

**A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA AREIA ARTIFICIALMENTE  
BRITADA NAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO DO CONCRETO**

**CARLA CRISTINA NASCIMENTO SANTOS**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA AREIA BRITADA NAS  
PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO DO CONCRETO**

**CARLA CRISTINA NASCIMENTO SANTOS**

**ORIENTADOR: ANTÔNIO ALBERTO NEPOMUCENO, Dr.Ing (ENC-UnB)**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.TD 004A/08**

**BRASÍLIA/DF, 05 de Dezembro de 2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA AREIA  
ARTIFICIALMENTE BRITADA NAS PROPRIEDADES DO ESTADO  
FRESCO DO CONCRETO**

**ENG. MSc. CARLA CRISTINA NASCIMENTO SANTOS**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

---

PROFº ANTÔNIO ALBERTO NEPOMUCENO, Dr.Ing (ENC-UnB)  
(ORIENTADOR)

---

PROFº ELTON BAUER, DSc (ENC-UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

PROFª NEUSA MARIA BEZERRA MOTA. DSc. (ENC-UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

PROFº ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO, PhD (COPPE)

---

PROFº CLAUDIO SBRIGHI NETO, PhD (FAAP/IPT)

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 de Novembro de 2008

## DEDICATÓRIA

*À Painho, Mainha, Tiane e Hilton pelo amor, confiança e torcida indispensáveis.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antônio Alberto Nepomuceno, pela orientação, pela paciência e apoio.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil que ampliaram meu conhecimento através das disciplinas ministradas, pelo desafio, proporcionando, ainda que indiretamente, forças para a finalização desse trabalho.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da Universidade de Brasília, onde foram realizados os ensaios.

Aos técnicos e amigos Severino e Xavier por todos esses anos de convivência agradável, torcida e colaboração.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, CIMENTO PLANALTO e FROYLAN AGREGADOS pelo fornecimento das areias.

Às minhas amigas e companheiras de Serenata “Jakitas” Érika, Juliana, Patrícia e Raquel, pela compreensão, apoio e amizade.

Às minhas companheiras e amigas Simone e Simoneli pela amizade, paz e momentos de descontração.

À Andrea pela amizade e força.

Aos colegas de curso e amigos Pollyana, Rosanna, Maura, Waléria e Gustavo pela amizade e pelo apoio.

Dispensando sincera gratidão a Paulinha pela amizade incondicional, por acreditar em mim em todos os momentos e discussões acerca do tema.

Ao meu namorado e amigo Hilton pelo amor, confiança, apoio, aconchego e por abrilhantar minha vida.

Aos meus pais, Luiz e Esmeralda e à minha irmãzinha Tiane cujo amor sem fronteiras e apoio foram essenciais no decorrer desses anos difíceis.

## RESUMO

O presente trabalho aborda o estudo das propriedades no estado fresco do concreto quando utilizadas areias britadas de diferentes naturezas petrográficas, enfatizando a investigação de quais características desses agregados miúdos exercem influência preponderante nessas propriedades. Foram usadas areias britadas de cinco naturezas petrográficas distintas e identificadas, em um primeiro momento, a influência dos aspectos de forma, textura e da própria natureza petrográfica nas propriedades do estado fresco (projeto experimental 1). Nas fases seguintes do programa experimental foram investigadas a influência da continuidade das curvas granulométricas das areias preparadas pela técnica do peneiramento, estando estas compostas com baixos e altos teores de partículas microfinas (projeto experimental 2 e projeto experimental 3, respectivamente). A partir dos resultados dos projetos experimentais 2 e 3, elaborou-se o projeto experimental 4 com o intuito de averiguar a mudança nas propriedades do concreto ao se usar um menor teor de material médio-fino (material passante da peneira 0.6 mm e retido na peneira 0.075 mm de diâmetro). Os concretos foram caracterizados através das propriedades reológicas viscosidade e tensão de escoamento pelo método do abatimento modificado, consistência pelos ensaios de abatimento e *k-slump*, teor de água exsudada com vibração, segregação/consistência pelo *k-slump* ou *flow gauge* e teor de ar incorporado pelo método pressométrico. Os resultados mostraram que a esfericidade dos grãos exerce maior influência nas propriedades do estado fresco do que o grau de arredondamento de cantos e arestas ou textura superficial. Em relação à mineralogia das areias, possivelmente a natureza petrográfica dos agregados miúdos também exerce influência significativa, já que parece haver uma maior fluidez das misturas quando estas possuem altos teores do mineral calcita, talvez devido às ligações epitáxicas entre os cristais de calcita e cimento ou devido à menor dureza deste mineral em relação aos demais. Não se observou, nesse trabalho, relação clara entre o grau de continuidade da curva granulométrica e as propriedades mensuradas, parecendo mais evidente a influência nessas últimas do teor de grãos de dimensões intermediárias presentes nas areias compostas. Em relação à influência das partículas microfinas, pôde-se constatar que, ao analisar-se a influência destas às curvas mais contínuas encontradas, percebeu-se que tais partículas aumentaram a coesão do sistema, resultando em concretos com altos valores de viscosidade, tensão de escoamento e consistência. No entanto, percebeu-se que tais partículas favoreceram lubrificação do sistema, diminuindo a resposta reológica e de consistência dos concretos, ao serem reduzidos os teores de grãos médio-finos das areias. Portanto, considerando-se esta última constatação, notou-se que é possível produzir concretos com altos teores de grãos microfinos, independente da magnitude das cargas de superfície destes e do tipo litológico da areia de britagem.

## ABSTRACT

This work reports on the properties of the fresh state of concrete when different petrographic types of crushed sand are used. It focuses on the characteristics of these aggregates which exert a dominant influence on the concrete properties. To reach the main goal of this work, five different lithological types of crushed sand were used, which have been identified. In a first approach, we have identified the influence of the aspects of shape, texture and the lithological type itself on the properties of the fresh state of concrete (experimental project 1). In the subsequent phases of the experimental procedure, the influence of the continuity of the grading of sand prepared by the technique of sieving was investigated, where the sands were composed of low and high levels of microfine-sized particulates (experimental project 2 and experimental project 3, respectively). From the results of experimental projects 2 and 3, an experimental project 4 was designed with the aim of investigating the change in the properties of concrete when a lower level of medium-fine material is used (material passing the 0,6 mm sieve and withholding a sieve of 0,075 mm diameter). The concretes were characterized by their rheological properties - viscosity and yield stress - using the modified slump test method, the consistency was obtained by slump assays and k-slump, the bleeding water content by vibration, segregation / consistency by k-slump or flow gauge, and the content of incorporated air by the pressiometric method. The results showed that the sphericity of grain exerts more influence on the properties of the fresh state than the degree of rounding of the edges or corners and surface texture. Concerning the mineralogy of sand, there seems to be a larger flow of mixtures when they have higher levels of the calcite mineral. There was no evidence, in this work, of a clear relationship between the degree of continuity in the grain-size curve and the measured properties, and it seems that the latter are more influenced by the content of grains of sand of intermediate dimensions. In the analysis of the role of microfine-sized particles added to the more continuous studied curves, it was observed that these particles increased the cohesion of the system, resulting in concretes with high values of viscosity, yield stress and consistency. However, it was observed that such particles had favored the lubrication of the system, reducing the rheological response and consistency of concrete as the content of medium-thin grains is reduced. Therefore, it was found that it is possible to produce concrete with high levels of micro-sized grains, regardless of the magnitude of their surface loads and the lithological type of crushed sand.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1– PRINCÍPIOS SOBRE REOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 – Fluido Viscoso Ideal ou Newtonian.....	8
2.1.2 - Fluidos não-newtonianos.....	10
2.1.2.1 - Fluidos não newtonianos independentes do tempo.....	11
2.1.2.2 - Fluidos não newtonianos dependentes do tempo.....	18
2.2 - ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS.....	19
2.3 - CARACTERÍSTICAS DA AREIA QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS CONCRETOS.....	25
2.3.1 - Adição de finos.....	26
2.3.2 – Distribuição Granulométrica.....	34
2.3.3 - Forma dos grãos das areias.....	37
2.4 AVANÇOS RECENTES RELACIONADOS À UTILIZAÇÃO DE AREIA BRITADA NOS CONCRETOS.....	42
<b>CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>52</b>
3.1– ESTUDO PILOTO.....	53
3.2 – DOSAGEM DOS CONCRETOS – MÉTODO DE FAURY.....	63
3.3 – ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL-PROJETOS EXPERIMENTAIS.....	70
3.3.1 – Projeto experimental 1.....	71
3.3.2 – Projeto experimental 2.....	72
3.3.3 – Projeto experimental 3.....	74
3.3.4 – Projeto experimental 4.....	75
3.4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	76
3.4.1 - Materiais utilizados na pesquisa.....	77
3.4.1.1 – Caracterização do Cimento.....	77
3.4.1.2 – Caracterização dos agregados.....	79
3.4.2 – Procedimento de mistura dos materiais na produção dos concretos.....	85
3.4.3 – Definição da nomenclatura adotada.....	85
3.4.4 – Ensaio de abatimento do tronco de cone ou <i>slump test</i> .....	86
3.4.5 – Viscosidade e Tensão de Escoamento – Abatimento de tronco de cone Modificado.....	87
3.4.6 – Ensaio K-slump ou flow-gauge.....	88
3.4.7 – Ensaio de exsudação.....	90
3.4.8 – Teor de ar incorporado pelo método pressométrico.....	91
<b>CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>93</b>
4.1 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROJETO EXPERIMENTAL 1.....	93
4.1.1- Apresentação dos resultados.....	93
4.1.1.1 – Apresentação dos resultados de análise morfoscópica.....	93

