tabela 16: os consumo de cimento ( $C_{cp}$ ) e de sílica ( $C_{sa}$ ), a relação areia/cimento, a relação areia + pó de quartzo/cimento, a massa específica no estado endurecido, a densidade de empacotamento do conjunto granular ( $\sigma_{tm}$ ), o volume mínimo de pasta ( $V_p^{mín}$ ), a diferença entre o valor do módulo de finura ideal determinado de acordo com o modelo de Andreasen e Andersen modificado e do módulo de finura resultante da curva resultante obtida por meio da análise matricial, a soma do erro quadrado, o Índice de Desvio do Empacotamento (IDE) e o *binder index* ( $BI$ ) de cada traço.

**Tabela 16 - Parâmetros adicionais do experimento piloto**

Parâmetro	$q = 0,22$	$q = 0,37$	$q = 0,52$
Consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ )	835	774	803
Consumo de sílica ( $\text{kg/m}^3$ )	209	196	201
Relação areia/cimento	1,081	1,461	1,465
Relação areia+pó de quartzo/cimento	1,415	1,700	1,590
Massa específica ( $\text{Kg/m}^3$ )	2356	2410	2423
Densidade de empacotamento do conjunto granular – $\sigma_{tm}$	0,64173	0,66741	0,65488
Volume mínimo de pasta – $V_p^{mín}$	0,35827	0,33259	0,34512
Diferença entre os valores de módulo de finura	2,0%	5,7%	7,1%
Soma do erro quadrado – $\Xi$	0,0405	0,0783	0,0931
Índice de Desvio do Empacotamento – IDE	60,06	85,16	100,78
<i>Binder index</i> ( $\text{kg/m}^3/\text{MPa}$ )	6,75	6,20	6,22

Fonte: Autoria própria

Apesar da diferença entre os módulos de finura das composições granulométricas ideal e matricial, a soma do erro quadrado e o valor do IDE serem menores para o para o coeficiente de distribuição de 0,22, e, a resistência mais elevada ter sido registrada para  $q = 0,52$ , a análise do coeficiente de empacotamento granular mostra que para o valor de  $q$  igual a 0,37 tem-se a máxima densidade de empacotamento e, conseqüentemente, o menor volume de pasta, ratificando o estabelecido nos estudos de Funk e Dinger (1980) e os resultados de Soares *et al.* (2013).

Como consequência do menor volume de pasta, obtém-se um conjunto de traços com menor consumo de cimento e maior consumo de agregados, o que implica na redução da retração, na minimização do impacto ambiental, na redução do consumo de energia, na redução do custo final e em um melhor *binder index*. Em função destas condições, para efeito desta pesquisa optou-se por adotar o valor de  $q = 0,37$  como coeficiente de distribuição.

#### 4.2.4 Determinação da Curva Granulométrica Ideal da Composição

Para a definição da curva granulométrica ideal utilizou-se a Equação 5, considerando-se como  $D_p$  o tamanho da maior partícula igual a 4,8 mm (areia artificial) e o tamanho da menor partícula  $D_s$  de 0,0005 mm (pó de quartzo).

Estando definido o coeficiente de distribuição  $q = 0,37$ , a composição granulométrica ideal, determinada de acordo com o modelo de Andreasen e Andersen modificado está apresentada na Tabela 17. Destaca-se que a escolha adicional pelas peneiras 0,045; 0,020; 0,010; 0,005; 0,002; 0,001 e 0,0005 mm se deu segundo o mesmo critério de classificação das peneiras da série normal, ou seja, a abertura da peneira sucessiva corresponde à metade do diâmetro da peneira anterior. O módulo de finura resultante do modelo é igual a 2,62.



**Tabela 17 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado**

<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>% Passante</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
9,5	100,0%	0,0%	0,0%
6,3	100,0%	0,0%	0,0%
4,8	100,0%	0,0%	0,0%
2,4	76,6%	23,4%	23,4%
1,2	58,5%	18,1%	41,5%
0,6	44,5%	14,0%	55,5%
0,3	33,6%	10,8%	66,4%
0,15	25,2%	8,4%	74,8%
0,075	18,7%	6,5%	81,3%
0,045	14,9%	3,8%	85,1%
0,020	10,1%	4,8%	89,9%
0,010	7,1%	3,1%	92,9%
0,005	4,7%	2,4%	95,3%
0,002	2,3%	2,3%	97,7%
0,001	1,0%	1,3%	99,0%
0,0005 (fundo)	0,0%	1,0%	100,0%
	<b>TOTAL</b>	<b>100,0%</b>	<b>---</b>
	<b>Módulo de finura</b>		<b>MF = 2,62</b>

**Fonte: Autoria própria**

A matriz resultante do empacotamento por Andreasen e Andersen modificado está apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 - Análise matricial

	Material granular	Ax+Bx = E	- ( $\epsilon_1 \cdot G_1 + \epsilon_2 \cdot G_2 + \epsilon_3 \cdot G_3 = E_1$ )			E1	Erro^2		AtA*x=AtE
	Peneira (mm)	G1	G2	G3					
# PENEIRAS	25	0,0000	0,0000	0,0000					
	19	0,0000	0,0000	0,0000					
	12,5	0,0000	0,0000	0,0000					
	9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_1 =$	0,19	
	6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_2 =$	0,66	
	4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_3 =$	0,15	
	2,4	0,0017	0,3197	0,0000	0,2341	0,0005	Média do Erro =	0,0052	
	1,2	0,0030	0,6301	0,0000	0,4152	0,0000	Soma do Erro =	0,0783	
	0,6	0,0170	0,7808	0,0000	0,5554	0,0014	Varição do Erro =	0,000026	
	0,3	0,1598	0,8587	0,0000	0,6638	0,0046			
	0,15	0,7151	0,8981	0,0000	0,7477	0,0004			
	0,075	0,7151	0,8981	0,0000	0,8127	0,0072			
	0,045	0,7151	0,8981	0,0863	0,8509	0,0122			
	0,020	0,7151	0,8981	0,4304	0,8986	0,0112			
	0,010	0,7151	0,8981	0,7010	0,9294	0,0092			
	0,005	0,7151	0,8981	0,8651	0,9532	0,0090			
	0,002	0,7151	0,8981	0,9760	0,9767	0,0103			
	0,001	0,7151	0,8981	0,9998	0,9898	0,0123			
0,0005 Fundo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000				

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 18, a coluna *G1* representa a curva granulométrica da areia natural, a coluna *G2* se refere à curva granulométrica da areia artificial, a coluna *G3* se refere à curva granulométrica do pó de quartzo e, finalmente, a coluna *E1* corresponde à curva ótima obtida pelo modelo de Andreasen e Andersen modificado. A resolução do sistema de equações (Equações 21 a 23) permitiu a definição da porcentagem de cada agregado, indicada pelas variáveis  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$ . Multiplicando-se a porcentagem de cada material pela respectiva porcentagem retida acumulada de cada peneira tem-se a porcentagem retida acumulada da mistura granular que, por sua vez, é comparada com a porcentagem retida acumulada da curva ideal.

A partir da análise matricial (Tabela 18) pode-se concluir que a porcentagem de areia natural na composição da curva ideal ( $\varepsilon_1$ ) é de 19%, a porcentagem de areia artificial ( $\varepsilon_2$ ) corresponde a 66% e a de pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ ) é de 15%.

Na Tabela 19 observa-se a composição granulométrica determinada por meio do modelo matricial. Nota-se que o módulo de finura resultante do sistema é 2,47, diferindo 6% daquele determinado pelo modelo de Andreasen e Andersen modificado. Segundo Christ (2019), não é possível se determinar a quantidade exata de cada material a ser inserido na composição de modo que a curva granulométrica produzida com os agregados disponíveis seja exatamente igual à teórica, que visa o empacotamento perfeito.

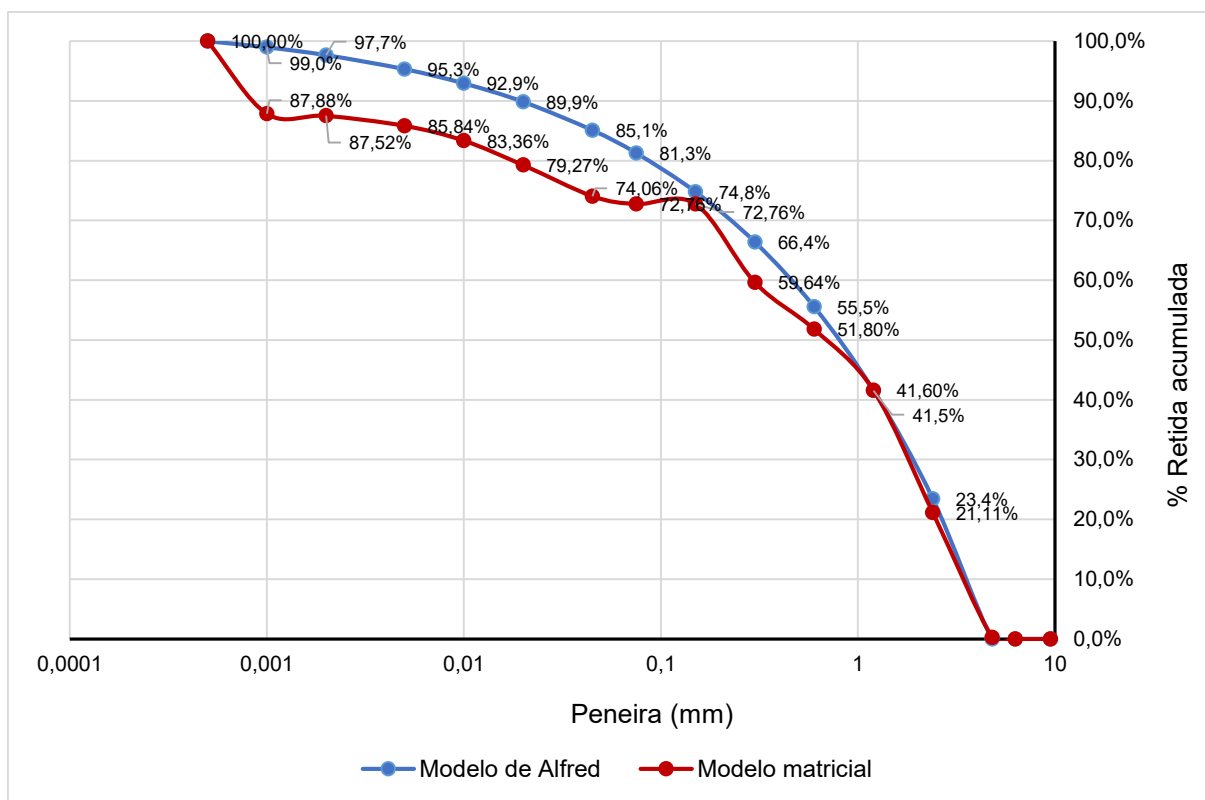
Tabela 19 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial

Abertura nominal da malha da peneira (mm)	G1	G2	G3	% Retido acumulado
	Areia natural ( $\varepsilon_1$ )	Areia artificial ( $\varepsilon_2$ )	Pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ )	
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
12,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,26%
2,4	0,0017	0,3197	0,0000	21,11%
1,2	0,0030	0,6301	0,0000	41,60%
0,6	0,0170	0,7808	0,0000	51,80%
0,3	0,1598	0,8587	0,0000	59,64%
0,15	0,7151	0,8981	0,0000	72,76%
0,075	0,7151	0,8981	0,0000	72,76%
0,045	0,7151	0,8981	0,0863	74,06%
0,020	0,7151	0,8981	0,4304	79,27%
0,010	0,7151	0,8981	0,7010	83,36%
0,005	0,7151	0,8981	0,8651	85,84%
0,002	0,7151	0,8981	0,9760	87,52%
0,001	0,7151	0,8981	0,9998	87,88%
0,0005	1,0000	1,0000	1,0000	100,00%
			<b>Módulo de finura</b>	<b>MF = 2,47</b>

Fonte: Autoria própria

A Figura 35 ilustra as curvas granulométricas resultantes do modelo de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial. Nota-se que até a peneira de 0,015 as curvas são próximas, sendo os principais desvios identificados a partir da peneira 0,075 mm. Isto se deve à composição granulométrica do pó de quartzo, que na proporção calculada, não atinge os valores determinados na composição ideal. É importante se observar que o diâmetro das peneiras, representado no eixo horizontal, está em escala logarítmica.

**Figura 35 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial**



**Fonte: Autoria própria**

O Índice de Desvio de Empacotamento entre as duas curvas é de 85,16. Destaca-se que para sua determinação foram empregadas as peneiras com abertura 4,80; 2,40; 1,20; 0,600; 0,300; 0,150; 0,075; 0,045; 0,020; 0,010; 0,005; 0,002; 0,001 e 0,0005 mm.

#### 4.2.5 Determinação do Volume Mínimo de Pasta

A partir da definição das porcentagens dos agregados empregou-se o modelo de Toufar modificado. Os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe e segunda classes estão indicados na Tabela 20.

**Tabela 20 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira e segunda classes**

Parâmetro	Valor
$\varphi_1$ (areia natural)	0,556818182
$\varphi_2$ (areia artificial)	0,625429553
$r_1$ (areia natural)	0,22324
$r_2$ (areia artificial)	0,77676
$k_d$	0,96923
$x$	0,86181
$k_s$	0,62987
$\alpha_t$	0,73590

Fonte: Autoria própria

Para a determinação do empacotamento da terceira classe, considerou-se como  $r_3$  a porcentagem de pó de quartzo estabelecida por meio modelo de Andreasen e Andersen modificado (15%) e como  $r_m$  (mistura entre areia natural e areia artificial), os 85% restantes.

O estabelecimento da densidade de empacotamento da mistura ( $\alpha_m$ ) foi determinado por meio da Equação 25, que contempla os valores de massa específica ( $ME_i$ ) e massa unitária solta ( $MU_i$ ) dos dois agregados, bem como suas respectivas frações volumétricas relativas ( $r_i$ ).

$$\alpha_m = \frac{1,47 \cdot 0,12746 + 1,58 \cdot 0,87254}{2,64 \cdot 0,12746 + 2,65 \cdot 0,87254} = 0,611240116$$

Os parâmetros matemáticos resultantes da aplicação do modelo estão listados na Tabela 21.

**Tabela 21 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\varphi_3$ (pó de quartzo)	0,348473282
$\alpha_m$ (mistura)	0,611240116
$r_3$ (pó de quartzo)	0,15125
$r_m$ (mistura)	0,84875
$k_{dm}$	0,99792
$x_m$	0,80406
$k_{sm}$	0,60197
$\alpha_{tm}$	0,66741
$V_p\text{mín}$	0,33259

**Fonte: Autoria própria**

Os resultados da análise indicam que a densidade de empacotamento granular da mistura dos três materiais ( $\alpha_{tm}$ ) é 0,66741 e que volume mínimo de pasta ( $V_p\text{mín}$ ) necessário para preencher os vazios entre os agregados é de 33,3%.

O experimento laboratorial executado para a verificação da densidade de empacotamento da mistura se deu por meio da determinação da massa específica e da massa unitária de uma mistura de areia natural e areia artificial produzida de acordo com as respectivas razões volumétricas  $r_1$  e  $r_2$ . A mistura apresentou massa específica de 2.857 kg/m<sup>3</sup>, determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e massa unitária solta de 1.776 kg/m estabelecida conforme as prescrições da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A densidade de empacotamento correspondente a esta mistura experimental ( $\alpha_{mexp}$ ) é de 0,621497160, valor que difere 1,7% do  $\alpha_m$  calculado. Simulações matemáticas do método proposto mostram que tal diferença corresponde a uma diminuição de 0,8% no volume de pasta ( $V_p\text{mín}$ ) e representaria uma redução aproximada de 12 kg/m<sup>3</sup> no consumo de cimento dos traços com o mínimo volume de pasta. Em função de sua baixa magnitude, acredita-se que estas diferenças não promoveriam impacto significativo nos patamares de resistência à compressão.

#### 4.2.6 Determinação dos Traços

A primeira etapa da determinação dos traços de UHPC consistiu em estabelecer o volume de cada um dos componentes da mistura, a partir dos respectivos volumes de pasta. Para tanto, foram empregadas as Equações 26 a 30. Os resultados para os teores de 15, 20, 25 e 30% de sílica estão apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22 - Volume dos materiais componentes dos traços**

(continua)

Teor de sílica	Parâmetro	Valor				
		0%	20%	40%	60%	80%
15%	Volume adicional de pasta					
	Volume de pasta $V_p$ (m <sup>3</sup> )	0,33259	0,39911	0,46563	0,53215	0,59867
	Volume de agregados (m <sup>3</sup> )	0,66741	0,60089	0,53437	0,46785	0,40133
	Volume de cimento (m <sup>3</sup> )	0,17310	0,20772	0,24234	0,27696	0,31158
	Volume de sílica (m <sup>3</sup> )	0,03647	0,04376	0,05106	0,05835	0,06564
	Volume de pó de quartzo (m <sup>3</sup> )	0,10095	0,09089	0,08083	0,07076	0,06070
	Volume de areia artificial (m <sup>3</sup> )	0,44000	0,39615	0,35230	0,30844	0,26459
	Volume de areia natural (m <sup>3</sup> )	0,12646	0,11385	0,10125	0,08864	0,07604
	Volume de água (m <sup>3</sup> )	0,12302	0,14763	0,17223	0,19684	0,22144
Volume total (m <sup>3</sup> )	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	
20%	Volume de pasta $V_p$ (m <sup>3</sup> )	0,33259	0,39911	0,46563	0,53215	0,59867
	Volume de agregados (m <sup>3</sup> )	0,66741	0,60089	0,53437	0,46785	0,40133
	Volume de cimento (m <sup>3</sup> )	0,16445	0,19733	0,23022	0,26311	0,29600
	Volume de sílica (m <sup>3</sup> )	0,04619	0,05543	0,06467	0,07391	0,08315
	Volume de pó de quartzo (m <sup>3</sup> )	0,10095	0,09089	0,08083	0,07076	0,06070
	Volume de areia artificial (m <sup>3</sup> )	0,44000	0,39615	0,35230	0,30844	0,26459
	Volume de areia natural (m <sup>3</sup> )	0,12646	0,11385	0,10125	0,08864	0,07604
	Volume de água (m <sup>3</sup> )	0,12195	0,14634	0,17073	0,19512	0,21952
	Volume de agregados (m <sup>3</sup> )	0,66741	0,60089	0,53437	0,46785	0,40133
Volume total (m <sup>3</sup> )	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	



Tabela 22 - Volume dos materiais componentes dos traços

(conclusão)

Teor de pasta	Parâmetro	Valor				
		0%	20%	40%	60%	80%
25%	Volume de pasta $V_p$ (m <sup>3</sup> )	0,33259	0,39911	0,46563	0,53215	0,59867
	Volume de agregados (m <sup>3</sup> )	0,66741	0,60089	0,53437	0,46785	0,40133
	Volume de cimento (m <sup>3</sup> )	0,15661	0,18794	0,21926	0,25058	0,28191
	Volume de sílica (m <sup>3</sup> )	0,05499	0,06599	0,07699	0,08799	0,09899
	Volume de pó de quartzo (m <sup>3</sup> )	0,10095	0,09089	0,08083	0,07076	0,06070
	Volume de areia artificial (m <sup>3</sup> )	0,44000	0,39615	0,35230	0,30844	0,26459
	Volume de areia natural (m <sup>3</sup> )	0,12646	0,11385	0,10125	0,08864	0,07604
	Volume de água (m <sup>3</sup> )	0,12098	0,14518	0,16938	0,19358	0,21777
	Volume total (m <sup>3</sup> )	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
30%	Volume de pasta $V_p$ (m <sup>3</sup> )	0,33259	0,39911	0,46563	0,53215	0,59867
	Volume de agregados (m <sup>3</sup> )	0,66741	0,60089	0,53437	0,46785	0,40133
	Volume de cimento (m <sup>3</sup> )	0,14950	0,17939	0,20929	0,23919	0,26909
	Volume de sílica (m <sup>3</sup> )	0,06299	0,07559	0,08819	0,10079	0,11339
	Volume de pó de quartzo (m <sup>3</sup> )	0,10095	0,09089	0,08083	0,07076	0,06070
	Volume de areia artificial (m <sup>3</sup> )	0,44000	0,39615	0,35230	0,30844	0,26459
	Volume de areia natural (m <sup>3</sup> )	0,12646	0,11385	0,10125	0,08864	0,07604
	Volume de água (m <sup>3</sup> )	0,12010	0,14413	0,16815	0,19217	0,21619
	Volume total (m <sup>3</sup> )	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000

Fonte: Autoria própria

Por meio das Equações 31 a 36, determinou-se o consumo de cada um dos materiais (kg/m<sup>3</sup>). Com o objetivo de facilitar a comparação entre os traços determinados e traços apresentados em outras pesquisas correlatas, adicionalmente apresentam-se os respectivos Traços Unitários em Massa Seca (TUMS) e a relação areia/cimento.

A partir da combinação entre os diferentes volumes de pasta e os teores de sílica foram determinados 20 traços de UHPC identificados de acordo com a seguinte nomenclatura: **TR-S.V**, em que TR indica traço, S o teor de sílica e V o volume adicional de pasta (Tabela 23).

O teor de aditivo, determinado experimentalmente para todos os traços, foi de 5% conforme descrito no experimento piloto (APÊNDICE B), entretanto, o elevado consumo de sílica presente nos traços que contém 60 e 80% de acréscimo de volume de pasta promoveu uma melhora nas características reológicas do concreto pelo efeito da lubrificação resultante da esfericidade das partículas da sílica e o teor de aditivo precisou ser reduzido de modo a evitar a segregação, exsudação e a incorporação excessiva de ar.

Tabela 23 - Traços

(continua)

Teor de sílica	Parâmetro	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					Traço Unitário em Massa Seca				
		0%	20%	40%	60%	80%	0%	20%	40%	60%	80%
15%	<b>Traço</b>	TR-15.0	TR-15.20	TR-15.40	TR-15.60	TR-15.80	TR-15.0	TR-15.20	TR-20.40	TR-15.60	TR-15.80
	Cimento	534,9	641,9	748,8	855,8	962,8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Sílica	80,2	96,3	112,3	128,4	144,4	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
	Pó de quartzo	264,5	238,1	211,8	185,4	159,0	0,494	0,371	0,283	0,217	0,165
	Areia artificial	1280,4	1152,8	1025,2	897,6	770,0	2,394	1,796	1,369	1,049	0,800
	Areia nat.	333,8	300,6	267,3	234,0	200,7	0,624	0,468	0,357	0,273	0,209
	Água	123,0	147,6	172,2	196,8	221,4	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	Aditivo	30,8	36,9	43,1	49,2	33,2	0,050	0,050	0,050	0,050	0,030
	areia/cimento	--	--	--	--	--	3,018	2,264	1,726	1,322	1,008
20%	<b>Traço</b>	TR-20.0	TR-20.20	TR-20.40	TR-20.60	TR-20.80	TR-20.0	TR-20.20	TR-20.40	TR-20.60	TR-20.80
	Cimento	508,1	609,8	711,4	813,0	914,6	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Sílica	101,6	122,0	142,3	162,6	182,9	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	Pó de quartzo	264,5	238,1	211,8	185,4	159,0	0,520	0,391	0,298	0,228	0,174
	Areia artificial	1280,4	1152,8	1025,2	897,6	770,0	2,520	1,891	1,441	1,104	0,842
	Areia nat.	333,8	300,6	267,3	234,0	200,7	0,657	0,493	0,376	0,288	0,219
	Água	122,0	146,3	170,7	195,1	219,5	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	Aditivo	30,5	36,6	42,7	48,8	49,4	0,050	0,050	0,050	0,050	0,045
	areia/cimento	--	--	--	--	--	3,177	2,383	1,817	1,392	1,061

Tabela 23 - Traços

(conclusão)

Teor de sílica	Parâmetro	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					Traço Unitário em Massa Seca				
		0%	20%	40%	60%	80%	0%	20%	40%	60%	80%
25%	<b>Traço</b>	TR-25.0	TR-25.20	TR-25.40	TR-25.60	TR-25.80	TR-25.0	TR-25.20	TR-25.40	TR-25.60	TR-25.80
	Cimento	483,9	580,7	677,5	774,3	871,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Sílica	121,0	145,2	169,4	193,6	217,8	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
	Pó de quartzo	264,5	238,1	211,8	185,4	159,0	0,547	0,410	0,313	0,239	0,183
	Areia artificial	1280,4	1152,8	1025,2	897,6	770,0	2,646	1,985	1,513	1,159	0,884
	Areia nat.	333,8	300,6	267,3	234,0	200,7	0,690	0,518	0,395	0,302	0,230
	Água	121,0	145,2	169,4	193,6	217,8	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	Aditivo	30,2	36,3	42,3	43,6	41,4	0,050	0,050	0,050	0,045	0,040
	areia/cimento	--	--	--	--	--	3,336	2,503	1,908	1,461	1,114
30%	<b>Traço</b>	TR-30.0	TR-30.20	TR-30.40	TR-30.60	TR-30.80	TR-30.0	TR-30.20	TR-30.40	TR-30.60	TR-30.80
	Cimento	461,9	554,3	646,7	739,1	831,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Sílica	138,6	166,3	194,0	221,7	249,4	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
	Pó de quartzo	264,5	238,1	211,8	185,4	159,0	0,573	0,430	0,327	0,251	0,191
	Areia artificial	1280,4	1152,8	1025,2	897,6	770,0	2,772	2,080	1,585	1,214	0,926
	Areia nat.	333,8	300,6	267,3	234,0	200,7	0,723	0,542	0,413	0,317	0,241
	Água	120,1	144,1	168,1	192,2	216,2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	Aditivo	30,0	36,0	42,0	38,4	37,8	0,050	0,050	0,050	0,040	0,035
	areia/cimento	--	--	--	--	--	3,494	2,622	1,999	1,531	1,167

Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que, em função da metodologia empregada (combinação entre os modelos de Andreasen e Andersen modificado e Toufar modificado) e da composição granulométrica específica dos dois agregados e do pó de quartzo, o consumo total de agregados resultante do empacotamento granular, sobretudo para os traços de 0%, 20% e 40% de acréscimo de volume de pasta, é superior àqueles usualmente adotados nos estudos de UHPC, podendo ter influência direta na trabalhabilidade das misturas.

A última etapa metodológica contemplou a produção dos quatro conjuntos de traços supra apresentados.

#### 4.2.7 Determinação do Consumo de Fibras

Esta etapa foi desenvolvida como um objetivo específico desta pesquisa com o propósito de avaliar a influência da adição de fibras metálicas na fluidez e na resistência à compressão dos traços com diferentes teores de pasta. Para tanto, optou-se pela adição do máximo teor de fibras ( $T_{fibras}$ ), determinado a partir da Equação 38.

O fator de forma da fibra ( $f$ ) foi calculado pela divisão entre o valor de seu comprimento (13mm) e de sua espessura (0,20mm). Os valores de massa unitária e massa específica da composição dos dois agregados miúdos foram determinados por meio da média ponderada entre as respectivas massas específicas ( $ME$ ) e massas unitárias ( $MU$ ) de cada um dos agregados e sua correspondente fração volumétrica na composição ( $r_i$ ).

$$T_{fibras} = \frac{400}{65} * \left(1 - \frac{1,74}{2,85}\right) = 2,39\%$$

Como resultado do cálculo obteve-se o teor 2,39% de fibras sobre o volume total de concreto. Considerando-se que a densidade do material é de 7850 kg/m<sup>3</sup>, o consumo correspondente, em massa, é de 188 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3 DOSAGEM DOS TRAÇOS DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO

O programa experimental desta pesquisa contemplou a moldagem de 256 corpos de prova, sendo seis corpos de prova por traço, que posteriormente foram submetidos ao ensaio de determinação da resistência à compressão axial simples. Tendo como referência o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa cinco diferentes conjuntos de traços foram produzidos visando:

- a) A análise da influência dos teores de sílica (15, 20, 25 e 30%) e do volume adicional de pasta (0, 20, 40, 60 e 80) na fluidez e na resistência à compressão;

- b) A análise da influência do tipo de cura (térmica e úmida) na resistência à compressão;
- c) A análise da influência da idade de ensaio na resistência à compressão;
- d) A análise da influência do emprego de fibras metálicas na fluidez e na resistência à compressão e de traços com diferentes volumes de pasta;
- e) A validação do método de dosagem.

Para o desenvolvimento das análises discriminadas nos tópicos “b”, “c”, “d” e “e” optou-se pela adoção da série de traços com 25% de sílica, por se tratar do teor que apresentou a maior densidade de empacotamento, conforme determinado em 4.2.1.

A seguir são detalhados os procedimentos adotados para a mistura, moldagem e adensamento e cura dos traços de concreto de ultra-alto desempenho.

#### 4.3.1 Procedimentos de Mistura

A mistura dos materiais componentes do UHPC foi feita em argamassadeira eletromecânica para argamassa com cuba de capacidade 5 Litros, uma vez que não se têm a presença de agregados graúdos. Em cada ciclo de mistura foram produzidos 1,30 litros de concreto, volume suficiente para a moldagem de seis corpos de prova (CPs) cilíndricos de (50x100) mm, acrescido de 10%.

Em função da baixa quantidade de água, o procedimento de mistura dos componentes do UHPC é um fator de grande influência na homogeneidade da mistura, na sua trabalhabilidade, e, por consequência em suas propriedades mecânicas. O procedimento empregado neste trabalho seguiu as recomendações autores como Ma e Dietz (2002), Vanderlei (2004), Chang *et al.* (2009), Kim *et al.* (2016), Pyo *et al.* (2017), Zdeb (2019), Hung *et al.* (2020), Jung *et al.* (2020), Sohail *et al.* (2021) que preconizam a pré mistura e homogeneização de todo o material seco (aglomerantes e agregados), a fim de minimizar a ocorrência da aglomeração das partículas finas. O aditivo superplastificante foi adicionado e homogeneizado manualmente em 50% da água até formar uma solução única.

Inicialmente colocou-se 50% da pré mistura de materiais secos na cuba. A água foi sendo adicionada aos poucos, promovendo a formação de uma pasta de consistência seca. Sucessivamente, novas porções de água com aditivo, pré mistura seca e água foram sendo incorporadas até que todo o material foi consumido e totalmente homogeneizado. A argamassadeira foi mantida na velocidade lenta durante todo o processo que teve uma duração média de 10 minutos.

No conjunto de traços previamente selecionado, as fibras foram adicionadas ao final do processo supracitado, em pequenas porções, de modo que pudessem ser lentamente incorporadas na matriz de modo a se evitar a formação de aglomerados, como se pode observar na Figura 36. A argamassadeira também foi mantida em velocidade lenta durante este processo.

**Figura 36 - Adição de fibras**



**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3.2 Procedimentos de Moldagem e Adensamento

Para cada traço produzido foram moldados seis corpos de prova. Como fôrmas para a moldagem dos exemplares foram adotados os moldes metálicos cilíndricos normalmente empregados em ensaios de cimento. Em função da fluidez obtida no experimento piloto, o procedimento adotado foi o mesmo de Andrade (2015)

e consistiu em preencher 1/3 da forma com concreto, aplicando-se 20 golpes por meio da queda livre da forma de uma altura de aproximadamente 15 cm sobre uma superfície rígida e capaz de absorver o impacto, de modo a promover o adensamento do concreto. O procedimento foi repetido na segunda e na terceira camadas de preenchimento. A última camada foi preenchida com excesso de material, e, em seguida, regularizada.

Após o acabamento os corpos de prova foram envolvidos por um filme de polietileno com o objetivo de evitar a perda de água por evaporação. A desforma dos corpos de prova foi realizada 36 horas após a sua moldagem.

Entretanto, devido à baixa fluidez obtida nos traços produzidos com o mínimo volume de pasta, conforme se observa na Figura 37, o adensamento destes corpos de prova seguiu as determinações da NBR 7215 que prevê o adensamento em “quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homoganeamente distribuídos” (ABNT, 2019, p.7). O mesmo ocorreu com os traços com 0% e 20% de volume de pasta que continham fibras.

**Figura 37 - Fluidez do traço com o mínimo volume de pasta**



**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3.3 Procedimentos de Cura

Após a desmoldagem os corpos de prova foram levados à cura úmida em tanque de água potável à temperatura ambiente ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) por 72 horas, seguindo as recomendações dos estudos de Romero e Braga (1983), De Larrard e Sedran (1994), Lai *et al.* (2015) e Andrade (2015).

Findo este período, as amostras foram submetidas à cura térmica em equipamento de banho maria próprio para amostras, com elevação gradual de temperatura até se atingir  $90^{\circ}\text{C}$ , permanecendo assim até completarem 72 horas conforme os estudos de Chang *et al.* (2009), Vattania *et al.* (2020) e Werder *et al.* (2021). O ciclo de aquecimento durou três horas.

Passadas 72 horas o equipamento de banho maria foi desligado, de modo a promover a redução da temperatura de forma gradual e evitar um gradiente térmico muito severo, até atingir o equilíbrio com a temperatura ambiente. O ciclo de resfriamento teve uma duração de dez horas.

Ao final do ciclo, seguindo as determinações da NBR 5738 (ABNT, 2015), os corpos de prova foram submergidos em tanque de água potável à temperatura ambiente ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) e assim mantidos até as respectivas datas de ensaio.

As amostras produzidas com o objetivo de avaliar tão somente a influência da cura úmida na resistência à compressão foram mantidas em tanque de água potável à temperatura ambiente ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), desde a sua desforma até data de ensaio.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A fluidez do UHPC no estado fresco foi determinada por meio de uma adaptação dos procedimentos seguidos por Okamura e Ouchi (2003), Kwan e Wong (2008), Fung e Kwan (2010); Kwan e Chen (2012) e Ibrahim *et al.* (2020) que, em função da inexistência do agregado graúdo, empregaram um molde tronco-cônico de dimensões reduzidas (diâmetro superior de 70 mm e diâmetro inferior de 100 mm) na realização do ensaio.



Para efeito desta pesquisa empregou-se o tronco de cone especificado no ensaio de determinação da massa específica do agregado miúdo (NBR NM 52:2009) que apresenta diâmetro superior de 40 mm, diâmetro inferior de 90 mm e altura de 75 mm. O ensaio foi realizado sobre uma placa de vidro previamente umedecida com o objetivo de eliminar qualquer atrito que pudesse afetar o resultado.

Encerrada a etapa de produção, o UHPC foi vertido livremente no cone, que após ser totalmente preenchido foi removido cuidadosamente de forma a permitir que o material fluísse tão somente sob a influência da gravidade, conforme se observa na Figura 38. O tempo especificado para a mensuração dos diâmetros da pasta espalhada foi fixado em 20 segundos após a retirada do cone.

**Figura 38 - Ensaio de determinação da fluidez da pasta**



**Fonte: Autoria própria**

Destaca-se ainda que a determinação dos diâmetros seguiu o procedimento adotado por Ibrahim *et al.* (2020) em que o valor da fluidez das misturas foi determinado pela média do espalhamento dos valores de quatro diâmetros (Figura 39).

**Figura 39 - Determinação do diâmetro da pasta**



**Fonte: Autoria própria**

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão axial aos 28 dias de idade. Para a determinação da resistência à compressão do concreto os corpos de prova foram ensaiados segundo os procedimentos da NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007). Antes de realizar o ensaio as amostras foram retificadas a fim de se garantir a planicidade da base e sua perpendicularidade ao eixo longitudinal (Figura 40).

**Figura 40 - Procedimento de retífica**

**Fonte: Autoria própria**

As medidas (diâmetro e altura) foram determinadas para a aplicação do fator de correção no cálculo da resistência à compressão. O fator de correção foi calculado por meio da Equação 39.

$$FC = - 0,1067 \left(\frac{H}{DI}\right)^4 + 0,8 \left(\frac{H}{DI}\right)^3 - 2,2333 \left(\frac{H}{DI}\right)^2 + 2,83 \left(\frac{H}{DI}\right) - 0,42 \quad (\text{Eq. 39})$$

Em que:

FC – fator de correção;

H – altura do corpo de prova (mm);

DI – diâmetro do corpo de prova (mm).

Os ensaios foram realizados em uma prensa de compressão hidráulica com capacidade de 100 toneladas, precisão de medição Classe 1 segundo a NM ISO 7500-1 (ABNT, 2016) e dispositivo com rótula apropriada para ensaio de compressão de corpos de prova de 5x10 cm em prensas para concreto (Figura 41), a uma taxa de carregamento de 0,45 MPa/s, conforme prescrito na NBR 5739 (ABNT, 2018).

**Figura 41 - Equipamento para ensaio da resistência à compressão**



**Fonte: Autoria própria**

Após a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova nas idades de ensaio, o conjunto de resultados correspondente a cada traço foi analisado por meio do Critério de Peirce, com o objetivo de validar ou não a permanência de todos os resultados na determinação da média ( $f_{cm}$ ), do desvio padrão ( $Sd$ ) e do coeficiente de variação ( $CV$ ) das amostras. Os passos para a aplicação deste critério estão descritos em 2.4.1.

#### 4.6 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Concluída a etapa de determinação dos resultados de resistência mecânica das amostras, cinco análises comparativas foram efetuadas, atendendo assim aos objetivos específicos desta pesquisa.

Para tanto, os dados foram tratados por meio do programa de análises estatísticas MINITAB 18 e do Excel. A normalidade dos dados foi verificada e confirmada através do Teste de Rayan-Joiner para um nível de confiança de 95%.

Com o objetivo de se identificar a existência de diferenças significativas entre as médias dos resultados de cada conjunto de traços, a análise normal de variância (ANOVA) foi processada considerando-se um nível de confiança de 95%. Nos casos em que o Valor  $p$  para tratamentos da ANOVA resultou significativo, o Teste de Tukey-Kramer foi executado por meio do suplemento *Real Statistics Resource Pack for Excel 2007*, com o objetivo de identificar tais diferenças.