4.1.1.2 – Apresentação dos resultados nos concretos.....	<b>99</b>
4.1.2 – Análise dos resultados – Projeto experimental 1.....	<b>102</b>
4.1.2.1 – Análise do grau de arredondamento, esfericidade e textura superficial das areias.....	<b>103</b>
4.1.2.2 – Influência dos aspectos morfoscópicos nas propriedades do estado fresco do concreto.....	<b>108</b>
4.1.2.2.1 – Influência das características de forma e textura na consistência dos concretos.....	<b>108</b>
4.1.2.2.2 – Influência das características morfoscópicas das areias nas propriedades do estado fresco dos concretos.....	<b>117</b>
4.1.2.2.3 – Avaliações complementares – Projeto Experimental 1.....	<b>126</b>
4.2 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROJETO EXPERIMENTAL 2.....	<b>135</b>
4.2.1- Apresentação dos resultados – Projeto experimental 2.....	<b>135</b>
4.2.1.1 – Apresentação dos resultados variáveis resposta.....	<b>135</b>
4.2.1.2 – Apresentação dos resultados nos concretos – Projeto experimental 2.....	<b>144</b>
4.2.2 – Análise dos Resultados – Projeto Experimental 2.....	<b>147</b>
4.2.2.1 – Influência do grau de continuidade nas propriedades do estado fresco dos concretos.....	<b>147</b>
4.2.2.1.1 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0,6 mm na tensão de escoamento.....	<b>148</b>
4.2.2.1.2 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm na viscosidade.....	<b>153</b>
4.2.2.1.3 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm no abatimento de tronco de cone.....	<b>157</b>
4.2.2.1.4 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm no <i>k-slump</i> 2.....	<b>162</b>
4.2.2.1.5 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm no <i>k-slump</i> 1.....	<b>166</b>
4.2.2.1.6 – Influência das faixas granulométricas no empacotamento granular nas propriedades reológicas.....	<b>170</b>
4.2.2.2 – Análise das variáveis resposta – Parâmetros de mistura.....	<b>178</b>
4.3 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROJETO EXPERIMENTAL 3 e 4.....	<b>182</b>
4.3.1- Apresentação dos resultados – Projetos experimentais 3 e 4.....	<b>182</b>
4.3.1.1 – Apresentação dos resultados nos agregados miúdos.....	<b>183</b>
4.3.1.2 – Apresentação dos resultados nos concretos – Projeto experimental 3.	<b>185</b>
4.3.2 – Análise dos Resultados – Projeto Experimental 3.....	<b>187</b>
4.3.2.1 – Análises dos resultados da areia CV – projeto experimental 3.....	<b>187</b>
4.3.2.2 – Análises dos resultados da areia SV – projeto experimental 3.....	<b>189</b>
4.3.2.3 – Análises dos resultados da areia GR – projeto experimental 3.....	<b>193</b>
4.3.2.4 – Análises dos resultados da areia MI – projeto experimental 3.....	<b>196</b>
4.3.2.5 – Análises dos resultados da areia CA – projeto experimental 3.....	<b>198</b>
4.3.3 – Análises dos resultados – projeto experimental 4.....	<b>200</b>
4.3.3.1 – Análise dos resultados – Areia SV.....	<b>201</b>
4.3.3.2 – Análise dos resultados – Areia MI.....	<b>203</b>
4.3.3.3 – Análise dos resultados – Areia GR.....	<b>205</b>
4.3.3.4 – Análise dos resultados – Areia CV.....	<b>207</b>
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....</b>	<b>212</b>

5.1 – Influência dos parâmetros de forma, texturais e da natureza petrográfica nas propriedades dos concretos no estado fresco – Projeto experimental 1.....	<b>212</b>
5.2 – Influência do grau de continuidade da curva granulométrica dos agregados nas propriedades do estado fresco – Projeto experimental 2.....	<b>212</b>
5.3 – Influência do aumento do teor de microfinos nas curvas granulométricas mais contínuas – Projeto experimental 3.....	<b>213</b>
5.4 – Influência da redução do material médio-fino nas propriedades do concreto – Projeto experimental 4.....	<b>213</b>
5.5 – Adequação dos ensaios aos objetivos propostos.....	<b>214</b>
5.6 – Aspectos gerais.....	<b>214</b>
5.7 – Sugestão para trabalhos futuros.....	<b>215</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>216</b>
<b>ANEXO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS DOS PROJETOS EXPERIMENTAIS 1, 2 E 3</b>	

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Esquema ilustrativo do experimento de Newton para a determinação da viscosidade de fluidos.....	9
<b>Figura 2.2</b> – Hipótese de Reynolds para a dilatância. Fonte: NAVARRO(1997).....	14
<b>Figura 2.3</b> – Comportamento bighamiano modificado de FERRARIS (1999).....	15
<b>Figura 2.4</b> - Comportamento da tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento considerando os diversos comportamentos de fluxo.....	17
<b>Figura 2.5</b> – Ilustração do fenômeno da tixotropia.....	18
<b>Figura 2.6</b> – Ilustração procedimento de ensaio do abatimento do tronco de cone modificado ( FERRARIS & DE LARRARD, 1998).....	24
<b>Figura 2.7</b> – Esquema da dupla camada elétrica que envolve a superfície da partícula.....	28
<b>Figura 2.8</b> – Configuração esquemática da dupla camada elétrica.....	29
<b>Figura 2.9</b> – Curvas que proporcionam otimização nos resultados de Abatimento do Tronco de Cone QUIROGA & FOWLER (2003).....	37
<b>Figura 2.10</b> – Carta de avaliação visual dos graus de esfericidade e arredondamento constante na NBR 7389 (1992).....	39
<b>Figura 2.11</b> - Carta visual de índice de arredondamento proposto por SHEPPARD apud SUGUIO(1980).....	40
<b>Figura 3.1</b> – Aspectos de forma das areias – Grupo I.....	56
<b>Figura 3.2</b> – Relação entre índice médio de arredondamento/textura e tensão de escoamento das argamassas do estudo preliminar 1 – Grupo I.....	57
<b>Figura 3.3</b> – Aspectos de forma das areias – Grupo II.....	58
<b>Figura 3.4</b> – Relação entre índice médio de arredondamento/textura e tensão de escoamento das argamassas do estudo preliminar 1 – Grupo II.....	59
<b>Figura 3.5</b> - Relação entre potencial zeta e tensão de escoamento – argamassas <b>grupo I</b> .....	59
<b>Figura 3.6</b> - Relação entre potencial zeta e tensão de escoamento – argamassas <b>grupo II</b> .....	61
<b>Figura 3.7</b> – Relação entre potencial zeta dos finos e volume total de água exsudada.....	61
<b>Figura 3.8</b> – Relação entre potencial zeta dos finos e volume total de água exsudada-grupo I.....	62
<b>Figura 3.9</b> – Relação entre potencial zeta dos finos e volume total de água exsudada-grupo II...	62
<b>Figura 3.10</b> – Curva de referência da areia britada.....	65
<b>Figura 3.11</b> – Curva de referência da areia rolada.....	65
<b>Figura 3.12</b> – Ajuste da areia de micaxisto à curva granulométrica de Faury.....	67
<b>Figura 3.13</b> – Ajuste da areia de natural à curva granulométrica de Faury.....	68
<b>Figura 3.14</b> – Ajuste da areia de dolomítico equidimensional à curva granulométrica de Faury.	69
<b>Figura 3.15</b> – Ajuste da areia de granítica à curva granulométrica de Faury.....	69
<b>Figura 3.16</b> – Ajuste da areia de natural à curva granulométrica de Faury.....	70
<b>Figura 3.17</b> – Variáveis do projeto experimental 1.....	72
<b>Figura 3.18</b> – Variáveis do projeto experimental 2.....	74
<b>Figura 3.19</b> – Variáveis do projeto experimental 3.....	75
<b>Figura 3.20</b> – Variáveis do projeto experimental 4.....	76
<b>Figura 3.21</b> – Distribuição granulométrica da brita 0 e brita 1.....	79
<b>Figura 3.22</b> – Curvas granulométricas originais dos agregados miúdos usados na pesquisa.....	80
<b>Figura 3.23</b> – Curva granulométrica referência para todas as areias – projeto experimental 1....	82
<b>Figura 3.24</b> – Curvas granulométricas do projeto experimental 2.....	83
<b>Figura 3.25</b> – Curvas granulométricas do projeto experimental 3.....	84
<b>Figura 3.26</b> - Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	87
<b>Figura 3.27</b> – Ensaio de tronco de cone modificado.....	88
<b>Figura 3.28</b> – Ensaio flow gauge. Penetrômetro graduado.....	89

<b>Figura 3.29</b> – Mesa vibratória e recipiente utilizados no ensaio de exsudação.....	90
<b>Figura 3.30</b> – Determinação do teor de ar incorporado pelo concreto.....	92
<b>Figura 4.1</b> – Fases encontradas na Difratometria de raio X – <b>Areia CA</b> .....	96
<b>Figura 4.2</b> – Fases encontradas na Difratometria de raio X – <b>Areia CV</b> .....	97
<b>Figura 4.3</b> – Fases encontradas na Difratometria de raio X – <b>Areia SV</b> .....	97
<b>Figura 4.4</b> – Fases encontradas na Difratometria de raio X – <b>Areia NA</b> .....	98
<b>Figura 4.5</b> – Fases encontradas na Difratometria de raio X – <b>Areia GR</b> .....	98
<b>Figura 4.6</b> – Fases encontradas na Difratometria de raio X – <b>Areia MI</b> .....	99
<b>Figura 4.7</b> – Resultados de abatimento – projeto experimental 1.....	101
<b>Figura 4.8</b> – Resultados de K-Slump Leitura 2 – <b>projeto experimental 1</b> .....	101
<b>Figura 4.9</b> – Resultados de k-slump 1 – <b>projeto experimental 1</b> .....	102
<b>Figura 4.10</b> – Resultados de teor de água exsudada – <b>projeto experimental 1</b> .....	102
<b>Figura 4.11</b> – Resultados de Índice de vazios com a <i>massa unitária estado compactado</i> – <b>projeto experimental 1</b> .....	102
<b>Figura 4.12</b> – Resultados de Índice de vazios com a <i>massa unitária estado solto</i> – <b>projeto experimental 1</b> .....	102
<b>Figura 4.13</b> – Relação entre os aspectos gerais de forma e consistência e segregação/consistência – <b>projeto experimental 1</b> .....	108
<b>Figura 4.14</b> – Relação entre os aspectos gerais de forma e teor de água exsudada e teor de ar incorporado – <b>projeto experimental 1</b> .....	110
<b>Figura 4.15</b> – Relação entre os aspectos gerais de forma e índice de vazios com massa unitária no estado solto (MS) e índice de vazios com massa unitária no estado compactado (MC) – <b>projeto experimental 1</b> .....	111
<b>Figura 4.16</b> – Relação entre esfericidade e consistência e segregação/consistência – <b>projeto experimental 1</b> .....	112
<b>Figura 4.17</b> – Relação entre esfericidade e teor de ar incorporado e teor de água exsudada– <b>projeto experimental 1</b> .....	113
<b>Figura 4.18</b> – Relação entre esfericidade e índice de vazios (MC) e índice de vazios (MS)– <b>projeto experimental 1</b> .....	113
<b>Figura 4.19</b> – Relação entre arredondamento e consistência e segregação/consistência– <b>projeto experimental 1</b> .....	114
<b>Figura 4.20</b> – Relação entre arredondamento e teor de ar incorporado e teor de água exsudada– <b>projeto experimental 1</b> .....	114
<b>Figura 4.21</b> – Relação entre arredondamento e índice de vazios (MC) e índice de vazios (MS)– <b>projeto experimental 1</b> .....	115
<b>Figura 4.22</b> – Relação entre textura superficial dos grãos e consistência e segregação/consistência– <b>projeto experimental 1</b> .....	115
<b>Figura 4.23</b> – Relação entre textura superficial dos grãos e teor de ar incorporado e teor de água exsudada– <b>projeto experimental 1</b> .....	116
<b>Figura 4.24</b> – Relação entre textura superficial dos grãos e índice de vazios MC e MS– <b>projeto experimental 1</b> .....	116
<b>Figura 4.25</b> – Correlação entre relação esfericidade-consistência e consistência/segregação grupos 1 e 2– <b>projeto experimental 1</b> .....	118
<b>Figura 4.26</b> – Correlação entre relação arredondamento-consistência e consistência/segregação grupos 1 e 2– <b>projeto experimental 1</b> .....	119
<b>Figura 4.27</b> – Correlação entre relação rugosidade-consistência e consistência/segregação grupos 1 e 2– <b>projeto experimental 1</b> .....	121
<b>Figura 4.28</b> – Correlação entre relação arredondamento - teor de água exsudada e teor de ar incorporado grupos 1 e 2– <b>projeto experimental 1</b> .....	122
<b>Figura 4.29</b> – Correlação entre relação esfericidade - teor de água exsudada e teor de ar incorporado grupos 1 e 2– <b>projeto experimental 1</b> .....	123
<b>Figura 4.30</b> – Correlação entre relação rugosidade - teor de água exsudada e teor de ar incorporado grupos 1 e 2– <b>projeto experimental 1</b> .....	124
<b>Figura 4.31</b> – Correlação entre teor de calcita (agregados grupo 2) e abatimento de tronco de cone, k-slump 2 e k-slump 1– <b>projeto experimental 1</b> .....	125
<b>Figura 4.32</b> – Correlação entre teor de calcita (agregados grupo 2) – teor de água exsudada e teor de ar incorporado – <b>projeto experimental 1</b> .....	126