## 5 RESULTADOS

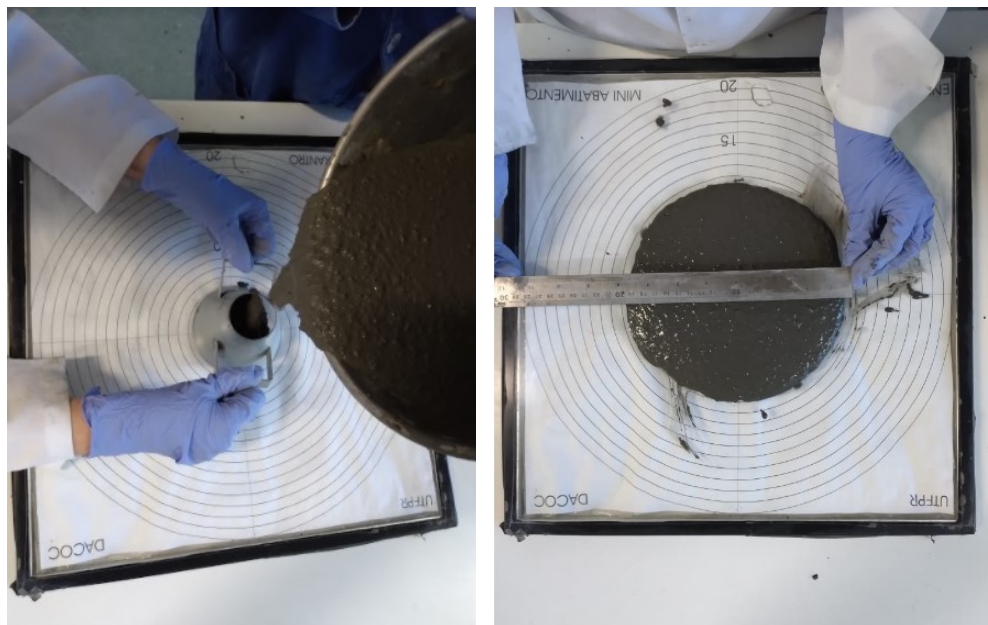
Neste capítulo são apresentados os resultados da presente pesquisa, assim segmentados:

- Análise do comportamento da fluidez dos traços;
- Análise da influência do teor de sílica ativa na resistência à compressão;
- Análise da influência do volume adicional de pasta na resistência à compressão;
- Análise da influência do tipo de cura na resistência à compressão;
- Análise da influência da idade de ensaio na resistência à compressão;
- Análise da influência do emprego de fibras metálicas na fluidez e na resistência à compressão de traços com diferentes volumes adicionais de pasta;
- Análise do experimento de validação do método de dosagem.

### 5.1 ANÁLISE DA FLUIDEZ DOS TRAÇOS

Conforme descrito em 4.4, a fluidez dos diferentes traços foi estabelecida por meio da utilização de um molde tronco-cônico de dimensões reduzidas conforme pode-se observar na Figura 42 (a). O resultado do espalhamento foi determinado a partir da média de quatro diâmetros (Figura 42 (b)).

**Figura 42 - Ensaio para determinação da fluidez: (a) preenchimento do molde e (b) determinação do diâmetro**

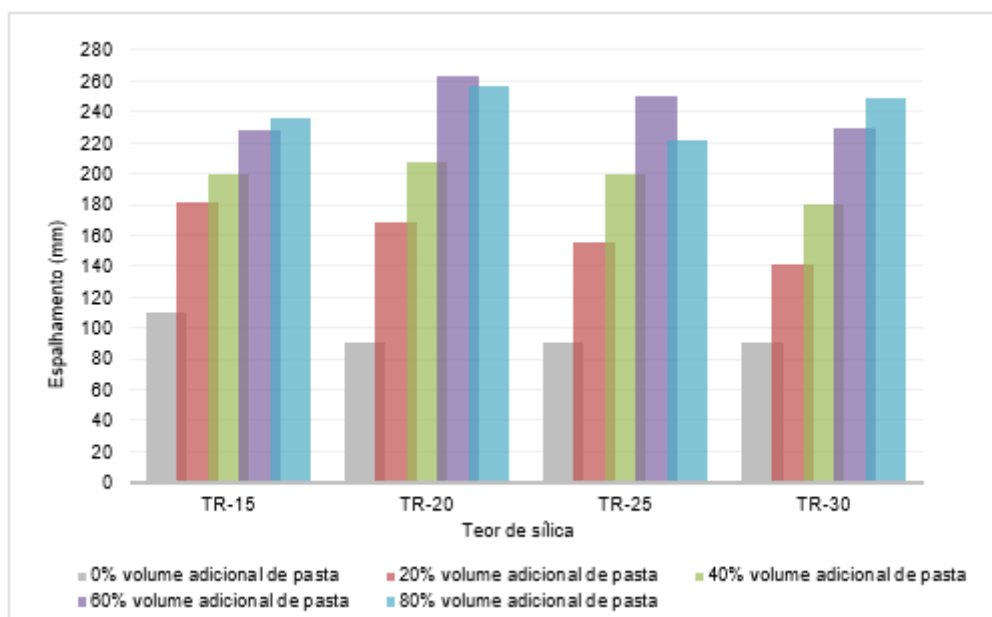


**Fonte: Autoria própria**

É importante rememorar que nos traços com teores de sílica mais elevados e maiores volumes de pasta optou-se por reduzir o teor de aditivo de modo a evitar a segregação, exsudação ou incorporação de ar na mistura, justificando-se assim o decréscimo ou o discreto aumento do valor do espalhamento em relação ao traço com volume de pasta imediatamente inferior. Procedimento similar foi adotado na pesquisa de Soliman e Tagnit-Hamou (2016). O teor de aditivo efetivamente empregado em cada traço está apresentado na Tabela 23 (Traços), no Capítulo 4.

Por meio da Figura 43 é possível analisar o comportamento do espalhamento em função do teor de sílica e do volume adicional de pasta.

**Figura 43 - Comportamento do espalhamento em função do teor de sílica e do volume adicional de pasta**



**Fonte: Autoria própria**

É possível notar pequenas diferenças entre os valores do espalhamento dos diferentes traços em função da variação teor de sílica. Considerando-se o espalhamento de cada série, a amplitude entre a maior e a menor média é de 6,8%. Esta afirmação é corroborada pela análise de variância apresentada na Tabela 24, cujos resultados atestam que o aumento do teor de sílica não afeta significativamente a fluidez das misturas.

**Tabela 24 - Análise de variância da influência do teor de sílica na fluidez**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor <i>p</i>	F crítico	Comparação
Entre grupos	970	3	323,3333	0,081166	9,69E-01	3,238872	Efeito não significativo
Dentro dos grupos	63738	16	3983,625				
Total	64708	19	3405,684				

**Fonte: Autoria própria**

Em primeiro lugar, é necessário destacar que a sílica adicionada à mistura foi proporcionada em massa sem relação ao cimento, e que a sua massa específica é inferior à do cimento. Logo, o volume de partículas sólidas em relação à água presente nos diferentes traços aumenta à medida que ocorre um incremento no teor de sílica, provocando efeitos opostos, que, ao se combinarem, alteram a fluidez das misturas.



Conforme já abordado no Capítulo 2, sabe-se que ao passo que o teor de sílica é incrementado ocorre um aumento da superfície específica do conjunto ( $A_{CM}$ ), elevando a demanda de água necessária para molhar as partículas e reduzindo a espessura do filme de água disponível ( $WFT$ ), o que irá implicar na diminuição da fluidez da mistura. Por outro lado, a elevada finura das partículas promove um aumento na densidade de empacotamento da mistura e, conseqüentemente, a parcela de água em excesso ( $\mu'_w$ ) disponível para lubrificar a pasta e promover a fluidez. Além disso, o formato esférico das partículas de sílica reduz o intertravamento do esqueleto granular e melhora a fluidez, enquanto sua elevada finura aumenta a coesão e, conseqüentemente, reduz a fluidez.

Ainda que o efeito do teor de sílica não tenha se mostrado significativo na fluidez, um padrão pode ser observado nos traços que contém 5% de aditivo. A série com 30% de sílica foi a que apresentou os menores valores de espalhamento, seguida, nesta ordem, pelas séries com os teores de 25%, 20% e 15% indicando que o aumento da superfície específica do conjunto e da coesão da mistura foram preponderantes sobre os demais efeitos supracitados, prejudicando a fluidez. Comportamento similar foi identificado nas pesquisas de Henche (2013) e Li, You e Brouwers (2018), realizadas com teores de 5%, 10% e 15% de sílica

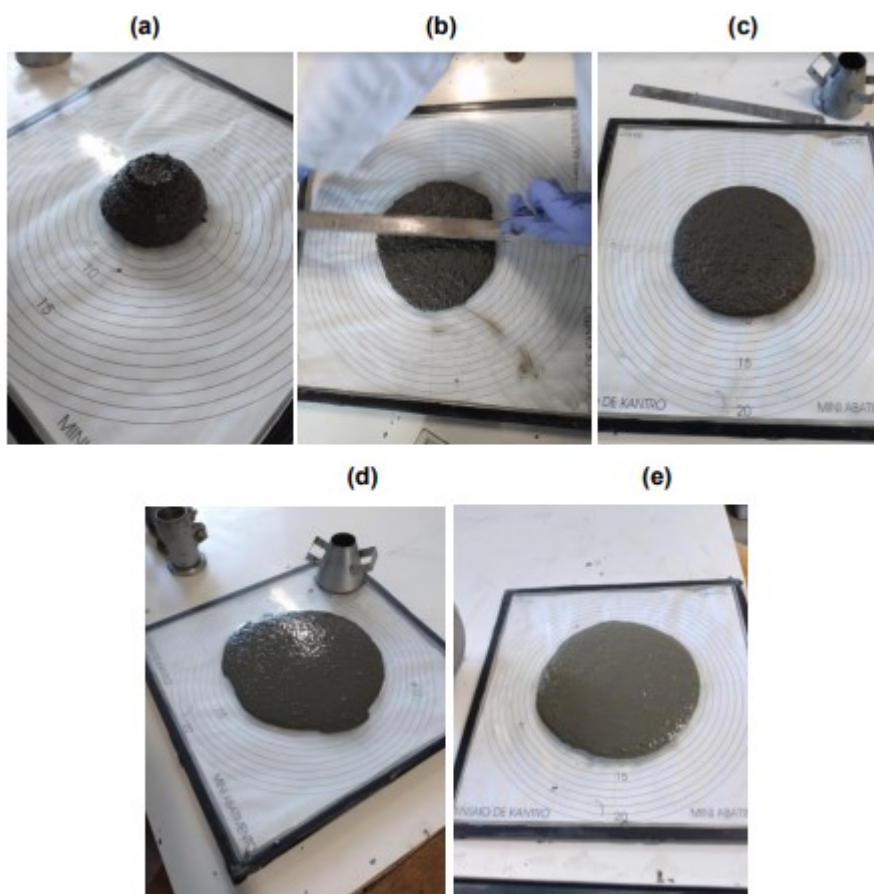
Por sua vez, o acréscimo do volume de pasta promoveu o aumento da fluidez da mistura, como se pode observar na Figura 44 que ilustra a sequência de ensaios para a série de traços com 20% de sílica. A Figura 44 (a) representa o traço com o teor mínimo de pasta. Pode-se notar que este traço não possui características autoadensáveis, entretanto a partir de 20% de volume adicional de pasta (Figura 44 (b)), a fluidez do UHPC aumenta e o material passa a assumir minimamente a característica desejada.

Este comportamento é consequência da redução do volume de agregados e do aumento do teor de pasta disponível (espessura do filme de pasta) para lubrificar os grãos de agregados, promovendo um aumento da mobilidade entre eles, e, conseqüentemente uma maior fluidez (NG *et al.*, 2016).

Os resultados aqui obtidos são ratificados pelas considerações de Kwan e Li (2012), que destacam que espessuras mais elevadas do filme pasta levam a uma

maior fluidez, reduzindo a coesão e a viscosidade da mistura (Figura 44 (e)), enquanto espessuras relativamente pequenas podem levar a uma fluidez mais baixa, porém com elevada coesão e viscosidade (Figura 44 (a)).

**Figura 44 - Determinação da fluidez do UHPC: (a) volume mínimo de pasta, (b) 20% adicional, (c) 40% adicional, (d) 60% adicional e (e) 80% adicional de pasta**



**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 45 pode-se observar a elevada fluidez (característica autoadensável) do traço produzido com o teor de 20% de sílica e 80% de volume adicional de pasta.

**Figura 45 - Característica autoadensável do traço com 20% de sílica e 80% de volume adicional de pasta**



**Fonte: Autoria própria**

A influência do volume adicional de pasta na fluidez é confirmada pelos resultados da análise de variância apresentados na Tabela 25, em que o Valor  $p$  é inferior ao nível de significância de 0,05.

**Tabela 25 - Análise de variância da influência do volume de pasta na fluidez**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F crítico	Comparação
Entre grupos	61785,5	4	15446,38	79,27994	6,65E-10	3,055568	Efeito significativo
Dentro dos grupos	2922,5	15	194,8333				
Total	64708	19	3405,684				

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 26 consolida os resultados do teste de Tuckey-Kramer. A análise dos dados permite concluir que apenas quando se comparam os resultados do volume mínimo de pasta de 60% ao de 80%, o efeito não é significativo. Acredita-se que este comportamento seja fruto da redução do consumo de aditivo, e, conseqüentemente, da fluidez nos traços TR-15.80, TR-20.80, TR-25.60, TR-25.80, TR-30.60 e TR-30.80.

**Tabela 26 - Teste de Tukey-Kramer para a influência do volume de pasta na fluidez**

Q TEST (TUKEY HSD/KRAMER)						
<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>p-value</i>	Comparação
0%	20%	66,5	6,979136	9,5284007	5,66E-05	Efeito significativo
0%	40%	103	6,979136	14,758275	2,51E-07	Efeito significativo
0%	60%	147,75	6,979136	21,170244	1,79E-09	Efeito significativo
0%	80%	147,75	6,979136	21,170244	1,79E-09	Efeito significativo
20%	40%	36,5	6,979136	5,229874	1,56E-02	Efeito significativo
20%	60%	81,25	6,979136	11,641843	5,25E-06	Efeito significativo
20%	80%	81,25	6,979136	11,641843	5,25E-06	Efeito significativo
40%	60%	44,75	6,979136	6,4119689	3,10E-03	Efeito significativo
40%	80%	44,75	6,979136	6,4119689	3,10E-03	Efeito significativo
60%	80%	0	6,979136	0	1,00E+00	Efeito não significativo

**Fonte: Autoria própria**

Por fim, é importante reforçar que, embora o uso do molde tronco-cônico de dimensões reduzidas para a determinação da fluidez seja relativamente usual em pesquisas de UHPC e, que resultados similares aos aqui obtidos também sejam legitimados por outros pesquisadores como You, Spiesz e Brouwers (2014) e Soliman e Tagnit-Hamou (2016), sempre que não houverem limitações relacionadas à capacidade volumétrica dos equipamentos de mistura recomenda-se que a determinação e o ajuste das propriedades autoadensáveis do UHPC sejam realizados segundo as prescrições da NBR 15823-1 (ABNT, 2017) visando a obtenção de resultados mais representativos.

## 5.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 27 consolida os resultados de resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) dos traços submetidos à cura térmica e ensaiados na idade de 28 dias. São apresentados também os valores do desvio padrão ( $Sd$ ) e do coeficiente de variação do ensaio ( $CV$ ). Os resultados individuais, disponíveis no APÊNDICE D, foram tratados por meio do Critério de Peirce.

De modo geral, pode-se dizer que a resistência média do conjunto de 20 traços avaliados é de 157,0 MPa, sendo 131,8 MPa a média mais baixa e 186,1 MPa,

a mais elevada. O coeficiente de variação geral, em média, é de 5% indicando que as operações de produção e ensaio podem ser classificadas com um bom nível de rigor para variação geral de misturas experimentais em laboratório, segundo o ACI 363 (2010).

**Tabela 27 - Valores de resistência média à compressão**

Traço	$f_{cm}$ (MPa)	$Sd$ (MPa)	$CV$ (%)
TR-15.0	137,1	6,4	4,7%
TR-15.20	145,5	7,4	5,1%
TR-15.40	148,6	4,4	3,0%
TR-15.60	146,4	4,6	3,1%
TR-15.80	150,4	12,9	8,6%
TR-20.0	180,8	3,9	2,2%
TR-20.20	170,1	8,1	4,8%
TR-20.40	166,7	5,3	3,2%
TR-20.60	147,4	8,3	5,6%
TR-20.80	131,8	10,3	7,8%
TR-25.0	186,1	10,5	5,6%
TR-25.20	167,9	9,9	5,9%
TR-25.40	162,3	12,2	7,5%
TR-25.60	151,3	9,2	6,1%
TR-25.80	161,9	2,9	1,8%
TR-30.0	172,2	16,7	9,7%
TR-30.20	169,8	11,0	6,5%
TR-30.40	165,9	12,7	7,7%
TR-30.60	142,0	5,0	3,6%
TR-30.80	146,3	11,7	8,0%

**Fonte: Autoria própria**

Nos subitens a seguir são apresentadas as análises destes resultados segmentadas de acordo com os objetivos específicos desta pesquisa, assim como as análises relacionadas ao tipo de cura, idade de ensaio e adição de fibras. Por fim, são exibidos, subsequentemente, os resultados do experimento de validação do método proposto.

### 5.2.1 Análise da Influência dos Teores de Sílica Ativa na Resistência à Compressão

De forma a contribuir para o entendimento das próximas análises, a Tabela 28 consolida os valores de resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) em função do teor de sílica e do volume adicional de pasta, assim como a resistência média de cada série ( $f_{cms}$ ) e a resistência média correspondente aos diferentes volumes adicionais de pasta ( $f_{cmvp}$ ).

**Tabela 28 - Média dos valores de resistência à compressão em função do teor de sílica e do volume adicional de pasta**

Volume adicional de pasta	0%	20%	40%	60%	80%	
Série						$f_{cms}$
TR-15	137,1	145,5	148,6	146,4	150,4	145,6
TR-20	180,8	170,1	166,7	147,4	131,8	159,4
TR-25	186,1	167,9	162,3	151,3	161,9	165,9
TR-30	172,2	169,8	165,9	142,0	146,3	159,2
$f_{cmvp}$	169,1	163,3	160,9	146,8	147,6	--

**Fonte: Autoria própria**

De início constata-se que os valores da resistência média correspondentes aos diferentes volumes adicionais de pasta ( $f_{cmvp}$ ) indicam que à medida que o volume adicional de pasta aumenta, a resistência à compressão tende a diminuir, à exceção da série que contém 15% de sílica ativa.

No que se refere ao comportamento da resistência em função do teor de sílica, pode-se afirmar que a série com 15% de sílica, apesar de conter os maiores consumos de cimento, foi a que apresentou a menor resistência média ( $f_{cms}$ ), enquanto a que contém o teor de 25% foi a que atingiu os patamares mais elevados.

É fundamental notar que o padrão supracitado corresponde exatamente ao observado na determinação da densidade de empacotamento das respectivas pastas (Tabela 12) que apontou a escolha do percentual de 25% de sílica como sendo o ideal, uma vez que foi o que resultou na maior densidade de empacotamento, enquanto o teor de 15% foi o de menor densidade de empacotamento. Nesta tabela também é possível observar que à medida que o teor de sílica aumenta, a densidade de

empacotamento aumenta até o teor de 25%, a partir deste ponto, a densidade de empacotamento diminuiu. O mesmo comportamento ocorreu com os valores de  $f_{cms}$  (Tabela 28), ou seja, à medida que o teor de sílica é incrementado, o valor da resistência média da série aumenta, porém, quando atinge o patamar de 25%, o valor da resistência passa a diminuir. Neste caso acredita-se que o excesso de sílica possa estar provocando o efeito de afastamento entre as demais partículas, contribuindo para a queda da resistência.

Comportamento similar foi identificado por Biz (2001), porém com teores de sílica variando entre 10 e 30%. A máxima resistência foi lograda com 20% de sílica e o autor considera que este resultado pode ser parcialmente atribuído ao efeito de aglomeração e à maior dificuldade de dispersão de elevados teores de sílica.

Outro aspecto importante a ser considerado é o fato de que para o mesmo volume adicional de pasta, a diferença entre o valor de  $f_{cm}$  da série com 15% de sílica em relação ao valor da média da resistência das outras três séries decresce com o aumento do volume adicional de pasta. Ou seja, para o mínimo volume de pasta a diferença entre os patamares de resistência é de aproximadamente 26%, enquanto para 18% de volume adicional, a diferença cai para 10%. Já para os traços com 40%, o percentual chega próximo a 7%, sendo que a partir de 60% de volume adicional de pasta, os valores de  $f_{cm}$  apresentam maior proximidade (1%), independentemente do teor de sílica, indicando que há um excesso de aglomerantes.

A ação da sílica ativa no UHPC pode ser explicada em função da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento e pelo efeito de preenchimento nos vazios entre os grãos de cimento ou outros materiais em pó (MA E DIETZ, 2008). Logo, no que se refere ao teor de sílica de 15% acredita-se que o fato de os resultados aqui obtidos serem inferiores aos dos demais teores possa ser justificado pelo fato de que este percentual, em termos de cálculo estequiométrico, é muito próximo do necessário para reagir com a totalidade do hidróxido de cálcio resultante da reação de hidratação do cimento. Isto posto, nessas quantidades estima-se que não há mais hidróxido de cálcio para ser consumido, e, portanto, também não resta sílica para atuar com a função de fíler e preencher os pequenos vazios existentes na zona de transição e entre os agregados, reduzir a porosidade e promover ganhos de resistência mecânica (TUTIKIAN, ISAÍIA E HELENE, 2011; SOHAIL *et al.*, 2018).

Para efeito de comparação, Meleka *et al.* (2013) estudaram a influência de diferentes teores de sílica em traços contendo  $800 \text{ kg/m}^3$  de cimento e relação a/agl entre 0,17 e 0,19. Para 15% de sílica a média de resistência à compressão foi de 125,0 MPa aos 28 dias, enquanto para 30% atingiu-se o patamar de 152,0 MPa. Em ambos os casos as amostras foram curadas a  $75^\circ\text{C}$  durante 72 horas. Já Li *et al.* (2020) obtiveram resultados de 116,0 MPa em traços contendo  $493 \text{ kg/m}^3$  de cimento,  $247 \text{ kg/m}^3$  de cinza pozzolânica, 15% de sílica ativa e  $a/agl = 0,20$ , submetidos à temperatura de  $80^\circ\text{C}$  durante o período de 48 horas. Ressalta-se que o patamar de resistência logrado nesta pesquisa, para os mesmos 15% de sílica, é superior aos supracitados e originado de traços com menores consumos de aglomerantes.

Com o objetivo de avaliar a influência conjunta do teor de sílica e do volume adicional de pasta na resistência média à compressão, a análise de variância de fator duplo sem repetição foi empregada. Os resultados apresentados na Tabela 29 indicam não haver diferença significativa entre os valores de resistência tanto em função do teor de sílica, como do volume adicional de pasta, uma vez que o valor  $p$  resultante é superior ao nível de significância de 0,05 para ambos os casos.

**Tabela 29 - Análise de variância da resistência média à compressão em função do teor de sílica e do volume de pasta**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F critico	Comparação
Volume de pasta	1567,025	4	391,7562	3,10906	5,68E-02	3,25917	Efeito não significativo
Teor de sílica	1093,274	3	364,4245	2,89214	7,93E-02	3,49030	Efeito não significativo
Erro	1512,059	12	126,0049				
Total							

**Fonte: Autoria própria**

Observa-se também que o nível de significância é menor para o teor de sílica do que para o volume adicional de pasta, indicando que a variação no consumo de sílica tem menos influência na resistência do que o volume adicional de pasta. Esta afirmação se sustenta por meio da comparação entre os consumos de aglomerantes dos diferentes traços. O incremento médio do consumo de sílica entre as séries subsequentes é da ordem de  $27 \text{ kg/m}^3$ , enquanto a variação do consumo de cimento

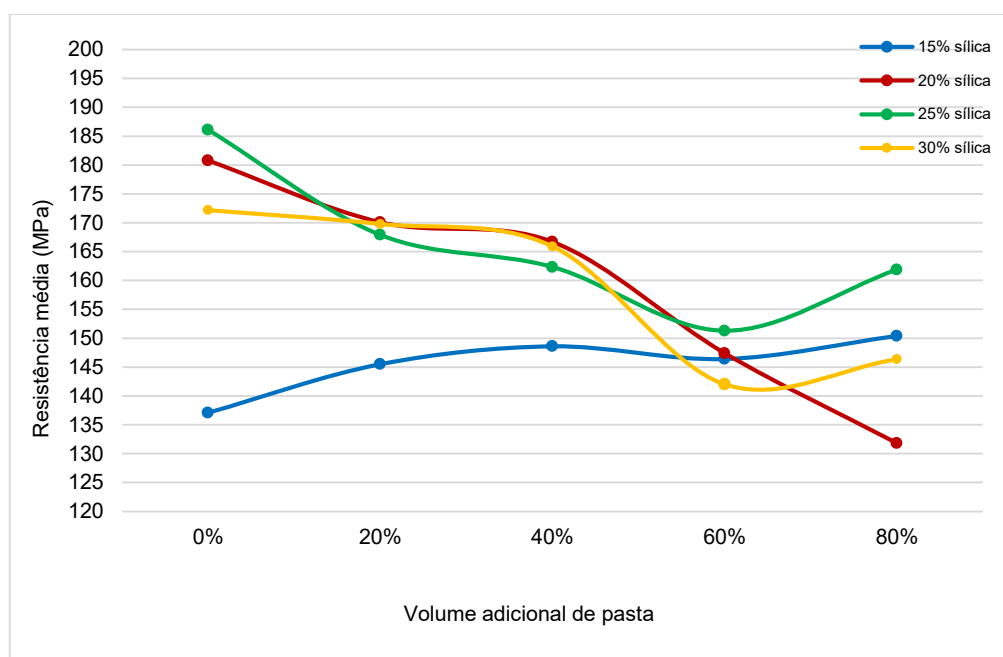


entre os volumes adicionais de pasta consecutivos é, em média,  $100 \text{ kg/m}^3$ , ou ainda,  $122 \text{ kg/m}^3$  quando se considera o consumo total de aglomerantes.

### 5.2.2 Análise da Influência do Volume Adicional de Pasta na Resistência à Compressão

Na Figura 46 pode-se observar as curvas que representam o comportamento da resistência média à compressão ( $f_{cms}$ ) em função do volume adicional de pasta.

**Figura 46 - Comportamento da resistência média à compressão de cada série em função do volume adicional de pasta**



Fonte: Autoria própria

As equações de regressão que correspondem a cada um dos teores de sílica, além dos valores de  $R^2$ , do coeficiente de correlação ( $\rho$ ) e do valor  $p$  indicando o nível de significância de cada uma das equações, calculados por meio do MINITAB 18, são apresentados no Quadro 4.

**Quadro 4 - Equações de regressão correspondente aos diferentes teores de sílica**

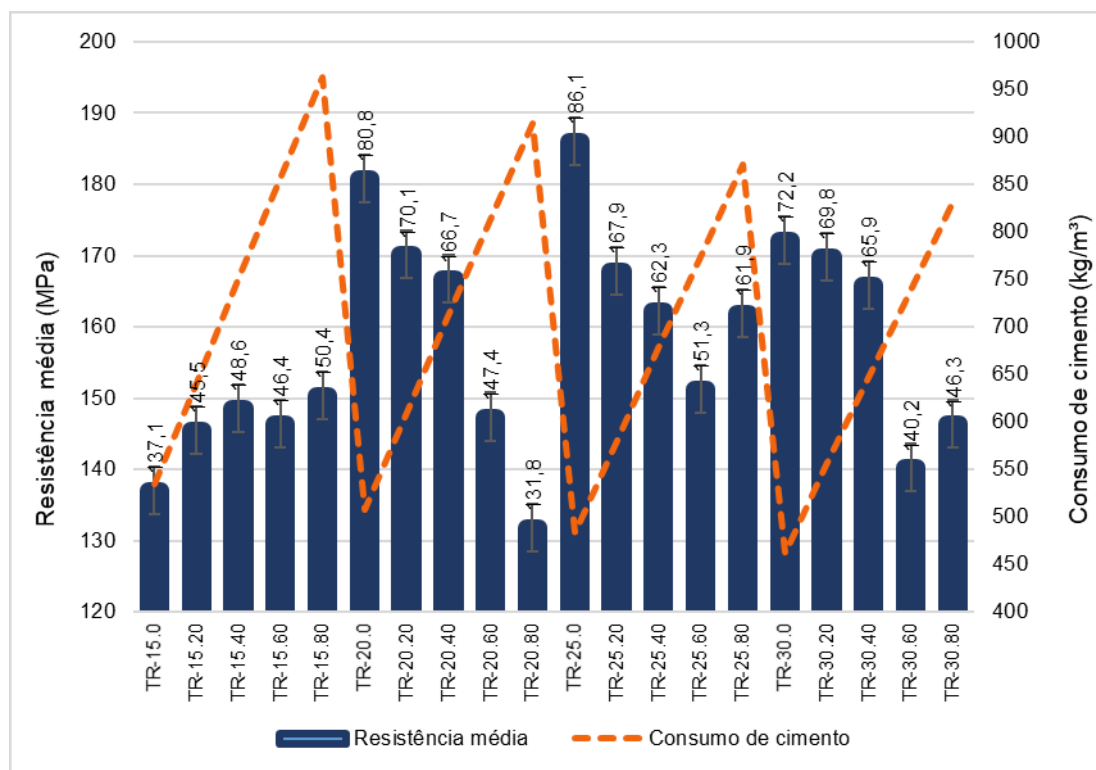
Teor	Equação	R <sup>2</sup>	ρ	Valor p
15%	$y = 138,2 + 33,89 x - 25,18 x^2$	0,8560	0,9252	0,144
20%	$y = 179,8 - 23,64 x - 45,89 x^2$	0,9821	0,9910	0,018
25%	$y = 186,4 - 107,1 x + 93,21 x^2$	0,9434	0,9713	0,057
30%	$y = 174,2 - 30,37 x - 11,79 x^2$	0,8075	0,8986	0,192

Fonte: Autoria própria

Uma análise preliminar da Figura 46 indica que, para os teores de 20, 25 e 30% de sílica, à medida que o volume adicional de pasta e, por conseguinte, o consumo de cimento ( $C_{cp}$ ) aumentam, o volume de agregados diminui e a resistência à compressão média tende a reduzir, como se pode constatar na Figura 47.

Este comportamento era esperado, uma vez que o volume de 0% corresponde à quantidade de pasta necessária para preencher os vazios entre os agregados, e que o aumento deste volume pode provocar o efeito de afastamento entre os agregados. Neste caso, a transmissão do esforço deixa de ocorrer diretamente entre os agregados (elemento mais resistente) e passa a se dar pela pasta (elemento de menor resistência mecânica presente, ainda que seja constituída por elevados teores de materiais pozolânicos e baixa relação água/aglomerante), contribuindo para a queda da resistência.

**Figura 47 - Comportamento da resistência média à compressão em função do volume adicional de pasta e do consumo de cimento**



Fonte: Autoria própria

Além disso, ao passo que o volume de pasta aumenta, o consumo de pó de quartzo é reduzido, sendo que a diferença entre o traço com o mínimo volume de pasta e o traço com 80% de volume adicional é de 40%, independentemente do teor de sílica. Partindo-se do princípio que o pó de quartzo atua tanto como fíler, quanto como pozolana na presença de cura térmica, e que ambos os efeitos promovem o incremento da resistência mecânica, acredita-se que sua redução também contribuiu para a queda nos valores de resistência à compressão ao passo que se tem o aumento do volume adicional de pasta.

Isto posto, os resultados indicam que o mínimo volume de pasta é suficiente para a obtenção das maiores resistências à compressão para o UHPC e, que a partir deste patamar, qualquer incremento adicional de pasta provavelmente não promoverá benefícios relevantes em termos de resistência, uma vez que existe a possibilidade de que nem todos os materiais cimentícios estejam participando das reações pozolânicas, como observado por Liu *et al.* (2012) e Yurdakul *et al.* (2013).

Este comportamento pode ser observado tanto na Tabela 28 (5.2.1), quanto na Figura 46. Nota-se que os valores de  $f_{cmvp}$  referentes aos traços contendo 0%, 20% e 40% de volume adicional de pasta diferem entre si menos de 5%, enquanto a divergência entre os resultados de resistência média dos traços de 60% e 80% é menor que 1%. Entretanto, entre a média destes dois grupos, a amplitude é de 17,0 MPa e representa uma diferença da ordem de 15%, estabelecendo duas faixas de resistência.

Também é possível perceber na Figura 47, que à medida que o teor de sílica aumenta, a diferença entre os valores de resistência média dos volumes adjacentes é minimizada. Comportamento similar foi identificado por Meleka *et al.* (2013). Em sua pesquisa, os autores notaram que à medida que o conteúdo de cimento e sílica aumentam, o ganho na resistência à compressão percentualmente diminui.

Em 1990, Popovics comprovou que para a mesma relação  $a/agl$ , um aumento no teor de aglomerantes resultou na diminuição da resistência à compressão. Li, You e Brouwers (2018) chegaram a mesma conclusão a partir da análise de traços com o consumo de aglomerantes variando entre 750 e 900 kg/m<sup>3</sup>. Um padrão similar também pode ser percebido na pesquisa de Vatannia *et al.* (2020), em que o consumo de cimento das misturas estudadas variou de 900 kg/m<sup>3</sup> a 595 kg/m<sup>3</sup>, enquanto a resistência à compressão aumentou de 95,7 para 191,1 MPa. Os autores também comprovaram que maiores patamares de resistência foram alcançados nos traços com maior consumo de agregados.

Na Tabela 30 são apresentados os resultados da ANOVA para as séries contendo os teores de 20%, 25% e 30% de sílica. Nota-se que o efeito do acréscimo de volume de pasta na resistência se mostrou estatisticamente significativo para os três teores, sendo que o nível de significância diminui à medida que o percentual de sílica aumenta.

**Tabela 30 - Análise de variância do volume adicional de pasta nos traços com 20%, 25% e 30% de sílica**

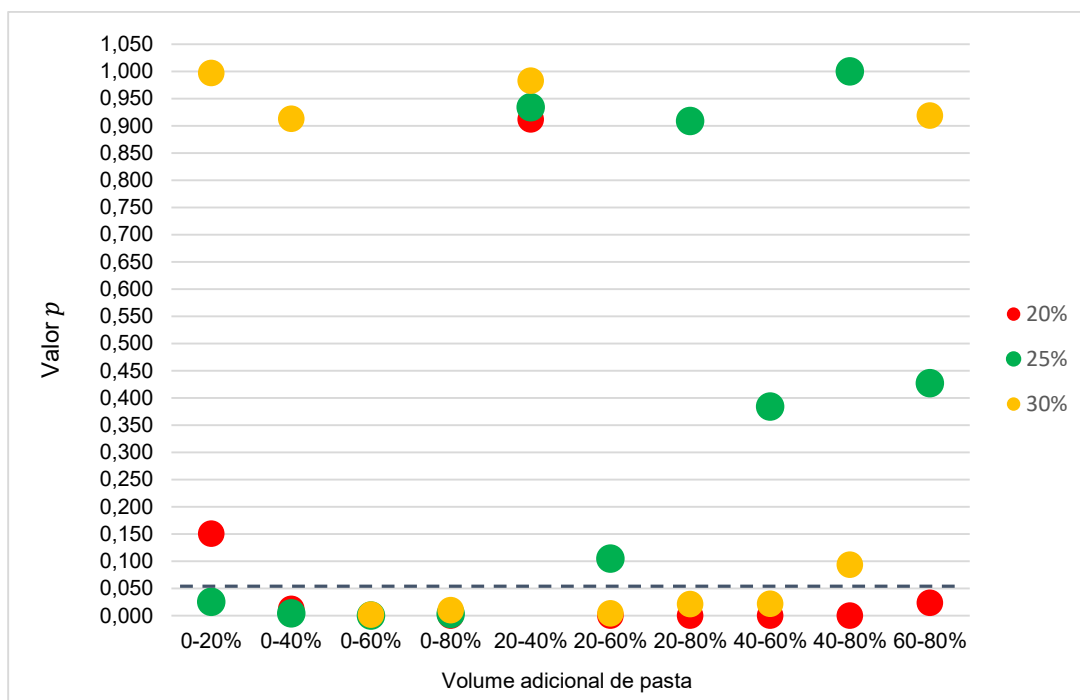
Teor de sílica	Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F crítico	Comparação
20%	Entre grupos	6999,143	4	1749,7860	35,20184	1,71E-09	2,79554	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	1143,266	23	49,7072				
	Total	8142,41	27	301,5707				
25%	Entre grupos	3651,874	4	912,9685	10,03312	1,06E-04	2,84010	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	1910,904	21	90,9954				
	Total	5562,778	25	222,5111				
30%	Entre grupos	4709,743	4	1177,4360	7,90703	3,66E-04	2,79554	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	3424,931	23	148,9100				
	Total	8134,674	27	301,2842				

**Fonte: Autoria própria**

Os valores de  $p$  resultantes do teste de Tukey-Kramer são apresentados na Figura 48. Com o objetivo de facilitar a identificação das correlações significativas entre os volumes adicionais de pasta correspondentes a cada teor de sílica, a linha pontilhada traçada representa o valor  $p = 0,05$ . Assim sendo, apenas os pontos abaixo da linha indicam a ocorrência de correlações estatisticamente significativas.

Via de regra nota-se que não existe um padrão entre as dez correlações formadas a partir dos diferentes volumes adicionais de pasta. Para o teor de 20% de sílica, só não têm efeito significativo as correlações 0-20% e 20-40%. Enquanto para o percentual de 25% de sílica só tem efeito significativo as correlações com o volume mínimo de pasta, ou seja: 0-20%, 0-40%, 0-60% e 0-80%. Por sua vez, para o teor de 30% de sílica, 50% das correlações são significativas (0-60%, 0-80%, 20-60%, 20-80% e 60-80%) e as outras 50%, não são significativas.

**Figura 48 - Valor  $p$  resultante do Teste de Tukey-Kramer para as séries com 20%, 25% e 30% de sílica**



**Fonte: Autoria própria**

Destaca-se ainda que, diferentemente do que ocorreu com o teor de 20% de sílica, os traços TR-25.80 e TR-30.80 apresentaram valores de resistência média à compressão superiores aos dos respectivos traços produzidos com 60% de volume adicional de pasta (Figura 47). Contudo, os resultados do teste de Tukey-Kramer indicam que, em ambos os casos, a diferença entre os valores de resistência (de 4% a 7%) não é estatisticamente significativa.

De modo contrário, para o teor de 15% de sílica os resultados indicam a tendência do aumento do valor da resistência à compressão em função do incremento do volume adicional pasta e do consumo de cimento, sendo que o traço com o mínimo volume de pasta foi o que apresentou a menor resistência média, enquanto o traço com 80% de volume adicional de pasta foi o que atingiu os maiores resultados. A diferença entre os dois extremos é de 10%. Entretanto, é importante ressaltar que os resultados da análise de variância (Tabela 31) sinalizam que este incremento também não é estatisticamente significativo.