<b>Figura 4.33</b> – Correlação entre esfericidade, grau de arredondamento e textura superficial – Índice de vazios no estado solto (MUS) – <b>projeto experimental 1</b> .....	127
<b>Figura 4.34</b> – Correlação entre esfericidade, grau de arredondamento e textura superficial – Índice de vazios no estado compactado (MUC) – <b>projeto experimental 1</b> .....	128
<b>Figura 4.35</b> – Correlação entre teor de água exsudada e teor de ar incorporado – Índice de vazios no estado solto (MUS) – <b>projeto experimental 1</b> .....	129
<b>Figura 4.36</b> – Correlação entre teor de água exsudada e teor de ar incorporado – Índice de vazios no estado compactado (MUC) – <b>projeto experimental 1</b> .....	130
<b>Figura 4.37</b> – Correlação entre consistência pelo abatimento e <i>k-slump 2</i> , segregação ( <i>k-slump1</i> ) – Índice de vazios no estado solto (MUS) – <b>projeto experimental 1</b> .....	131
<b>Figura 4.38</b> – Correlação entre consistência pelo abatimento e <i>k-slump 2</i> , segregação ( <i>k-slump1</i> ) – Índice de vazios no estado solto (MUC) – <b>projeto experimental 1</b> .....	133
<b>Figura 4.39</b> – Correlação entre segregação ( <i>k-slump 1</i> ) e teor de água exsudada – <b>projeto experimental 1</b> .....	134
<b>Figura 4.40</b> – Correlação entre medidas de consistência pelo <i>k-slump 2</i> e abatimento – <b>projeto experimental 1</b> .....	134
<b>Figura 4.41</b> – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia CV e curva de referência de Faury – <b>projeto experimental 2</b> .....	137
<b>Figura 4.42</b> – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia SV e curva de referência de Faury – <b>projeto experimental 2</b> .....	139
<b>Figura 4.43</b> – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia MI e curva de referência de Faury – <b>projeto experimental 2</b> .....	140
<b>Figura 4.44</b> – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia GR e curva de referência de Faury – <b>projeto experimental 2</b> .....	142
<b>Figura 4.45</b> – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia CA e curva de referência de Faury – <b>projeto experimental 2</b> .....	143
<b>Figura 4.46</b> – Correlação entre tensão de escoamento e grau de continuidade considerando as diversas areia e composições – Projeto experimental 2.....	148
<b>Figura 4.47</b> – Correlação entre tensão de escoamento e índice de vazios MS considerando as diversas areia e composições – Projeto experimental 2.....	150
<b>Figura 4.48</b> – Correlação entre tensão de escoamento e grãos passantes na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0.075 mm considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	151
<b>Figura 4.49</b> – Correlação entre viscosidade e grau de continuidade considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	153
<b>Figura 4.50</b> – Correlação entre viscosidade e índice de vazios MS considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	154
<b>Figura 4.51</b> – Correlação entre viscosidade e material passante na peneira 0.6 mm - retido peneira 0.075 mm considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	155
<b>Figura 4.52</b> – Correlação entre abatimento de tronco de cone e grau de continuidade, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	157
<b>Figura 4.53</b> – Correlação entre abatimento de tronco de cone e índice de vazios MS considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	159
<b>Figura 4.54</b> – Correlação entre abatimento de tronco de cone e material passante peneira 0.6mm – retido peneira 0.075 mm considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	161
<b>Figura 4.55</b> – Correlação entre <i>k-slump 2</i> de tronco de cone e grau de continuidade, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	163
<b>Figura 4.56</b> – Correlação entre <i>k-slump 2</i> índices de vazios, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	164
<b>Figura 4.57</b> – Correlação entre <i>k-slump 2</i> e material passante na peneira 0.6 mm – retido na peneira 0.075 mm, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	165
<b>Figura 4.58</b> – Correlação entre <i>k-slump 1</i> e grau de continuidade, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	167
<b>Figura 4.59</b> – Correlação entre <i>k-slump 1</i> e índice de vazios MS, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	168
<b>Figura 4.60</b> – Correlação entre <i>k-slump 1</i> e material passante peneira 0.6 mm – retido peneira 0.075 mm, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2.....	169
<b>Figura 4.61</b> – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições <b>areia CV</b> .....	171

<b>Figura 4.62</b> – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – areia CV...	172
<b>Figura 4.63</b> – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições <b>areia SV</b> .....	173
<b>Figura 4.64</b> – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – <b>areia SV</b> ...	173
<b>Figura 4.65</b> – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições – <b>areia GR</b> ..	174
<b>Figura 4.66</b> – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – <b>areia SV</b> ..	174
<b>Figura 4.67</b> – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições – <b>areia MI</b> ..	175
<b>Figura 4.68</b> – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – <b>areia MI</b> ..	176
<b>Figura 4.69</b> – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições – <b>areia CA</b> ..	176
<b>Figura 4.70</b> – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – <b>areia CA</b> ..	177
<b>Figura 4.71</b> – Respostas parâmetros de mistura e consistência pelo abatimento de tronco de cone – Projeto experimental 2.....	180
<b>Figura 4.72</b> – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.72 a) e tensão de escoamento (figura 4.72 b) versus teor de microfinos da areia CV– projeto experimental 3.....	187
<b>Figura 4.73</b> – Resultados de teor de água exsudada (figura 4.73 a) e <i>k-slump 1</i> (figura 4.73 b) versus teor de microfinos da areia CV– projeto experimental 3.....	188
<b>Figura 4.74</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.74 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.74 b) versus teor de microfinos da areia CV– projeto experimental 3.....	188
<b>Figura 4.75</b> – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.75 – a) e índices de vazios (figura 4.75 – b) e teor de microfinos da areia CV– <b>projeto experimental 3</b> .....	189
<b>Figura 4.76</b> – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.76 a) e tensão de escoamento (figura 4.76 b) versus teor de microfinos da areia SV– <b>projeto experimental 3</b> .....	190
<b>Figura 4.77</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.77 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.77 b) versus teor de microfinos da areia SV– <b>projeto experimental 3</b> .....	191
<b>Figura 4.78</b> – Resultados de teor de água exsudada (figura 4.78 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.78 b) versus teor de microfinos da areia SV – <b>projeto experimental 3</b> .....	191
<b>Figura 4.79</b> – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.79 – a) e índices de vazios (figura 4.79 – b) e teor de microfinos da areia SV – <b>projeto experimental 3</b> .....	192
<b>Figura 4.80</b> – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.80 a) e tensão de escoamento (figura 4.80 b) versus teor de microfinos da areia GR – <b>projeto experimental 3</b> .....	193
<b>Figura 4.81</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.82 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.82 b) versus teor de microfinos da areia GR – <b>projeto experimental 3</b> .....	194
<b>Figura 4.82</b> – Resultados de teor de água exsudada (figura 4.82 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.82 b) versus teor de microfinos da areia GR – <b>projeto experimental 3</b> .....	195
<b>Figura 4.83</b> – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.83 – a) e índices de vazios (figura 4.83 – b) e teor de microfinos da areia GR – <b>projeto experimental 3</b> .....	195
<b>Figura 4.84</b> – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.84-a) e tensão de escoamento (figura 4.84-b) versus teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 3</b> .....	196
<b>Figura 4.85</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.85 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.85 b) versus teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 3</b> .....	197
<b>Figura 4.86</b> – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.86 – a) e índices de vazios (figura 4.86 – b) e teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 3</b> .....	197
<b>Figura 4.87</b> – Correlação entre velocidade de fluxo (figura 4.87 – a) e tensão de escoamento (figura 4.87– b) e teor de microfinos da areia CA – <b>projeto experimental 3</b> .....	198
<b>Figura 4.88</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.88 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.88 b) versus teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 3</b> .....	199
<b>Figura 4.89</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.89 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.89 b) versus teor de microfinos da areia CA – <b>projeto experimental 3</b> .....	199
<b>Figura 4.90</b> – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.90 a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.90 b) versus teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 3</b> .....	200
<b>Figura 4.91</b> – Correlação entre viscosidade (figura 4.91 – a) e tensão de escoamento (figura 4.91 – b) e teor de microfinos da areia SV – <b>projeto experimental 4</b> .....	201
<b>Figura 4.92</b> – Correlação entre abatimento de tronco de cone (figura 4.92 – a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.92 – b) e teor de microfinos da areia SV – <b>projeto experimental 4</b> .....	202
<b>Figura 4.93</b> – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.93 – a) e <i>k-slump 1</i> (figura 4.93 – b) e teor de microfinos da areia SV – <b>projeto experimental 4</b> .....	202
<b>Figura 4.94</b> – Correlação entre viscosidade (figura 4.94 – a) e tensão de escoamento (figura 4.94 – b) e teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 4</b> .....	203
<b>Figura 4.95</b> – Correlação entre abatimento (figura 4.95 – a) e <i>k-slump 2</i> (figura 4.95 – b) e teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 4</b> .....	204

<b>Figura 4.96</b> – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.96 – a) e k-slump 2 (figura 4.96 – b) e teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 4</b> .....	204
<b>Figura 4.97</b> – Correlação entre viscosidade (figura 4.97 – a) e tensão de escoamento (figura 4.97 – b) e teor de microfinos da areia MI – <b>projeto experimental 4</b> .....	205
<b>Figura 4.98</b> – Correlação entre abatimento (figura 4.98 – a) e k-slump 2 (figura 4.98 – b) e teor de microfinos da areia GR – <b>projeto experimental 4</b> .....	206
<b>Figura 4.99</b> – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.99 – a) e k-slump 1 (figura 4.99 – b) e teor de microfinos da areia GR – <b>projeto experimental 4</b> .....	206
<b>Figura 4.100</b> – Correlação entre viscosidade (figura 4.100 – a) e k-slump 1 (figura 4.100 – b) e teor de microfinos da areia CV – <b>projeto experimental 4</b> .....	207
<b>Figura 4.101</b> – Correlação entre abatimento (figura 4.101 – a) e <i>k-slump</i> 2 (figura 4.101 – b) e teor de microfinos da areia CV – <b>projeto experimental 4</b> .....	207
<b>Figura 4.102</b> – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.102 – a) e <i>k-slump</i> 1 (figura 4.102 – b) e teor de microfinos da areia CV – <b>projeto experimental 4</b> .....	208
<b>Figura 4.103</b> – Correlação entre viscosidade (figura 4.103 – a) e tensão de escoamento (figura 4.103 – b) e teor de microfinos da areia CA – <b>projeto experimental 4</b> .....	209
<b>Figura 4.104</b> – Correlação entre abatimento (figura 4.104 – a) e <i>k-slump</i> 2 (figura 4.104 – b) e teor de microfinos da areia CA – <b>projeto experimental 4</b> .....	209
<b>Figura 4.105</b> – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.105 – a) e <i>k-slump</i> 1 (figura 4.105 – b) e teor de microfinos da areia CA – <b>projeto experimental 4</b> .....	210

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Alguns exemplos de ensaios que mensuram apenas um fator – correlação com a viscosidade ou com a tensão de escoamento (FERRARIS, 1999).....	20
<b>Tabela 2.2</b> – Relação entre estabilidade de colóides e potencial zeta (SILVA, 1999).....	31
<b>Tabela 3.2</b> – Resultados de forma das areias utilizadas no projeto <u>preliminar 1</u> .....	55
<b>Tabela 3.3</b> – Valores dos índices necessários para o traçado da curva de referência – Areia natural e Areia britada.....	64
<b>Tabela 3.4</b> – Parâmetros de mistura realizados com o método de Faury e algumas características da curva de Faury.....	66
<b>Tabela 3.5</b> – Variação da composição granulométrica das areias - Projeto Experimental 2....	73
<b>Tabela 3.6</b> – Caracterização física do cimento CP II-Z32 usados nos projetos experimentais.....	77
<b>Tabela 3.7</b> – Caracterização química do cimento CP II-Z32 usados nos projetos experimentais...	78
<b>Tabela 3.8</b> – Resultados do ensaio para determinação do potencial zeta do cimento CII - Z32..	78
<b>Tabela 3.9</b> – Caracterização física dos agregados graúdos.....	79
<b>Tabela 3.10</b> – Caracterização física dos agregados graúdos.....	81
<b>Tabela 4.1</b> – Resultados, em percentual, das características de forma e textura dos agregados miúdos.....	94
<b>Tabela 4.2</b> – Características petrográficas/mineralógicas das areias analisadas.....	95
<b>Tabela 4.3</b> – Proporção de traço e parâmetros de mistura - <b>projeto experimental 1</b> .....	99
<b>Tabela 4.4</b> – Resultados dos ensaios nos concretos - <b>projeto experimental 1</b> .....	100
<b>Tabela 4.5</b> – Relações das características de forma: grau de arredondamento, textura superficial e grau de esfericidade.....	104
<b>Tabela 4.6</b> – Ordem de classificação das areias em termos das características de forma dos agregados miúdos.....	106
<b>Tabela 4.7</b> – Principais análises em relação aos aspectos morfoscópicos dos grãos.....	107
<b>Tabela 4.8</b> – Traço de referência obtido com a curva contínua de Faury – Projeto Experimental 2.....	136
<b>Tabela 4.9</b> – Traços ajustados – Projeto Experimental 2.....	136
<b>Tabela 4.10</b> – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia CV – Projeto Experimental 2.....	138
<b>Tabela 4.11</b> – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia SV – Projeto Experimental 2.....	139
<b>Tabela 4.12</b> – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia MI – Projeto Experimental 2.....	140
<b>Tabela 4.13</b> – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia GR – Projeto Experimental 2.....	142
<b>Tabela 4.14</b> – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia CA – Projeto Experimental 2.....	143
<b>Tabela 4.15</b> – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia CV – projeto experimental 2.....	144
<b>Tabela 4.16</b> – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia SV – projeto experimental 2.....	145
<b>Tabela 4.17</b> – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia SV – projeto experimental 2.....	145
<b>Tabela 4.18</b> – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia MI – projeto experimental 2.....	146
<b>Tabela 4.19</b> – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia CA – projeto experimental 2.....	146
<b>Tabela 4.20</b> – Resultados dos índices de vazios MS e MC – <b>Projeto experimental 3</b> .....	183
<b>Tabela 4.21</b> – Resultados dos índices de vazios MS e MC – <b>Projeto experimental 4</b> .....	184
<b>Tabela 4.22</b> – Resultados de potencial zeta – <b>Projeto experimental 3 e 4</b> .....	184
<b>Tabela 4.23</b> – Resultados variáveis dependentes – <b>Projeto experimental 3</b> .....	186
<b>Tabela 4.24</b> – Resultados das variáveis dependentes – projeto experimental 4.....	186

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A areia britada e o pó-de-pedra são produtos resultantes da classificação e beneficiamento da brita, que é obtida através da exploração de maciços rochosos por meio do desmonte destes por explosão, e posterior britagem e classificação nas indústrias, sendo que o processo de beneficiamento – que pode ser a seco ou úmido - irá conferir a tais produtos características distintas. Se o beneficiamento é realizado a seco, o material resultante é denominado de pó-de-pedra, e se é a úmido, o material comercializado é a areia britada, que tem como principal característica, a eliminação de boa parte dos microfinos produzidos no processo de britagem (CUCHIERATO, 2000; CUCHIERATO et al, 2005).

A produção do pó-de-pedra consiste na extração da rocha da jazida e o transporte para um britador primário. As rochas que serão lançadas no britador primário devem ter no máximo 1 metro de diâmetro. O material resultante da britagem primária tem diâmetro máximo menor que cinco polegadas (FARIA & DA CRUZ, 2003), sendo encaminhado então para o britador secundário, que reduz o diâmetro do produto para menos de duas polegadas. O britador secundário pode ser de mandíbulas ou do tipo cônico. A partir do britador secundário, o material é todo conduzido às peneiras de diâmetros 7/8”, 3/8” e 3/16”, ou rebitado em uma ou duas etapas, constituindo nas fases terciária ou quaternária. Os britadores terciário e quaternário são cônicos ou de impacto, sendo usados para reduzir a lamelaridade do agregado, tendo apenas como inconveniente a maior geração de partículas microfinas(CUCHIERATO, 2000). O material que fica retido na peneira 7/8” é conduzido à (s) rebitagem (ns), enquanto que o material que passa pela peneira 7/8” e fica retido na peneira 3/8” é separado como brita 1. O material que passa na peneira 3/8” e fica retido na peneira 3/16” é separado como brita 0. O pó-de-pedra é constituído do material que passa na peneira 3/16” (FARIA & DA CRUZ, 2003).

O pó-de-pedra é um produto com alguma aceitação no mercado, sendo utilizado principalmente em sub-bases de pavimentações, na mistura em usinas de asfalto, em blocos de concreto, pré-moldados e alguns tipos de concreto, como é o caso do concreto

compactado com rolo. Já em relação ao uso da areia britada as concreteiras e construtoras produzem concretos utilizando esse material geralmente misturado à areia rosa, como uma maneira de compensar a deficiência de finos desse produto proveniente da britagem (SINDIPEDRAS, 2006).