**Tabela 31 - Análise de variância do volume adicional de pasta nos traços com 15% de sílica**

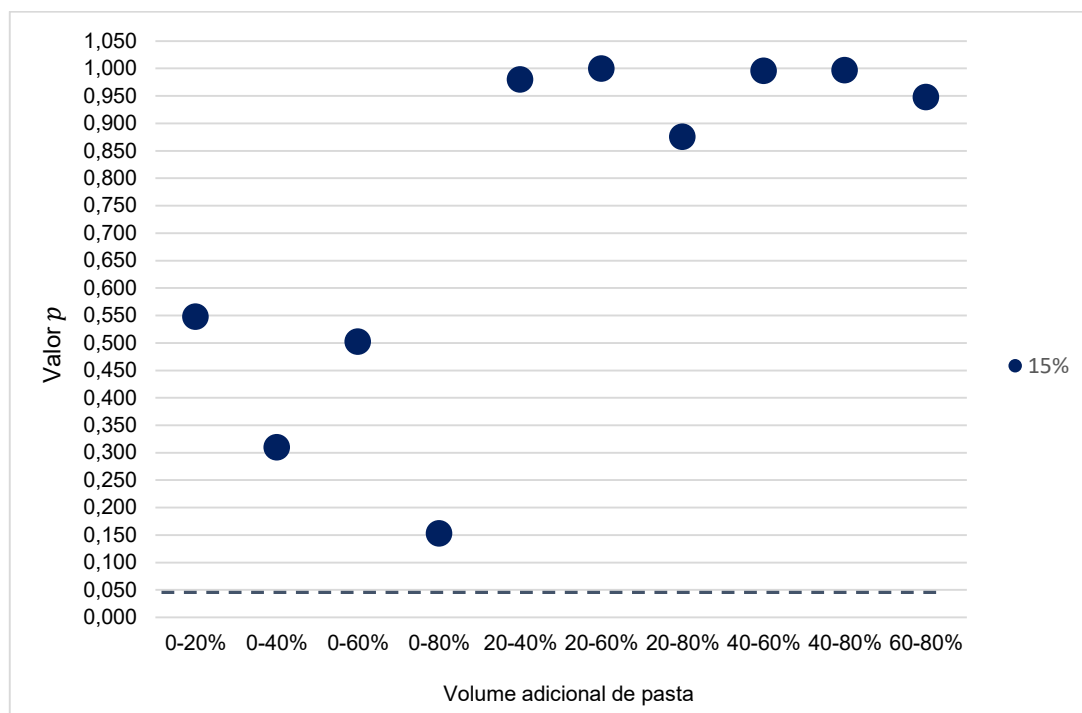
Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F crítico	Comparação
Entre grupos	441,5885	4	110,3971	1,66813	2,04E-01	2,96471	Efeito não significativo
Dentro dos grupos	1125,061	17	66,1801				
Total	1566,65	21	74,6024				

**Fonte: Autoria própria**

Acredita-se que este comportamento possa ser explicado pelo fato de que para o teor de 15% de sílica não existe excesso de material pozolânico, e, portanto, não há sílica suficiente para atuar como microfíler, logo o aumento do teor de pasta se reflete no aumento absoluto do volume de cimento e de sílica disponíveis para reagir, o que por sua vez resulta em uma maior quantidade de C-S-H, contribuindo positivamente para a resistência.

De forma a complementar esta análise, a Figura 49 contém os valores de  $p$  resultantes do teste de Tukey-Kramer para o teor de 15% de sílica. Comparativamente, pode-se observar que ocorre um comportamento similar ao do teor com 25% de sílica, ainda que não tenha sido confirmada a significância estatística. Ou seja, os valores de  $p$  indicam as correlações com o traço que contém o mínimo volume adicional de pasta são mais fortes que as demais.

**Figura 49 - Valor  $p$  resultante do Teste de Tukey-Kramer para a série com 15% de sílica**

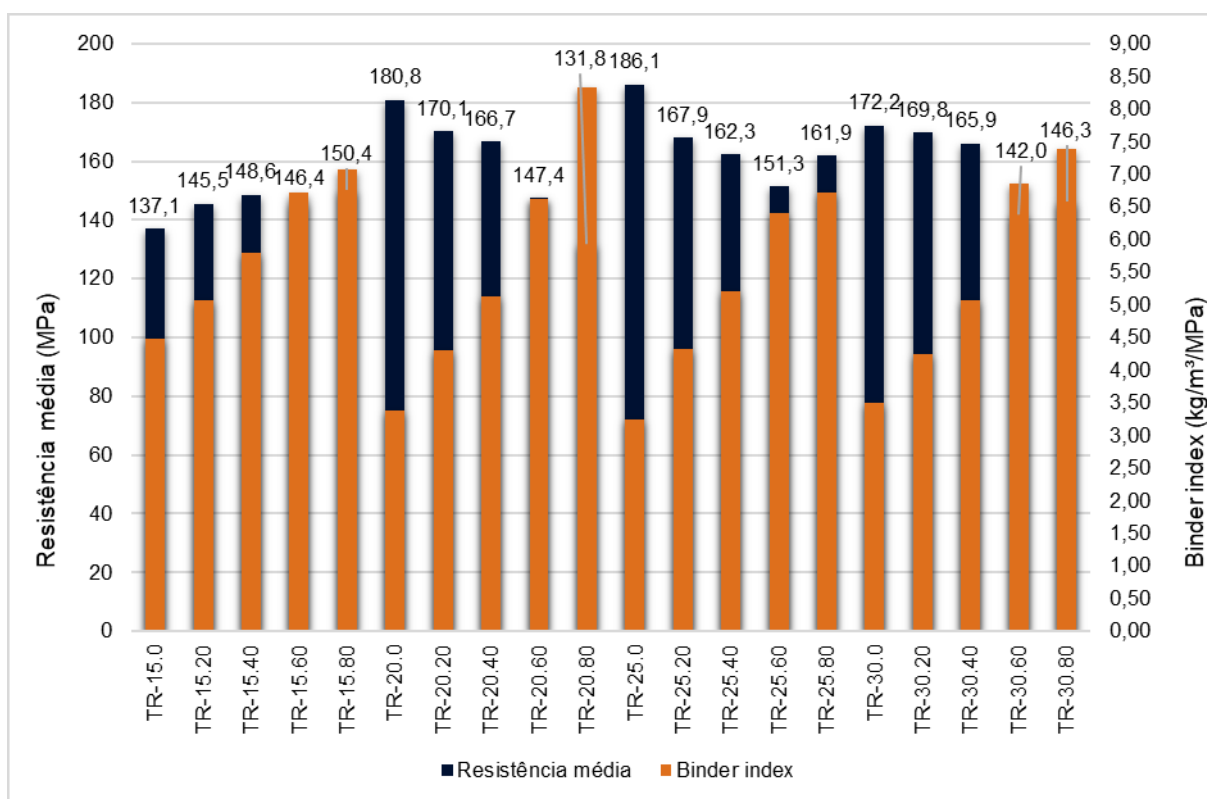


**Fonte: Autoria própria**

O *binder index* individual de cada traço, determinado por meio da Equação 37, está representado na Figura 50.

Os números mostram que os traços com o volume mínimo de pasta são aqueles que apresentam o melhor *binder index*, e que este valor aumenta à medida que aumenta o volume adicional de pasta, independentemente do consumo de sílica, dando origem a concretos mais caros e menos sustentáveis.



Figura 50 - *Binder index* individual dos traços

Fonte: Autoria própria

Adicionalmente, na Tabela 32 são apresentados os valores médios de resistência à compressão de cada série ( $f_{cms}$ ), bem como a média dos respectivos consumos de cimento ( $C_{cp}$ ) e de sílica ativa ( $C_{sa}$ ), além do *binder index* da série ( $BIs$ ).

Tabela 32 - *Binder index* médio

Série	$f_{cms}$ MPa	$C_{cp}$ Kg/m³	$C_{sa}$ Kg/m³	$BIs$ Kg/m³/MPa
TR-15	145,6	749	112	5,91
TR-20	154,9	711	142	5,36
TR-25	165,9	678	169	5,10
TR-30	159,2	647	194	5,28

Fonte: Autoria própria

Quando se compara o *binder index* médio de cada série, os resultados indicam que a de melhor *BI* é a que contém 25% de sílica, conforme também já era esperado, enquanto a de pior *binder index* é aquela produzida com 15% de sílica,

tanto por conter o maior consumo de aglomerantes, quanto por apresentar a menor resistência média.

Vale destacar que o traço TR-25.0 foi o que apresentou as maiores resistências individuais, sendo que uma das amostras atingiu 199,1 MPa (APÊNDICE D), com consumo total de 605 kg/m<sup>3</sup> de aglomerantes. Como consequência, este traço também assume a resistência média mais elevada dentre os cinco traços produzidos com o mínimo volume de pasta, além do melhor *binder index* individual (3,25 Kg/m<sup>3</sup>/MPa) dentre os 20 traços estudados. Para efeito de comparação, Vatannia *et al.* (2020) obtiveram um *binder index* de 3,77 Kg/m<sup>3</sup>/MPa e resistência de 206,0 MPa em um traço contendo 595 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 30% de sílica e relação a/agl de 0,20.

Outro ponto relevante é o fato de que a resistência média de 186,1 MPa do traço TR-25.0 foi alcançada com o consumo de 484 kg/m<sup>3</sup> de cimento, valor 36% inferior à média identificada no levantamento de parâmetros correlatos. Contudo, dado o mínimo volume de pasta, este traço apresenta reduzida fluidez e, portanto, pode não ser considerado o melhor traço do ponto de vista de trabalhabilidade. Logo, a escolha do volume ideal de pasta requer o estabelecimento de um ponto de equilíbrio em que as propriedades no estado fresco e no estado endurecido possam ser satisfatoriamente alcançadas.

Em sua pesquisa, com o uso de areia artificial de basalto, Ma e Dietz (2008) concluíram que o volume de pasta adequado para o atendimento das condições de fluidez e resistência mecânica deveria variar entre 46% e 55%, sendo que as maiores resistências (156,0 MPa aos 28 dias) correspondem ao teor de 55%, cujo traço contém 609 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 30% de sílica, a/agl=0,21, 70% de areia artificial e 30% de areia natural em massa. Em termos de volume de pasta e teor de sílica, este traço pode ser comparado ao TR-30.60 ( $f_{cm} = 142,0$  MPa). A resistência inferior do TR-30.60 em relação ao traço supracitado pode ser justificada em função da relação entre o consumo de pó de quartzo e de cimento. Nesta pesquisa, a proporção é de 25%, enquanto no traço de Ma e Dietz (2008), a relação representa 43%. Neste caso, o maior consumo de pó de quartzo em relação ao cimento promoveu um ganho mais acentuado de resistência.

Por fim destaca-se que, de forma oposta aos resultados obtidos nesta pesquisa, os autores identificaram que o aumento no volume de pasta, até o patamar de 55%, provocou o incremento na resistência à compressão. A partir deste ponto, o valor da resistência apresentou tendência de redução.

### 5.2.3 Análise da Influência do Tipo de Cura na Resistência à Compressão

Para a análise da influência do tipo de cura na resistência à compressão foi selecionado o traço TR-25.20 por estar inserido na série que apresentou o melhor *binder index* médio (5,10 kg/m<sup>3</sup>/MPa), conforme pode-se observar na Tabela 32.

Por sua vez, a escolha por aquele que apresenta 20% de volume adicional de pasta é justificada pela combinação entre a característica autoadensável e pelo *binder index* (4,32 kg/m<sup>3</sup>/MPa).

Na Tabela 33 tem-se os resultados de resistência média à compressão aos 28 dias, o desvio-padrão e o coeficiente de variação para os conjuntos de amostras submetidos aos diferentes regimes de cura. Os resultados indicam que a adoção do ciclo de cura térmica durante 72 horas promoveu um incremento de 45% no valor da resistência no traço produzido com 581 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 33 - Valores da resistência média em função do tipo de cura**

Traço	Tipo de cura	$f_{cm}$ (MPa)	$Sd$ (MPa)	$CV$ (%)
TR-25.20	Cura úmida	115,7	6,4	5,5
	Cura térmica	167,9	9,9	5,9

**Fonte: Autoria própria**

A significância deste efeito pode ser corroborada pelo resultado da análise de variância (Tabela 34).

**Tabela 34 - Análise de variância da resistência média à compressão em função do tipo de cura**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor <i>p</i>	F crítico	Comparação
Entre grupos	8796,256	1	8796,2560	150,98420	1,57E-08	4,66719	Efeito significativo
Dentro dos grupos	757,373	13	58,2595				
Total	9553,629	14	682,4021				

**Fonte: Autoria própria**

Este fenômeno justifica-se em função do aumento da atividade pozolânica, resultante da sílica e do pó de quartzo na mistura de UHPC, que foi ativada pela elevada temperatura. Tal reação levou a produção hidratos secundários, dando origem a uma microestrutura mais densa de C-S-H, que resultou no desenvolvimento mais rápido da resistência.

Em seus estudos, Soliman e Tagnit-Hamou (2016) atestaram um ganho de 24% na resistência à compressão de amostras submetidas tão somente a um ciclo de cura térmica com 48 horas de duração, em relação àquelas submetidas ao ciclo de cura úmida e ensaiadas aos 28 dias. Werder *et al.* (2021) apontaram um incremento de 20% na resistência de amostras submetidas à temperatura de 90°C durante 96 horas. Com consumo de cimento de 832 kg/m<sup>3</sup>, 16% de sílica ativa, 25% de pó de quartzo, a/agl de 0,22, a resistência média atingiu 210,0 MPa aos 28 dias.

A comparação dos resultados aqui obtidos com os de Yang *et al.* (2020), mostram a eficiência do método proposto uma vez que patamares similares de resistência (115,7 MPa x 122,0 MPa) foram alcançados com 34% a menos de cimento (581 kg/m<sup>3</sup> x 780 kg/m<sup>3</sup>), considerando-se o mesmo teor de sílica e relação a/agl similar.

#### 5.2.4 Análise da Influência da Idade de Ensaio na Resistência à Compressão

A influência da idade de ensaio na resistência à compressão do concreto foi testada tanto para amostras submetidas à cura úmida, quanto à cura térmica.

Na Tabela 35 tem-se os resultados da resistência à compressão do traço TR-25.20 cujas amostras foram submetidas exclusivamente à cura úmida. Observa-se

que aos 28 dias estas amostras atingiram a resistência média de 115,7 MPa. Já, aos 91 dias, ocorreu um acréscimo de 27% no valor da resistência, atingindo patamares próximos de 150,0 MPa.

**Tabela 35 - Valores da resistência média em função da idade ensaio de amostras submetidas à cura úmida**

Traço	Idade	$f_{cm}$ (MPa)	$Sd$ (MPa)	$CV$ (%)
TR-25.20	28 dias	115,7	6,4	5,5
	91 dias	147,0	6,0	4,1

Fonte: Autoria própria

A análise de variância (Tabela 36) confirma que o efeito da idade é estatisticamente significativo para as amostras submetidas à cura úmida.

**Tabela 36 - Análise de variância da resistência média à compressão em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura úmida**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F crítico	Comparação
Entre grupos	4646,24	1	4646,2400	121,33230	3,69E-09	4,45132	Efeito significativo
Dentro dos grupos	650,9899	17	38,2935				
Total	5297,229	18	294,2905				

Fonte: Autoria própria

É sabido que a resistência à compressão de misturas cimentícias evolui em função do tempo, sobretudo com a adição de materiais pozolânicos. A formação do gel de C-S-H densifica a microestrutura e preenche os poros da matriz, melhorando significativamente as propriedades mecânicas do UHPC, tanto em idades mais avançadas quanto da adoção da cura térmica.

Em seus estudos, Campos *et al.* (2020) identificaram um ganho de 17% em amostras produzidas com 16% de sílica e submetidas tão somente à cura úmida. Já Soliman e Tagnit-Hamou (2016) constataram o aumento de 7% a 10% na resistência à compressão em função da idade. Comportamento similar também pode ser identificado em Yang *et al.* (2020). Aos 91 dias, a resistência do traço composto por 780 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 25% de sílica, apresentou um crescimento de 9% em relação aos 28 dias, contudo o patamar de 150,0 MPa foi logrado somente aos 180 dias.

Outro grupo de amostras representativas da série contendo 15% de sílica foi produzido com o objetivo de avaliar a evolução da resistência em função da idade, entretanto, neste caso optou-se pela adoção do ciclo de cura térmica. Os resultados de resistência média, desvio padrão e coeficiente de variação são apresentados na Tabela 37.

**Tabela 37 - Valores da resistência média em função da idade de ensaio de amostras submetidas à cura térmica**

Traço	Idade	$f_{cm}$ (MPa)	$Sd$ (MPa)	$CV$ (%)
TR-15.0	28 dias	137,1	6,4	4,7
	91 dias	161,5	2,7	1,7
TR-15.20	28 dias	145,5	7,4	5,1
	91 dias	161,0	4,1	2,5
TR-15.40	28 dias	148,6	4,4	3,0
	91 dias	161,8	5,4	3,3
TR-15.60	28 dias	146,4	4,6	3,1
	91 dias	136,9	7,3	5,0
TR-15.80	28 dias	150,4	12,9	8,6
	91 dias	156,6	8,7	5,6

**Fonte: Autoria própria**

Os dados indicam que o maior crescimento (18%) se deu no traço com o mínimo volume de pasta, seguido do traço TR-15.20 (11%) e, então, do traço com 40% de volume adicional de pasta (9%). Já no traço TR-15.60, o valor da resistência média aos 91 dias foi menor do que aos 28 dias, enquanto no traço contendo 80% de volume adicional de pasta, o valor da resistência aos 91 dias voltou a superar o de 28 dias, entretanto, apenas neste caso, a variação não pode ser considerada estatisticamente significativa como se pode observar na análise de variância apresentada na Tabela 38.

**Tabela 38 - Análise de variância da resistência média à compressão em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura térmica**

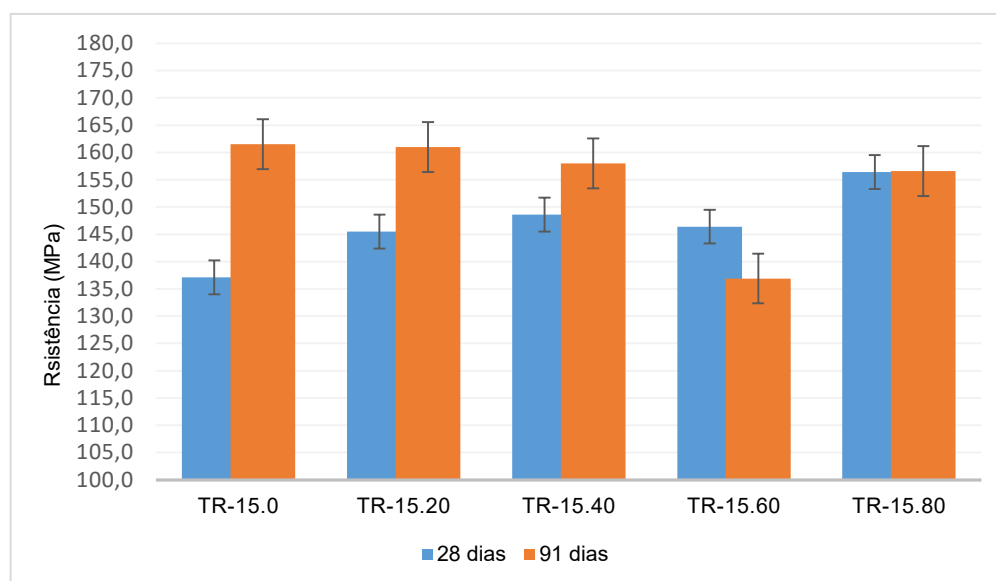
Traço	Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor <i>p</i>	F crítico	Comparação
TR-15.0	Entre grupos	1190,72	1	1190,7200	50,10921	3,99E-04	5,98738	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	142,575	6	23,7625				
	Total	1333,295	7	190,4707				
TR-15.20	Entre grupos	529,0776	1	529,0776	13,61006	7,76E-03	5,59145	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	272,118	7	38,8740				
	Total	801,1956	8	100,1494				
TR-15.40	Entre grupos	349,8013	1	349,8013	14,63017	8,71E-03	5,98738	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	143,4575	6	23,90958				
	Total	493,2588	7	70,46554				
TR-15.60	Entre grupos	327,7801	1	327,7801	6,32579	4,01E-02	5,59145	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	362,7155	7	51,8165				
	Total	690,4956	8	86,31194				
TR-15.80	Entre grupos	97,969	1	97,9690	0,81338	3,93E-01	5,31766	Efeito não significativo
	Dentro dos grupos	963,58	8	120,4475				
	Total	315,6289	8	39,45361				

**Fonte: Autoria própria**

Destaca-se também que o nível de significância diminui ao passo que o volume adicional de pasta é incrementado, ratificando a hipótese de que elevados consumos de cimento não promovem ganhos proporcionais na resistência à compressão, mesmo em idades mais avançadas.

A Figura 51 ilustra o comportamento da resistência em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura térmica. É importante destacar que, conforme já identificado na Tabela 31, os resultados de resistência aos 28 dias não apresentaram significância estatística. Nota-se que a média dos resultados de resistência aos 91 dias, desconsiderando-se o TR-15.60, varia pouco mais de 3% indicando uma estabilidade do patamar resistente, independentemente do acréscimo do consumo de aglomerantes. Acredita-se que este comportamento possa ser atribuído ao fato de que a sílica disponível para a formação de reações pozolânicas foi sendo consumida de forma mais acentuada a partir dos 28 dias, a despeito do volume de pasta.

**Figura 51 - Comportamento da resistência em função da idade de ensaio das amostras submetidas à cura térmica**



**Fonte: Autoria própria**

A única exceção a este comportamento se dá no traço TR-15.60 (91 dias). Esta constatação é validada pelo resultado da ANOVA (Tabela 39) e corroborada pelo Teste de Tukey-Kramer, cujo resultado está apresentado na Tabela 40.

**Tabela 39 - Análise de variância dos resultados de resistência média à compressão aos 91 dias em função do volume de pasta**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F crítico	Comparação
Entre grupos	1809,2	4	452,3108	11,63319	1,28E-04	3,00692	Efeito significativo
Dentro dos grupos	622,1	16	38,9000				
Total	2431,34	20	121,6000				

**Fonte: Autoria própria**

Observa-se na Tabela 40 que apenas nos traços comparados com aquele que possui 60% de volume adicional de pasta, o valor  $p$  é inferior ao nível de significância indicando a existência de diferença entre as médias dos demais grupos.



**Tabela 40 - Teste de Tukey-Kramer para os resultados de resistência média aos 91 dias em função do volume de pasta**

Q TEST (TUKEY HSD/KRAMER)						
<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>p-value</i>	Comparação
TR-15.0	TR-15.20	0,525	3,117734	0,168392	1,00E+00	Efeito não significativo
TR-15.0	TR-15.40	0,300	3,117734	0,096224	1,00E+00	Efeito não significativo
TR-15.0	TR-15.60	24,575	3,117734	7,882327	3,51E-04	Efeito significativo
TR-15.0	TR-15.80	4,835	2,957742	1,634693	7,75E-01	Efeito não significativo
TR-15.20	TR-15.40	0,825	3,117734	0,264615	1,00E+00	Efeito não significativo
TR-15.20	TR-15.60	24,050	3,117734	7,713936	4,41E-04	Efeito significativo
TR-15.20	TR-15.80	4,310	2,957742	1,457193	8,38E-01	Efeito não significativo
TR-15.40	TR-15.60	24,875	3,117734	7,978551	3,08E-04	Efeito significativo
TR-15.40	TR-15.80	5,135	2,957742	1,736122	7,36E-01	Efeito não significativo
TR-15.60	TR-15.80	19,740	2,957742	6,67401	1,86E-03	Efeito significativo

**Fonte: Autoria própria**

Apesar do efeito significativo, acredita-se que esta diferença no patamar de resistência do traço TR-15.60 comparativamente aos demais, seja consequência de eventuais falhas que possam ser atribuídas ao processo de produção e/ou ensaio destas amostras. Ainda que indesejáveis, apesar do rigor e controle adotados, estas situações ocasionalmente podem ser identificadas em programas experimentais.

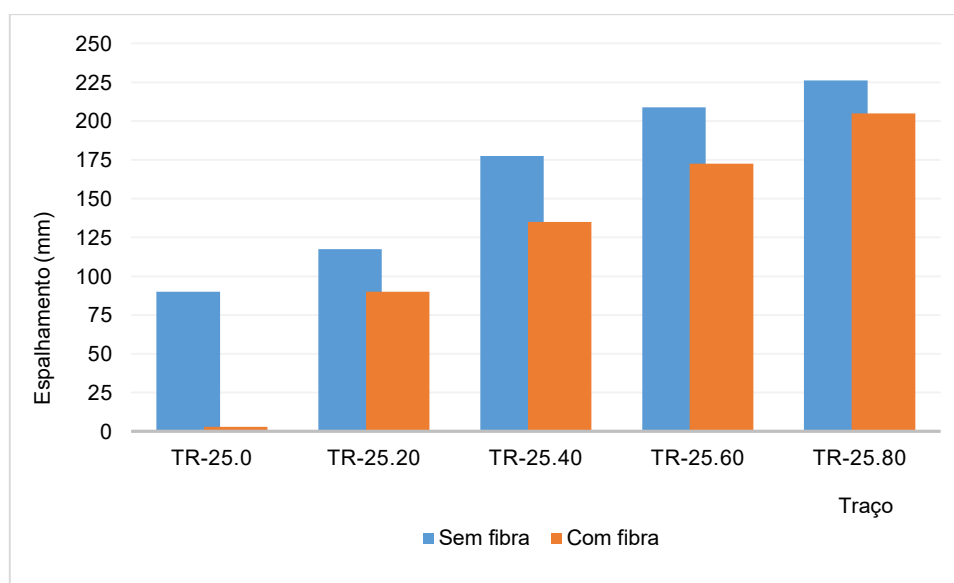
### 5.2.5 Análise da Influência da Fibra Metálica na Fluidez e na Resistência à Compressão

Visando analisar a influência da fibra metálica na resistência à compressão do UHPC selecionou-se a série de traços com 25% de sílica, por se tratar daquela que apresentou o melhor *binder index* médio.

Para tanto, os cinco traços da série supracitada foram novamente produzidos e submetidos ao ciclo de cura térmica, uma vez que, segundo Shi *et al.* (2015a) este regime de cura tem um impacto significativo na resistência da ligação entre a fibra e matriz. Com o objetivo de avaliar a influência da fibra na fluidez destes traços, determinou-se o espalhamento de cada amostra antes e imediatamente após a inserção da fibra na mistura.

Através da Figura 52 é possível observar que a adição da fibra provocou uma queda na fluidez de todos os traços, sendo muito significativa no traço com o mínimo volume de pasta. Este comportamento já pôde ser constatado nas Figura 47 (a) e (b). Contudo, com o aumento do volume de pasta a fluidez passou a ser maior.

**Figura 52 - Comportamento do espalhamento em função do volume adicional de pasta e da adição de fibras metálicas**



**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 53 (c) pode-se avaliar a trabalhabilidade do traço TR-25.60. Com espalhamento de 172 mm, este traço apresentou fluidez equivalente ao traço TR-25.40 sem fibras. A Figura 53 (d) é uma imagem do ensaio de espalhamento do traço TR-25.80 que apresentou uma redução de 20 mm em relação ao ensaio executado previamente à adição da fibra. À exceção do traço TR-25.0, em que não foi possível medir o espalhamento dada a condição extremamente seca da mistura e a formação de aglomerados de fibras (Figura 53 (a) e (b)), nos demais traços a redução média do espalhamento foi de 30 mm.

Figura 53 - Aspecto da fluidez em função do volume adicional de pasta e da adição de fibras metálicas: (a) TR-25.0, (b) TR-25.0, (c) TR-25.60, (d) TR-25.80



Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que o valor da fração de empacotamento relativa total foi determinado segundo a expressão  $(T_{fibras} \cdot f / 4 + o_s / o_m)$  proposta por Martinie, Rossi e Roussel (2010) e, para o teor de fibra de 2,39% adotado nesta pesquisa, o número resultante é 0,99, ou seja, muito próximo de 1,00, sinalizando que a mistura poderia apresentar baixos níveis de fluidez, conforme citado em 2.1.

Em sua pesquisa, Soliman e Tagnit-Hamou (2016) não identificaram alterações significativas na fluidez do UHPC com a adição de 2% do mesmo tipo de fibra, assim como Christ (2019) com percentuais de 1, 2 e 3%. Contudo, vale destacar que, ainda que os teores de pasta em massa sejam similares em ambas as pesquisas (em torno de 52%) e se assemelhem ao do traço TR-15.60, acredita-se que a associação do pressuposto supracitado ao formato, textura e granulometria da areia artificial empregada nesta pesquisa, justifique a queda da fluidez com a incorporação da fibra.

Os resultados de resistência média à compressão aos 28 dias, o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos conjuntos de amostras com diferentes volumes de pasta, das amostras produzidas com e sem a adição de fibras metálicas estão apresentados na Tabela 41. Os dados indicam que o traço com 60% de volume adicional de pasta foi o que apresentou os melhores resultados frente a adição da fibra.

**Tabela 41 - Valores da resistência média em função da adição de fibras**

Traço	Fibra	$f_{cm}$ (MPa)	$Sd$ (MPa)	$CV$ (%)
TR-25.0	Sem fibras	186,1	10,5	5,6
	Com fibras	59,6	2,4	4,0
TR-25.20	Sem fibras	167,0	9,9	5,9
	Com fibras	119,9	6,7	5,6
TR-25.40	Sem fibras	162,3	12,2	7,5
	Com fibras	169,8	5,9	3,5
TR-25.60	Sem fibras	151,3	9,2	6,1
	Com fibras	173,6	4,5	2,6
TR-25.80	Sem fibras	161,9	2,9	1,8
	Com fibras	144,2	10,0	6,9

**Fonte: Autoria própria**

A análise de variância contida na Tabela 42 mostra que a inclusão da fibra teve um efeito estatisticamente significativo, para mais ou para menos, na resistência à compressão dos diferentes traços, à exceção daquele com 40% de volume adicional de pasta em que os valores de resistência do UHPC com ou sem fibra foram muito similares.

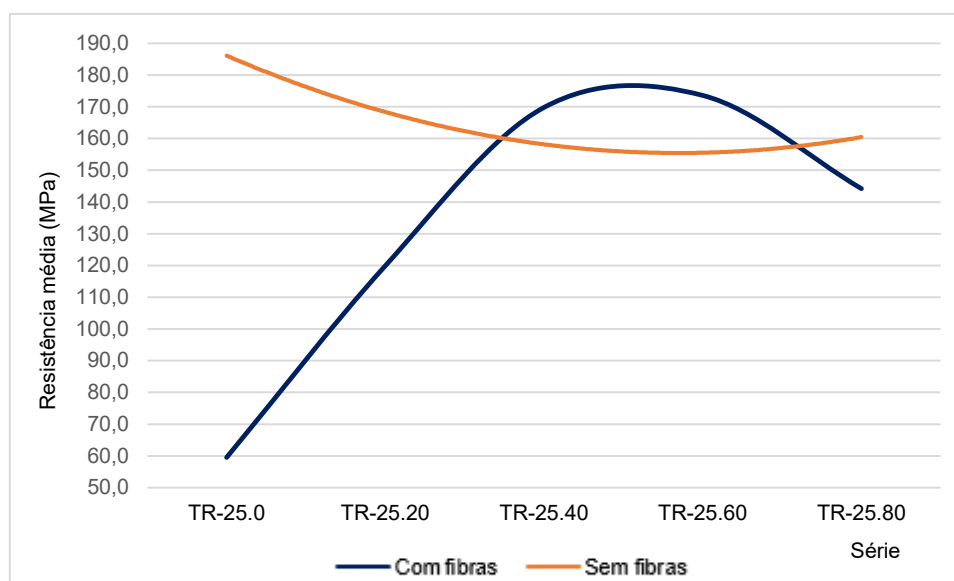
**Tabela 42 - Análise de variância da resistência média em função da adição de fibras**

Traço	Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor <i>p</i>	F crítico	Comparação
TR-25.0	Entre grupos	38425,64	1	38425,6400	540,10480	1,25E-08	5,31766	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	569,1583	8	71,1448				
	Total	38994,8	9	4332,7560				
TR-25.20	Entre grupos	5550,736	1	5550,7360	77,77408	2,15E-05	5,31766	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	570,96	8	71,3700				
	Total	6121,696	9	680,1884				
TR-25.40	Entre grupos	139,129	1	139,1290	1,51373	2,54E-01	5,31766	Efeito não significativo
	Dentro dos grupos	735,292	8	91,9115				
	Total	874,421	9	97,1579				
TR-25.60	Entre grupos	1478,492	1	1478,4920	30,46006	3,71E-04	5,11736	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	436,8483	9	48,5387				
	Total	1915,34	10	191,5340				
TR-25.80	Entre grupos	777,924	1	777,9240	14,40533	5,27E-03	5,31766	Efeito significativo
	Dentro dos grupos	432,02	8	54,0025				
	Total	1209,944	9	134,4382				

**Fonte: Autoria própria**

Através da Figura 56 é possível se observar a tendência do comportamento da resistência à compressão em função do acréscimo do volume de pasta. Nota-se que à medida que o volume adicional de pasta é incrementado, a resistência à compressão do UHPC com a fibra tende a aumentar, de modo inverso ao que ocorre nas matrizes sem a fibra.

**Figura 54 - Tendência do comportamento da resistência à compressão em função da adição de fibras**



Fonte: Autoria própria

As equações de regressão, os valores de  $R^2$ , o coeficiente de correlação e o valor  $p$  indicando o nível de significância de cada uma das equações, são apresentados no Quadro 5.

**Quadro 5 - Equações de regressão correspondentes à adição de fibras**

Traço	Equação	$R^2$	$\rho$	Valor $p$
Com fibras	$y = 56,63 + 443,6 x - 402,7 x^2$	0,9901	0,9950	0,010
Sem fibras	$y = 186,1 - 107,9 x + 94,82 x^2$	0,9402	0,9696	0,060

Fonte: Autoria própria

Esta tendência pode ser parcialmente justificada em função do comportamento reológico do compósito. Ao passo que o volume de pasta aumenta, as fibras passam a se dispersar melhor na matriz, os aglomerados se desfazem, a fluidez da mistura aumenta e a combinação destes fatores passa a favorecer o processo de moldagem e adensamento das amostras, refletindo diretamente no resultado da resistência mecânica. Tal comportamento é facilmente visualizado mediante os baixos valores da fluidez e, por consequência, da resistência à compressão dos traços TR-25.0 e TR-25.20.

No traço contendo 40% de volume adicional de pasta, os valores de resistência do UHPC com e sem fibra se equivalem. Isto ocorre porque o acréscimo de pasta provoca a redução da resistência no traço sem fibra, enquanto a presença da fibra, agora em uma pasta com níveis minimamente adequados de fluidez promove um incremento na resistência à compressão conforme ratificam os estudos de You, Spiesz e Brouwers (2014), Christ (2019), Rompa e Gidrão (2020).

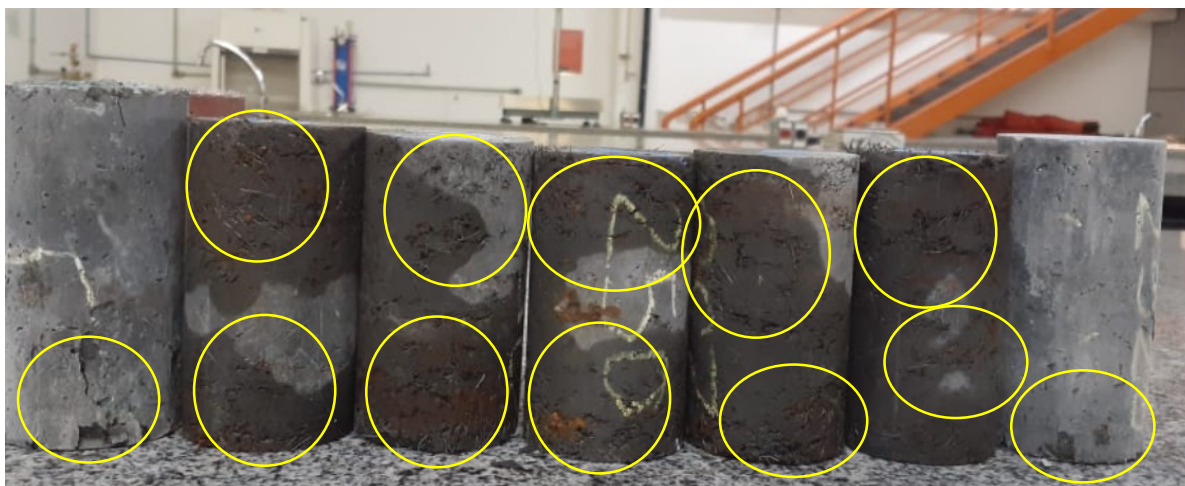
O efeito positivo é ainda mais acentuado no traço TR-25.60, com um acréscimo de 15% no valor da resistência do traço contendo a fibra. Kalthoff e Raupach (2021) registraram os mesmos 15% de aumento de resistência em matrizes contendo 832 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 16% de sílica e 146 kg/m<sup>3</sup> de fibra. Por sua vez, Li *et al.* (2020) apontaram um ganho de 41% na resistência à compressão com a incorporação de 1,7% de fibras metálicas à matriz, enquanto Dingqiang *et al.* (2020), com o teor de 0,5% alcançaram resistências de 122,0 MPa, chegando a 160,0 MPa com a adição de 3% de fibras.

Por sua vez, Zhang *et al.* (2021) registraram uma queda de 19% na resistência à compressão de 150,0 MPa com a adição de 2% de fibras metálicas (157 kg/m<sup>3</sup>) em um traço contendo 657 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 119 kg/m<sup>3</sup> de sílica e relação água/aglomerante de 0,23. Desempenho similar e este foi percebido no traço com 80% de volume adicional de pasta. Neste caso, a resistência do traço sem a fibra aumentou em relação ao traço precedente, enquanto a resistência do traço com a fibra diminuiu em comparação ao traço TR-25.60. É interessante observar que, ao contrário do traço TR-25.0 (Figura 53 (a)) onde se pode observar o excesso de fibras em relação à pasta, no traço TR-25-80 (Figura 53 (d)) parece haver um excedente de pasta em relação à quantidade de fibras, justificando a queda da resistência. Este comportamento se reflete no nível de significância da ANOVA, que diminui ao passo que o volume adicional de pasta é incrementado (Tabela 42).

Acredita-se, portanto, que existe uma combinação ótima entre o volume de pasta e o teor de fibra, que, por sua vez, é diferente para cada teor de sílica, e, que esta combinação conduz ao aumento da resistência até certo ponto. Cabe lembrar que as relações fibra/pasta e fibra/agregado são variáveis para os diferentes teores de sílica e volumes adicionais de pasta, sendo recomendado um maior aprofundamento no estudo destas correlações.

Na Figura 55 tem-se o conjunto de amostras representativas do traço TR-25.0, em que é possível visualizar as falhas decorrentes do processo de moldagem e adensamento, destacadas pelos círculos amarelos, que por sua vez contribuíram para a queda significativa nos resultados de resistência à compressão.

**Figura 55 - Aspecto do traço TR-25.0 com fibras**



**Fonte: Autoria própria**

Por fim, destaca-se que quando submetidos ao ensaio de compressão axial, a mecânica de ruptura das amostras de UHPC ocorre através da formação de múltiplas fissuras na direção vertical, e, quando se atinge o pico de força máxima resistida ocorre a falha repentina, causando a explosão do corpo de prova e a queda repentina na capacidade de carga. Em contraste, o modo de falha do UHPC reforçado com fibras e exposto ao mesmo tipo de esforço apresenta o padrão predominante de fissura inclinada, como se pode observar na Figura 56 (NAEIMI E MOUSTAFA, 2021; ZHANG *et al.*, 2021).



**Figura 56 - Padrão de fratura das amostras com adição de fibras**



**Fonte: Autoria própria**

### 5.3 EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE DOSAGEM

Com o objetivo de validar o método de dosagem proposto nesta pesquisa, um novo experimento foi realizado. Para tanto, a areia artificial foi substituída pela areia natural fina, cuja caracterização foi previamente apresentada em 4.1.2.

Como as etapas de determinação do teor de sílica e da relação água/aglomerante independem do tipo de agregado empregado, não foi necessária sua repetição, sendo aqui adotados os resultados obtidos em 4.2.1 (teor ideal de sílica igual a 25%) e 4.2.2 (relação água/aglomerante igual a 0,20). O coeficiente de distribuição ( $q = 0,37$ ) também foi mantido constante, uma vez que simulações matemáticas do método proposto indicaram que a alteração de um dos agregados miúdos, por si só, já provocou modificações significativas no percentual de cada um dos materiais, bem como na curva granulométrica resultante do modelo matricial. Os parâmetros determinados nas demais etapas estão apresentados a seguir.

### 5.3.1 Determinação da Curva Granulométrica Ideal do Experimento de Validação

Na Tabela 43 tem-se a composição granulométrica ideal entre as duas areias naturais e o pó de quartzo, determinada segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado. Observa-se que o módulo de finura resultante do modelo é igual a 1,23, valor bem inferior àquele estabelecido com o uso da areia artificial (2,62).

**Tabela 43 - Composição granulométrica do experimento de validação segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado**

<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>% Passante</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
9,5	100,0%	0,0%	0,0%
6,3	100,0%	0,0%	0,0%
4,8	100,0%	0,0%	0,0%
2,4	100,0%	0,0%	0,0%
1,2	100,0%	0,0%	0,0%
0,6	76,0%	24,0%	24,0%
0,3	57,5%	18,5%	42,5%
0,15	43,1%	14,4%	56,9%
0,075	32,0%	11,1%	68,0%
0,045	25,5%	6,5%	74,5%
0,020	17,3%	8,1%	82,7%
0,010	12,1%	5,3%	87,9%
0,005	8,0%	4,1%	92,0%
0,002	4,0%	4,0%	96,0%
0,001	1,7%	2,2%	98,3%
0,0005 (fundo)	0,0%	1,7%	100,0%
	<b>TOTAL</b>	100,0%	---
		<b>Módulo de finura</b>	<b>MF = 1,23</b>

**Fonte: Autoria própria**

Esta redução é consequência da diferença existente entre a curva granulométrica e o diâmetro máximo da areia artificial em relação à areia natural fina, ainda que a areia natural e o pó de quartzo tenham sido mantidos na mistura.

A análise matricial resultante deste empacotamento está apresentada na Tabela 44. Os resultados indicam que a porcentagem de areia natural na composição

da curva ideal ( $\varepsilon_1$ ) é de 9%, enquanto a porcentagem de areia natural fina ( $\varepsilon_2$ ) corresponde a 60% e o pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ ) representa de 32% da mistura.

Ao se comparar esta composição com aquela determinada em 4.2.4 com o emprego da areia artificial nota-se uma redução no percentual de areia natural e um aumento significativo no percentual de pó de quartzo. É importante destacar que o teor de 32% de pó de quartzo é congruente com a média dos teores identificados nas pesquisas correlatas (Quadro 1).

Conforme supracitado, esta alteração se dá em função da diferença entre a granulometria da areia artificial e da areia natural fina, que altera a composição da curva ideal, e, conseqüentemente, a proporção entre os seus componentes.

Tabela 44 - Análise matricial do experimento de validação

	Areias	Ax+Bx = E - ( $\epsilon_1 \cdot G_1 + \epsilon_2 \cdot G_2 + \epsilon_3 \cdot G_3 = E_1$ )			E1	Erro^2	AtA*x=AtE
	Peneira (mm)	G1	G2	G3			
# PENEIRAS	25	0,0000	0,0000	0,0000			
	19	0,0000	0,0000	0,0000			
	12,5	0,0000	0,0000	0,0000			
	9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_1 = 0,09$
	6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_2 = 0,60$
	4,8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_3 = 0,32$
	2,4	0,0017	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	Média do Erro = 0,0045
	1,2	0,0030	0,0368	0,0000	0,0000	0,0005	Soma do Erro = 0,0714
	0,6	0,0170	0,1611	0,0000	0,2397	0,0201	Varição do Erro = 0,000034
	0,3	0,1598	0,7119	0,0000	0,4251	0,0002	
	0,15	0,7151	0,9984	0,0000	0,5686	0,0082	
	0,075	0,7151	0,8981	0,0000	0,6797	0,0065	
	0,045	0,7151	0,8981	0,0863	0,7451	0,0141	
	0,020	0,7151	0,8981	0,4304	0,8266	0,0084	
	0,010	0,7151	0,8981	0,7010	0,8793	0,0035	
	0,005	0,7151	0,8981	0,8651	0,9200	0,0023	
	0,002	0,7151	0,8981	0,9760	0,9601	0,0029	
	0,001	0,7151	0,8981	0,9998	0,9826	0,0047	
	0,0005 Fundo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 45 tem-se a composição granulométrica determinada por meio do modelo matricial, cujo módulo de finura resultante é de 1,22, praticamente igual àquele determinado pelo modelo de Andreasen e Andersen modificado de 1,23. Neste caso, é possível observar que o aumento da porcentagem do pó de quartzo na mistura, promoveu uma maior equivalência entre a curva ideal e aquela determinada pelo modelo matricial.

**Tabela 45 - Composição granulométrica do experimento de validação segundo o modelo matricial**

Abertura nominal da malha da peneira (mm)	G1	G2	G3	% Retido acumulado
	Areia natural ( $\epsilon_1$ )	Areia natural fina ( $\epsilon_2$ )	Pó de quartzo ( $\epsilon_3$ )	
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
12,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
4,8	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
2,4	0,0017	0,0004	0,0000	0,04%
1,2	0,0030	0,0368	0,0000	2,23%
0,6	0,0170	0,1611	0,0000	9,78%
0,3	0,1598	0,7119	0,0000	43,94%
0,15	0,7151	0,9984	0,0000	65,90%
0,075	0,7151	0,8981	0,0000	59,91%
0,045	0,7151	0,8981	0,0863	62,63%
0,020	0,7151	0,8981	0,4304	73,47%
0,010	0,7151	0,8981	0,7010	82,00%
0,005	0,7151	0,8981	0,8651	87,17%
0,002	0,7151	0,8981	0,9760	90,67%
0,001	0,7151	0,8981	0,9998	91,42%
0,0005	1,0000	1,0000	1,0000	100,00%
			<b>Módulo de finura</b>	<b>MF = 1,22</b>

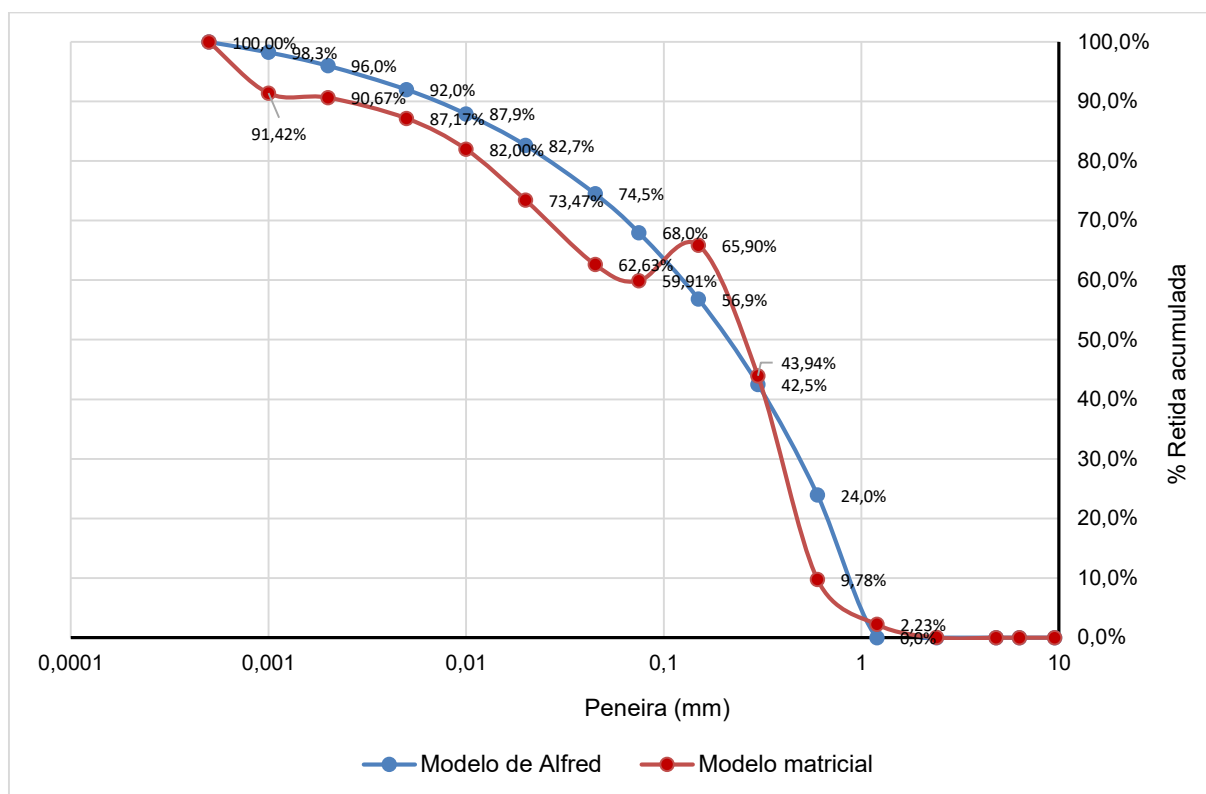
Fonte: Autoria própria

Esta observação pode ser comprovada pelo baixo valor do Índice de Desvio de Empacotamento, que é igual a 40,56. Destaca-se que para sua determinação

foram consideradas as mesmas peneiras empregadas em 4.2.4. Como já era previsto, este valor é menor do que aquele encontrado na composição com areia artificial (Tabela 16), dada a maior proximidade entre os valores de módulo de finura.

Na Figura 57 tem-se a representação gráfica das curvas granulométricas resultantes do modelo de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial. Nota-se que os principais desvios ocorrem na peneira 0,6 mm e 0,045, uma consequência dos respectivos percentuais de areia natural fina e pó de quartzo nestas peneiras.

**Figura 57 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para o experimento de validação**



Fonte: Autoria própria

### 5.3.2 Determinação do Volume Mínimo de Pasta do Experimento de Validação

Os parâmetros matemáticos do empacotamento granular determinados a partir do modelo de Toufar modificado são apresentados na Tabela 46.

**Tabela 46 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira e segunda classes para o experimento de validação**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\varphi_1$ (areia natural)	0,556818182
$\varphi_2$ (areia natural fina)	0,596226415
$r_1$ (areia natural)	0,12746
$r_2$ (areia natural fina)	0,87254
$k_d$	0,88235
$x$	0,38738
$k_s$	0,31631
$\alpha_t$	0,65470

**Fonte: Autoria própria**

De modo análogo ao que foi adotado em 4.2.5, para a determinação do empacotamento da terceira classe, considerou-se como  $r_3$  a porcentagem de pó de quartzo de 32% estabelecida no modelo de Andreasen e Andersen modificado e como  $r_m$  (mistura entre areia natural e areia natural fina), os 68% remanescentes.

O estabelecimento da densidade de empacotamento da mistura ( $\alpha_m$ ) se deu por meio da Equação 25.

$$\alpha_m = \frac{1,47*0,12746+1,58*0,87254}{2,64*0,12746+2,65*0,87254} = 0,591220156$$

Os parâmetros matemáticos resultantes da aplicação do modelo estão listados na Tabela 47.

**Tabela 47 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura do experimento de validação**

Parâmetro	Valor
$\varphi_3$ (pó de quartzo)	0,348473282
$\varphi_m$ (mistura de areias naturais)	0,591220156
$r_3$ (pó de quartzo)	0,31515
$r_m$ (mistura de areias naturais)	0,68485
$k_{dm}$	0,99170
$x_m$	1,90987
$k_{sm}$	0,87950
$\alpha_{tm}$	0,60616
$V_p^{mín}$	0,39384

**Fonte: Autoria própria**

Como resultado tem-se a densidade de empacotamento granular da mistura dos três materiais ( $\alpha_{tm}$ ) é 0,60610 e volume mínimo de pasta ( $V_p^{mín}$ ) necessário para preencher os vazios existentes entre os grão de agregados naturais é de 39,4%, valor superior àquele determinado com o emprego da areia artificial (33,3%), o que acarreta no aumento médio de 125 kg/m<sup>3</sup> no consumo de cimento dos traços, sendo 90kg/m<sup>3</sup> no traço com o mínimo volume de pasta e 160 kg/m<sup>3</sup> no traço com 80% de volume adicional de pasta.

É importante destacar que a densidade de empacotamento é dependente das proporções das misturas e dos diferentes tamanhos dos agregados, bem como da distribuição granulométrica, da morfologia e da textura superficial dos grãos contemplados em cada um dos dois sistemas.

De modo análogo ao descrito em 4.2.5, o experimento laboratorial executado para a verificação da densidade de empacotamento da mistura se deu por meio da determinação da massa específica e da massa unitária da composição entre a areia natural fina e a areia natural. Os valores de massa específica e massa unitária solta determinados foram de 2.646 kg/m<sup>3</sup> e 1.577 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. A densidade de empacotamento correspondente a mistura experimental ( $\alpha_{mexp}$ ) é de 0,596171339,



diferindo 0,8% do  $\alpha_m$  calculado. Através de simulações matemáticas do método proposto pode-se concluir que esta diferença corresponde a uma diminuição de 0,1% no volume mínimo de pasta ( $V_p min$ ), que, por sua vez, representaria uma redução média de 2 kg/m<sup>3</sup> no consumo de cimento dos traços com o mínimo volume de pasta, validando a determinação do valor da densidade de empacotamento da mistura ( $\alpha_m$ ) com a terceira classe a partir do emprego da Equação 25.

### 5.3.3 Determinação dos Traços do Experimento de Validação para a Dosagem do Concreto de Ultra-Alto Desempenho

Para o desenvolvimento desta etapa optou-se pela série de traços com 25% de sílica, por se tratar do teor que apresentou a maior densidade de empacotamento, conforme determinado em 4.2.1.

O volume de cada um dos componentes da mistura, estabelecido a partir dos respectivos volumes de pasta está apresentado na Tabela 48.

**Tabela 48 - Volume dos materiais componentes dos traços do experimento de validação**

Teor de sílica	Parâmetro	Valor				
		0%	20%	40%	60%	80%
25%	Volume adicional de pasta					
	Volume de pasta $V_p$ (m <sup>3</sup> )	0,393841	0,47261	0,55138	0,63015	0,70891
	Volume de agregados (m <sup>3</sup> )	0,60616	0,52739	0,44862	0,36985	0,29109
	Volume de cimento (m <sup>3</sup> )	0,18546	0,22255	0,25964	0,29673	0,33382
	Volume de sílica (m <sup>3</sup> )	0,06512	0,07814	0,09117	0,10419	0,11722
	Volume de pó de quartzo (m <sup>3</sup> )	0,19103	0,16620	0,14138	0,11656	0,09173
	Volume de areia natural fina (m <sup>3</sup> )	0,36222	0,31515	0,26808	0,22101	0,17394
	Volume de areia natural (m <sup>3</sup> )	0,05291	0,04604	0,03916	0,03228	0,02541
Volume de água (m <sup>3</sup> )	0,14326	0,17192	0,20057	0,22922	0,25788	

Fonte: Autoria própria

A partir dos diferentes volumes de pasta foram determinados cinco traços de UHPC (Tabela 49). Os teores de aditivo também foram definidos experimentalmente.

Contudo, em função da composição granulométrica das misturas, do formato e da textura dos grãos de areia natural, que diferem da areia artificial, o teor de aditivo adotado em alguns traços diferiu daquele adotado nos traços contendo areia artificial. O objetivo primordial foi promover a condição autoadensável, sem a ocorrência de exsudação, segregação ou incorporação de ar.

**Tabela 49 - Traços do experimento de validação**

Teor de sílica	Parâmetro	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					Traço Unitário em Massa Seca				
		0%	20%	40%	60%	80%	0%	20%	40%	60%	80%
25%	<b>Traço</b>	TR-EV 25.0	TR- EV 25.20	TR- EV 25.40	TR- EV 25.60	TR- EV 25.80	TR- EV 25.0	TR- EV 25.20	TR- EV 25.40	TR- EV 25.60	TR- EV 25.80
	Cimento	573,1	687,7	802,3	916,9	1031,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Sílica	143,3	171,9	200,6	229,2	257,9	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
	Pó de quartzo	500,5	435,5	370,4	305,4	240,3	0,873	0,633	0,462	0,333	0,233
	Areia natural fina	959,9	835,2	710,4	585,7	461,0	1,675	1,214	0,885	0,639	0,447
	Areia natural	139,7	121,5	103,4	85,2	67,1	0,244	0,177	0,129	0,093	0,065
	Água	143,3	171,9	200,6	229,2	257,9	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	Aditivo	35,8	43,0	40,1	40,1	38,7	0,050	0,050	0,040	0,035	0,030
	areia/cimento	--	--	--	--	--	1,919	1,391	1,014	0,732	0,512

**Fonte: Autoria própria**

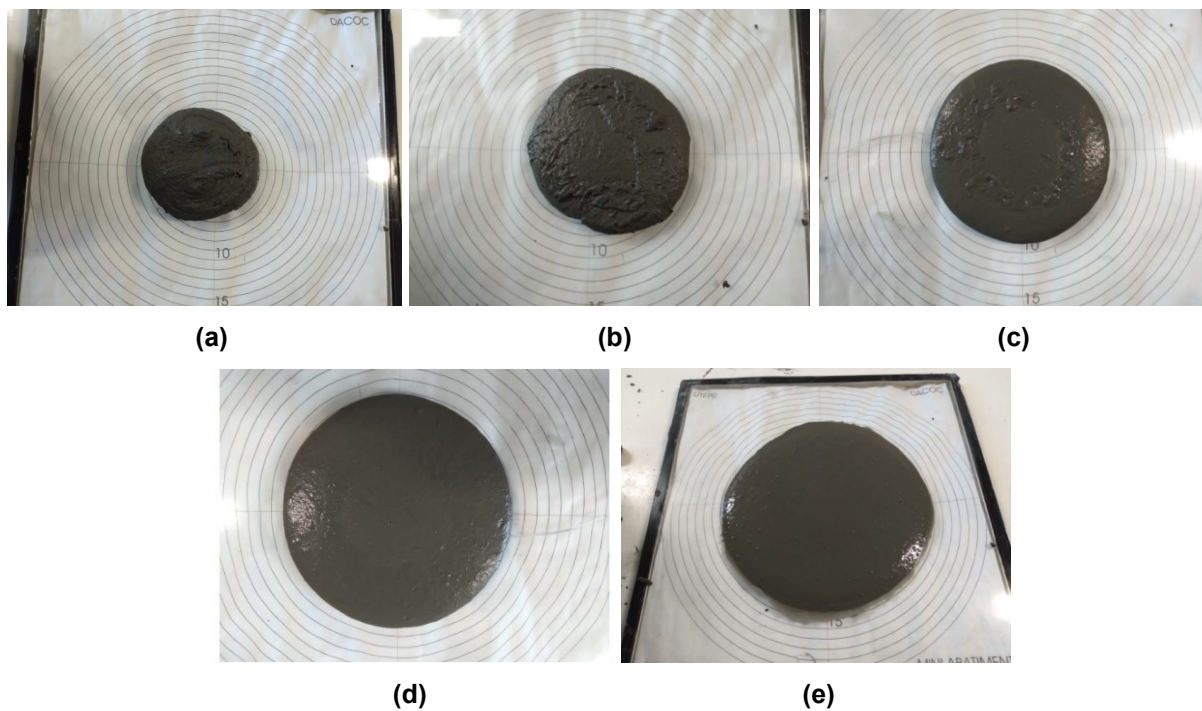
Findo o processo de cálculo, os cinco traços foram produzidos conforme os procedimentos descritos em 4.3 e as amostras caracterizadas de acordo com as etapas determinadas em 4.4 e 4.5. Analogamente, os resultados foram estatisticamente tratados segundo os passos declarados em 4.6.

#### 5.3.4 Análise da Fluidez das Amostras do Experimento de Validação

A Figura 58 (a) a (e) ilustra o ensaio de espalhamento dos traços do experimento de validação em função do respectivo volume adicional de pasta. Através

das imagens é possível observar que as misturas apresentaram elevada coesão, sem qualquer sinal de incorporação de ar.

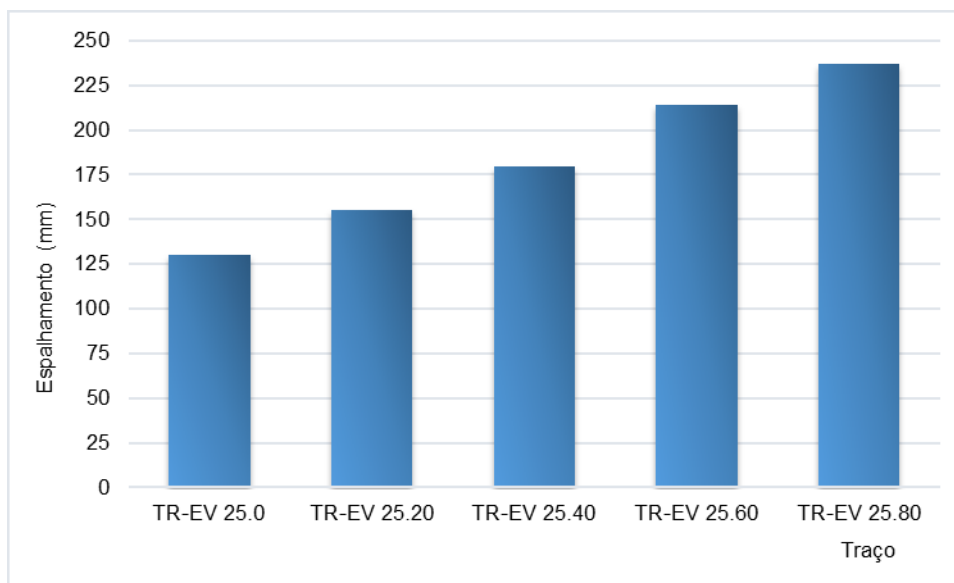
**Figura 58 - Comportamento da fluidez dos traços do experimento de validação em função do volume adicional de pasta: (a) TR-EV 25.0, (b) TR-EV 25.20, (c) TR-EV 25.40, (d) TR-EV 25.60, (e) TR-EV 25.80**



Fonte: Autoria própria

Os valores do espalhamento determinados para cada um dos traços está representado na Figura 59.

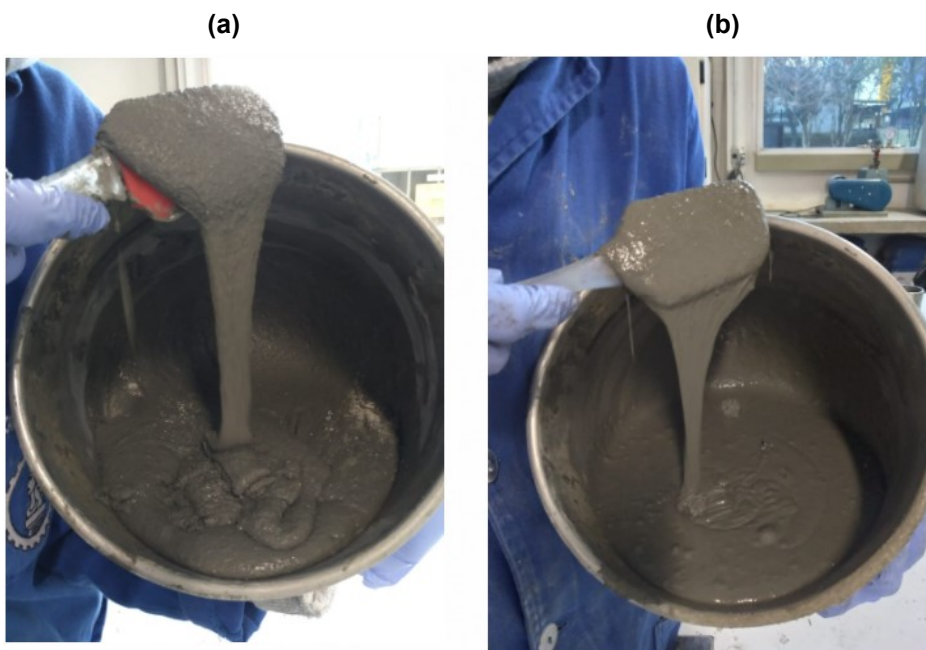
**Figura 59 - Comportamento do espalhamento dos traços do experimento de validação em função do volume adicional de pasta**



**Fonte: Autoria própria**

Nota-se que, mesmo com a redução proporcional do teor de aditivo a partir do traço com 40% de adicional de pasta, o valor do espalhamento aumentou, do mesmo modo que ocorreu com os traços produzidos com areia artificial. O aspecto dos traços com 20% e 80% de volume adicional de pasta pode ser observado na Figura 60.

**Figura 60 - Aspecto dos traços: (a) TR-25.20-EV, (b) TR-25.80-EV**



**Fonte: Autoria própria**

É importante destacar que, em função do valor do espalhamento e das características reológicas do traço com o mínimo volume de pasta (TR-25.0), optou-se pela moldagem das respectivas amostras por meio de queda livre, conforme descrito em 4.3.2, não sendo necessário o adensamento com o soquete metálico.

### 5.3.5 Análise da Resistência à Compressão das Amostras do Experimento de Validação

Na Figura 61 (a) pode-se observar o aspecto das amostras produzidas com o mínimo volume de pasta. Ainda que o material tenha apresentado fluidez adequada para a moldagem, notam-se falhas no adensamento que, por sua vez, podem ter atenuado a resistência à compressão. Já na Figura 61 (b) pode-se visualizar o aspecto totalmente íntegro das amostras produzidas com 80% de volume adicional de pasta.

**Figura 61 - Aspecto das amostras: (a) TR-EV 25.0 (b) TR-EV 25.80**



**Fonte: Autoria própria**

Os resultados de resistência média à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras referentes ao experimento de validação estão apresentados na Tabela 50. É importante destacar que, por razões de força maior, não foi possível submeter tais amostras ao ciclo de cura térmica, sendo então mantidas somente em tanque de água potável à temperatura ambiente ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), desde o momento de sua desforma até a idade de ensaio (28 dias).

**Tabela 50 - Valores da resistência média à compressão do experimento de validação**

Traço	$f_{cm}$ (MPa)	$Sd$ (MPa)	$CV$ (%)
TR-EV 25.0	127,3	7,7	6,0
TR-EV 25.20	120,9	7,6	6,0
TR-EV 25.40	119,3	8,4	7,0
TR-EV 25.60	109,0	15,9	15,0
TR-EV 25.80	94,9	12,0	13,0

**Fonte: Autoria própria**

A resistência média à compressão desta série ( $f_{cms}$ ) é 114,3 MPa. Conforme já era esperado, o comportamento da resistência em função do volume adicional de pasta foi o mesmo daquele identificado nas demais séries avaliadas.

A análise de variância está apresentada na Tabela 51. Os resultados indicam haver significância estatística entre as médias.

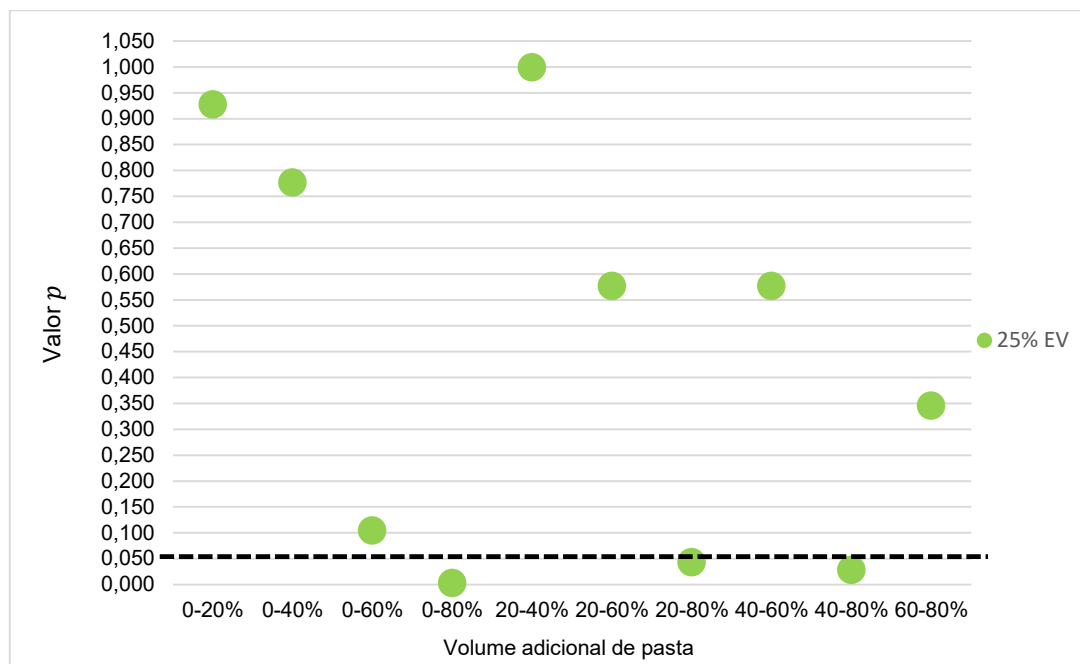
**Tabela 51 - Análise de variância da resistência média à compressão do experimento de validação**

Fonte da variação	SQ	gL	MQ	F	Valor $p$	F critico	Comparação
Entre grupos	2738,303	4	684,5758	5,75106	4,08E-03	2,96471	Efeito significativo
Dentro dos grupos	2023,592	17	119,0348				
Total	4761,895	21	226,7569				

**Fonte: Autoria própria**

Contudo, a partir dos valores de  $p$  resultantes do teste de Tukey-Kramer (Figura 62) nota-se que apenas as correlações entre traços 0-80%, 20-80% e 40-80% são significativas. Acredita-se que este comportamento seja uma consequência do elevado desvio padrão dos resultados de resistência média das séries que contém 60% e 80% de volume adicional de pasta.

**Figura 62 - Valor  $p$  resultante do Teste de Tukey-Kramer para o experimento de validação**



Fonte: Autoria própria

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO MÉTODO DE DOSAGEM

Condiderando-se os resultados obtidos nas etapas contempladas tanto no experimento de aplicação do método de dosagem (descrito em 4.2), quanto no experimento de validação (descrito em 5.3), verifica-se que:

- A determinação do teor ideal de sílica por meio da adaptação do método de empacotamento úmido estabelecido por Wong e Kwan (2008) se mostrou satisfatória uma vez que o teor de sílica que levou à maior densidade de empacotamento (Tabela 12) foi aquele correspondente ao conjunto de traços com a maior resistência média à compressão (165,9 MPa) e o melhor *binder index* (5,10 kg/m<sup>3</sup>/MPa). Vale destacar que o traço com o mínimo volume de pasta (TR-25.0) foi o que apresentou as maiores resistências individuais, com resultados acima de 190,0 MPa (APÊNDICE D);
- Apesar de ter sido comprovado que teor de aditivo tem influência no valor da densidade de empacotamento da pasta, a escolha por fixar as propriedades reológicas da pasta e não um teor único de aditivo na realização do ensaio de

empacotamento úmido também se mostrou congruente, tanto do ponto de vista dos resultados obtidos, como pelo fato de ter eliminado a influência de efeitos indesejados como segregação, exsudação, incorporação de ar ou formação de aglomerados na pasta;

- A associação entre os parâmetros espessura média do filme de água ( $WTF$ ) e/ou excesso de água presente na pasta ( $\mu w'$ ) e relação água/aglomerante apresentou-se adequada posto que o valor resultante ( $a/agl=0,20$ ) permitiu que se atingissem os patamares de fluidez e resistência mecânica almejados. Não obstante, é importante destacar que nesta pesquisa foi adotada uma única relação  $a/agl$  para todos os teores de sílica estudados (aquela correspondente aos teores mais elevados);
- Para efeito desta pesquisa foram estudados quatro teores de sílica, contudo o método proposto permite a adoção tão somente do teor coincidente com a maior densidade de empacotamento, e o mesmo preceito deve ser adotado para a determinação da relação  $a/agl$ . Apesar disso, recomenda-se verificar experimentalmente se, para a relação  $a/agl$  definida nesta etapa do método, o UHPC irá atingir a consistência mínima necessária para que o(s) aditivo(s) consiga(m) promover a fluidez da mistura, que por sua vez é afetada pelas propriedades físicas (formato dos grãos e superfície específica) dos materiais empregados na dosagem. Este comportamento pode ser observado por meio dos resultados do espalhamento dos traços TR-25.0 do experimento de aplicação do método (90 mm) e do experimento de validação do método (130 mm). No primeiro caso, o UHPC foi produzido predominantemente com areia artificial (grãos de formato ânguloso e lamelar), enquanto, no segundo, o formato arredondado e liso dos grãos de areia natural favoreceu a mobilidade da mistura permitindo que níveis superiores de fluidez fossem alcançados com o mesmo teor de aditivo, ou ainda, níveis equivalentes de fluidez com um menor consumo de aditivo como é o caso dos traços com 40% 60% e 80% de volume adicional de pasta;
- Embora não tenha sido destacado no corpo desta pesquisa, preliminarmente empregou-se o Método de Kantro com o objetivo de se verificar a compatibilidade entre os aglomerantes e o aditivo e, conjuntamente, de determinar o ponto de saturação correspondente a cada um dos teores de



sílica. Os resultados logrados variaram entre 1,1% e 1,7%, de acordo com o teor de sílica. É notório que estes valores estão muito aquém daqueles empregados nos diferentes traços produzidos, tanto no experimento de aplicação (Tabela 23) quanto no de validação (Tabela 49). Este fenômeno pode ser justificado pelo fato de o pó de quartzo não ter sido considerado como constituinte da pasta e sim como material integrante da curva granulométrica dos agregados miúdos. Desta forma, conclui-se que para o método de dosagem aqui proposto, o teor de aditivo deve ser determinado experimentalmente no momento da dosagem do UHPC e não previamente na composição da pasta (ensaio de empacotamento úmido). Outrossim, este procedimento também permite um melhor controle sobre os possíveis efeitos indesejados de segregação, exsudação ou incorporação excessiva de ar;

- A definição do coeficiente de distribuição ( $q$ ) por meio de um experimento laboratorial se mostrou relevante a partir do momento que permitiu a identificação do coeficiente que deu origem ao traço com o menor volume de vazios, menor consumo de cimento ( $C_{cp}$ ) e o melhor *binder index* ( $BI$ ). Contudo, fica a critério do pesquisador o estabelecimento deste coeficiente a partir da execução de um experimento piloto, de resultados correlatos ou de fontes bibliográficas;
- É importante destacar que nesta pesquisa optou-se por manter o valor de  $q = 0,37$  para os conjuntos de traços do experimento de aplicação e do experimento de validação, independentemente de terem sido produzidos com diferentes agregados. Porém simulações matemáticas do método proposto indicam que, para o experimento de validação (mantendo-se fixos os teores de 25% de sílica e 60% de volume adicional de pasta), o coeficiente de distribuição igual a 0,52 é aquele que daria origem ao traço com a maior densidade de empacotamento do conjunto granular, e, portanto, com o menor consumo de aglomerantes como se pode observar na Tabela 52, apesar de o valor de  $q = 0,37$  ter resultado na menor diferença percentual entre os valores de módulo de finura e o menor IDE, indicando maior equivalência entre as curvas. Assim sendo, recomenda-se que a tomada de decisão acerca do valor

do coeficiente de distribuição também contemple a análise da fluidez, da resistência à compressão e do *binder index* de cada um dos traços;

**Tabela 52 - Simulação dos parâmetros adicionais do experimento de validação**

Parâmetro	$q = 0,22$	$q = 0,37$	$q = 0,52$
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	1026	917	843
Consumo de sílica (kg/m <sup>3</sup> )	256	229	211
Densidade de empacotamento do conjunto granular – $\sigma_{tm}$	0,55938	0,60616	0,63878
Volume mínimo de pasta	0,440619	0,393841	0,361216
Diferença entre os valores de módulo de finura	2,3%	1,2%	3,6%
Soma do erro quadrado	0,0370	0,0714	0,1013
Índice de Desvio do Empacotamento – IDE	85,24	40,56	79,91

**Fonte: Autoria própria**

- Conforme já citado anteriormente, a escolha pela composição de dois agregados miúdos, um mais grosso e um mais fino, assim como a inserção do pó de quartzo na composição da curva granulométrica se fundamentou no pressuposto de que uma faixa mais ampla de distribuição do tamanho das partículas resulta em uma densidade de empacotamento mais elevada. Além disso, a inclusão do pó de quartzo na curva granulométrica ao invés da pasta se mostrou pertinente posto que o respectivo percentual a ser admitido na mistura foi definido de forma otimizada através da análise matricial, e não empiricamente como se dá em grande parte das dosagens estudadas, possibilitando a redução do custo final do UHPC;
- O emprego do modelo de Andreasen e Andersen modificado como meio para a determinação da curva granulométrica ideal associado à análise matricial, que originou na definição dos percentuais de cada um dos três materiais na composição da curva granulométrica resultante, também se mostrou assertivo. Além da simplicidade do método, o que favorece sua aplicação, o mecanismo de otimização dos percentuais de cada material na composição

da curva possibilitou a obtenção de uma boa equivalência entre os valores do módulo de finura (MF) da curva resultante e da curva ideal. Ao se comparar estes resultados nota-se que existe uma tendência de o valor do MF da curva ideal ser superior ao valor do MF da curva resultante. Observa-se também um direcionamento no sentido de que quanto maior o coeficiente de distribuição empregado, maior a diferença entre o valor do MF das duas curvas, maior a soma do erro quadrado e o valor do IDE;

- A escolha pelo modelo de Toufar modificado para a determinação da densidade de empacotamento do conjunto granular multicomponente, e, conseqüentemente, do volume mínimo de pasta, pode ser considerada adequada, sobretudo para os traços com diferentes teores de sílica apresentados no experimento de aplicação do método, uma vez que deu origem a composições com baixo consumo médio de cimento ( $C_{cp} = 500 \text{ kg/m}^3$ ) para o mínimo volume de pasta ( $P < 30\%$ ) e que atingiram elevados patamares de resistência à compressão aos 28 dias ( $x_m = 170,0 \text{ MPa}$ ). Há de se considerar que apesar do *binder index* médio decorrente ( $BI = 3,65 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$ ), como já era esperado, estes traços não apresentaram a fluidez adequada dado o baixo volume de pasta presente na mistura e o formato anguloso e lamelar dos grãos de areia artificial. Entretanto, os traços com 20% de volume adicional de pasta, por sua vez, atingiram a fluidez necessária para a condição autoadensável e apresentaram resultados satisfatórios em termos de consumo de cimento ( $C_{cp} = 600 \text{ kg/m}^3$ ), resistência ( $f_{cm} = 163,0 \text{ MPa}$ ) e *binder index* ( $4,48 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$ ) quando comparados aos traços com o mínimo volume de pasta, mas, sobretudo em relação ao consumo médio de cimento identificado no levantamento de parâmetros correlatos, cuja diferença é de 26%;
- Destaca-se também que o consumo total de agregados resultante do método de empacotamento granular aqui adotado, sobretudo para os traços de 0%, 20% e 40% de acréscimo de volume de pasta, é superior àqueles usualmente adotados nos estudos de UHPC, podendo ter influência direta na reologia das misturas;

- Ainda no que tange o modelo de Toufar modificado, destaca-se que a inclinação pela determinação do valor da densidade de empacotamento da mistura ( $\alpha_m$ ) na execução do empacotamento com a terceira classe a partir da Equação 25, que correlaciona, por meio do cálculo de média ponderada, as massas específicas e unitárias de cada um dos agregados com a sua respectiva fração volumétrica na composição, e não do valor de  $\alpha_t$  resultante do empacotamento da primeira e segunda classes, se mostrou pertinente. Primeiramente porque o resultado foi comprovado experimentalmente através da determinação laboratorial e do cálculo da densidade de empacotamento da mistura experimental ( $\alpha_{mexp}$ ), mas, sobretudo, porque simulações matemáticas do método proposto demonstraram que a adoção do valor de  $\alpha_t$  no empacotamento da terceira classe daria origem a traços, para o volume mínimo de pasta, com consumos de cimento muito baixos, o que supostamente levaria a patamares de resistência significativamente inferiores aos aqui obtidos;
- A etapa final de determinação dos traços visou estabelecer o volume de cada um dos componentes da pasta, a partir do volume de pasta ( $V_p$ ), do teor de sílica e da relação a/agl previamente determinados no ensaio de empacotamento úmido. Com base nos respectivos volumes, determinou-se o consumo de cada um dos materiais ( $\text{kg/m}^3$ ) e o traço unitário em massa seca. Esta linha de raciocínio simples permite que traço(s) com qualquer teor(es) de sílica e volume(s) adicional (is) de pasta sejam calculados rapidamente, ficando a combinação entre estes dois parâmetros a critério do pesquisador;
- Conforme já mencionado, em função das premissas adotadas no método proposto, o teor de aditivo deve ser determinado experimentalmente visando a obtenção de índices adequados de fluidez que permitam que o UHPC tenha comportamento autoadensável, sem quaisquer efeitos indesejáveis nas propriedades no estado fresco;
- Outro ponto que merece ser considerado está relacionado com a interação entre os aglomerantes e o aditivo. É fundamental evidenciar que a performance do aditivo empregado nesta pesquisa foi adequada uma vez que, mesmo sendo utilizado em teores próximos a 5%, em nenhum dos traços

ocorreu segregação, exsudação ou incorporação significativa de ar. Ainda assim, a adição de teores acima do permitido pela NBR 11768 (ABNT, 2019) não foi testada, logo não é possível afirmar se os traços com o mínimo volume de pasta poderiam apresentar níveis mais elevados de fluidez com o incremento do teor de aditivo, ou com a inclusão de um modificador de reologia na mistura ou ainda, com a sua substituição por outro aditivo equivalente;

- Verifica-se, portanto, que em termos de resistência à compressão e *binder index*, o traço ideal é aquele que contempla o teor de sílica que apresentou a maior densidade de empacotamento e o mínimo volume de pasta. Porém, é fundamental que a fluidez deste traço seja avaliada. Isto posto, se o traço com o mínimo volume de pasta não apresentar a reologia adequada, e, partindo-se do princípio que o aumento do teor de pasta provoca a redução da resistência à compressão, recomenda-se avaliar o volume adicional de pasta em pequenos incrementos (sugere-se de 5 a 10%), e, através do sucessivo refinamento destes intervalos, determinar o volume de pasta adequado em termos de fluidez.