A geração de resíduos na indústria extrativa de pedra britada é um dos principais problemas econômicos e ambientais do setor, pois uma parcela significativa de suas reservas minerais acaba sendo perdida devido à inadequada disposição ou descarte das frações finas produzidas. Esta fração conhecida no mercado como areia britada ou pó de pedra pode corresponder de 5 a 25% do total de pedra britada produzida, e vem aumentando sua procura no mercado, mas ainda com pouca especificação técnica. Geralmente, este subproduto é armazenado em pilhas de estoque ao ar livre, sujeito à ação dos ventos e das chuvas e à liberação de material particulado para a rede de drenagem e para os cursos d'água (CUCHIERATO, 2003; MENOSSI & CAMACHO, 2003; ALMEIDA & SILVA, 2005; ALMEIDA, 2005). Nos casos onde o beneficiamento é realizado a úmido, com a lavagem da pedra britada há a geração de finos, sendo estes dispostos em bacias de decantação, que por sua vez, além de serem uma constante preocupação do ponto de vista ambiental, tornam-se problemáticas quando a pedreira está instalada em área urbana (CUCHIERATO, 2003; BOUSO, 2005; ALMEIDA, 2005).

Além do problema ambiental na produção de uma quantidade excessiva de microfios no processo do britamento de rocha, a elevada demanda por areia no setor da construção civil aliado às restrições ambientais com relação à exploração de areia natural – ou seja, restrições à utilização de várzeas e leito de rio para extração de areia – além do distanciamento cada vez maior das jazidas naturais nos grandes centros urbanos do país, resultaram no desenvolvimento de pesquisas científicas e técnicas com o intuito de proporcionar a substituição total da areia natural pela areia britada em concretos e argamassas (CUNHA et al, 2005; ALMEIDA, 2005). Portanto, nota-se um crescente envolvimento do meio técnico e científico em desenvolver concretos e argamassas com areias britadas artificialmente. Já foram realizados, aqui no Brasil, dois simpósios tratando exclusivamente do uso da fração fina da britagem, denominados I e II SUFFIB (Seminário de Utilização da Fração Fina da Indústria de Britagem). A nova norma NBR 7211 traz modificações de forma a abranger os agregados miúdos gerados por

cominuição de rochas, também estabelecendo limites devido a tais materiais. No entanto, a revista *Areia e Brita*, que era publicada até o ano de 2006 trazendo novidades e enfatizando artigos relacionando sustentabilidade e práticas da mineração no geral, teve a sua publicação suspensa.

A maioria dos trabalhos e estudos consultados para desenvolvimento do presente trabalho, utilizam a areia britada artificialmente ou pó de pedra como substituição de parte da areia natural. Assim sendo, a necessidade premente de estudos aprofundados das características dos agregados tais como influência do aumento do teor de materiais microfinos; otimização da distribuição granulométrica dos grãos de areia e identificação das características de forma destes ainda carecem de investigação pormenorizada. Para que se possa substituir as areias naturais pelas areias britadas, obtendo consistência e trabalhabilidade adequadas, uma conexão entre as características da areia de brita com propriedades importantes do concreto no estado fresco deve ser realmente estabelecida. Isso é importante para que se possa de entender o material e usá-lo de maneira adequada, satisfatória e otimizada, pois, trata-se de resíduos que está comprometendo a sustentabilidade da construção civil.

Esse trabalho está inserido na linha de pesquisa referente a Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais e Componentes do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, o qual possui um acervo de teses e dissertações que estão disponíveis para consulta e *download* no sítio [www.unb.br/ft/enc/estruturas](http://www.unb.br/ft/enc/estruturas).

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar e caracterizar as propriedades de concretos no estado fresco, confeccionados com areias britadas, entendendo assim o comportamento das misturas produzidas.

Como objetivos específicos pode-se considerar:

- Analisar a influência da distribuição de tamanhos dos grãos das areias sobre as propriedades do concreto no estado fresco, considerando as diversas naturezas petrográficas;
- Investigar a influência das características de forma e textura superficial dos grãos de uma maneira efetiva com as propriedades no estado fresco que serão mensuradas;
- Maximizar o teor de microfios nas misturas realizadas, e analisar a influência destes nas propriedades do estado fresco;
- Otimização de curvas granulométricas que propiciem adequados resultados de consistência e trabalhabilidade , dos concretos estudados;
- Avaliar a viabilidade do uso da areia britada sem tratamento de forma em concretos convencionais.

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos clássicos da teoria reológica que levam a um entendimento mais aprofundado sobre as principais características e propriedades do estado fresco do concreto. Dentro desse enfoque, são apresentados e discutidos também alguns parâmetros que influenciam em tais características, enfatizando principalmente a influência do agregado miúdo nas referidas propriedades.

### **2.1– PRINCÍPIOS SOBRE REOLOGIA**

A reologia é a ciência do ramo da física que estuda a deformação e o escoamento da matéria, quando esta se encontra submetida a esforços originados por forças externas. Em uma visão mais ampla, a reologia tem por finalidade principal a descrição das propriedades mecânicas dos diversos materiais sob variadas condições de deformação, quando estes possuem a capacidade de deformar e/ou escoar e acumular deformações reversíveis e/ou irreversíveis. Neste contexto, considerando que a matéria pode ser classificada nos estados sólido, líquido ou gasoso, a deformação de um sólido pode ser caracterizada por leis que descrevem a alteração de seu volume, tamanho ou forma, ao passo que o escoamento de um fluido, líquido ou gás, é descrito pela variação contínua da taxa ou grau de deformação em função das forças ou tensões aplicadas (NAVARRO, 1997; MACHADO, 2002).

A deformação, cujo conceito está associado à mudança de forma de um corpo, pode ser dividida em dois tipos distintos, a saber: deformação espontânea e reversível, denominada também deformação elástica e deformação irreversível conceito análogo a fluxo ou escoamento. Assim, o trabalho usado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo retorna ao seu estado original não deformado, ao passo que o trabalho usado para manter o escoamento é dissipado como calor e não é recuperado mecanicamente, ou seja, a elasticidade equivale à energia mecanicamente recuperável, enquanto que a viscosidade ou resistência friccional corresponde à energia mecânica convertida em calor (MACHADO, 2002; BRETAS & D'ÁVILA, 2005). O conceito de viscosidade será discutido mais adiante neste mesmo capítulo.

Em se tratando de tensões atuantes em um material fluido, quando este está em movimento, existem vários tipos de forças atuando sobre um dado elemento de fluido, as quais surgem devido ao próprio movimento do fluido, conhecidas como forças de convecção, a força gravitacional ou forças de campo, forças devido aos gradientes de pressão, além das forças relacionadas às interações entre moléculas do fluido ou forças de superfície. Estas forças atuantes estão relacionadas à tensão atuante em um dado elemento fluido, já que a tensão em um ponto pode ser definida como segue (equação 2.1), onde  $\Delta F$  é a força atuando em um elemento de fluido de área  $\Delta A$  (BRETAS & D'ÁVILA, 2005).

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Os estudos reológicos têm o objetivo de entender a estrutura do material e projetar seu comportamento em situações substancialmente diferentes, a partir da relação entre a tensão aplicada sobre um corpo e a resposta deste, ou seja, a deformação, a este esforço (NAVARRO, 1997; MACHADO, 2002). Desta forma, a classificação de um material como fluido ou sólido depende, em certos casos, da resposta deste material à imposição de tal esforço externo. Não obstante, nem sempre os resultados desta classificação estão a contento. De acordo com LENK apud NAVARRO (1997), um corpo é considerado fluido quando se deforma irreversivelmente como resultado do escoamento. No entanto, apesar de metais e alguns sólidos plásticos escoarem e permitirem deformações irreversíveis os mesmos não podem ser considerados como fluidos. O que distingue um sólido plástico de um fluido é que o segundo não resiste ao seu peso próprio e seu escoamento é preponderantemente viscoso na temperatura ambiente (NAVARRO, 1997; FERRARIS et al, 2001; BANFILL, 2003).

Portanto, como pode-se notar, a análise da relação tensão-deformação não é o bastante para classificar reologicamente um material, devendo-se, para tanto, observar primeiramente a existência de escoamento, já que sem a presença de escoamento o material é um sólido, e por último o tipo de escoamento verificado se viscoso ou plástico. De acordo com JASTRZEBSKI (1976), NAVARRO (1997) e BRETAS &

D'ÁVILA (2005) as propriedades reológicas são melhor identificadas quando são considerados: a classificação mecânica dos materiais; a análise dos comportamentos dos materiais frente a um campo de tensão; relacionar estes comportamentos com a estrutura de cada material e prever o desempenho de cada material ou grupo de materiais em outros estágios de tensão, deformação, tempo e temperatura.