No que tange a comparação entre os traços resultantes dos dois experimentos conclui-se que:

- Os resultados aqui logrados com o uso da areia artificial de basalto são coerentes com os de Yang *et al.* (2020), que analisaram a influência do percentual de substituição de areia natural por areia artificial em misturas de UHPC contendo 780 kg/m<sup>3</sup> de cimento de 25% de sílica. Os autores identificaram que traços produzidos com 80% de areia artificial e 20% de areia natural, submetidos apenas à cura úmida, apresentaram os maiores resultados de resistência (122,0 MPa aos 28 dias) em relação aos demais percentuais de substituição. Vale ressaltar que o traço supracitado, em termos de proporções equivale ao TR-25.60 (151,0 MPa), sendo que as principais diferenças entre os dois consistem na utilização de cinza pozzolânica em detrimento ao pó de quartzo e no padrão de cura aplicado, justificando a distinção entre os valores de resistência. Além disso, segundo os autores, em

comparação com a areia natural, a superfície mais áspera da areia artificial foi responsável pela maior aderência entre os grãos e a pasta, fortalecendo a zona de transição e promovendo benefícios em termos de propriedades mecânicas;

- A substituição do agregado miúdo grosso (*coarser fine aggregate*), de diâmetro máximo característico igual a 4,75 mm, pelo agregado miúdo fino (DMC = 1,18 mm) ocasionou uma série de alterações no conjunto de traços do experimento de validação (mantendo-se constante o teor de sílica e a relação  $a/agl$ ) a saber: a atenuação da curva granulométrica (ideal e resultante), a redução da densidade de empacotamento do conjunto granular ( $\alpha_{tm}$ ), o aumento do volume mínimo de pasta ( $V_p^{mín}$ ), a redução do volume de agregados, o aumento do consumo de cimento, de sílica e de pó de quartzo, bem como a diminuição da relação areia/cimento, e a consequente redução da densidade do compósito ( $kg/m^3$ );
- O impacto positivo na fluidez foi percebido já no traço com o mínimo volume de pasta, contudo o comportamento nos outros traços não é passível de comparação uma vez que houve uma redução no teor de aditivo, mas a tendência sugere que os traços de areia artificial apresentem fluidez inferior aos de areia natural, como uma consequência da forma e textura dos grãos que é bastante diferente. Este fenômeno foi comprovado nos estudos de Yang *et al.* (2019), através da redução de 12% no abatimento de traços produzidos com areia artificial em relação à areia natural. Vale considerar que o aumento da superfície específica do traço com areia natural, em função do maior volume de pó de quartzo e da finura mais elevada da areia, pode ter afetado negativamente a fluidez. Além disso, deve-se atentar também ao fato de que a britagem do quartzo, que por ser um cristal resistente dá origem a fragmentos lamelares e pontiagudos, pode prejudicar a trabalhabilidade da mistura e acarretar na presença de vazios entre os grãos (TUTIKIAN, ISAÍ E HELENE, 2011);
- Tendo como referência tão somente os resultados de 28 dias dos traços TR-25.20 submetidos à cura úmida, conclui-se que alterações efetuadas no esqueleto granular não provocaram um impacto estatisticamente significativo

nos valores de resistência à compressão, uma vez que os valores de  $x_m$  diferem, entre si, menos de 5%. Esta similaridade não era esperada uma vez que existe uma diferença superior a 10% entre as densidades de empacotamento dos dois conjuntos granulares. Com base neste parâmetro, imaginava-se que o traço com areia artificial ( $\alpha_{tm} = 0,66741$ ) alcançaria resistências mais elevadas do que o traço com areia natural ( $\alpha_{tm} = 0,60616$ ). Porém, o resultado mais favorável do traço produzido com areia natural pode ser explicado em função do formato esférico dos grãos de areia que favorece o empacotamento, da maior proximidade entre os valores do módulo de finura dos dois agregados naturais, e do maior volume de pó de quartzo presente. Além disso, em comparação com a composição contendo areia artificial, tem-se um menor valor de IDE indicando uma maior proximidade entre a curva granulométrica ideal e à curva oriunda da análise matricial. Acredita-se que a combinação destes fatores contribuiu para uma maior densificação da matriz, resultando em benefícios em termos de comportamento mecânico;

- Imagina-se também que o patamar resistente do traço com areia natural pode se alterar de forma relevante frente ao tratamento térmico, uma vez que contém 83% a mais de pó de quartzo do que o traço com areia artificial, favorecendo a ocorrência das reações pozolânicas, e, possivelmente promovendo um incremento mais acentuado na resistência;
- Para efeito de comparação, foi efetuado um breve levantamento do custo (R\$/m<sup>3</sup>) dos traços TR-25.20 produzidos com areia artificial e areia natural, submetidos apenas à cura úmida, tendo como base valores correntes de mercado dos respectivos insumos. Os valores indicam que o traço que contém areia artificial tem um custo total 32% menor do que o traço produzido com areia natural. No que se refere ao custo por MPa, a diferença é de 27% sendo que o maior impacto está relacionado ao pó de quartzo, seguido do aditivo e dos aglomerantes, como se pode observar na Tabela 53:

**Tabela 53 - Análise comparativa de custos**

Agregado miúdo	Artificial		Natural	
	Consumo	Preço	Consumo	Preço
Insumo	kg/m <sup>3</sup>	R\$/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	R\$/m <sup>3</sup>
Cimento	580,7	216,1	687,7	255,9
Sílica ativa	145,2	165,5	171,9	196,0
Pó de quartzo	238,1	285,7	435,5	522,5
Areia artificial	1152,8	37,2	--	--
Areia natural	300,6	12,9	121,5	39,8
Areia natural fina	--	--	835,2	5,2
Aditivo	36,3	544,4	43,0	644,7
Custo total (R\$/m <sup>3</sup> )	--	1261,9	--	1664,2
Resistência (MPa)	115,7	--	120,9	--
Custo por MPa	--	10,9	--	13,8
<i>Binder index</i>	--	6,27	--	7,11
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	2476,7	--	2392,4	--

Fonte: Autoria própria

- No que se refere ao *binder index*, os resultados mostram que o traço produzido com areia artificial é o mais eficiente, ainda que apresente resistência média 5% inferior ao traço produzido com areia natural. Isto se deve ao menor consumo de aglomerantes do primeiro traço;
- Por sua vez, a densidade do traço que contém areia artificial também é superior (3%) à do traço com areia natural. Esta diferença é uma consequência do maior consumo de agregados presente e da massa específica da areia artificial (2,91 kg/m<sup>3</sup>) que é mais elevada do que a das areias naturais ( $\cong$  2,65 kg/m<sup>3</sup>);
- Ainda que o método aqui proposto tenha dado origem a traços distintos, mas que levaram a resultados similares em termos de resistência à compressão, considerando-se apenas o ciclo de cura úmida, entende-se que o traço com areia artificial é a melhor opção, tanto do ponto de vista tecnológico, quanto econômico e de sustentabilidade, uma vez que emprega um menor consumo de aglomerantes e de pó de quartzo, levando à minimização da ocorrência da retração, além de contemplar a substituição da areia natural por um agregado oriundo de um processo de menor impacto ambiental.



## 6 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta tese e as recomendações para trabalhos futuros.

O objetivo geral desta pesquisa consistiu na proposição de um método racional de dosagem de concreto de ultra-alto desempenho que tem como premissa o emprego do mínimo volume de pasta.

Para tanto, oito etapas experimentais foram estabelecidas, a saber: a seleção e caracterização dos materiais; a determinação do teor de sílica ativa e a determinação da relação água/aglomerante por meio do empacotamento dos aglomerantes na condição úmida (método de Wong e Kwan, 2008); a determinação do coeficiente de distribuição ( $q$ ) por meio de um experimento piloto; a determinação da composição ideal entre os agregados miúdos e pó de quartzo (ou outra adição inerte) através do modelo de empacotamento granular de Andreasen e Andersen modificado; a determinação do volume mínimo de pasta através do modelo de empacotamento granular de Toufar modificado; o estabelecimento de volumes adicionais de pasta visando a eventual adequação das propriedades reológicas e, por fim, a determinação dos traços de UHPC e os respectivos consumos de material por metro cúbico. Adicionalmente, o método contempla a definição do máximo teor de fibras metálicas a ser incorporado na matriz por meio de uma adaptação do método de Christ (2019).

Como objetivos específicos, abordou a influência do teor de sílica ativa na resistência à compressão, a influência do volume adicional de pasta na fluidez e na resistência à compressão, a influência da cura úmida, da cura térmica e da idade de ensaio na resistência à compressão, e, ainda, a influência da adição de fibras metálicas na fluidez e na resistência à compressão do UHPC.

Um ponto de destaque desta pesquisa foi a incorporação da areia artificial de basalto *in natura* (sem qualquer peneiramento ou lavagem adicional) nas matrizes de UHPC, como um agregado miúdo de maiores dimensões (*coarser fine aggregate*), visando não só a redução do consumo de cimento, como a maximização das propriedades mecânicas (em função da elevada resistência mecânica intrínseca da

rocha de origem) e a diminuição do uso de recursos naturais escassos e/ou de maior custo, como é o caso da areia natural e do pó de quartzo. Os resultados logrados foram satisfatórios uma vez que foi possível garantir tanto as características autoadensáveis, quanto níveis de resistência à compressão superiores ou muito próximos de 150,0 MPa em 65% dos traços produzidos, sendo que todos os traços que contém 20%, 40% ou 60% de volume adicional de pasta atendem a ambos os requisitos.

O método proposto também permitiu avaliar diferentes teores de sílica ativa, visando a obtenção da proporção ótima. A análise dos percentuais estipulados nesta pesquisa se mostrou relevante ao comprovar que o teor ideal (de 25%), determinado por meio da adaptação do método de empacotamento úmido, foi o que promoveu os melhores resultados médios de resistência à compressão e *binder index*. Através dos ensaios efetuados foi possível observar a influência dos diferentes teores de sílica na fluidez e na de resistência à compressão.

A alta eficiência obtida no empacotamento dos aglomerantes combinada com a otimização da curva granulométrica dos agregados levou à determinação do mínimo volume pasta, e, comprovadamente à obtenção de concretos de melhor desempenho, tanto em termos de propriedades mecânicas, quanto em relação ao consumo de aglomerantes. A análise dos volumes adicionais de pasta permitiu comprovar que, independentemente do teor de sílica, o excesso de aglomerantes não promove benefícios na resistência à compressão, tampouco no *binder index* dos traços.

À exceção do teor de 15% de sílica, os melhores resultados em termos de resistência foram obtidos em traços com 33% de volume de pasta ( $P = 29\%$ ), valor 76% inferior à média identificada nos trabalhos correlatos que é de 51% (Quadro 1). Contudo, conforme já citado, os traços que contém areia artificial e foram produzidos com o mínimo volume de pasta não apresentaram a fluidez adequada. Porém, nos traços subsequentes (20% de volume adicional de pasta), que contém 40% de volume de pasta ( $P = 35\%$ ) este problema foi minimizado.

Os resultados aqui obtidos indicam que o consumo total de aglomerantes dos traços produzidos com volume adicional de pasta inferiores a 60% (de 600 a 860 kg/m<sup>3</sup>) é insuficiente para que se atinjam resistências à compressão da ordem de

150,0 MPa aos 28 dias apenas com a adoção do ciclo de cura úmida. Contudo, os resultados de resistência média da série contendo 15% de sílica, bem como do traço TR-25.20 aos 91 dias de idade sinalizam que com um maior tempo de cura úmida, o patamar de 150,0 MPa pode ser atingido mesmo com consumos mais baixos de aglomerantes, validando o método aqui proposto.

O ciclo de cura térmica proposto (72 horas de cura úmida após a desforma, seguidas de mais 72 horas de cura térmica a 90°C) mostrou-se satisfatório. Primeiramente por viabilizar o atingimento níveis de resistência acima de 150,0 MPa nos traços com volume adicional de pasta inferiores a 60%, e também por promover ganhos de resistência percentualmente significativos, sobretudo quando comparados a resultados de outros trabalhos correlatos.

Assim sendo, pode-se dizer que a associação das três abordagens que sustentam o método proposto: a definição do teor ideal de sílica, o emprego do mínimo volume de pasta e a incorporação do agregado miúdo artificial de basalto, possibilitou a obtenção de traços que se enquadram nos parâmetros internacionais que definem o UHPC.

Em relação à adição de fibras pode-se concluir que a associação entre os conceitos de mínimo volume de pasta e máximo teor de fibra não se mostrou apropriada. A ausência de fluidez desta mistura acarretou na formação de aglomerados na matriz, impedindo o adequado processo de hidratação da pasta. Associado a isto, as falhas no adensamento das amostras contribuíram para os baixos níveis de resistência. Entretanto, a partir do momento em que níveis adequados de fluidez foram alcançados a fibra passou a contribuir positivamente para os resultados de resistência à compressão, conforme era esperado.

O experimento de validação, de mesmo modo, comprovou a eficácia do método de dosagem ao dar origem a traços que apresentaram patamares de fluidez e resistência próximos, ou, eventualmente superiores àqueles logrados com o emprego da areia artificial, indicando que pode ser aplicado para qualquer tipo de agregado, uma vez que é dependente do empacotamento granular e não da origem ou da forma dos grãos.

Destaca-se ainda que, apesar de viabilizar o alcance de níveis mais elevados de resistência, observou-se que nem sempre o traço com o mínimo volume de pasta apresenta a fluidez adequada. Parâmetros como a distribuição granulométrica, a morfologia e a textura superficial dos grãos dos agregados, a superfície específica e o formato dos grãos de aglomerantes e adições inertes, a interação dos aglomerantes com o aditivo, além da proporção de cada um destes materiais e do teor de fibra empregados na composição do traço, têm influência direta sobre a reologia da mistura. Logo, se o traço com o mínimo volume de pasta não se mostrar adequado em termos de trabalhabilidade, recomenda-se aumentar o volume adicional em pequenos incrementos até que se encontre o valor que permita o atendimento das propriedades do UHPC tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. O mesmo raciocínio é válido para a incorporação de fibras na matriz.

Por último, conclui-se que objetivo geral desta tese foi logrado. Através da conciliação de métodos experimentais e modelos de empacotamento, o método de dosagem proposto tende a apresentar a melhor proporção entre os materiais componentes, com consumo de aglomerantes inferiores àqueles identificados na literatura correlata, independentemente da origem e da granulometria dos agregados miúdos aqui empregados. Por meio de uma abordagem racional, econômica e sustentável, que visa a otimização do emprego de materiais de maior custo e a minimização do uso de recursos naturais escassos, o método contribui positivamente para o desenvolvimento tecnológico do setor.

Para o aprofundamento de pesquisas nesta área, a partir do método de dosagem proposto nesta tese, sugere-se:

- A definição do volume ideal de pasta a partir do sucessivo refinamento de intervalos analisados;
- A elaboração de diagramas de dosagem que correlacionem o coeficiente de distribuição, o volume de pasta, a resistência, a fluidez e o *binder index* e/ou outros parâmetros correlatos;
- A análise da influência da combinação de agregados miúdos de diferentes granulometrias;
- A análise da influência do emprego de areia artificial produzida a partir de rochas de outras origens tais como gnaisse, granito e calcário;

- A análise da influência do emprego de cimentos pozolânicos e/ou outras adições pozolânicas, cimentícias e/ou inertes;
- A determinação do teor ideal da fibra metálica em função do volume adicional de pasta e da relação fibra/agregado;
- A análise da influência de fibras de outras origens, misturas híbridas ou fibras de diferentes fatores de forma na fluidez e nas propriedades mecânicas;
- A análise da influência da cura à vapor e de diferentes ciclos de cura térmica nas propriedades mecânicas, bem como na formação de etringita tardia;
- A avaliação da resistência à tração, tenacidade e módulo de elasticidade;
- A análise da influência da incorporação de aditivo modificador de reologia na fluidez e demais propriedades do UHPC no estado fresco;
- A partir do uso de misturadores planetários de maior capacidade volumétrica, sugere-se o ajuste das propriedades autoadensáveis do UHPC e sua posterior classificação, segundo os ensaios e critérios prescritos pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017);
- A análise dos parâmetros de durabilidade do UHPC em função da idade, tipo de cura e materiais empregados;
- A análise de viabilidade econômica e de parâmetros de sustentabilidade do UHPC (CAMPOS, 2019);
- A análise da eficiência do UHPC como material para recuperação, reforço e/ou reabilitação estrutural;
- A análise da eficiência do UHPC em conexões estruturais.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45** – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52** – Agregados – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 7211** – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738** – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768** – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1** – Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697** – Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **ISO 7500-1** – Materiais metálicos – Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial. Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/ compressão – Calibração e verificação do sistema de medição da força.

ABUODEH, O.R.; ABDALLA, J.A.; HAWILEH, R.A. Assessment of compressive strength of Ultra-High Performance Concrete using deep machine learning techniques, **Applied Soft Computing**, Volume 95, 2020, 06552.

ACI (American Concrete Institute). **ACI 239R-18**. Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report. October 2018.

ACI (American Concrete Institute). **ACI PRC-363-10**. Report on High-Strength Concrete. 2010.

AFNOR (Association Française de Normalization). **NF P 18-470**. Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Spécification, performance, production et conformité, Paris, 2016.

AFNOR (Association Française de Normalization). **NF P 18-710**. National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC), Paris, 2016.

AHMAD, S.; ZUBAIR, A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 73-81, 2015. ISSN 0950-0618.

AKHNOUKH, A. K.; BUCKHALTER, C. Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. **Case Studies in Construction Materials**. Volume 15, December 2021, e00559.

AKHNOUKH, A. K.; XIE, H. (2010). "Welded wire reinforcement versus random steel fibers in precast/prestressed ultra-high performance concrete I-girders" **Construction and Building Materials**, 24(11), 2200–2207.

ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S. Structural response of joints made with generic UHPC. **Proceedings, Structures Congress 2015, ASCE, Reston, VA, 1435–1445**.

ALMEIDA, V.A. **Uma metodologia para tratamentos de dados de curvas de carga baseada em técnicas de inteligência artificial**. 2017. 92p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2017.

ANDRADE, T. C. C. S. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

AOUDE, H.; DAGENAI, F. P.; BURRELL, R. P.; SAATCIOGLU, M. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading Int. **Journal of Impact Engineering**, 80, 185–202. 2015.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM C29 / C29M-17a**. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).

AZAD, A. K.; HAKEEM, I. Y. Flexural behavior of hybrid concrete beams reinforced with ultra-high performance concrete bars. **Construction and Building Materials**, 49, 128–133. 2013

BAE, Y.; PYO, S. Effect of steel fiber content on structural and electrical properties of ultra high performance concrete (UHPC) sleepers, **Engineering Structures**, Volume 222, 2020, 111131, ISSN 0141-0296.

- BAIÃO, D.B.; MACHADO, C.S.; CONDOTTA, R. Misturas bi-dispersas de areias: efeitos da granulometria no empacotamento e fluidez. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. Vol 04. N.01 (2018).
- BAJABER, M.A.; HAKEEM, I.Y. UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, Volume 10, January–February 2021, Pages 1058-1074.
- BALA, M.; ZENTRA, R., BOUSTINGORRY, P. Parameter determination of the Compressible Packing Model (CPM) for concrete application. **Powder Technology**. v. 367. p. 56-66. 2020.
- BANTHIA, N.; GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HYFRC): fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**. V37, n, 10, p. 707-716, 2004.
- BEN AÏM, R.; LE GOFF, P. Effet de paroi dans les empilements désordonnés de sphères et application à la porosité de mélanges binaires. (1967) **Powder Technology**, Vol. 1 (5), pp. 281-290.
- BIZ, C.E. **Concreto de pós reativos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.
- BROUWERS, H.J.H. Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. **Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**. 2006. Vol. 74 (3), pp. 031309- 031309-14.
- BUTTIGNOL, T.E.T.; FERNANDES, J.F.; SOUSA, J.L.A.O.; BITTENCOURT, T.N. Aplicações do Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) em obras de reforço e recuperação de estruturas. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. CBC 2018.
- BUTTIGNOL, T.E.T.; SOUSA, J.L.A.O.; BITTENCOURT, T.N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC): a review of material properties and design procedures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. vol.10 no.4 São Paulo, Aug. 2017.
- CAETANO, E.R.R. **Análise de Variância utilizando modelos autorregressivos em experimentos com dependência espacial**. 2013. 116p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2013.
- CAI, X., TAERWE, L.R. YUAN, Y. Hysteretic behavior of UHPC beam-column joints after fire exposure, **Fire Safety Journal**, Volume 117, 2020, 102987, ISSN 0379-7112.
- CALLEGARO, R.F. **Uma arquitetura para fusão de dados de sensores de baixo custo em redes de sensores sem fio**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.
- CAMPOS, H.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.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

CAMPOS, H.H.; KLEIN, N.S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production** 265 (2020) 121907.

CAMPOS, H.H.; KLEIN, N.S.; MARQUES FILHO, J. Comparison of the Silica Fume Content for High-Strength Concrete Production: Chemical Analysis of the Pozzolanic Reaction and Physical Behavior by Particle Packing. **Materials Research**. 2020 (a); 23(5): e20200285

CASTRO, A.L.; LIBORIO, J.B.L.; PANDOLFELLI, V.C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, vol.55 no.335 São Paulo July/Sept. 2009.

CASTRO, A.L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, 55 (2009) 18-32.

CATEN, C.S.; RIBEIRO, J.L.D. **Projeto de Experimentos**. 2011. 153p. Programa de pós-graduação de Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

CHANG, T.P.; CHEN, B.T.; WANG, J.J.; WU, C.S. Performance of Reactive Powder Concrete (RPC) with different curing conditions and its retrofitting effects on concrete member. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3.

CHEN, Y.; MATAKHAH, F.; SOROUSIAN, P.; WEERASISI, R.; BALACHANDRA, A. Optimization of ultra-high performance concrete, quantification of characteristic features. **Civil & Environmental Engineering**, (2019), 6: 1558696.

CHOUDARY, D.; KESHARI, J.; KHAN, A. Prediction of Compressive Strength of Ultra-High-Performance Concrete Using Machine Learning Algorithms—SFS and ANN. **Advances in Computational Intelligence and Communication Technology**. vol 1086. pp 17-27, Springer, Singapore, 2020.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra-alto desempenho (UHPC)**. Tese (Doutorado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2019.

COURTIAL, M.; DE NOIRFONTAINE, M.N.; DUNSTETTER, F.; SIGNES-FREHE, M.; MOUNANGA, P.; CHERKAOUI, K.; KHELIDJ, A. Effect of polycarboxylate and crushed quartz in UHPC: Microstructural investigation. **Construction and Building Materials**, Volume 44, July 2013, Pages 699-705.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B.L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S; JOHN, V.M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**. Volume 32, Issue 8, September 2010, Pages 555-562.

DANCEY, C.P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. 5a. edição. Porto Alegre: Penso, 2013.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, No. 6, pp. 997-1009, 1994.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. (1999). London: E & FN Spon.

DEEB, R.; GHANBARI, A.; KARIHALOO, B. L. Development of selfcompacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres. **Cement and Concrete Composites**, 34(2), 185-190, 2012.

DEWAR, J.D. **Computer Modelling of Concrete Mixtures**. (1999) London: E & FN Spon.

DINGER, D.R.; FUNK, J.E. Particle-Packing Phenomena and Their Application in Materials Processing. **MRS Bulletin**, December, 1997.

DINGQIANG, F.; RUI, YU; ZHONGHE, S.; CHUNFENG, WU; JINNAN, W.; QIQI, SU. A novel approach for developing a green Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with advanced particles packing meso-structure. **Construction and Building Materials** 265 (2020) 120339.

DONG, S.; WANG, Y.; ASHOUR, A.; HAN, B.; OU, J. Uniaxial compressive fatigue behavior of ultra-high performance concrete reinforced with super-fine stainless wires, **International Journal of Fatigue**, Volume 142, 2021, 105959, ISSN 0142-1123.

DUNNETT, C.W. Pairwise Multiple Comparisons in the Homogeneous Variance, Unequal Sample Size Case. **Journal of the American Statistical Association**. Vol. 75, No. 372 (Dec., 1980), pp. 789-795 (7 pages).

EL-DIEB, A. S. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. **Mater. Des.**, 30(10), 4286–4292. (2009).

ENAMI, R.M. **Reforço de pilares curtos de concreto armado por encamisamento com concreto de ultra-alto desempenho**. 2017. 136 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2017.

FAN, D.Q.; YU, R.; SHUI, Z.H.; WU, C.F.; SONG, Q.L.; LIU, Z.J.; SUN, Y.; GAO, X.; HE, Y.J. A new design approach of steel fibre reinforced ultra-high performance concrete composites: Experiments and modeling. **Cement and Concrete Composites**. Volume 110, July 2020, 103597.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. 2011. 256 p. Tese (Doutorado) - Universidade Técnica de Delft - Holanda, 2011.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **HERON**. Vol. 57 (2012). No. 2.

FERÉT, R. Sur la compacité des mortiers hydrauliques. **Annales des Ponts et Chaussées**. Vol. 4 (2e semestre), pp. 5-16.

FUNG, W.W.S.; KWAN, A.H.K. Role of water film thickness in rheology of CSF mortar. **Cement & Concrete Composites**. Volume 32, Issue 4, April 2010, Pages 255-264.

FUNK, J.E.; DINGER, D.R. **Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content**. Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO). New York. 1980.

FUNK, J.E.; DINGER, D.R. Particle Packing, Part VI - Applications of Particle Size Distribution Concepts. **Interceram**, 43, 5 (1994) 350-3.

FURNAS, C.C. Flow of gasses through beds of broken solids. **Bureau of Mines Bulletin** (1929), 307.

FURNAS, C.C. Grading Aggregates; Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry**. (1931). Vol. 23 (9), pp. 1052-1058. Vol. 23 (9), pp. 1052-1058.

GARCIA, J. A. Four-layer perceptron approach for strength prediction of UHPC, **Construction and Building Materials**, Volume 256, 2020, 119465.

GHAFAARI, E.; BANDARABADI, M.; COSTA, H.; JÚLIO, E. Prediction of Fresh and Hardened State Properties of UHPC: Comparative Study of Statistical Mixture Design and an Artificial Neural Network Model. **Journal of Materials in Civil Engineering** © ASCE, ISSN 0899-1561/04015017(11), 2015.

GHASEMI, Y.; EMBORG, M.; CWIRZEN, A. Effect of water film thickness on the flow in conventional mortars and concrete. **Materials and Structures** (2019) 52:62.

GLAVIND, M.; PEDERSEN, J. Packing Calculations Applied for Concrete Mix Design **Proceedings** Creating with Concrete, May 1999, University of Dundee, pp.1-10.

GRAYBEAL, B. A.; RUSSELL, H. G. Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community, Publication No. **FHWA-HRT-13-060**, June, 2013.

GOES, C.M.W.; KRAHL, P.A.; ALMEIDA, L.C.; TRAUTWEIN, L.M. Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho. **Anais** do 62º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2020 - 62CBC2020.

GOLTERMAN, P.; JOHANSEN, V.; PALBFL, L. Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix, **ACI Materials Journal**, Vol. 94, No. 5, 1997, p 435-443.

GUIMARÃES, F.; VISEDO, G.; SINDICATO NACIONAL DA INSÚSTRIA DO CIMENTO. Projeções para o consumo de cimento no Brasil e de emissões absolutas de CO<sub>2</sub> para o período 2020 a 2050. **Concreto & Construções**. IBRACON, Ed. 95. Jul-Set. 2019.

GURUSIDESWAR, S., SHUKLA, A., JONNALAGADDA, K.N., NANTHAGOPALAN, P. Tensile strength and failure of ultra-high performance concrete (UHPC) composition over a wide range of strain rates, **Construction and Building Materials**, Volume 258, 2020, 119642, ISSN 0950-0618.

HABEL, K.; VIVIANI, M., DENARIÉ, E.; BRÜHWILER, E. Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC). **Cement and Concrete Research**, 36(7), 1362–1370. 2006.

HABEL, K., GAUVREAU, P. Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) to impact and static loading, **Cement and Concrete Composites**, Volume 30, Issue 10, 2008, Pages 938-946, ISSN 0958-9465.

HAILE, B.F.; JIN, D.W.; YANG, B.; PARK, S.; LEE, H.K. Multi-level homogenization for the prediction of the mechanical properties os ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**. Volume 229, 2019. 116797.

HANIFEHZADEH, M.; ARYAN, H.; GENCTURK, B.; AKYNIYAZOV, D. Structural Response of Steel Jacket-UHPC Retrofitted Reinforced Concrete Columns under Blast Loading. **Materials 2021**, 14(6), 1521; <https://doi.org/10.3390/ma14061521>.

HENCHE, D. **Composto cimentício de alta resistência com adição de nanotubos de carbono**. 2013. 223 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná – Curitiba.

HIREMATH, P.N.; YARAGAL. S.C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**. Volume 154, 2017, 72–87.

HUNG, C.; CHEN, Y.; YEN, C. Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers, **Construction and Building Materials**. Volume 260, 2020, 119944, ISSN 0950-0618.

HUNGER, M. **An integral design concept for ecological self-compacting concrete**. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherland, 2010.

IBRAHIM, A.G.; GARBA, M.M.; OKOLI, O.G.; ZUBAIR, I.K.; USMAN, J. Properties of reactive powder concrete produced with unrefined metakaolin and gear inner wire, **African Journal of Built Environment Research**, Vol. 4, No. 1, July 2020, 81-95.

JIAO, Y.; ZHANG, Y.; GUO, M.; ZHANG, L.; NING, H.; LIU, S. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (UHPC) containing waste glass

sand as partial replacement material, **Journal of Cleaner Production**, Volume 277, 2020, 123501, ISSN 0959-6526.

JUNG, M.; PARK, J.; HONG, S.; MOON, J. Electrically cured ultra-high performance concrete (UHPC) embedded with carbon nanotubes for field casting and crack sensing, **Materials & Design**, Volume 196, 2020, 109127, ISSN 0264-1275.

JUNG, M.; LEE, Y.; HONG, S.; MOON, J. Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE), **Cement and Concrete Research**, Volume 131, 2020, 106017, ISSN 0008-8846.

KALTHOFF, M.; RAUPACH, M. Pull - out behaviour of threaded anchors in fibre reinforced ordinary concrete and UHPC for machine tool constructions. **Journal of Building Engineering** 33 (2021).

KALTHOFF, M., RAUPACH, M. Pull-out behaviour of threaded anchors in fibre reinforced ordinary concrete and UHPC for machine tool constructions, **Journal of Building Engineering**, 2020, 101842, ISSN 2352-7102.

KANG, S.; JEONG, Y.; TAN, K.H.; MOON, J. The use of limestone to replace physical filler of quartz powder in UHPFRC. **Cement and Concrete Composites**. Volume 94, November 2018, Pages 238-247.

KANG, S.T.; LEE, Y.; D. PARK, Y.D.; KIM, J.K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber, **Composite Structures** 92 (1) (2010) 61–71.

KANG, S.T.; CHOI, J-IL.; KOH, K-T.; LEE, K.S.; LEE, B.Y. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. **Composite Structures**. Volume 145, 10 June 2016, Pages 37-42

KENNEDY, C.H. The design of concrete mixes. **ACI Proceedings**. 36 (1940). 373-400.

KHAKSEFIDI, S., GHALEHNOVI, M., DE BRITO, J. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC). **Journal of Building Engineering**, 33. 2021.

KHOSRAVANI, M.R.; NASIRI, S.; ANDERS, D.; WEINBERG, K. Prediction of dynamic properties of ultra-high performance concrete by an artificial intelligence approach, **Advances in Engineering Software**, Volume 127, 2019, Pages 51-58, ISSN 0965-9978.

KIM, H.; KOH, T.; PYO, S. Enhancing flowability and sustainability of ultra-high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags. **Construction and Building Materials**, Volume 123, 2016, Pages 153-160.

KIM, J., YOO, D. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete, **Cement and Concrete Composites**, Volume 103, 2019, Pages 213-223, ISSN 0958-9465.

KLEIN, N.S.; CAVALARO, S.; AGUADO, A.; SEGURA, I.; TORALLES, B. The wetting water in cement-based materials: Modeling and experimental validation. **Construction and Building Materials** 121 (2016) 34–43.

KOUTNÝ, O.; KRATOCHVÍL, J.; ŠVEC, J.; BEDNÁREK, J. Modelling of packing density for particle composites design. **Procedia Engineering** 151 (2016) 198 – 205.

KRAHL, P. A. **Instabilidade lateral de vigas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras com ênfase em fases transitórias**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, 2018.

KRAMER, C.Y. Extension of Multiple Range Tests to Group Means with Unequal Numbers of Replications. **Biometrics**. Vol. 12, No. 3 (Sep., 1956), pp. 307-310 (4 pages).

KWAN, A.K.H.; CHEN, J.J. Roles of packing density and water film thickness in rheology and strength of cement paste. **Journal of Advanced Concrete Technology**, volume 10, 2012, pp. 332-344.

KWAN, A.K.H.; WONG, H.H.C. Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement paste. **Advances in Cement Research**, 2008, 20, No. 1, January, 1–11

KWAN, A.K.H.; LI, L.G.; FUNG, W.W.S. Wet packing of blended fine and coarse aggregate. **Materials and Structures** (2012) 45:817–828.

LAI, J.; GUO, X.; ZHU, Y. Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete. **International Journal of Impact Engineering** Volume 84, 2 June 2015, Pages 1-12.

LEROY, M.N.L; MOLAY, T.G.G; JOSEPH, N.; COLINCE, F.M.; BIENVENU, N.J. A comparative Study of Concrete Strength Using Metamorphic, Igneous, and Sedimentary Rocks (Crushed Gneiss, Crushed Basalt, Alluvial Sand) as Fine Aggregate. **Journal of Architectural of Engineering Technology**. 2017, 6:1.

LI, P.P.; BROUWERS, H.J.H.; CHEN, W.; YU, O. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials** 242 (2020) 118112.

LI, P.P.; YU, K.L.; BROUWERS, H.J.H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC) **Construction and Building Materials** Volume 170, 10 May 2018, Pages 649-659.

LI, L.G.; KWAN, K.H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. **Cement & Concrete Composites** 39 (2013) 33–42.

LI, L.G.; KWAN, K.H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. **Powder Technology**, 2014. 253 (2):514-521.

LI, X., LI, J., LU, Z, HOU, L., CHEN. J. Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates. **Construction and Building Materials**, 234, (2020), 117342.

LIU, J.; LAI, Z.; CHEN, B., XU, S. Experimental behavior and analysis of steel-laminated concrete (RC and UHPC) composite girders. **Engineering Structures**, Volume 225, 2020, 111240, ISSN 0141-0296.

LIU, R.; DURHAM, S. A.; RENS, K. L.; RAMASWAMI, A. Optimization of cementitious material content for sustainable concrete mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 24(6), 2020, 745-753.

LONDERO, C.; LENZ, L.A.; DOS SANTOS, I.M.R.; KLEIN, N.S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica** 63 (2017) 22-33.

LU, D.; ZHONG, J.; YAN, B.; GONG, J.; HE, Z.; G.; SONG, C. Effects of Curing Conditions on the MECHANICAL and Microstructural Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Incorporating Iron Tailing Powder. **Materials** 2021, 14, 215. <https://doi.org/10.3390/ma14010215>.

LU GU, X.; SHI, C.; ZHU, C.; WU, Z. A review of ultra-high performance concrete mix design based on dense packing. **1<sup>st</sup> International Conference on UHPC Materials and Structures**. 27-30 Oct, 2016, Changsha, China.

MA, J.; DIETZ, J. Ultra High Performance Self Compacting Concrete. **LACER** N° 7, 2002.

MAMIROV, M. **Using Theoretical And Experimental Particle Packing For Aggregate Gradation Optimization To Reduce Cement Content In Pavement Concrete Mixtures**. Master's thesis. University of Nebraska. Lincoln, Nebraska, 2019.

MANGULKAR, M.N.; JAMKAR, S.S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **International Journal Of Scientific & Engineering Research** Volume 4, Issue 5, May-2013.

MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement and Concrete Research** 40 (2010) 226–234.

MELEKA, N.N.; BASHANDY, A.A.; ARAB, M.A. Economic reactive powder concrete cast using available materials in north Sinai, Egypt. **Archives of Civil Engineering**, LIX, 2, 2013.

MOHAMMED, S. D.; AWAD. H.K.; ABOUD, R.K. Compressive Strength Performance of Reactive Powder Concrete Using Different Types of Materials as a Partial Replacement of Fine Aggregate. **Key Engineering Materials**, vol. 857, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2020, pp. 39–47.

MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. 2003. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MULLEN, C. **Determining the effect of thermal treatment timing on ultra-high performance concrete beams**. Master's thesis, Michigan Technological Univ., Houghton, MI. 2013.

NAEIMI, N.; MOUSTAFA, M. A. Compressive behavior and stress-strain relationships of confined and unconfined uhpc. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121844, 2021. ISSN 0950-0618.

NG, P.; KWAN, A.K.; LI, L.G. Packing and film thickness theories for the mix design of high-performance concrete. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics and Engineering)**, 2016 17(10):759-871.

NOGUEIRA, C.H. **Testes para comparações múltiplas de médias em experimentos com tendência e dependência espacial**. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2017.

OH, S.G., NOGUCHI, T.; TOMOSAWA, F. Toward mix design for rheology of selfcompacting concrete. In: Proceedings, 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete, **RILEM Publications SARL**, Stockholm, Sweden; 1999. p. 361–72.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol.1, No.1, 5-15, April 2003.

OLIVEIRA, A.F.G. Testes estatísticos para comparação de médias. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.5, n° 6, p.777-788 Novembro/Dezembro 2008.

PACHECO, J.; RIBEIRO, M.; HELENE, P. Contribuição dos concretos de alto desempenho da redução do impacto ambiental e incremento da sustentabilidade. **Concreto & Construções**. IBRACON, Ed. 95. Jul-Set. 2019.

PREINSTORFER, P.; HUBER, P.; HUBER, T.; KROMOSER, B.; KOLLEGER, J. Experimental investigation and analytical modelling of shear strength of thin walled textile-reinforced UHPC beams. **Engineering Structures** • 15 March 2021.

POPOVICS S. Analysis of the concrete strength versus water–cement ratio relationship. **ACI Mater Journal**. 1990;87(5):517–29.

POSSAN, E. Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios. **Concreto & Construções**. IBRACON, Ed. 95. Jul-Set. 2019

PERRY, V.H. What really is ultra-high performance concrete? Towards a global definition. **Proceedings** of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures (UHPC2018-China).

PREFABRICADOS FORMEX. **Passarela de UHPC sobre el barranco de las Ovejas (Alicante)**. Disponível em: <<https://preffor.com/project/pasarela-uhpc-alicante/>>. Acesso em 07 Out 2020.



POWERS, T.C. **The properties of fresh concrete**. John Wiley & Sons, New York, 1968.

PYO, S.; KIM, H.; LEE, B.Y. Effects of coarser fine aggregate on tensile properties of ultra high performance concrete. **Cement and Concrete Composites** 84 (2017) 28e35.

QIAN, D.; YU, R.; SHUI, Z.; SUN, Y.; JIANG, C.; ZHOU, F.; DING, M.; TONG, X.; HE, Y. (2020). A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, Volume 261, 10 July 2020, 121231.

QIU, M., ZHANG, Y., QU, S., ZHU, Y., SHAO, X. Effect of reinforcement ratio, fiber orientation, and fiber chemical treatment on the direct tension behavior of rebar-reinforced UHPC, **Construction and Building Materials**, Volume 256, 2020, 119311, ISSN 0950-0618.

QU, S.; ZHANG, Y.; ZHU, Y.; HUANG, L.; QIU, M.; SHAO, X. Prediction of tensile response of UHPC with aligned and ZnPh treated steel fibers based on a spatial stochastic process, **Cement and Concrete Research**, Volume 136, 2020, 106165.

QUEIROZ, I.S.O. **Desenvolvimento de concretos de ultra-alta resistência com uso de materiais disponíveis na região do norte de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado). 2018. 72 p. Centro Federal de Educação de Minas Gerais – Belo Horizonte.

RAGALWAR, K.; HEARD, W.F.; WILLIAMS, B.A.; RANADE, R. Significance of the particle size distribution modulus for strain-hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design, **Construction and Building Materials**, Volume 234, 2020, 117423, ISSN 0950-0618.

REDA, M. M., SHRIVE, N. G., GILLOTT, J. E. Microstructural investigation of innovative UHPC. **Cement and Concrete Research**., 29(3), 323–329. 1999.

REDDY, G.G.K.; RAMADOSS, P. Influence of alccofine incorporation on the mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC), **Materials Today: Proceedings**, 2020, ISSN 2214-785.

REGINATO, L. A.; FÁVERO, R. B.; CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. F.; SILVA FILHO, L. C. P.; CHIES, J. A. Dosagem de concreto de pós reativos: avaliação da influência do coeficiente de distribuição q no modelo de empacotamento de partículas proposto por Alfred. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado - RS. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo - SP: IBRACON, 2013.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive poder concretes. **Cement and Concrete Research**, Vol. 25. No. 7, pp. 1501-1511.1995. Elsevier Science Ltd.

ROHDEN, A.B.; KIRCHHEIMB, A.P.; DAL MOLIN, D.C. Otimização da resistência mecânica de concretos de pós reativos. **Rev. IBRACON Estruturas e Materiais**., vol. 13, no. 5, e13507, 2020.

ROSS, S.M. Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data. **Journal of Engineering Technology**. Fall, 2003.

ROMERO, A.B.; BRAGA, J.A. Seminário sobre produção do concreto. Informações relativas à cura a vapor. Instituto Brasileiro do Concreto. Reunião de 1983. **Anais**. São Paulo, 1983.

ROMPA, D. D. GIDRÃO, G. DE M. S. Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPRFC). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 73-88, abr./jun. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SCHWANDA, F. Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für Spannbetonbau. **Zement und Beton**, (1966) Vol. 37, pp. 8-17.

SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa). **Novas estimativas de emissões dos gases de efeito estufa do Brasil – 2019**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/>>. Acesso em 02 Nov. 2021.

SERNA, P.; LÓPEZ, J.A.; COLL, H., CAMACHO, E.; NAVARRO-GREGORI, J.; GALÁN, F. Pasarela de hormigón de muy alto rendimiento sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante). **Hormigón y Acero**. Vol. 66. Issue 275. pages 23-42 (January - April 2015).

SHEN, P.; LU, L.; HE, Y.; WANG, F.; HU, S. The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. **Cement and concrete research**. v. 118, p. 1-13. abr. 2019.

SHEN, P., ZHENG, H., XUAN, D., LU, J., POON, C.S. Feasible use of municipal solid waste incineration bottom ash in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, 114, 2020, 103814.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials** 101 (2015) 741–751.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials** 96 (2015a) 368–377.

SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento). Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono na indústria brasileira até 2050. **SNIC**. Rio de Janeiro, 2019.

SOARES, T.C.C.; MAZER, W.; STELLA, A.C.; NAKANISHI, E.Y. Contribuição ao estudo do empacotamento em concretos de pós reativos. **Anais do Simpósio sobre materiais e construção civil**. Toledo, 2013.

SOHAIL, M.G; WANG, B.; JAIN, A.; KAHRAMAN, R.; OZERKAN, N.G.; GENCTURK, B.; DAWOOD, M.; BELARBI, A. Advancements in concrete mix designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2018, 30 (3): ASCE 04017310-1.

SOHAIL, M.G; WANG, B.; RAMAZAN, K.; AL NUAIMI, N.; GENCTURK, B.; ALNAHHAL, W. Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. **Journal of Building Engineering**. Volume 33, January 2021, 101669.

SOLIMAN, N.A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, 125 (2016) 600-612.

SOLHMIRZAEI, R.; SALEHI, H.; KODUR, V.; NASER, M.Z. Machine learning framework for predicting failure mode and shear capacity of ultra high performance concrete beams, **Engineering Structures**, Volume 224, 2020, 111221.

SONG, J.; LIU, S. Properties of Reactive Powder concrete and Its Application in Highway Bridge. **Advances in Materials Science and Engineering**. Volume 2016, Article ID 5460241, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5460241>.

SONG, Q., YU, R., SHUI, Z., RAO, S., WANG, X., SUN, M., JIANG, C. Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC), **Cement and Concrete Composites**, Volume 94, 2018, Pages 191-200, ISSN 0958-9465.

STOVALL, T., LARRARD, F. DE AND BUIL, M. Linear Packing Density Model of Grain Mixtures. **Powder Technology**, (1986) Vol. 48, pp. 1-12.

TOUFAR, W., BORN, M. KLOSE, E. Beitrag zur Optimierung der Packungsdichte. Polydispenser körniger Systeme. Freiburger Forschungsheft A 558, VEB **Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie**, (1976) pp. 29-44.

TONG, L., CHEN, L., WEN, M., XU, C. Static behavior of stud shear connectors in high-strength-steel-UHPC composite beams, **Engineering Structures**, Volume 218, 2020, 110827, ISSN 0141-0296.

TUTIKIAN, B.F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G.C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Geraldo Cechella Isaia (Editor). Capítulo 36. 2011. IBRACON.

VANDENBERG, A.; WILLE, K. Evaluation of resonance acoustic mixing technology using ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 716-730, 2018. ISSN 0950-0618.

- VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2004.
- VATANNIA, S.; KEARSLEY, E.; MOSTERT, D. Development of economic, practical and green ultra-high performance fiber reinforced concrete verified by particle packing model. **Case Studies in Construction Materials** 13 (2020).
- VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2005.
- VIANA, T.M.; BACELAR, B.A.; COELHO, I.D.; LUDVIG, P.; SANTOS, J. Behaviour of ultra-high performance concretes incorporating carbon nanotubes under thermal load. **Construction and Building Materials** Volume 263, 10 December 2020, 120556.
- VOGT, C. **Ultrafine particles in concrete - Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. PhD thesis. School of Architecture and the Built Environment, Civil and Architectural Engineering, Concrete Structures. 2010.
- VON WERDER, J.; SIMON, S.; GARDEI, A.; FONTANA, P.; MENG, B. Thermal and hydrothermal treatment of UHPC: influence of the process parameters on the phase composition of ultrahigh performance concrete. **Materials and Structures** (2021) 54:44 <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01633-w>.
- WANG, C.; YANG, C.; LIU, F.; WAN, C.; PU, X. Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. **Cement and Concrete Composites**. Volume 34, Issue 4, April 2012, Pages 538-544.
- WANG, X.; WANG, YU, R.; SONG, Q.; SHUI, Z.; LIU, Z.; WU, S.; Hou, d. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. **Cement and Concrete Research** 126 (2019) 105921.
- WANG, D.; SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, Volume 96, 2015, pp. 368-377.
- WANG, Z.; YAN, J.; LIN, Y.; FAN, F.; YANG, Y. Mechanical properties of steel-UHPC-steel slabs under concentrated loads considering composite action, **Engineering Structures**, Volume 222, 2020, 111095, ISSN 0141-0296.
- WANG, X., YU, R., SONG, Q., SHUI, Z., LIU, Z., WU, S., HOU, D. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density, **Cement and Concrete Research**, Volume 126, 2019, 105921, ISSN 0008-8846.
- WERDER, J.V.; SIMON, S.; GARDEI, A.; FONTANA, P.; MENG, B. Thermal and hydrothermal treatment of UHPC: influence of the process parameters on the phase composition of ultra-high performance concrete. **Materials and Structures** (2021) 54:44.

WILLE, K.; BOISVERT-COTULIO, C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 86, 2015, Pages 33-43, ISSN 0950-0618.

WILLEY, J. **Use of ultra-high performance concrete to mitigate impact and explosive threats**. Master's thesis, Missouri Univ. of Science and Technology, Rolla, MO, 2013.

WONG, H.H.C.; KWAN, A.K.W. Packing density of cementitious materials: part 1 – measurement using a wet packing method. **Materials and Structures** 41: 689 - 701, 2008.

WONG, H.H.C.; KWAN, A.K.W. Packing density of cementitious materials: part 2– packing and flow of OPC + PFA+ CSF. **Materials and Structures** 41: 773 - 784, 2008a.

WU, Z.; SHI, C.; HE, W. Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 307-313, 2017.

XU, S.; WU, P.; WU, C. Calibration of KCC concrete model for UHPC against low-velocity impact, **International Journal of Impact Engineering**, Volume 144, 2020, 103648, ISSN 0734-743X.

YAN, J., CHEN, A., WANG, T. Compressive behaviours of steel-UHPC-steel sandwich composite walls using novel EC connectors, **Journal of Constructional Steel Research**, Volume 173, 2020, 106244, ISSN 0143-974X.

YANG, S. L., MILLARD, S. G.; SOUTSOS, M. N.; BARNETT, S. J.; LE, T. T. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**., 23(6), 2291–2298, 2009.

YANG, R.; YU, R.; SHUI, Z.; GAO, X.; XIAO, X.; FAN, D.; CHEN, Z.; CAI, J.; LI, X.; HE, Y. Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Journal of Cleaner Production** 258 (2020) 120673.

YAO, D., JIA, J., WU, F., AND YU, F. Shear performance of prestressed ultra high strength concrete encased steel beams **Construction and Building Materials** 52 (2014), 194–201.

YOO, D.Y.; YOU, I. Liquid crystal display glass powder as a filler for enhancing steel fiber pullout resistance in ultra-high-performance concrete. **Journal of Building Engineering**. Volume 33, January 2021.

YU, R. **Development of sustainable protective Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)**. PhD thesis, Eindhoven University of Technology. Eindhoven, the Netherland, 2015.

- YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. **Construction and Building Materials** 65 (2014), 273-282.
- YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H. Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. **Construction and Building Materials** 79 (2015), 140-150.
- YU, A.B.; STANDISH, N. Porosity calculations of multi-component mixtures of spherical particles. **Powder Technology** (1987) Vol. 52, pp. 233-241.
- YUNSHENG, Z., WEI, S., SIFENG, L., CHUJIE, J., JIANZHONG, L. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors, **Cement and Concrete Composites**, Volume 30, Issue 9, 2008, Pages 831-838, ISSN 0958-9465.
- YURDAKUL, Z.; TAYLOR, P.C.; CEYLAN, H. Effect of paste-to-voids volume ratio on the performance of concrete mixtures. **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 25, No. 12, pp. 1840-1851. 2013.
- ZANNI, H.; CHEYREZY, M.; MARET, V.; PHILIPPOT, S.; NIETO, P. Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete using Si NMR. **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, NO. 1, pp. 93-100, 1996.
- ZDEB, T. Ultra high performance concrete – properties and technology. **Bulletin of the Polish Academy of Science - Technical Science**, v. 61, n. 01, p. 11, 2013
- ZDEB, T. Effect of vacuum mixing and curing conditions on mechanical properties and porosity of reactive powder concretes. **Construction and Building Materials** 209 (2019) 326–339.
- ZENG, X.; DENG, K.; LIANG, H.; XU, R.; ZHAO, C.; CUI, B. Uniaxial behavior and constitutive model of reinforcement confined coarse aggregate UHPC. **Engineering Structures** 207 (2020) 110261.
- ZHANG, X.; ZHANG, Z.; ZHIDA, L.; YUNYU, L.; SUN, T. Filling capacity analysis of self-compacting concrete in rock-filled concrete based on DEM. **Construction and Building Materials**. Volume 233, 10 February 2020, 117321.
- ZHANG, X., LI, X., LIU, R., HAO, C., CAO, Z. Dynamic properties of a steel–UHPC Composite deck with large U-ribs: Experimental measurement and numerical analysis, **Engineering Structures**, Volume 213, 2020, 110569, ISSN 0141-0296.
- ZHANG, Y., ZHU, Y., QU, S., KUMAR, A., SHAO, X. Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers. **Construction and Building Materials**, Volume 251, 2020, 118893, ISSN 0950-0618.
- ZHANG, Y., ZHU, Y., QU, S., KUMAR, A., SHAO, X., FAN, D., CHEN, Z., CAI, J., LI, X., HE, Y. Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC), **Journal of Cleaner Production**, Volume 258, 2020, 120673, ISSN 0959-6526.

ZHANG, Y., CAI, S., ZHU, Y., FAN, L., SHAO, X. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment, **Engineering Structures**, Volume 206, 2020, 110134, ISSN 0141-0296.



ZHANG, Y., ZHANG, C., ZHU, Y., CAO, J., SHAO, X. An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC, **Construction and Building Materials**, Volume 236, 2020, 117480, ISSN 0950-0618.



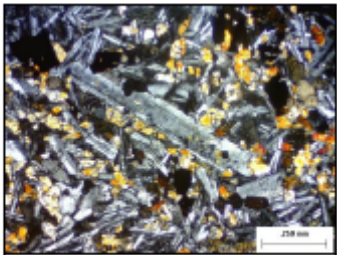
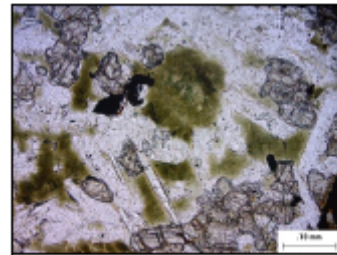
ZHANG, Y.; HAOHUI, X.; CORREIA, J.A.F.O. Fracture evaluation of ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). **Engineering Failure Analysis**. Volume 120, February 2021, 105076.



ZHU, Y.; ZHANG, Y.; HUSSEIN, H.H.; LIU, J.; CHEN, G. Experimental study and theoretical prediction on shrinkage-induced restrained stresses in UHPC-RC composites under normal curing and steam curing, **Cement and Concrete Composites**, Volume 110, 2020, 103602, ISSN 0958-9465.

**ANEXO A - Certificado de Análise Petrográfica da Areia Artificial**



 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA			
<b>LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS</b> Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba - PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br			
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b> Nº. 2012-0469			
1. SOLICITANTE <b>Pedreira Guaravera Ltda.</b>			
2. DATA DE EMISSÃO <b>06/06/2012</b>			
3. TIPO DE ENSAIO <b>Análise petrográfica</b> - Caracterização mesoscópica de rocha complementada por análise microscópica; - Análise microscópica de seção delgada por luz transmitida; - Microscópio petrográfico OLYMPUS, modelo BX 60; - Porcentagem mineralógica obtida por estimativa visual; - Sistema de captura - <i>Dino Capture</i> e tratamento de imagem - <i>Image Pro-Plus</i> .			
4. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA <b>Pelo solicitante</b> Amostra CMB-PG-01 Processo DNPM Nº 826.327/2010		<b>Nº. LAMIR</b> 172/12	
4.1. Tipo de material: Fragmento de rocha.			
5. CARACTERÍSTICAS MESOSCÓPICAS  Rocha cinza médio, de granulação fina, constituída por plagioclásio, piroxênio e opacos. Possui textura fanerítica equigranular fina e estrutura maciça. Subordinadamente ocorrem cavidades (amígdalas) arredondadas preenchidas por zeólitas. Não é observada alteração superficial.			
6. CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS			
6.1. Mineralogia (total):			
	%		%
Labradorita (Plagioclásio)	55	Argilomineral	< 1
Augita (Piroxênio)	40	Quartzo	< 1
Opacos	5	Feldspato alcalino	< 1
Apatita	< 1	Zeólita	-
<b>PÁGINA 1 de 3</b> <small>OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E DOS CARIMBOS E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.</small> Responsável Técnico: _____ Coordenador: _____			

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA			
<b>LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS</b> Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba - PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br			
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b> Nº. 2012-0469			
Rocha de granulação fina, constituída essencialmente por cristais de labradorita, augita e opacos, com presença de microfenocristais de labradorita e augita.  A <b>labradorita</b> (plagioclásio) ocorre na matriz como cristais subédricos a euédricos ripiformes, de granulação fina, heterogranulares; e como microfenocristais (1 - 5%) subédricos a euédricos prismáticos, tabulares, submilimétricos, isolados, com fraturamento incipiente, exibindo zoneamento composicional (Fotomicrografia A). A <b>augita</b> (piroxênio) ocorre na matriz como cristais anédricos granulares, de granulação fina, intenciais a labradorita caracterizando textura intergranular; e como microfenocristais (< 1%) subédricos prismáticos, submilimétricos, com fraturamento incipiente. Alteração para opacos é comum em alguns cristais. Os <b>opacos</b> ocorrem na forma de cristais anédricos, de granulação fina, associados à augita; e como cristais anédricos a subédricos, ligeiramente mais grossos, com inclusões parciais de labradorita. A <b>apatita</b> está na forma de finos cristais prismáticos, aciculares, indusos em labradorita. O <b>argilomineral</b> verde a castanho claro encontra-se nos interstícios dos cristais de labradorita e augita da matriz (Fotomicrografia B). O <b>quartzo</b> e o <b>feldspato alcalino</b> ocorrem subordinadamente entre os cristais de labradorita da matriz.			
6.2. Textura: <b>África a subaférica com matriz intergranular.</b>			
6.3. Estrutura: <b>Maciça.</b>			
6.4. Granulação: <b>Fina (&lt; 1,0 mm).</b>			
6.5. Estado de alteração: <b>Rocha pouco alterada.</b>			
6.6. Microfissuração: <b>Fraca.</b>			
7. FOTOMICROGRAFIA			
			
<b>A</b>		<b>B</b>	
<b>A (aumento 40X/ luz polarizada)</b> - Fenocristal prismático de labradorita imerso em matriz fina com textura intergranular. <b>B (aumento 100X/ luz natural)</b> - Argilomineral (verde) intencional aos cristais de labradorita da matriz.			
<b>PÁGINA 2 de 3</b> <small>OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E DOS CARIMBOS E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.</small> Responsável Técnico: _____ Coordenador: _____			

	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA		
<b>LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS</b>			
<small>Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br</small>			
<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b>			
N°. 2012-0469			
8. CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA			
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="813 547 1514 566">8.1. Tipo: Rocha Ígnea.</td> </tr> </table>			8.1. Tipo: Rocha Ígnea.
8.1. Tipo: Rocha Ígnea.			
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="813 566 1514 585">8.2. Nome: Basalto.</td> </tr> </table>			8.2. Nome: Basalto.
8.2. Nome: Basalto.			
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="813 601 1514 638"> <b>OBSERVAÇÃO:</b> A descrição petrográfica possui certo caráter subjetivo e interpretativo quanto a cor e a quantificação mineralógica. O resultado petrográfico apresentado restringe-se à amostra analisada.         </td> </tr> </table>			<b>OBSERVAÇÃO:</b> A descrição petrográfica possui certo caráter subjetivo e interpretativo quanto a cor e a quantificação mineralógica. O resultado petrográfico apresentado restringe-se à amostra analisada.
<b>OBSERVAÇÃO:</b> A descrição petrográfica possui certo caráter subjetivo e interpretativo quanto a cor e a quantificação mineralógica. O resultado petrográfico apresentado restringe-se à amostra analisada.			
- FINAL DO CERTIFICADO -			
<b>PÁGINA 3 de 3</b>			
<small>OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VISA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E DOS CARIMBOS E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.</small>			
<small>Responsável Técnico:</small>	<small>Coordenador:</small>		

**ANEXO B - Certificado de Análises Físicas e Químicas da Areia Natural**



## RELATÓRIO INTERPRETATIVO DE ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS DE MINÉRIO DE AREIA PARA USO INDUSTRIAL

Projeto ALPES.2016/ALPES\_PRJ\_RAV\_0004.16\_UNI\_RE\_Rev.01

Relatório técnico, 13 páginas, 2 anexos

ANEXO 01 – Documento ALPES\_PRJ\_EFA\_0001\_2016\_UNI\_RE

ANEXO 02 – Documento GQ1601022

CLIENTE: Uni Mineração Ltda.

CURITIBA - PR

Resp. Técnico: Geól. Nilton Cezar Canteri Strada (CREA 97.030-D/PR)

e-mail: nilton@alpeslaboratorio.com.br

ALPES LABORATÓRIO DE PESQUISAS E ENSAIOS FÍSICOS DE SOLOS

Rua Érico José de Mio, 45 - Campina do Siqueira.

CEP: 80.740-160 - Curitiba/PR - Tel: (41) 3274-1955

contato@alpeslaboratorio.com.br

### 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O presente relatório se refere à interpretação dos resultados analíticos de ensaios físicos e químicos realizados em uma amostra de areia coletada pelo cliente em uma jazida localizada no litoral paranaense em área de abrangência do processo DNPM nº 826.416/2014.

Este relatório tem como objetivo comparar esses resultados com os padrões de referência adotados para uso industrial do minério de areia, de modo a auxiliar o cliente na tomada de decisão quanto ao emprego mais adequado para esse material.

### 2. ANÁLISES REALIZADAS

As análises físicas e químicas foram realizadas em uma amostra de areia natural (bruta). Esta amostra foi dividida em duas alíquotas. Para a primeira alíquota (denominada Nat.) foi mantida as características naturais da amostra; já a segunda alíquota (denominada Lav.) foi previamente lavada em laboratório.

Estas alíquotas foram submetidas a ensaios para determinação de características físicas e também para análise química elementar via fluorescência de raio X.

#### 2.1 ENSAIOS FÍSICOS

Em cada uma das alíquotas foram realizados os seguintes ensaios físicos:

- a) Massa específica e massa específica aparente (densidade real e aparente), segundo a ABNT/NBR NM 52, 2002;
- b) Determinação de impureza orgânica, segundo a ABNT/NBR NM 49, 2001;
- c) Determinação da composição granulométrica, segundo a ABNT/ NBR NM 248, 2003;
- d) Descrição mineral e descrição de forma.

Os ensaios físicos foram realizados no laboratório **ALPES – Laboratório de Pesquisas e Ensaios Físicos de Solo**. Os laudos analíticos emitidos são apresentados no **ANEXO 01**.

## 2.2 ANÁLISES QUÍMICAS

Cada uma das alíquotas foi submetida a ensaios via fluorescência de raios-X para análise química elementar, segundo os parâmetros: SiO<sub>2</sub> (sílica), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e ZrO<sub>2</sub>

As análises químicas foram realizadas no laboratório **SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA**. Os laudos analíticos emitidos são apresentados no **ANEXO 02**.

## 3. RESULTADOS OBTIDOS

### 3.1 ENSAIOS FÍSICOS

Segundo os resultados obtidos (**ANEXO 01**), independente da alíquota, o material foi caracterizado fisicamente como areia silicosa de granulação fina, com grãos subarredondados a arredondados, de esfericidade alta, com diâmetro médio de 0,20 mm e diâmetro máximo característico de 0,30 mm. Tanto a areia natural como a lavada apresentaram um índice de cor mais escuro que a solução padrão no ensaio de determinação de impurezas orgânicas.

As alíquotas de areia natural e lavada apresentaram entre si uma leve diferença nos valores calculados de módulo de finura (0,9 e 0,8, respectivamente) e de densidade real e aparente (2,65 g/cm<sup>3</sup> e 1,46 g/cm<sup>3</sup> respectivamente para a areia natural, e 2,65 g/cm<sup>3</sup> e 1,45 g/cm<sup>3</sup> respectivamente para a areia lavada). O grau de seleção é de areia bem selecionada ( $\phi = 0,42$ ) para a natural e de muito bem selecionada ( $\phi = 0,31$ ) para a lavada.

### 3.2 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas (conforme pode ser observado no **ANEXO 02** - Documento GQ1601022) demonstram que a areia é constituída por mais de 98% de sílica, além de outros óxidos minoritários. O item a seguir compara a composição química obtida para as alíquotas da areia natural e lavada com as especificações recomendadas do minério para os principais usos industriais.

## 4. COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL AVALIADO COM VALORES DE REFERÊNCIA

### 4.1 VIDRO

Qualquer tipo de areia de quartzo para vidro deve conter, pelos menos, 98,5% SiO<sub>2</sub> (acima de 99% para vidro plano) com um máximo de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em torno de 0,08% para vidro plano, 0,1% para fibra de vidro e 0,3% para vasilhames de vidro colorido. Há outros constituintes, cujas proporções são também rigidamente controladas: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A presença de cobre, níquel e cobalto, mesmo em níveis de traços, pode produzir cores e defeitos no vidro, tornando-o inaceitável.

Ao se comparar o material avaliado com as referências (conforme mostra a **Tabela 01** e as **Figuras 01 a 03**), observa-se que os teores dos óxidos indesejáveis para a aplicação em vidro extrapolam o aceitável nas alíquotas natural e lavada da areia analisada. Há, assim, a necessidade de beneficiamento das areias do depósito para que sejam eliminados ou diminuídos os valores dos elementos contaminantes, aumentando consequentemente a concentração do valor de sílica, a fim de garantir o aceite do produto pelo mercado consumidor.

**Tabela 01:** Comparação dos valores das amostras avaliadas com a referência para vidro.

Composição	Nat	Lav	*V.P.	**V.C	***F.V.
SiO <sub>2</sub> %	98,500%	98,100%	99,5000%	98,5000%	99,000%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0,820%	0,830%	0,3000%	0,5000%	0,300%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	1,040%	0,940%	0,0400%	0,0350%	0,500%
CaO %	0,030%	0,030%	0,0000%	0,2000%	0,000%
MgO %	0,100%	0,100%	0,0000%	0,0300%	0,000%
TiO <sub>2</sub> %	0,090%	0,090%	0,1000%	0,0000%	0,000%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	0,010%	0,010%	0,0000%	0,0000%	0,000%
Na <sub>2</sub> O %	0,100%	0,100%	0,0000%	0,0000%	0,100%
K <sub>2</sub> O %	0,340%	0,340%	0,0000%	0,0000%	0,100%
MnO %	0,010%	0,010%	0,0000%	0,0000%	0,000%
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> %	0,005%	0,005%	0,0002%	0,0010%	0,000%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0,020%	0,010%	0,0002%	0,0100%	0,000%
ZrO <sub>2</sub> %	0,010%	0,010%	0,0000%	0,1000%	0,000%
H <sub>2</sub> O	0,010%	0,090%	0,0500%		0,500%

#### Legenda:

\*V.P. – composição química de referência para vidro plano (Harben e Kuzvart, 1996).

\*\*V.C. – composição química de referência para vaso de cristal (Ziduncyk e Linkous, 1994).

\*\*\*F.V. – composição química de referência para fibra de vidro (Ziduncyk e Linkous, 1994).

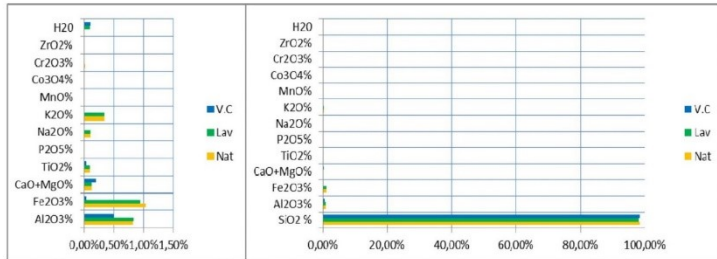


Figura 01: Comparação da composição química das amostras avaliadas com valor de referência para Vidro Plano.

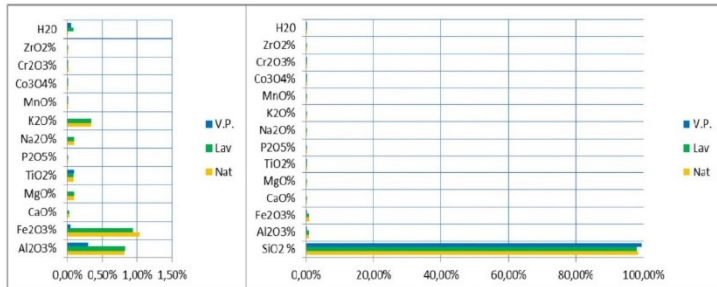


Figura 02: Comparação da composição química das amostras avaliadas com valor de referência para Vasos de Cristal.

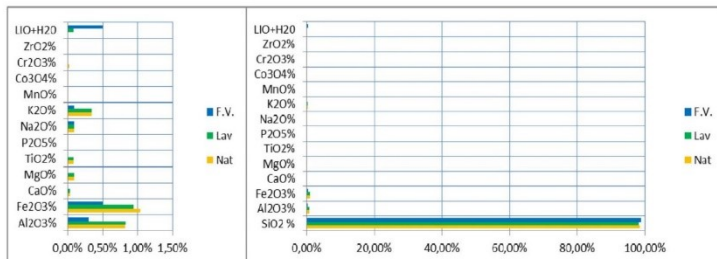


Figura 03: Comparação da composição química das amostras avaliadas com valor de referência para Fibra de Vidro.

4.2 CERÂMICA E CERÂMICA REFRAATÓRIAS

As características típicas de uma areia de quartzo para a indústria cerâmica são: granulometria entre as malhas #30 e #140 (0,60 a 0,105 mm); 93,5 a 99,8% SiO<sub>2</sub>; 0,035 a 0,70% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,02 a 0,08% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. De acordo com os resultados obtidos, do ponto de vista físico, não há qualquer impedimento para o uso da areia avaliada, independente das alíquotas, desde que estas sejam classificadas nessa faixa.

Entretanto, conforme mostra a comparação do material avaliado com a referência adotada para esse uso na Tabela 02 e na Figura 04, para que o material do depósito se adeque ao fabrico de corpos cerâmicos há a necessidade de limpeza e redução dos elementos contaminantes.

Tabela 02: Comparação da areia avaliada com as especificações típicas europeias e americanas para corpos cerâmicos.

Parâmetro	Nat	Lav	*M82	**250
SiO <sub>2</sub>	98,500%	98,100%	99,550%	99,880%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,040%	0,940%	0,03%	0,02%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,820%	0,830%	0,20%	0,06%
TiO <sub>2</sub>	0,090%	0,090%	0,03%	0,02%
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	0,440%	0,440%	0,15%	0,00%
CaO + MgO	0,130%	0,130%	0,03%	0,02%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,020%	0,010%	0,03%	0,00%
P.F.	0,010%	0,090%	0,10%	0,10%
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,46	1,45	0,95	1,009
Densidade	2,64	2,65	2,65	0
Absorção de óleo (g/100g)	-	-	17	20
Tamanho médio (µm)	7,6	7,4	20	9,5

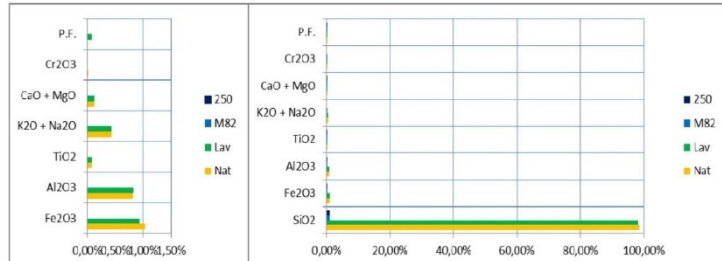
Legenda:

P.F. = Ponto de fusão

\*M82 = Grau Sibelco Millisil - M82

\*\*250 = Sílica americana Grau 250 Ottawa, IL

Fonte: SCR Sibelco AS, US Silica Co., in LUZ E LINZ (2008).



**Figura 04:** Comparação da areia avaliada com as especificações típicas europeias e americanas para corpos cerâmicos.

Para o uso da areia para esmalte em cerâmica refratária (Tabela 03 e Figura 05), também se faz necessária a limpeza e redução significativa dos elementos contaminantes, com consequente aumento na concentração de sílica do minério.