A identificação das propriedades reológicas dos materiais se torna uma tarefa fácil se for possível a dedução da equação constitutiva ou equação do estado reológico. Por equação do estado reológico entende-se toda aquela que relaciona os valores das tensões às deformações e as suas derivadas de diversas ordens em relação ao tempo, tendo como finalidade principal exprimir matematicamente os fenômenos reológicos experimentalmente observados. As equações constitutivas, em geral, expressam-se como relações empíricas ou semi-empíricas entre quantidades variadas como tensão e taxa de deformação que são tensores de grau 2 (representados por uma matriz 3x3); deformação que é um vetor e viscosidade que é um escalar, entre outras (NAVARRO, 1997; BRETAS & D'ÁVILA, 2005).

No início dos estudos sobre o comportamento reológico dos materiais, a reologia era relacionada exclusivamente à deformação de corpos coesos. No entanto, o entendimento tem sido estendido à compreensão da fricção entre sólidos e escoamento de substâncias pulverizadas e particuladas e de sistemas coloidais. Do ponto de vista da teoria química, uma das maneiras de se caracterizar o material reologicamente é proceder a uma análise da estrutura interna detalhada do material em questão. Desta forma, a teoria molecular que se aplica ao estudo da química dos sistemas coloidais e suspensões<sup>1</sup>, se mostra de importância fundamental, refletindo nas características das partículas individualmente, como também nas interações partícula-partícula e partícula-meio disperso (JASTRZEBSKI, 1976; MACHADO, 2002). Pode-se afirmar que, em parte, a reologia é em determinadas situações uma ciência puramente descritiva. Mas nos últimos anos registrou-se considerável progresso em relação ao entendimento mais

---

<sup>1</sup> Sistemas *Coloidais*, onde as partículas dispersas são menores que 1  $\mu\text{m}$ , e *Suspensões*, onde as partículas são maiores que 1  $\mu\text{m}$ . Entretanto, esta divisão é arbitrária, existindo muitos sistemas de dispersões com características intermediárias (JASTRZEBSKI, 1977).

profundo do comportamento reológico, e ao desenvolvimento de uma base quantitativa para seu estudo (NAVARRO, 1997; MACHADO, 2002; BRETAS & D'ÁVILA, 2005).

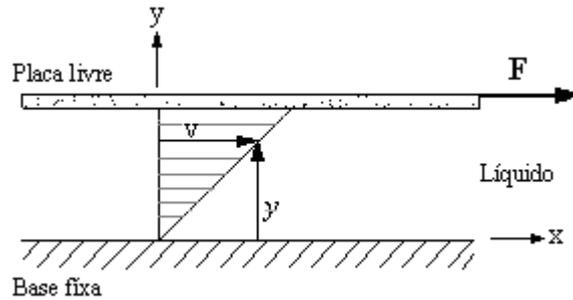
As propriedades no estado fresco dos concretos são explicadas pela deformação e fluxo destes, portanto, se torna necessário um maior entendimento dos fenômenos reológicos intrínsecos ao material. Nos itens a seguir serão discutidos os principais conceitos de interesse relativos à teoria reológica para fluidos, os quais possuem melhor adequação às propriedades reológicas do concreto no estado ainda plástico.

### **2.1.1 – Fluido Viscoso Ideal ou Newtoniano**

Como já comentado anteriormente, o escoamento de um fluido ocorre devido à presença de deformação. O tipo mais comum de deformação nos fluidos é por cisalhamento simples, o qual gera um escoamento caracterizado pelo movimento relativo das camadas ou moléculas do fluido devido à ação de força externa, podendo esta força inclusive ser o peso próprio do material. Portanto, é correto afirmar que corpos idealmente viscosos exibem escoamento ou fluxo.

Os materiais extremamente viscosos podem exibir resposta à força elástica por um determinado período de tempo inicial, período este curto se comparado com o escoamento pleno propriamente dito. Ou seja, o material é considerado, no início da deformação como sendo elástico ideal e, em um segundo momento, apresenta comportamento viscoso ideal assim que apresenta fluxo em períodos de tempo mais longos. Considerando um material viscoso ideal, a energia de deformação se dissipa sob forma de calor, já que não será recuperada quando da retirada do esforço. Então, inferindo-se sobre tal raciocínio, para se manter um fluido em regime de escoamento, deve-se adicionar energia ao sistema de maneira contínua (MACHADO, 2002).

A figura 2.1 apresenta uma representação da deformação por cisalhamento simples, representação esta utilizada por Newton para a elaboração de sua lei para a viscosidade. A teoria de Newton considera um fluxo laminar do fluido, ou seja, a aplicação de forças sobre esse líquido produz diferenças de velocidades entre camadas (laminares) adjacentes existentes no interior desse fluido (REINER apud MACHADO, 2002).



**Figura 2.1** – Esquema ilustrativo do experimento de Newton para a determinação da viscosidade de fluidos

O fluido viscoso se encontra confinado entre as duas placas planas paralelas, onde será submetido ao movimento a placa livre superior, devida a uma força tangencial  $F$  em relação à inferior que se encontra parada. Se for assumido que não há escorregamento do fluido nas superfícies, então cada elemento de fluido estará sujeito à mesma deformação local. Este movimento friccional (conhecido também como escoamento viscoso) produz um gradiente para a velocidade do fluido, que vai desde zero na interface com a placa inferior até o valor máximo representado pela velocidade da placa superior (NAVARRO, 1997; MACHADO, 2002). Tal gradiente de velocidade será tanto maior quanto maior for a força externa que ocasionou o fluxo e este nada mais é do que a taxa na qual a velocidade das partículas muda com sua posição (figura 2.1). Portanto:

$$\frac{\Delta V}{y} \propto \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Como,

$$\frac{F}{A} = \tau \quad (2.2)$$

Onde  $\tau$  é a tensão cisalhante ocasionada pela força  $F$  numa área  $A$  do fluido, então:

$$\tau \propto \frac{\Delta V}{y} \quad (2.3)$$

Onde  $\frac{\Delta V}{y}$  é denominado gradiente de velocidade. Analisando vários fluidos e apesar de verificar que para qualquer que fosse a tensão aplicada sempre era obtido um gradiente de velocidade, de forma que o quociente tensão/gradiente de velocidade era sempre constante, Newton pôde constatar que este quociente podia variar de um fluido para outro. Newton observou ainda que esta variação era necessária porque para diferentes fluidos, era preciso variar a força para manter uma dada velocidade para a placa em movimento sobre o fluido. Portanto, ele concluiu que este fato estava relacionado com a capacidade do fluido em resistir ao escoamento (NAVARRO, 1997; MACHADO, 2002; BRETAS & D'ÁVILA, 2005). Imaginado ser esta resistência oriunda do atrito gerado entre as camadas do fluido pelo movimento relativo imposto pelo cisalhamento aplicado, Newton acrescentou que esta resistência era a medida da fricção interna do fluido MINARD apud NAVARRO (1997), e a denominou de coeficiente de viscosidade. O coeficiente de viscosidade, ou simplesmente viscosidade, é a constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade (equação 2.4):

$$\tau = \mu\gamma \quad (2.4)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\mu$  a viscosidade e  $\gamma$  é o gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento. Um fluido que obedece à equação 2.4 é chamado *fluido newtoniano*. A viscosidade na realidade expressa a velocidade de deformação de um corpo. Se em um fluido são distribuídas partículas sólidas, ocorre uma mudança na viscosidade, que passa a ser maior que a do fluido puro, como é o caso das suspensões (JASTRZEBSKI, 1976; SOBRAL, 1990), como será discutido nos itens posteriores.

### **2.1.2 Fluidos não-newtonianos**

A Lei de Newton representa um importante passo para o entendimento do comportamento do fluido sob escoamento ocasionado por cisalhamento. Tal modelo impõe que a viscosidade seja apenas mutável mediante variação de temperatura e pressão. No entanto, a maioria dos fluidos - como as suspensões, principalmente se concentradas - não obedece ao modelo de Newton, possuindo viscosidade que depende ou do cisalhamento aplicado (taxa de deformação) ou do tempo de sua aplicação. Cabe

aqui salientar que todo fluido que possua relação entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento não constante, é denominado de não-newtoniano, se, além disso, forem considerados a temperatura e pressão constantes e o escoamento sendo laminar (MACHADO, 2002). Nestes fluidos, a viscosidade deixa de ser um coeficiente para se tornar uma propriedade que varia de acordo com as condições com as quais o fluido se depara. A viscosidade então passa a ser denominada de viscosidade aparente (NAVARRO, 1997).