**Tabela 03:** Especificações típicas de sílica flour para esmalte (enamel) e esmalte vitrificado (glaze).

Parâmetros	Nat	Lav	*M300	**G 75
SiO <sub>2</sub>	98,500%	98,100%	99,5000%	99,6000%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,040%	0,940%	0,0300%	0,0350%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,820%	0,830%	0,2000%	0,1100%
TiO <sub>2</sub>	0,090%	0,090%	0,0250%	0,0230%
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	0,000%	0,000%	0,1500%	0,0000%
CaO + MgO	0,000%	0,000%	0,0300%	0,0160%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,020%	0,010%	0,0003%	0,0000%
P.F.	0,010%	0,090%	0,1000%	0,2000%
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,46	0,85	0,897
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,64	2,65	-
Absorção de óleo (g/100g)	-	-	19,5	23
Tamanho médio em (µm)	7,6	7,4	10	6,7
Peneira de controle (>40 µm)			3% max.	

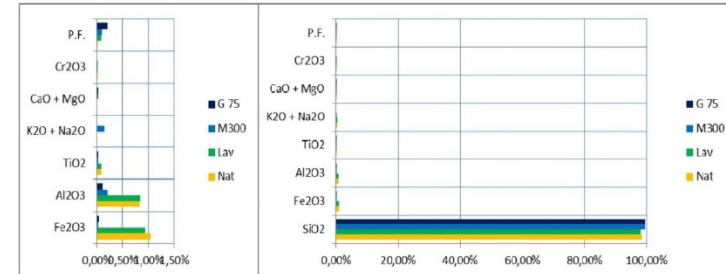
**Legenda:**

P.F. = Ponto de fusão

\*G 75 = Sílica americana Grau 75 Depósito de Mappleton (esmalte vitrificado)

\*\*M300 = Sibelco Millisil M300 (esmalte cerâmico-enamel)

Fonte: SCR Sibelco AS, US Silica Co., in LUZ E LINZ (2008).



**Figura 05:** Comparação da areia avaliada com as especificações típicas de sílica flour para esmalte (enamel) e esmalte vitrificado (glaze).

#### 4.3 TINTAS, PLÁSTICOS E BORRACHAS

A sílica de quartzo finamente moída (1 – 10 µm) é usada na indústria de tinta, plástico e borracha. A sílica cristalina finamente moída (tripoli) é usada na indústria de plástico, pois além de lhe conferir propriedade dielétrica, ela confere ao plástico resistência à compressão e à flexão.

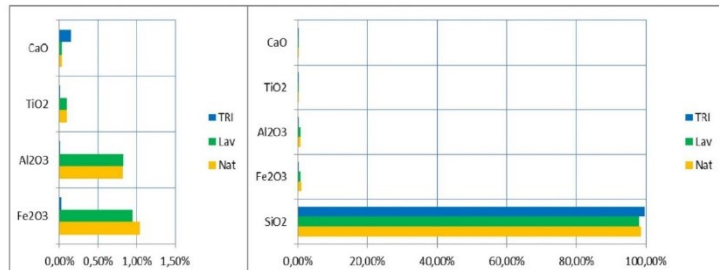
A sílica usada como carga ou extensor, na forma finamente moída (*flour*) ou tripoli, torna a tinta mais resistente a ataques químicos, devido à sua resistência. Por outro lado, a adição da sílica à formulação da tinta contribui para melhorar a retenção da tinta, durabilidade e fluidez.

Ao se comparar a composição química do material avaliado com os valores de referência, observa-se que os teores dos óxidos indesejáveis para essas aplicações ultrapassam o aceitável nas alíquotas natural e lavada da areia analisada. Para que a areia do depósito se adeque a estes usos, assim como para as aplicações anteriores, será necessário que a areia seja limpa para a remoção dos elementos que estão acima da referência, para posteriormente moê-la em moinho específico (moinho de cerâmica) para ajuste na granulometria.

**Tabela 04:** Comparação das especificações químicas e físicas da tripoli usada nas indústrias de tinta, plástico e borracha com o material avaliado.

Composto	*Referência	Nat.	Lav.
SiO <sub>2</sub>	99,5000%	98,500%	98,100%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0250%	1,040%	0,940%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0090%	0,820%	0,830%
TiO <sub>2</sub>	0,0050%	0,090%	0,090%
CaO	0,1500%	0,030%	0,030%
Propriedade	Valor		
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,64	2,65
Índice de refração	1,54 - 1,66	-	-
Resistência específica (ohms)	25.700	-	-
Alvura GE (%)	84 - 91	-	-
pH	7	-	-
Ponto de fusão (°C)	1 722	-	-

\*Fonte: Hanson (1995).



**Figura 06:** Comparação do material avaliado com as especificações químicas e físicas da tripoli usada nas indústrias de tinta, plástico e borracha.

#### 4.4 FILTROS

Diferentemente de outros usos, a granulometria de areia para filtração é mais grosseira, tipicamente entre 1,0 e 0,5 mm. Isso significa dizer que a granulação do depósito é muito fina para o uso da areia para filtro, conforme mostra a **Tabela 05**. Além disso, alguns teores de óxidos minoritários na composição química do material avaliado não estão conformes segundo as especificações técnicas para essa aplicação (segundo mostra a **Tabela 06** e a **Figura 07**), devendo-se, portanto, realizar uma etapa prévia de beneficiamento da areia do depósito.

**Tabela 05:** Comparação entre as granulações de areia usualmente comercializadas para aplicação em filtros e resultados obtidos para as amostras analisadas.

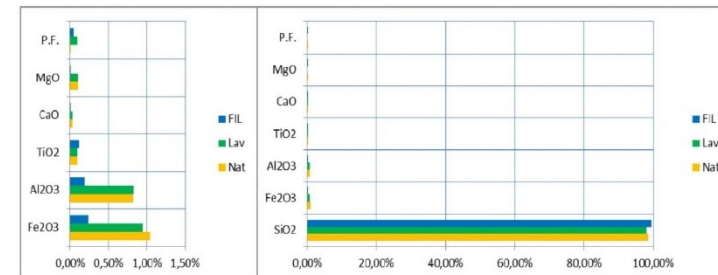
Amostra	Tamanho (mm)	Coefficiente de uniformidade
Granulações de referência	0,4 a 0,5	1,60 max.
	0,5 a 0,6	1,60 max.
	0,6 a 0,7	1,60 max.
	0,7 a 0,8	1,60 max.
	0,8 a 1,0	1,65 max.
	1,0 a 1,5	1,7
Nat.	0,075 a 0,3	2,12
Lav.	0,075 a 0,3	2,31

\*Fonte: Ziduncyk e Linkous (1994).

**Tabela 06:** Comparação entre a composição química típica de uma areia para filtração e resultados obtidos para as amostras analisadas.

	FILTRO	Nat.	Lav.
SiO <sub>2</sub>	99,3900%	98,500%	98,100%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2400%	1,040%	0,940%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1900%	0,820%	0,830%
TiO <sub>2</sub>	0,1200%	0,090%	0,090%
CaO	0,0100%	0,030%	0,030%
MgO	0,0040%	0,100%	0,100%
P.F.	0,0460%	0,010%	0,090%

\*Fonte: Ziduncyk e Linkous (1994).



**Figura 07:** Comparação do material avaliado com a composição química típica de areia para filtração.

#### 4.5 FUNDIÇÃO

Ao se comparar as alíquotas da areia avaliada com as características da areia para fundição apresentadas na **Tabela 07**, observa-se que o material da jazida é ligeiramente mais grosso que os valores definidos na norma técnica NBR 12672. Há, portanto, a necessidade de classificação granulométrica (peneiramento, hidrociclone) para adequar o material às especificações deste



mercado, necessitando-se também a realização de um beneficiamento a fim de aumentar a concentração do teor de sílica.

**Tabela 07:** Especificações de areia para fundição (ABNT – NBR 12672) e resultados obtidos para as amostras analisadas.

Características	Referência	Nat.	Lav.
Teor de umidade (%)	0,1 max.	-	-
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	99,0 max.	98,5	98,1
Teor de argila total (%)	0,1 max.	~ 0,06%	~ 0,05
Superfície específica teórica (cm <sup>2</sup> /g)	95 – 107	221	204
Tamanho de grão médio (mm)	0,230 – 0,260	0,28	0,29
Coefficiente de angularidade	1,20 – 1,40	-	-
Módulo de finura	55 – 61	64	66
Valor da demanda de ácido (mL HCl 0,1 N/50g de areia a pH 2)	3,0 máx.	-	-
Permeabilidade-base (AFS)	110-140	-	-
Número específico teórico de grãos (dez unidades/g)	7,0 – 10,0	-	-
Diâmetro representativo (mm)	0,188 – 0,211	-	-
Grau de afastamento (%)	10,0 – 13,0	-	-

#### 4.6 ABRASIVOS

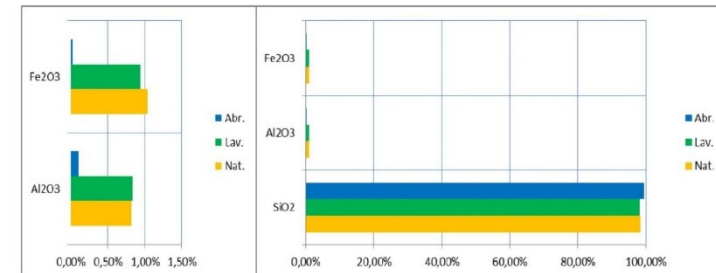
Os abrasivos, compostos de carbetto de silício (SiC) e óxidos de alumínio, são usados na produção de ferramentas abrasivas e de materiais refratários e isolantes. Na fabricação de SiC, a areia industrial entra como fonte de Si e suas principais características são: SiO<sub>2</sub> ≥ 99,5%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0,10%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0,025% e distribuição granulométrica entre 0,053 mm e 0,42 mm.

O material existente no depósito, conforme pode ser visto na **Tabela 08** e **Figura 08** (que mostram uma comparação das alíquotas analisadas com as especificações típicas para essa aplicação), necessita de beneficiamento para reduzir os valores de alumínio e ferro, a fim de produzir areia adequada à fabricação de carbetto de silício. Quanto à granulação, o material do depósito está dentro da aceitável pelo mercado.

**Tabela 08:** Valores de referência para a fabricação de compostos de carbetto de silício (SiC), comparados com a composição do material avaliado.

Parâmetro	Abr.	Nat.	Lav.
SiO <sub>2</sub>	99,50%	98,500%	98,100%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10%	0,820%	0,830%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03%	1,040%	0,940%

Fonte: LUZ E LINZ (2008).



**Figura 08:** Comparação do material avaliado com os valores de referência para a fabricação de compostos de carbetto de silício (SiC).

#### 5. CONCLUSÕES

Ambas as alíquotas (lavada ou não) apresentam concentrações de óxido de silício inferior aos valores desejáveis e teores de outros elementos indesejáveis acima do valor de referência para praticamente todos os usos da areia industrial, principalmente devido aos altos valores de alumínio e ferro que juntos somam quase 2% das amostras.

Todavia a caracterização física, mais precisamente a descrição de forma e mineral, indica que estes elementos indesejáveis não são constituintes do grão de quartzo, mas são oriundos de grãos de minerais acessórios, normalmente possuindo granulação de silte grosso a silte fino. Isso significa que técnicas de limpeza e classificação de areia (beneficiamento) mais adequadas, como a lavagem via hidrociclone por exemplo, podem reduzir os teores desses óxidos indesejáveis, aproximando os teores a limites aceitos para as diferentes aplicações discutidas nesse relatório.

Dentre os usos avaliados, o único realmente descartado nesta avaliação prévia é o para construção de filtros, uma vez que a granulação da areia observada nas amostras é muito fina para este uso em específico. Para os demais usos há a necessidade de adequação

granulométrica da areia para as diversas aplicações, sendo necessário o uso de moinhos de cerâmica para a aplicação na formulação de tintas e borrachas e plásticos, por exemplo. A caracterização física também mostrou que há um filme de hidróxido de ferro em até 9% dos grãos de quartzo, sendo indicativo de possível necessidade de ataque químico para a limpeza do minério de areia.

## 6. RECOMENDAÇÕES

---

Considerando o conhecimento prévio deste depósito, recomenda-se uma campanha de amostragem em toda a área dentro do depósito, e não apenas na cava existente, a fim de verificar a homogeneidade do material.

Sugere-se que o material coletado seja dividido sempre em duas alíquotas, a primeira como material natural e a segunda como material lavado via hidrociclone. Assim pode-se obter tanto o mapeamento dos teores de sílica do depósito quanto os teores dos contaminantes.

Caso os teores dos contaminantes não atinjam os limites de referência, mesmo com a lavagem via hidrociclone, recomenda-se que sejam feitos ensaios de limpeza via ataque químico tanto a quente em digestor, quanto a frio, para definir o custo de processamento do material.

Finalmente, recomenda-se que a água a ser utilizada no tratamento do minério seja analisada a fim de garantir que a mesma não venha a ser um possível foco de contaminação do minério (ferro total na água).

Curitiba, 04 de abril de 2016.

---

Geól. Nilton Cezar Canteri Strada (CREA-PR 97.030-D)





## ALPES LABORATÓRIO DE PESQUISAS E ENSAIOS FÍSICOS DE SOLOS

Rua Emílio de Almeida Torres, 672 - Campina do Siqueira

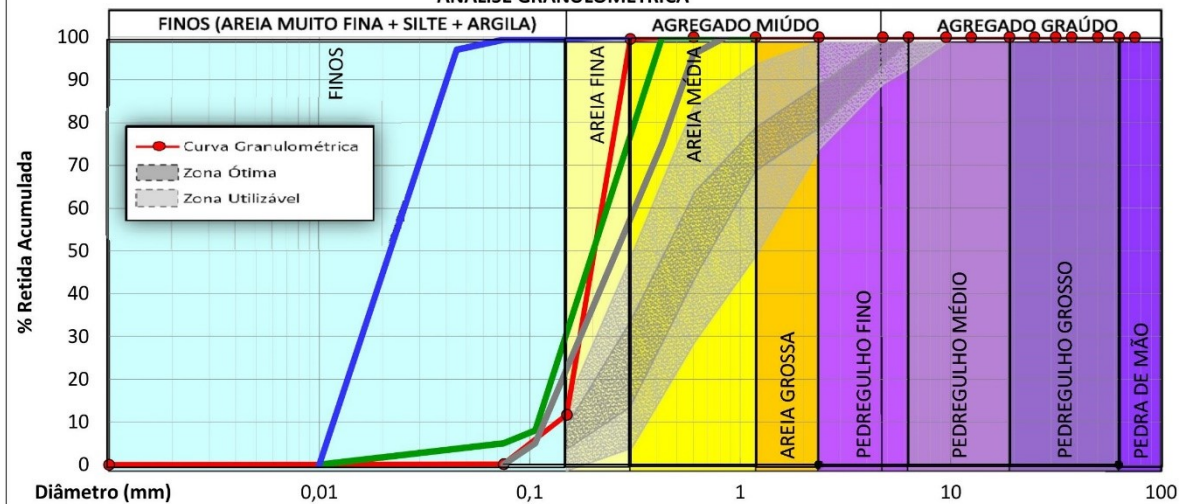
CEP: 80.740-160 - Curitiba/PR - Tel: (41) 3274-1955

alpeslaboratorio@gmail.com



DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA NBR NM 248/2003							Massa (g)	765,8			
Peneiras		Granulometria				CLASSIFICAÇÃO ABNT NBR 6502/1995					
Polegadas (mesh)	Milímetros (mm)	Massa Retid.(g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passado (%)	CLASSES GRANULOMÉTRICAS	PASSANTE	RETIDO			
GRAÚDO	3	75,0	0	0,00	0,00	0,00	GRAÚDO	PEDRA DE MÃO	100	63	
	2 1/2	63,0	0	0,00	0,00	0,00		PEDREGULHO GROSSO	63	19	
	2	50,0	0	0,00	0,00	0,00		PEDREGULHO MÉDIO	19	6,3	
	1 1/2	37,5	0	0,00	0,00	0,00	MIÚDO	PEDREGULHO FINO	6,3	2,36	
	1 1/4	31,5	0	0,00	0,00	0,00		AREIA GROSSA	2,36	1,18	
	1	25,0	0	0,00	0,00	0,00		AREIA MÉDIA	1,18	0,3	
	MIÚDO	3/4	19,0	0	0,00	0,00	0,00	FINOS	AREIA FINA	0,3	0,15
		1/2	12,5	0	0,00	0,00	0,00		AREIA MUITO FINA	0,15	0,075
		3/8	9,5	0	0,00	0,00	0,00	ESPECIFICAÇÃO FIBRA DE VIDRO			
1/4		6,3	0	0,00	0,00	0,00	Granulometria malha	Granulometria mm	Acumulado retido (%)		
n°4		4,75	0	0,00	0,00	0,00	n°60	0,25	0,01		
n°8		2,36	0	0,00	0,00	0,00	n°200	0,075	0,6		
n°16		1,18	0	0,00	0,00	0,00	n°325	0,045	3,0 min.		
n°30		0,6	0	0,00	0,00	0,00	Observações: a linha em azul é a especificação da curva de granulometria da sílica para fibra de vidro; A linha em cinza corresponde a areia para vidro cristal; e o linha verde corresponde a areia para vidro plano. Para melhor esclarecimento, favor contacte-nos.				
n°50		0,3	3,2	0,42	0,42	0,00					
n°100	0,15	673	87,88	88,30	0,42						
n°200	0,075	88,6	11,57	99,87	88,30						
FUNDO		0,9	0,12	99,99	99,87						
TOTAL		765,7	99,99	100,00	0,01						
Diâmetro Máximo Característico				0,30 mm							
Módulo de Finura				0,89							

## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA



ESPECIFICAÇÃO PARA VIDRO PLANO					ESPECIFICAÇÃO VIDRO VASOS DE CRISTAL						
Granulometria malha	n°14	Granulometria mm	1,180	Acumulado Retido (%)	0,00	Granulometria malha	n°20	Granulometria mm	0,850	Acumulado Retido (%)	0,00
	n°20		0,850		0,01 máx.		n°30		0,600		4,00 máx.
	n°35		0,425		0,10 máx.		n°35		0,425		25,00 máx.
	n°150		0,106		92,00 min.		n°150		0,106		95,00 min.
	n°200		0,075		95,00 min.						

**ANEXO C - Certificado de Análise do Pó de Quartzo**


**Certificado de análise**


Data: 08/05/2020 11:54:59

Número do certificado: MJ-279550

Cliente:

Lote: 022200302506

Produto: Areia Quartzosa - Sílica Moída # 400 - E 25

Número da nota: 000534881

**Ensaio granulométrico**

Elemento	Descrição	Resultado	Unidade
# 400	Peneira Abertura 38µm	4,1200	%

**Outros Parâmetros**

Elemento	Descrição	Resultado	Unidade
UMIDADE	Teor de Água	0,0400	%
TEMPERATURA	Temperatura	26,0000	°C
PERDA AO FOGO	Perda Ao Fogo 1000°C	0,1700	%

**Teores Químicos**

Elemento	Descrição	Resultado	Unidade
TEOR DE Fe2O3 (-)	Elemento Químico	0,0500	<
TEOR DE Al2O3 (-)	Elemento Químico	0,5000	<
TEOR DE TiO2 (-)	Elemento Químico	0,0350	<
TEOR DE SiO2 (-)	Elemento Químico	99,0000	>

Código da especificação do cliente:

Observação:

Resultado: Aprovado

Mardo Jose Jesus Foquel

Responsável

**Este certificado é assinado eletronicamente.**

Estrada Analândia-Corumbataí S/N Km 5-Santo Antonio-13880000 ANALÂNDIA SP-BR/A

Tel.

**ANEXO D - Relatório de Ensaio de Cimento**



TIPO: CP V-ARI

## RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

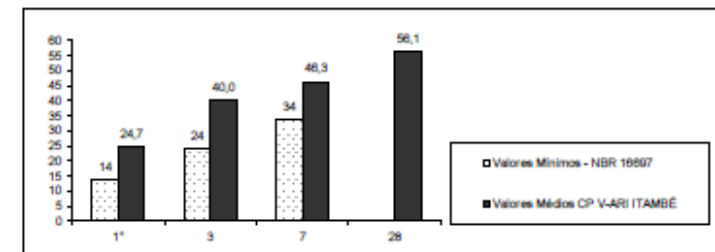
PERÍODO: set/20  
EMIÇÃO: 16/10/2020

Data	Químicos										Físicos										
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	min	min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
03	4,32	18,88	2,87	62,00	3,06	2,68	3,70	0,84	0,74	0,65	0,00	180	240	29,80	4,440	0,05	1,00	25,7	40,4	47,3	56,2
06	4,23	18,71	2,90	63,02	2,90	2,65	3,53	1,04	0,88	0,57	0,00	150	210	29,70	4,380	0,09	0,80	23,3	38,1	47,1	55,9
09	4,24	18,66	2,90	62,28	3,06	2,76	3,60	1,07	0,86	0,76	0,00	170	210	29,90	4,360	0,09	0,60	23,7	39,6	46,3	55,7
12	4,34	19,22	3,04	62,25	3,28	2,71	3,52	0,95	0,79	0,60	0,00	180	225	29,90	4,380	0,10	1,00	24,8	39,4	45,1	55,8
14	4,35	19,27	2,77	62,86	2,66	2,77	3,75	1,01	0,88	0,79	0,00	170	225	29,80	4,360	0,03	0,40	23,8	40,1	46,2	56,3
17	4,24	19,03	2,73	62,56	3,00	2,66	3,37	0,87	0,79	0,74	1,00	170	225	29,80	4,330	0,04	0,70	25,7	40,4	46,5	56,5
21	4,18	18,67	2,67	63,03	2,70	2,76	3,88	1,18	0,90	0,67	1,00	185	240	29,70	4,340	0,07	0,30	25,3	41,7	45,5	-
23	4,31	19,31	2,65	62,98	2,75	2,51	3,61	0,81	0,55	0,63	0,00	170	225	29,50	4,360	0,03	0,50	25,5	41,4	47,2	-
25	4,27	19,12	2,74	63,52	2,74	2,65	3,34	1,01	0,77	0,62	0,00	180	240	29,70	4,330	0,03	0,50	24,9	39,3	45,6	-
29	4,30	19,31	2,77	62,69	2,81	2,68	3,85	0,93	1,01	0,63	0,00	190	255	29,70	4,350	0,09	0,40	23,9	39,6	46,4	-
<b>Média</b>	<b>4,28</b>	<b>19,02</b>	<b>2,80</b>	<b>62,72</b>	<b>2,90</b>	<b>2,68</b>	<b>3,62</b>	<b>0,97</b>	<b>0,82</b>	<b>0,67</b>	<b>0,20</b>	<b>175</b>	<b>230</b>	<b>29,8</b>	<b>4,363</b>	<b>0,06</b>	<b>0,62</b>	<b>24,7</b>	<b>40,0</b>	<b>46,3</b>	<b>56,1</b>
<b>Sd</b>	<b>0,05</b>	<b>0,27</b>	<b>0,12</b>	<b>0,46</b>	<b>0,20</b>	<b>0,08</b>	<b>0,18</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,07</b>	<b>0,42</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>0,1</b>	<b>32</b>	<b>0,03</b>	<b>0,25</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>
<b>Min</b>	<b>4,18</b>	<b>18,66</b>	<b>2,65</b>	<b>62,00</b>	<b>2,66</b>	<b>2,51</b>	<b>3,34</b>	<b>0,81</b>	<b>0,55</b>	<b>0,57</b>	<b>0,00</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>29,5</b>	<b>4,330</b>	<b>0,03</b>	<b>0,30</b>	<b>23,3</b>	<b>38,1</b>	<b>45,1</b>	<b>55,7</b>
<b>Max</b>	<b>4,35</b>	<b>19,31</b>	<b>3,04</b>	<b>63,52</b>	<b>3,28</b>	<b>2,77</b>	<b>3,88</b>	<b>1,18</b>	<b>1,01</b>	<b>0,79</b>	<b>1,00</b>	<b>190</b>	<b>255</b>	<b>29,9</b>	<b>4,440</b>	<b>0,10</b>	<b>1,00</b>	<b>25,7</b>	<b>41,7</b>	<b>47,3</b>	<b>56,5</b>

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 16697, a qual não estabelece valor mínimo.

A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,09 g/cm<sup>3</sup> (NBR 16605).

As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.





**APÊNDICE A - Parâmetros do Ensaio de Empacotamento Úmido**

Tabela 54 - Parâmetros de saída para os teores de sílica de 10 e 15%

Materiais em massa	Teor de sílica =10%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Água (a/a)	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Cimento (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
Sílica (g)	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
Aditivo (g)	36,96	36,96	36,96	36,96	36,96	36,96
Água (g)	158,40	184,80	211,20	237,60	264,00	290,40
Massa Total (g)	1515,36	1541,76	1568,16	1594,56	1620,96	1647,36
Material + Recipiente (g)	1640,58	1650,50	1641,06	1626,18	1611,14	1596,39
Massa Recipiente (g)	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25
Massa Material (g)	922,33	932,25	922,81	907,93	892,89	878,14
Água adicionada (g)	158,40	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40

Materiais em massa	Teor de sílica =15%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Água (a/a)	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Cimento (g)	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00
Sílica (g)	165,00	165,00	165,00	165,00	165,00	165,00
Aditivo (g)	35,42	35,42	35,42	35,42	35,42	35,42
Água (g)	151,80	177,10	202,40	227,70	253,00	278,30
Massa Total (g)	1452,22	1477,52	1502,82	1528,12	1553,42	1578,72
Material + Recipiente (g)	1634,53	1644,10	1634,80	1624,47	1606,09	1589,62
Massa Recipiente (g)	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25
Massa Material (g)	916,28	925,85	916,55	906,22	887,84	871,37
Água adicionada (g)	151,80	25,30	25,30	25,30	25,30	25,30

Materiais em volume	Teor de sílica =10%					
	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66
Água (a/a) em volume	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66
Cimento (cm <sup>3</sup> )	388,35	388,35	388,35	388,35	388,35	388,35
Razão vol. Cimento	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Sílica (g)	54,05	54,05	54,05	54,05	54,05	54,05
Razão vol. Sílica	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Aditivo (cm <sup>3</sup> )	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75
Água (cm <sup>3</sup> )	158,40	184,80	211,20	237,60	264,00	290,40

Materiais em volume	Teor de sílica =15%					
	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65
Água (a/a) em volume	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65
Cimento (cm <sup>3</sup> )	355,99	355,99	355,99	355,99	355,99	355,99
Razão vol. Cimento	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Sílica (g)	74,32	74,32	74,32	74,32	74,32	74,32
Razão vol. Sílica	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Aditivo (cm <sup>3</sup> )	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
Água (cm <sup>3</sup> )	151,80	177,10	202,40	227,70	253,00	278,30

Parâmetros de saída	Teor de sílica =10%					
	276,00	274,08	266,62	257,88	249,38	241,24
Volume material cimentício (Vc) - cm <sup>3</sup>	276,00	274,08	266,62	257,88	249,38	241,24
Concentração de sólidos (ø)	0,7012	0,6963	0,6774	0,6552	0,6336	0,6129
Volume de vazios (µ)	0,4261	0,4361	0,4762	0,5263	0,5783	0,6316
Volume de água (Vw)	98,8211	114,4868	127,2841	138,4978	148,8150	158,3531
Excesso de água (µw)	-0,068	-0,018	0,001	0,011	0,018	0,025
Superfície específica (A <sub>CM</sub> ) - m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	6,3371E+06	6,3371E+06	6,3371E+06	6,3371E+06	6,3371E+06	6,3371E+06
Espessura do filme de água (WFT) - µm	-0,0107352	-0,0028997	0,0001823	0,0016988	0,0029075	0,0039200

Parâmetros de saída	Teor de sílica =15%					
	278,29	276,27	268,78	261,24	251,68	242,96
Volume material cimentício (Vc) - cm <sup>3</sup>	278,29	276,27	268,78	261,24	251,68	242,96
Concentração de sólidos (ø)	0,7070	0,7019	0,6829	0,6637	0,6394	0,6173
Volume de vazios (µ)	0,4143	0,4247	0,4644	0,5066	0,5639	0,6200
Volume de água (Vw)	98,1729	113,7009	126,4207	138,2369	147,9733	157,1323
Excesso de água (µw)	-0,062	-0,013	0,006	0,023	0,024	0,027
Superfície específica (A <sub>CM</sub> ) - m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	8,4007E+06	8,4007E+06	8,4007E+06	8,4007E+06	8,4007E+06	8,4007E+06
Espessura do filme de água (WFT) - µm	-0,0073289	-0,0015653	0,0007072	0,0026790	0,0028623	0,0031810

Fonte: Autoria própria

Tabela 55 - Parâmetros de saída para os teores de sílica de 20 e 25%

Materiais em massa	Teor de sílica =20%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Água (a/a)	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Cimento (g)	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00
Sílica (g)	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00
Aditivo (g)	43,56	43,56	43,56	43,56	43,56	43,56
Água (g)	158,40	184,80	211,20	237,60	264,00	290,40
Massa Total (g)	1521,96	1548,36	1574,76	1601,16	1627,56	1653,96
Material + Recipiente (g)	1625,90	1636,88	1617,87	1608,31	1591,68	1576,48
Massa Recipiente (g)	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25
Massa Material (g)	907,65	918,63	899,62	890,06	873,43	858,23
Água adicionada (g)	158,40	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40

Materiais em massa	Teor de sílica =25%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Água (a/a)	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Cimento (g)	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
Sílica (g)	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
Aditivo (g)	41,25	41,25	41,25	41,25	41,25	41,25
Água (g)	150,00	175,00	200,00	225,00	250,00	275,00
Massa Total (g)	1441,25	1466,25	1491,25	1516,25	1541,25	1566,25
Material + Recipiente (g)	1631,01	1620,74	1607,48	1601,22	1584,83	1572,49
Massa Recipiente (g)	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25
Massa Material (g)	912,76	902,49	889,23	882,97	866,58	854,24
Água adicionada (g)	150,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00

Materiais em volume	Teor de sílica =20%					
	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58	0,64
Água (a/a) em volume	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58	0,64
Cimento (cm <sup>3</sup> )	355,99	355,99	355,99	355,99	355,99	355,99
Razão vol. Cimento	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
Sílica (g)	99,10	99,10	99,10	99,10	99,10	99,10
Razão vol. Sílica	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Aditivo (cm <sup>3</sup> )	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78	39,78
Água (cm <sup>3</sup> )	158,40	184,80	211,20	237,60	264,00	290,40

Materiais em volume	Teor de sílica =25%					
	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,63
Água (a/a) em volume	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,63
Cimento (cm <sup>3</sup> )	323,62	323,62	323,62	323,62	323,62	323,62
Razão vol. Cimento	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Sílica (g)	112,61	112,61	112,61	112,61	112,61	112,61
Razão vol. Sílica	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Aditivo (cm <sup>3</sup> )	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67	37,67
Água (cm <sup>3</sup> )	150,00	175,00	200,00	225,00	250,00	275,00

Parâmetros de saída	Teor de sílica =20%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Volume material cimentício (Vc) - cm <sup>3</sup>	279,40	277,81	267,38	260,05	250,94	242,53
Concentração de sólidos (ø)	0,7098	0,7058	0,6793	0,6607	0,6375	0,6162
Volume de vazios (µ)	0,4088	0,4168	0,4721	0,5136	0,5685	0,6229
Volume de água (Vw)	97,2482	112,8142	124,0855	135,7719	145,5717	154,7628
Excesso de água (µw)	-0,061	-0,011	-0,008	0,009	0,012	0,015
Superfície específica (A <sub>CM</sub> ) - m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,0240E+07	1,0240E+07	1,0240E+07	1,0240E+07	1,0240E+07	1,0240E+07
Espessura do filme de água (WFT) - µm	-0,0059267	-0,0010444	-0,0007815	0,0008344	0,0011324	0,0014865

Parâmetros de saída	Teor de sílica =25%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Volume material cimentício (Vc) - cm <sup>3</sup>	284,41	276,28	267,53	261,14	252,02	244,36
Concentração de sólidos (ø)	0,7226	0,7019	0,6797	0,6635	0,6403	0,6208
Volume de vazios (µ)	0,3839	0,4246	0,4712	0,5072	0,5618	0,6107
Volume de água (Vw)	97,7957	110,8321	122,6524	134,6903	144,4300	154,0433
Excesso de água (µw)	-0,040	-0,023	-0,013	0,009	0,011	0,020
Superfície específica (A <sub>CM</sub> ) - m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,1889E+07	1,1889E+07	1,1889E+07	1,1889E+07	1,1889E+07	1,1889E+07
Espessura do filme de água (WFT) - µm	-0,0033685	-0,0019751	-0,0010752	0,0007190	0,0009522	0,0016539

Fonte: Autoria própria

Tabela 56 - Parâmetros de saída para os teores de sílica de 30 e 35%

Materiais em massa	Teor de sílica =30%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Água (a/a)	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Cimento (g)	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
Sílica (g)	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Aditivo (g)	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40
Água (g)	156,00	182,00	208,00	234,00	260,00	286,00
Massa Total (g)	1505,40	1531,40	1557,40	1583,40	1609,40	1635,40
Material + Recipiente (g)	1607,90	1603,50	1592,76	1579,05	1573,45	1560,47
Massa Recipiente (g)	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25
Massa Material (g)	889,65	885,25	874,51	860,80	855,20	842,22
Água adicionada (g)	156,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00

Materiais em massa	Teor de sílica =35%					
	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Água (a/a)	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
Cimento (g)	850,00	850,00	850,00	850,00	850,00	850,00
Sílica (g)	297,50	297,50	297,50	297,50	297,50	297,50
Aditivo (g)	47,05	47,05	47,05	47,05	47,05	47,05
Água (g)	137,70	160,65	183,60	206,55	229,50	252,45
Massa Total (g)	1332,25	1355,20	1378,15	1401,10	1424,05	1447,00
Material + Recipiente (g)	1589,69	1598,29	1593,32	1579,33	1568,18	1553,86
Massa Recipiente (g)	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25	718,25
Massa Material (g)	871,44	880,04	875,07	861,08	849,93	835,61
Água adicionada (g)	137,70	22,95	22,95	22,95	22,95	22,95

Materiais em volume	Teor de sílica =30%					
	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,62
Água (a/a) em volume	0,34	0,40	0,45	0,51	0,57	0,62
Cimento (cm <sup>3</sup> )	323,62	323,62	323,62	323,62	323,62	323,62
Razão vol. Cimento	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
Sílica (g)	135,14	135,14	135,14	135,14	135,14	135,14
Razão vol. Sílica	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Aditivo (cm <sup>3</sup> )	45,11	45,11	45,11	45,11	45,11	45,11
Água (cm <sup>3</sup> )	156,00	182,00	208,00	234,00	260,00	286,00

Materiais em volume	Teor de sílica =35%					
	0,34	0,39	0,45	0,50	0,56	0,62
Água (a/a) em volume	0,34	0,39	0,45	0,50	0,56	0,62
Cimento (cm <sup>3</sup> )	275,08	275,08	275,08	275,08	275,08	275,08
Razão vol. Cimento	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Sílica (g)	134,01	134,01	134,01	134,01	134,01	134,01
Razão vol. Sílica	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Aditivo (cm <sup>3</sup> )	42,97	42,97	42,97	42,97	42,97	42,97
Água (cm <sup>3</sup> )	137,70	160,65	183,60	206,55	229,50	252,45

Parâmetros de saída	Teor de sílica =30%					
	280,31	274,03	266,04	257,43	251,49	243,62
Volume material cimentício (Vc) - cm <sup>3</sup>	280,31	274,03	266,04	257,43	251,49	243,62
Concentração de sólidos (ø)	0,7122	0,6962	0,6759	0,6540	0,6390	0,6189
Volume de vazios (µ)	0,4041	0,4363	0,4795	0,5289	0,5650	0,6157
Volume de água (Vw)	95,3196	108,7149	120,6221	131,3085	142,5333	151,8757
Excesso de água (µw)	-0,064	-0,040	-0,026	-0,019	0,002	0,008
Superfície específica (A <sub>CM</sub> ) - m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,3376E+07	1,3376E+07	1,3376E+07	1,3376E+07	1,3376E+07	1,3376E+07
Espessura do filme de água (WFT) - µm	-0,0047921	-0,0029606	-0,0019494	-0,0014113	0,0001272	0,0005809

Parâmetros de saída	Teor de sílica =35%					
	277,39	275,21	268,94	260,15	252,50	244,18
Volume material cimentício (Vc) - cm <sup>3</sup>	277,39	275,21	268,94	260,15	252,50	244,18
Concentração de sólidos (ø)	0,7047	0,6992	0,6833	0,6610	0,6415	0,6204
Volume de vazios (µ)	0,4190	0,4302	0,4635	0,5130	0,5588	0,6119
Volume de água (Vw)	93,3686	108,0751	120,6993	131,3512	141,6550	150,6838
Excesso de água (µw)	-0,082	-0,037	-0,015	-0,008	0,002	0,005
Superfície específica (A <sub>CM</sub> ) - m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,4724E+07	1,4724E+07	1,4724E+07	1,4724E+07	1,4724E+07	1,4724E+07
Espessura do filme de água (WFT) - µm	-0,0055935	-0,0025456	-0,0010009	-0,0005473	0,0001503	0,0003515

Fonte: Autoria própria

**APÊNDICE B** - Experimento Piloto para a Determinação do Coeficiente de Distribuição

Conforme citado no item 4.2.3 deste documento, o experimento piloto foi executado com o objetivo determinar o coeficiente de distribuição ( $q$ ) necessário para o estabelecimento da curva granulométrica ideal segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado. Para tanto, os passos descritos de 3.4 a 3.6 foram replicados considerando-se valores de  $q$  iguais a 0,22; 0,37 e 0,52.

No subitem a seguir estão apresentados todos os parâmetros necessários para a determinação dos traços de UHPC empregados neste experimento, e na sequência, a execução do experimento laboratorial.

Foram escolhidos para o desenvolvimento do experimento piloto os traços que contém 25% de sílica. Este de sílica, previamente definido no item 4.2.1, foi estabelecido por se tratar daquele que resultou na maior densidade de empacotamento (Tabela 13) dentre os teores analisados.

#### B.1 – DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS DE UHPC PARA OS DIFERENTES VALORES DE COEFICIENTE DE DISTRIBUIÇÃO

O conjunto de Tabelas 58 a 62 apresenta o resultado da aplicação da metodologia de cálculo descrita nos itens 3.4, 3.5 e 3.6 e que leva à determinação dos traços para o coeficiente de distribuição de 0,22.

Na Tabela 57 tem-se a composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado para  $q=0,22$ .

**Tabela 57 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado para  $q=0,22$**

<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>% Passante</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
9,5	100,0%	0,0%	0,0%
6,3	100,0%	0,0%	0,0%
4,8	100,0%	0,0%	0,0%
2,4	83,7%	16,3%	16,3%
1,2	69,7%	14,0%	30,3%
0,6	57,7%	12,0%	42,3%
0,3	47,3%	10,3%	52,7%
0,15	38,5%	8,9%	61,5%
0,075	30,9%	7,6%	69,1%
0,045	25,9%	4,9%	74,1%
0,020	19,2%	6,7%	80,8%
0,010	14,3%	4,9%	85,7%
0,005	10,1%	4,2%	89,9%
0,002	5,5%	4,6%	94,5%
0,001	2,5%	2,9%	97,5%
0,0005 (fundo)	0,0%	2,5%	100,0%
	<b>TOTAL</b>	<b>100,0%</b>	<b>---</b>
		<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF = 2,03</b>

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 58 contém a análise matricial para o coeficiente de distribuição de 0,22. Os resultados indicam que a porcentagem de areia natural na composição da curva ideal ( $\varepsilon_1$ ) é de 24%, a porcentagem de areia artificial ( $\varepsilon_2$ ) é de 51% e a porcentagem de pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ ) representa 25% do total.

Tabela 58 - Análise matricial para  $q=0,22$ 

	Material granular	Ax+Bx = E			· (ε1*G1 + ε2*G2 + ε3*G3 = E1)			
	Peneira (mm)	G1	G2	G3	E1	Erro^2	ATA*x=AtE	
# PENEIRAS	25	0,0000	0,0000	0,0000				
	19	0,0000	0,0000	0,0000				
	12,5	0,0000	0,0000	0,0000				
	9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	ε1 =	0,24
	6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	ε2 =	0,51
	4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000	0,0000	ε3 =	0,25
	2,4	0,0017	0,3197	0,0000	0,1631	0,0000	Média do Erro =	0,0027
	1,2	0,0030	0,6301	0,0000	0,3032	0,0003	Soma do Erro =	0,0405
	0,6	0,0170	0,7808	0,0000	0,4234	0,0005	Variação do Erro =	0,000009
	0,3	0,1598	0,8587	0,0000	0,5267	0,0027		
	0,15	0,7151	0,8981	0,0000	0,6153	0,0002		
	0,075	0,7151	0,8981	0,0000	0,6914	0,0038		
	0,045	0,7151	0,8981	0,0863	0,7405	0,0080		
	0,020	0,7151	0,8981	0,4304	0,8080	0,0050		
	0,010	0,7151	0,8981	0,7010	0,8569	0,0027		
	0,005	0,7151	0,8981	0,8651	0,8988	0,0028		
	0,002	0,7151	0,8981	0,9760	0,9453	0,0052		
	0,001	0,7151	0,8981	0,9998	0,9747	0,0091		
	0,0005 Fundo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000		

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 59 tem-se a composição granulométrica resultante do modelo matricial para  $q=0,22$ .



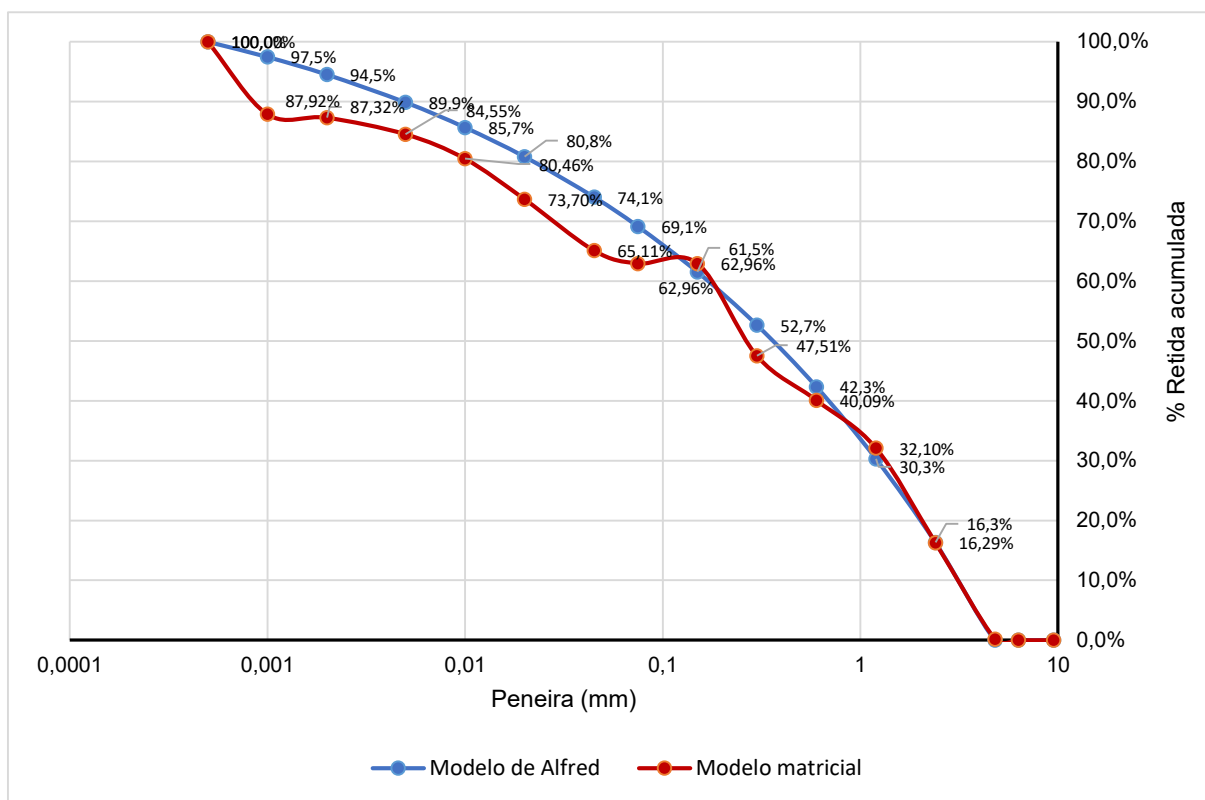
Tabela 59 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial para  $q=0,22$ 

Abertura nominal da malha da peneira (mm)	G1	G2	G3	% Retido acumulado
	Areia natural ( $\epsilon_1$ )	Areia artificial ( $\epsilon_2$ )	Pó de quartzo ( $\epsilon_3$ )	
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
12,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,26%
2,4	0,0017	0,3197	0,0000	21,11%
1,2	0,0030	0,6301	0,0000	41,60%
0,6	0,0170	0,7808	0,0000	51,80%
0,3	0,1598	0,8587	0,0000	59,64%
0,15	0,7151	0,8981	0,0000	72,76%
0,075	0,7151	0,8981	0,0000	72,76%
0,045	0,7151	0,8981	0,0863	74,06%
0,020	0,7151	0,8981	0,4304	79,27%
0,010	0,7151	0,8981	0,7010	83,36%
0,005	0,7151	0,8981	0,8651	85,84%
0,002	0,7151	0,8981	0,9760	87,52%
0,001	0,7151	0,8981	0,9998	87,88%
0,0005 Fundo	1,0000	1,0000	1,0000	100,00%
			<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF = 1,99</b>

Fonte: Autoria própria

As curvas granulométricas originadas pelo método de Andreasen e Andersen modificado e pelo modelo matricial para  $q=0,22$  estão representadas na Figura 63.

**Figura 63 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para  $q=0,22$**



**Fonte: Autoria própria**

O resultado do Índice de Desvio de Empacotamento entre as duas curvas é de 60,06.

Na Tabela 60 estão listados os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para  $q=0,22$ .

**Tabela 60 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para  $q=0,22$**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\varphi$ (areia natural)	0,556818182
$\varphi_2$ (areia artificial)	0,625429553
$r_1$ (areia natural)	0,32271
$r_2$ (areia artificial)	0,67729
$k_d$	0,96923
$x$	1,42880
$k_s$	0,80703
$\alpha_t$	0,74338

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 61 contém os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura  $q=0,22$ .

**Tabela 61 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para  $q=0,22$**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\varphi$ (pó de quartzo)	0,348473282
$\alpha_m$ (mistura)	0,604722305
$r_3$ (pó de quartzo)	0,24967
$r_m$ (mistura)	0,75033
$k_{dm}$	0,99792
$x_m$	1,46081
$k_{sm}$	0,81338
$\alpha_{tm}$	0,64137
$V_p$ mín	0,35827

**Fonte: Autoria própria**

Por fim, na Tabela 62 estão contidos o consumo dos materiais componentes do UHPC para o teor de 25% de sílica e  $q=0,22$

**Tabela 62 - Consumo dos materiais componentes do UHPC para 25% de sílica e  $q=0,22$** 

Parâmetro	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					Traço Unitário em Massa Seca				
	0%	20%	40%	60%	80%	0%	20%	40%	60%	80%
<b>Volume adicional de pasta</b>										
<b>Traço</b>	TR-20.0	TR-20.20	TR-20.40	TR-20.60	TR-20.80	TR-20.0	TR-20.20	TR-20.40	TR-20.60	TR-20.80
Cimento	521,8	626,2	730,5	834,9	939,3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Sílica	130,5	156,5	182,6	208,7	234,8	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
Pó de quartzo	419,5	372,6	325,7	278,8	231,9	0,804	0,595	0,446	0,334	0,247
Areia artificial	948,5	842,4	736,3	630,3	524,2	1,818	1,345	1,008	0,755	0,558
Areia natural	410,0	364,1	318,3	272,4	226,6	0,786	0,582	0,436	0,326	0,241
Água	130,5	156,5	182,6	208,7	234,8	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
areia/cimento	--	--	--	--	--	2,603	1,927	1,444	1,081	0,799
Teor de pasta (massa)	--	--	--	--	--	31%	38%	46%	54%	63%
Volume de pasta	--	--	--	--	--	36%	43%	50%	57%	65%

**Fonte: Autoria própria**

Nas Tabelas 63 a 68 são apresentados os resultados que levam à determinação do conjunto de traços para o coeficiente de distribuição de 0,37.

A Tabela 63 contém a distribuição granulométrica obtida segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado para  $q=0,37$ .

**Tabela 63 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado**

<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>% Passante</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
9,5	100,0%	0,0%	0,0%
6,3	100,0%	0,0%	0,0%
4,8	100,0%	0,0%	0,0%
2,4	76,6%	23,4%	23,4%
1,2	58,5%	18,1%	41,5%
0,6	44,5%	14,0%	55,5%
0,3	33,6%	10,8%	66,4%
0,15	25,2%	8,4%	74,8%
0,075	18,7%	6,5%	81,3%
0,045	14,9%	3,8%	85,1%
0,020	10,1%	4,8%	89,9%
0,010	7,1%	3,1%	92,9%
0,005	4,7%	2,4%	95,3%
0,002	2,3%	2,3%	97,7%
0,001	1,0%	1,3%	99,0%
0,0005 (fundo)	0,0%	1,0%	100,0%
	<b>TOTAL</b>	<b>100,0%</b>	<b>---</b>
	<b>Módulo de Finura</b>		<b>MF = 2,62</b>

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 64 contém a análise matricial para o coeficiente de distribuição de 0,37. A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que a porcentagem de areia natural na composição da curva ideal ( $\varepsilon_1$ ) é de 19%, a porcentagem de areia artificial ( $\varepsilon_2$ ) representa a 66% e a porcentagem de pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ ) corresponde a 15%.

Tabela 64 - Análise matricial para  $q=0,37$ 

	Material granular	Ax+Bx = E			-( $\epsilon_1 \cdot G_1 + \epsilon_2 \cdot G_2 + \epsilon_3 \cdot G_3 = E_1$ )		AtA*x=AtE
	Peneira (mm)	G1	G2	G3	E1	Erro^2	
# PENEIRAS	25	0,0000	0,0000	0,0000			
	19	0,0000	0,0000	0,0000			
	12,5	0,0000	0,0000	0,0000			
	9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_1 = 0,19$
	6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_2 = 0,66$
	4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000	0,0000	$\epsilon_3 = 0,15$
	2,4	0,0017	0,3197	0,0000	0,2341	0,0005	Média do Erro = 0,0052
	1,2	0,0030	0,6301	0,0000	0,4152	0,0000	Soma do Erro = 0,0783
	0,6	0,0170	0,7808	0,0000	0,5554	0,0014	Varição do Erro = 0,000026
	0,3	0,1598	0,8587	0,0000	0,6638	0,0046	
	0,15	0,7151	0,8981	0,0000	0,7477	0,0004	
	0,075	0,7151	0,8981	0,0000	0,8127	0,0072	
	0,045	0,7151	0,8981	0,0863	0,8509	0,0122	
	0,020	0,7151	0,8981	0,4304	0,8986	0,0112	
	0,010	0,7151	0,8981	0,7010	0,9294	0,0092	
	0,005	0,7151	0,8981	0,8651	0,9532	0,0090	
	0,002	0,7151	0,8981	0,9760	0,9767	0,0103	
	0,001	0,7151	0,8981	0,9998	0,9898	0,0123	
	0,0005 Fundo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 65 está apresentada a composição granulométrica resultante do modelo matricial para  $q=0,37$ .

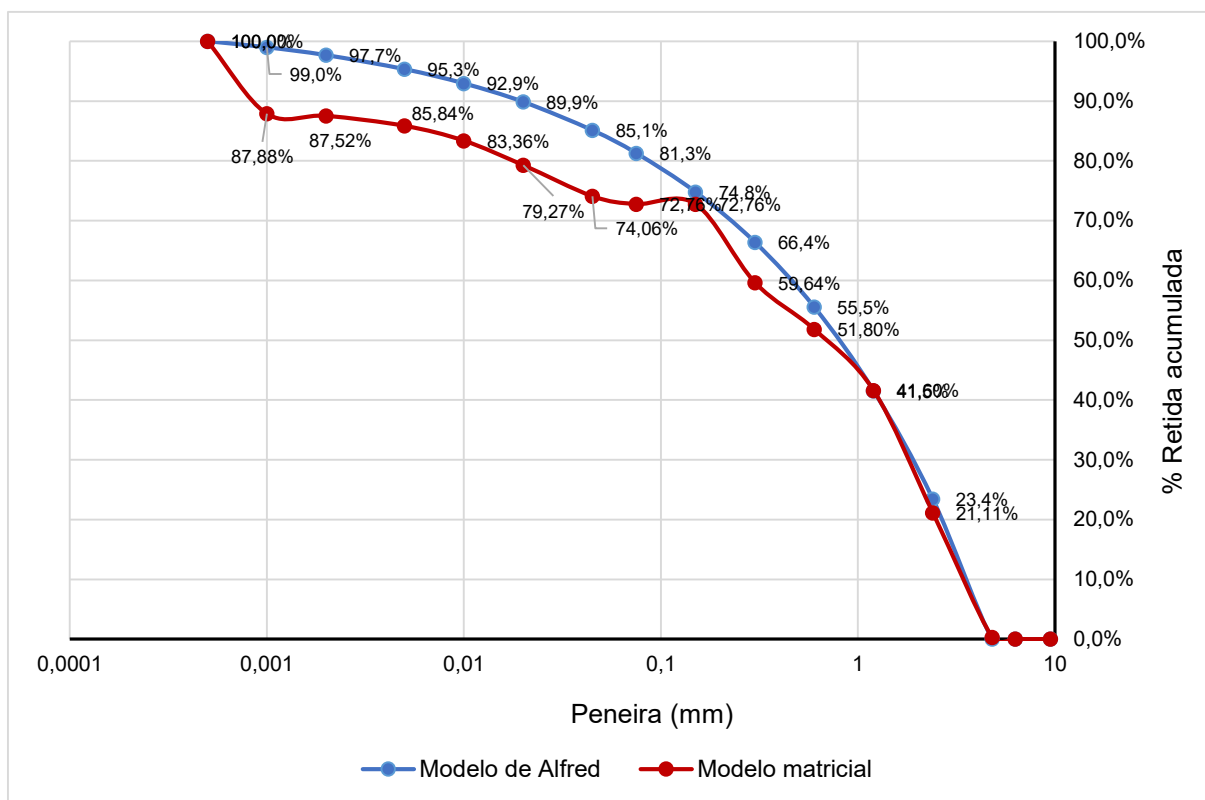
Tabela 65 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial

Abertura nominal da malha da peneira (mm)	G1	G2	G3	% Retido acumulado
	Areia natural ( $\epsilon_1$ )	Areia artificial ( $\epsilon_2$ )	Pó de quartzo ( $\epsilon_3$ )	
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
12,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,26%
2,4	0,0017	0,3197	0,0000	21,11%
1,2	0,0030	0,6301	0,0000	41,60%
0,6	0,0170	0,7808	0,0000	51,80%
0,3	0,1598	0,8587	0,0000	59,64%
0,15	0,7151	0,8981	0,0000	72,76%
0,075	0,7151	0,8981	0,0000	72,76%
0,045	0,7151	0,8981	0,0863	74,06%
0,020	0,7151	0,8981	0,4304	79,27%
0,010	0,7151	0,8981	0,7010	83,36%
0,005	0,7151	0,8981	0,8651	85,84%
0,002	0,7151	0,8981	0,9760	87,52%
0,001	0,7151	0,8981	0,9998	87,88%
0,0005	1,0000	1,0000	1,0000	100,00%
			<b>Módulo de finura</b>	<b>MF = 2,47</b>

Fonte: Autoria própria

Por sua vez, as curvas granulométricas determinadas a partir do método de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para  $q=0,37$  estão representadas na Figura 64.

**Figura 64 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial**



**Fonte: Autoria própria**

O Índice de Desvio de Empacotamento entre as duas curvas é de 85,16.

Na Tabela 66 são apresentados os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para  $q=0,37$ .



**Tabela 66 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira e segunda classes para  $q=0,37$**

Parâmetro	Valor
$\varphi_1$ (areia natural)	0,556818182
$\varphi_2$ (areia artificial)	0,625429553
$r_1$ (areia natural)	0,22324
$r_2$ (areia artificial)	0,77676
$k_d$	0,96923
$x$	0,86181
$k_s$	0,62987
$\alpha_t$	0,73590

Fonte: Autoria própria

Já a Tabela 67 contempla os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura  $q=0,37$ .

**Tabela 67 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para  $q=0,37$**

Parâmetro	Valor
$\varphi_3$ (pó de quartzo)	0,348473282
$\alpha_m$ (mistura)	0,611240116
$r_3$ (pó de quartzo)	0,15125
$r_m$ (mistura)	0,84875
$k_{dm}$	0,99792
$x_m$	0,80406
$k_{sm}$	0,60197
$\alpha_{tm}$	0,66741
$V_p \text{ mín}$	0,33259

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 68 estão contemplados os consumos dos materiais correspondentes ao teor de 25% sílica originados a partir do coeficiente de distribuição de 0,37.

**Tabela 68 - Consumo dos materiais componentes do UHPC para 25% de sílica e  $q=0,37$**

Parâmetro	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					Traço Unitário em Massa Seca				
	0%	20%	40%	60%	80%	0%	20%	40%	60%	80%
<b>Volume adicional de pasta</b>										
<b>Traço</b>	TR-25.0	TR-25.20	TR-25.40	TR-25.60	TR-25.80	TR-25.0	TR-25.20	TR-25.40	TR-25.60	TR-25.80
Cimento	483,9	580,7	677,5	774,3	871,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Sílica	121,0	145,2	169,4	193,6	217,8	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
Pó de quartzo	264,5	238,1	211,8	185,4	159,0	0,547	0,410	0,313	0,239	0,183
Areia artificial	1280,4	1152,8	1025,2	897,6	770,0	2,646	1,985	1,513	1,159	0,884
Areia natural	333,8	300,6	267,3	234,0	200,7	0,690	0,518	0,395	0,302	0,230
Água	121,0	145,2	169,4	193,6	217,8	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
areia/cimento	--	--	--	--	--	3,336	2,503	1,908	1,461	1,114
Teor de pasta (massa)	--	--	--	--	--	28%	35%	42%	49%	57%
Volume de pasta	--	--	--	--	--	33%	40%	47%	53%	60%

**Fonte: Autoria própria**

Por fim, nas Tabelas 69 a 74 têm-se os resultados que levam à determinação do conjunto de traços para o coeficiente de distribuição de 0,52.

A Tabela 69 apresenta a composição granulométrica determinada a partir do modelo de Andreasen e Andersen modificado para  $q=0,52$ .

**Tabela 69 - Composição granulométrica segundo o modelo de Andreasen e Andersen modificado para  $q=0,52$**

<b>Abertura nominal da malha da peneira (mm)</b>	<b>% Passante</b>	<b>% Retido individual</b>	<b>% Retido acumulado</b>
9,5	100,0%	0,0%	0,0%
6,3	100,0%	0,0%	0,0%
4,8	100,0%	0,0%	0,0%
2,4	69,5%	30,5%	30,5%
1,2	48,2%	21,3%	51,8%
0,6	33,3%	14,8%	66,7%
0,3	23,0%	10,4%	77,0%
0,15	15,8%	7,2%	84,2%
0,075	10,7%	5,0%	89,3%
0,045	8,0%	2,7%	92,0%
0,020	5,0%	3,1%	95,0%
0,010	3,2%	1,8%	96,8%
0,005	2,0%	1,2%	98,0%
0,002	0,9%	1,1%	99,1%
0,001	0,4%	0,5%	99,6%
0,0005 (fundo)	0,0%	0,4%	100,0%
	TOTAL	100,0%	---
	<b>Módulo de finura</b>		<b>MF = 3,10</b>

Fonte: Autoria própria

Por sua vez, a Tabela 70 apresenta os resultados da análise matricial para o coeficiente de distribuição de 0,52.

Tabela 70 - Análise matricial para coeficiente de distribuição de 0,52

	Material granular	Ax+Bx = E			· (ε <sub>1</sub> *G <sub>1</sub> + ε <sub>2</sub> *G <sub>2</sub> + ε <sub>3</sub> *G <sub>3</sub> = E1)			
	Peneira (mm)	G1	G2	G3	E1	Erro <sup>2</sup>	AtA*x=AtE	
# PENEIRAS	25	0,0000	0,0000	0,0000				
	19	0,0000	0,0000	0,0000				
	12,5	0,0000	0,0000	0,0000				
	9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	ε <sub>1</sub> =	0,12
	6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	ε <sub>2</sub> =	0,79
	4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,0000	0,0000	ε <sub>3</sub> =	0,09
	2,4	0,0017	0,3197	0,0000	0,3052	0,0026	Média do Erro =	0,0062
	1,2	0,0030	0,6301	0,0000	0,5181	0,0003	Soma do Erro =	0,0931
	0,6	0,0170	0,7808	0,0000	0,6665	0,0019	Variação do Erro =	0,000030
	0,3	0,1598	0,8587	0,0000	0,7700	0,0047		
	0,15	0,7151	0,8981	0,0000	0,8422	0,0018		
	0,075	0,7151	0,8981	0,0000	0,8926	0,0087		
	0,045	0,7151	0,8981	0,0863	0,9196	0,0128		
	0,020	0,7151	0,8981	0,4304	0,9502	0,0130		
	0,010	0,7151	0,8981	0,7010	0,9679	0,0118		
	0,005	0,7151	0,8981	0,8651	0,9802	0,0114		
	0,002	0,7151	0,8981	0,9760	0,9909	0,0117		
	0,001	0,7151	0,8981	0,9998	0,9963	0,0124		
	0,0005 Fundo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000		

Fonte: Autoria própria

A análise dos dados indica que porcentagem de areia natural na composição da curva ideal ( $\varepsilon_1$ ) é de 12%, enquanto a porcentagem de areia artificial ( $\varepsilon_2$ ) é de 79% e a porcentagem de pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ ) representa 9%.

Na Tabela 71 tem-se a composição granulométrica obtida por meio do modelo matricial para  $q=0,52$ .

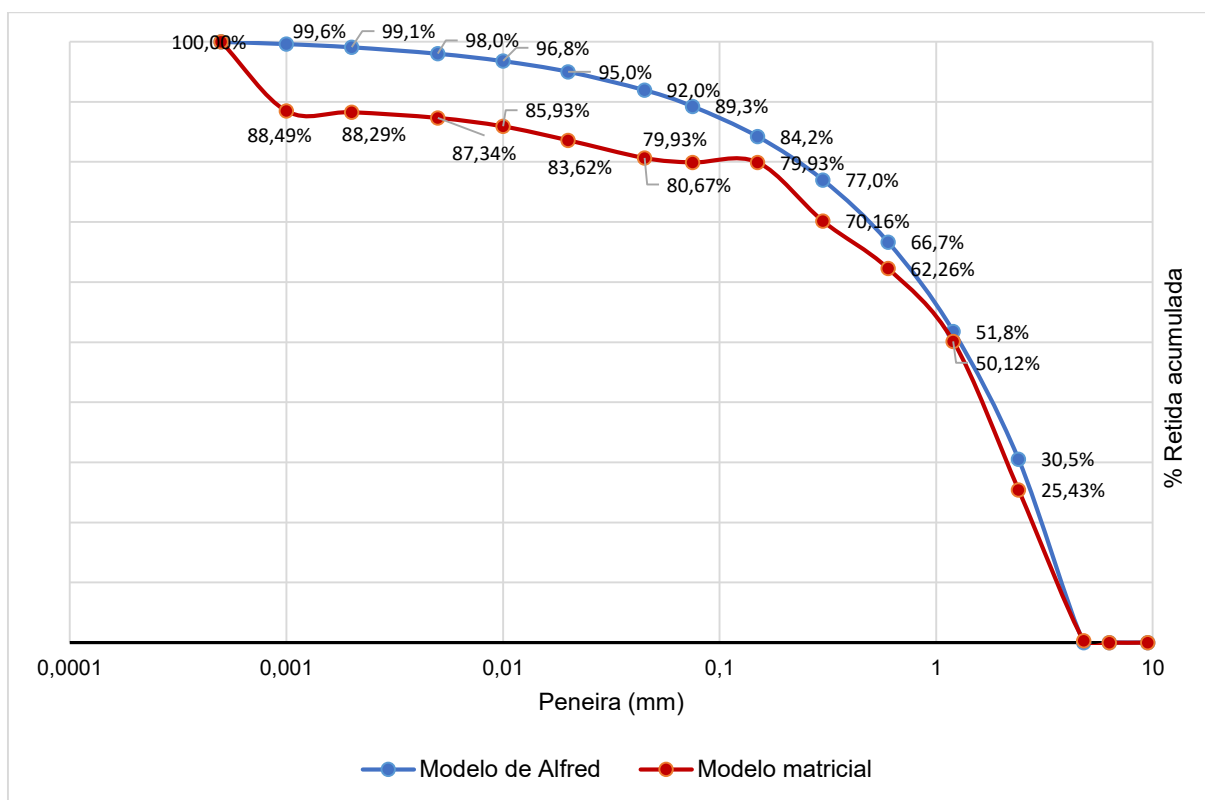
Tabela 71 - Composição granulométrica resultante do modelo matricial para  $q=0,52$ 

Abertura nominal da malha da peneira (mm)	G1	G2	G3	% Retido acumulado
	Areia natural ( $\varepsilon_1$ )	Areia artificial ( $\varepsilon_2$ )	Pó de quartzo ( $\varepsilon_3$ )	
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
12,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
9,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
6,3	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%
4,8	0,0000	0,0040	0,0000	0,26%
2,4	0,0017	0,3197	0,0000	21,11
1,2	0,0030	0,6301	0,0000	41,60
0,6	0,0170	0,7808	0,0000	51,80
0,3	0,1598	0,8587	0,0000	59,64
0,15	0,7151	0,8981	0,0000	72,76
0,075	0,7151	0,8981	0,0000	72,76
0,045	0,7151	0,8981	0,0863	74,06
0,020	0,7151	0,8981	0,4304	79,27
0,010	0,7151	0,8981	0,7010	83,36
0,005	0,7151	0,8981	0,8651	85,84
0,002	0,7151	0,8981	0,9760	87,52
0,001	0,7151	0,8981	0,9998	87,88
0,0005	1,0000	1,0000	1,0000	100,00
			<b>Módulo de finura</b>	<b>MF = 2,88</b>

Fonte: Autoria própria

As curvas granulométricas determinadas a partir do método de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para  $q=0,52$  são apresentadas na Figura 65. O Índice de Desvio de Empacotamento entre estas duas curvas é de 100,76.

**Figura 65 - Curvas granulométricas de Andreasen e Andersen modificado e do modelo matricial para  $q=0,52$**



**Fonte: Autoria própria**

Na Tabela 72 estão resumidos os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para  $q=0,52$ .

**Tabela 72 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da primeira classe para  $q=0,52$**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\varphi_1$ (areia natural)	0,556818182
$\varphi_2$ (areia artificial)	0,625429553
$r_1$ (areia natural)	0,13078
$r_2$ (areia artificial)	0,86922
$k_d$	0,96923
$x$	0,45117
$k_s$	0,36839
$\alpha_t$	0,69503

**Fonte: Autoria própria**

Na Tabela 73, por sua vez, são apresentados os parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para  $q=0,52$ .

**Tabela 73 - Parâmetros matemáticos do empacotamento granular da mistura para  $q=0,52$**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$\varphi_3$ (pó de quartzo)	0,348473282
$\alpha_m$ (mistura)	0,617189223
$r_3$ (pó de quartzo)	0,08565
$r_m$ (mistura)	0,91435
$k_{dm}$	0,99792
$x_m$	0,43337
$k_{sm}$	0,35386
$\alpha_{tm}$	0,65488
$V_p mín$	0,34512

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 74 contempla o consumo dos materiais correspondentes aos traços calculados para 25% de sílica e  $q=0,52$ .

**Tabela 74 - Consumo dos materiais componentes do UHPC para 25% de sílica e  $q=0,52$**

Parâmetro	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					Traço Unitário em Massa Seca				
	0%	20%	40%	60%	80%	0%	20%	40%	60%	80%
<b>Volume adicional de pasta</b>										
<b>Traço</b>	TR-20.0	TR-20.20	TR-20.40	TR-20.60	TR-20.80	TR-20.0	TR-20.20	TR-20.40	TR-20.60	TR-20.80
Cimento	502,2	602,6	703,0	803,5	903,9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Sílica	125,5	150,6	175,8	200,9	226,0	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
Pó de quartzo	147,0	131,5	116,0	100,5	85,0	0,293	0,218	0,165	0,125	0,094
Areia artificial	1514,6	1355,0	1195,3	1035,7	876,1	3,016	2,249	1,700	1,289	0,969
Areia natural	206,7	184,9	163,2	141,4	119,6	0,412	0,307	0,232	0,176	0,132
Água	125,5	150,6	175,8	200,9	226,0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
areia/cimento	--	--	--	--	--	3,428	2,555	1,932	1,465	1,102
Teor de pasta (massa)	--	--	--	--	--	29%	36%	43%	51%	59%
Volume de pasta	--	--	--	--	--	35%	41%	48%	55%	62%

**Fonte: Autoria própria**

## B.2 – EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO LABORATORIAL

Após a determinação do conjunto de traços para os três coeficientes de distribuição ( $q$ ), foram escolhidos para o experimento piloto aqueles com volume adicional de pasta de 60%, por resultarem em traços com consumos de cimento e pó de quartzo próximos dos valores médios identificados nos parâmetros correlatos (Quadro 1). A relação água/aglomerante de 0,20 foi previamente definida no ensaio de empacotamento úmido (item 4.2.2).

Os traços selecionados para o experimento piloto estão apresentados na Tabela 75.



**Tabela 75 - Traços selecionados para o experimento piloto**

<b>TUMS</b>	<b><math>q = 0,22</math></b>	<b><math>q = 0,37</math></b>	<b><math>q = 0,52</math></b>
$C_{cp}$ (kg/m <sup>3</sup> )	835	774	803
Cimento	1,000	1,000	1,000
Sílica	0,250	0,250	0,250
Pó de quartzo	0,334	0,239	0,125
Areia natural	0,326	0,302	0,176
Areia artificial	0,755	1,159	1,289
Água	0,20	0,20	0,20
Aditivo	0,005	0,005	0,005

**Fonte: Autoria própria**

O teor de aditivo foi estabelecido de forma experimental. Segundo Rohden *et al.* (2020), diferentemente dos concretos convencionais e de alto desempenho, o ponto de saturação do aditivo para o UHPC não é diretamente usado para definir o máximo teor de aditivo a ser empregado na mistura. Neste caso, o critério adotado neste caso passa a ser a trabalhabilidade. Isto posto, para a definição do teor ideal de aditivo, escolheu-se a dosagem o traço com  $q = 0,22$  por resultar no maior consumo de cimento dentre os três coeficientes de distribuição.

Ao se misturar todos os materiais para o traço de  $q = 0,22$  observou-se que o teor de aditivo de 3,3% previamente estabelecido no ensaio de empacotamento úmido para o teor de 25% de sílica (Tabela 13) não foi suficiente a obtenção da consistência mínima necessária para a moldagem dos exemplares, conforme pode-se observar na Figura 66. Este fenômeno é consequência da elevada superfície específica dos materiais que compõem o traço de UHPC, sobretudo do pó de quartzo e, também, do fato de que o formato alongado dos grãos e a textura superficial da areia artificial prejudicam a fluidez da mistura.

**Figura 66 - Traço piloto para  $q = 0,22$  e  $a/agl = 0,20$**



**Fonte: Autoria própria**

Portanto, seguindo os procedimentos adotados por Castro *et al.* (2009), o teor ideal de aditivo foi definido como aquele sendo aquele que possibilitou atingir fluidez similar a de um concreto autoadensável, considerando-se como limite superior o teor de 5% sob a massa de materiais cimentícios estabelecido pela NBR 11768 (ABNT, 2019). É importante destacar que o teor máximo recomendado pelo fabricante foi definido para concretos com características autoadensáveis e não para concretos de ultra-alto desempenho, justificando assim necessidade da extensão deste limite dado o elevado teor de finos que o compõe.

Com o teor de 5% sobre a massa de materiais cimentícios e relação água/aglomerante de 0,20, o UHPC atingiu a consistência auto adensável sem apresentar qualquer sinal de incorporação significativa de ar, exsudação ou segregação, ainda que a densidade da areia artificial de basalto seja elevada, como pode-se comprovar por meio da

Figura 67. O mesmo teor de aditivo foi adotado para os outros dois traços que apresentaram condições similares de fluidez.

**Figura 67 - Traço piloto para  $q = 0,22$  e  $a/agl = 0,20$  com o teor de aditivo ajustado**



**Fonte: Autoria própria**

Os três traços de UHPC foram dosados em ambiente laboratorial com temperatura controlada em  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Seis corpos de prova foram moldados para cada traço, respeitando-se as etapas descritas em 4.3. Os resultados de resistência à compressão obtidos estão descritos em 4.2.3.1.

**APÊNDICE C - Resultados Individuais de Resistência à Compressão  
do Experimento Piloto**

**Tabela 76 - Resultados individuais de resistência à compressão do experimento piloto**

Coefficiente de distribuição	Idade (Dias)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	CP6 (MPa)
0,22	7	165,3	157,5	114,9	154,8	184,2	140,6
0,37	7	134,5	141,6	175,5	156,8	167,4	162,3
0,52	7	148,9	144,9	173,1	173,3	172,9	155,3

**Fonte: Autoria própria**

**APÊNDICE D - Resultados Individuais de Resistência à Compressão**

**Tabela 77 - Resultados individuais de resistência à compressão**

Traço (TR-S.V)	Idade (Dias)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	CP6 (MPa)	CP7 (MPa)	CP8 (MPa)	CP9 (MPa)	CP10 (MPa)	CP11 (MPa)	CP12 (MPa)
TR-15.0	28	75,6	76,0	131,1	140,9	132,3	144,0						
TR-15.20	28	150,9	145,7	134,1	153,2	143,7	163,2						
TR-15.40	28	115,4	87,3	152,2	146,8	143,2	152,0						
TR-15.60	28	124,6	141,5	151,2	149,4	143,6	76,5						
TR-15.80	28	118,0	127,6	157,6	153,7	158,0	155,0						
TR-20.0	28	186,5	178,6	182,3	176,3	165,2	180,2						
TR-20.20	28	146,7	174,5	165,3	180,6	159,6	170,4						
TR-20.40	28	174,7	171,8	169,3	165,9	170,4	164,5	144,7	165,0	158,5	160,6		
TR-20.60	28	173,1	149,7	160,3	144,9	143,8	138,2						
TR-20.80	28	143,0	135,0	118,2	58,9	131,0	82,0						
TR-25.0	28	199,1	177,5	170,2	188,0	189,0	192,7						
TR-25.20	28	154,4	177,0	146,6	169,8	174,9	159,1						
TR-25.40	28	161,4	174,6	155,4	174,1	146,2	127,9						
TR-25.60	28	153,4	144,1	140,3	182,1	163,2	155,5						
TR-25.80	28	129,1	163,3	161,3	159,2	159,4	166,1						
TR-30.0	28	173,0	153,1	197,5	162,8	161,3	185,4						
TR-30.20	28	158,7	159,4	169,6	178,5	166,1	186,7						
TR-30.40	28	139,4	161,8	171,4	145,5	176,6	174,3						
TR-30.60	28	136,8	142,2	136,7	137,3	148,1	162,9						
TR-30.80	28	134,9	146,4	153,1	154,5	159,3	129,8						
TR-CU 25.20	28	119,9	110,8	112,5	98,2	120,4	122	87,8	104,1	118,7	113	110,8	124,5
TR-CU 25.20	91	143,2	143,2	138,5	149,5	149,0	105,2	147,1	120,7	90,6	157,4	141,8	153,2
TR-F 25.0	28	89,6	56,2	61,2	61,5	59,3	68,4						
TR-F 25.20	28	123,9	115,4	128,3	120,6	94,4	111,4						
TR-F 25.40	28	173,2	174,9	164,8	132,9	162,2	173,9						
TR-F 25.60	28	180,6	172,1	172,1	176,7	177,6	168,4						
TR-F 25.80	28	158,4	138,1	151,0	138,2	173,6	135,4						
TR-15.0	91	162,7	164,5	160,3	139,2	178,8	158,4						
TR-15.20	91	175,5	142	155,4	161,0	165,2	162,2						
TR-15.40	91	164,7	143,1	97,3	162,5	154,0	165,9						
TR-15.60	91	130,8	145,7	140,2	130,9	123,8	159,7						
TR-15.80	91	117,3	153,4	151,7	146,6	166,2	165,3						
TR-EV 25.0	28	132,0	134,5	107,7	118,9	121,5	129,4						
TR-EV 25.20	28	114,6	118,8	84,8	129,3	84,6	73,5						
TR-EV 25.40	28	75,6	124,1	108,5	128,2	112,4	123,3						
TR-EV 25.60	28	92,3	75,3	94,7	126,5	123,9	107,4						
TR-EV 25.80	28	83,8	100,8	86,2	108,9	44,1							

Legenda: **TR** - traço, **S** - teor de sílica, **V** - volume adicional de pasta, **CU** - cura úmida, **F** - fibras metálicas, **EV** - experimento de validação

**Fonte: Autoria própria**