Como comentado anteriormente, já que as suspensões geralmente possuem comportamentos não newtonianos, se torna importante o entendimento do comportamento de tais fluidos. Os fluidos não newtonianos podem ser divididos em três classes: os independentes do tempo, os dependentes do tempo e os viscoelásticos (NAVARRO, 1997).

Dentre os fenômenos que caracterizam o comportamento dos concretos, os mais importantes estão associados às classes dos fluidos independentes do tempo e dos dependentes do tempo.

#### 2.1.2.1 Fluidos não newtonianos independentes do tempo

Os fluidos independentes do tempo são aqueles cujas propriedades reológicas não dependem do tempo de sua agitação ou repouso. A taxa de deformação em qualquer ponto é somente função da tensão naquele ponto. Os fluidos desta classe estão enquadrados em três grupos: fluidos binghamianos ou fluidos plásticos ideais (ou ainda viscoplásticos), fluidos pseudoplásticos e fluidos dilatantes. Tais comportamentos serão melhor detalhados nos itens a seguir.

### I Fluidos Pseudoplásticos e Dilatantes

Ao submeter certos fluidos a cisalhamento, Ostwald de Waale verificou que os mesmos apresentavam comportamento distinto dos fluidos newtonianos em relação à viscosidade frente ao cisalhamento aplicado. Diferentemente dos fluidos newtonianos, os fluidos analisados apresentavam uma relação tensão de cisalhamento taxa de deformação não linear. Tomando por base a lei de Newton, Ostwald propôs o seguinte

modelo empírico, conhecido como a lei de Potência (JASTRZEBSKI, 1976; SOBRAL, 1990; NAVARRO, 1997; FERRARIS, 1999; MACHADO, 2002; BANFILL, 2001 BRETAS & D'ÁVILA, 2005):

$$\tau = K\dot{\gamma}^{0n} \quad (2.5)$$

Onde:

n – índice de comportamento ou de potência

K – índice de consistência

$\dot{\gamma}^0$  - taxa de deformação

A expressão 2.5 não se aplica a todo e qualquer fluido, nem a todo intervalo de taxa de cisalhamento, apesar de existirem um razoável número de fluidos não-newtonianos que apresentam comportamento de potência, num extenso intervalo de taxas de cisalhamento (MACHADO, 2002).

O índice de comportamento,  $n$ , indica fisicamente o quão afastado o fluido se encontra do modelo Newtoniano.

O índice K, indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento, assim, quanto maior o valor de K, mais consistente o fluido. Tal índice está relacionado com a viscosidade aparente ( $\eta_a$ ) da seguinte forma:

$$\text{Como } \eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^0} \text{ então } K = \eta_a \dot{\gamma}^{0^{1-n}}$$

Nota-se claramente que a equação 2.5 se reduz ao modelo de Newton quando  $n=1$ . Como o índice de consistência não varia nem com a tensão de cisalhamento nem com a taxa de deformação, é o índice  $n$  que fará a distinção entre os comportamentos newtoniano e da potência. Portanto:

Se  $n < 1$ , a relação  $\frac{\tau}{\dot{\gamma}^0}$  será decrescente na medida em que  $\dot{\gamma}^0$  for incrementada;

Se  $n > 1$ , se observará o contrário.

O fenômeno pelo qual a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação é conhecido como pseudoplasticidade, com  $0 < n < 1$ . Quando  $n > 1$ , a viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação, configurando assim o

fenômeno de dilatância (NAVARRO, 1997; MACHADO, 2002; BRETAS & D'ÁVILA, 2005).

Muitos fluidos apresentam comportamento pseudoplástico e na prática, pode-se observar o efeito da diminuição da viscosidade, por exemplo, através do aumento na velocidade do fluxo por meio do estreitamento de tubos e capilares. Isto significa dizer que para uma certa força ou pressão, menor quantidade de energia pode sustentar o escoamento a uma certa vazão (MACHADO, 2002). Este provavelmente é o artifício utilizado ao se proceder o bombeamento do concreto ou jateamento, no caso de concretos e argamassas projetados.

Os sistemas pseudoplásticos podem possuir partículas dispersas com formas irregulares, apesar da aparência homogênea. Em repouso, estas dispersões se caracterizam por uma alta resistência interna contra o escoamento, ou seja, um alto valor de viscosidade. Com o aumento da taxa de cisalhamento, muitas partículas dispersas, lineares ou laminares alinham-se na direção do fluxo, portanto, na direção da força aplicada é este alinhamento entre partículas (ou moléculas) que facilita o deslizamento em fluxo, reduzindo a viscosidade. Além da tendência de orientação de partículas assimétricas o comportamento pseudoplástico está relacionado à quebra dos aglomerados e destruição de arranjos estruturais destes fluidos viscosos (PILEGGI, 1996; NAVARRO, 1997).

A dilatância é o fenômeno oposto à pseudoplasticidade, ou seja, há um incremento da viscosidade com o aumento da taxa de deformação (ou cisalhamento). A dilatância foi estudada pela primeira vez por Reynolds, que analisou materiais granulares, através de uma série de experiências de grande interesse para a compreensão do fenômeno SOBRAL (1990). O termo dilatância foi utilizado porque Reynolds observou que alguns sistemas se expandiam volumetricamente sob cisalhamento, WHITE apud NAVARRO (1997).

Estudando suspensões concentradas de areia em água, Reynolds observou que quando em repouso, estas suspensões apresentavam uma quantidade mínima de vazios e que o líquido era apenas suficiente para preenche-los. Sob cisalhamento suave, o líquido lubrificava as partículas facilitando seus movimentos relativos, fenômeno esse que

segundo MACHADO (2002) denota que a suspensão comporta-se como um líquido viscoso. Efetuando-se aumentos posteriores na taxa de deformação, foi observada uma expansão do material e aumento na quantidade de vazios, os quais produzem uma tensão que contêm o movimento, já que as partículas dispersas ocuparão maior número de posições por intervalo de tempo. Deste ponto em diante o líquido não era mais suficiente para lubrificar as partículas em movimento, evidenciando-se o aumento de viscosidade pela necessidade de incremento da tensão de cisalhamento para manter o movimento das partículas (NAVARRO, 1997). A experiência de Reynolds está ilustrada através da figura 2.2.



**Figura 2.2** – Hipótese de Reynolds para a dilatância. Fonte: NAVARRO(1997)

Apesar do termo dilatância estar associado à dilatação ou aumento de volume, como pode ser constatado pela figura 2.2, ele passou a denotar o comportamento de certos sistemas que têm viscosidade aparente aumentada quando submetidas a cisalhamento crescente, aumentando ou não de volume (METZNER apud NAVARRO, 1997). Então, pode-se considerar que a dilatância acontece pelo aumento da interferência entre as partículas (com a diminuição de lubrificação), ou seja, pela alta fricção interna das mesmas (POPOVICS, 1982).

Este comportamento é típico de suspensões concentradas, onde as partículas encontram-se próximas entre si. Desta forma, todos os fatores que contribuem para a redução da distância média de separação entre as partículas e dificultam a movimentação relativa entre elas, favorecem a manifestação da dilatância, como, por exemplo, a presença de partículas com elevada rugosidade superficial e formatos assimétricos, como é o caso dos grãos de agregado britado, além da existência de pronunciadas forças de repulsão entre elas (SOBRAL, 1990; PILEGGI, 1996).

## II Fluidos Binghamianos ou Plásticos Ideais (Viscoplásticos)

O comportamento de um fluido de Bingham ou fluido Viscoplástico é caracterizado pela existência de um valor residual para a tensão de cisalhamento, o qual deve ser excedido para que o material tenha fluxo viscoso. Esta tensão é conhecida como tensão limite de escoamento. “A tensão limite de escoamento é a mínima tensão de cisalhamento correspondente à primeira evidência de fluxo, isto é, o valor de tensão de cisalhamento no qual o gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento é igual a zero”, (NGUYEN & BOGER, 1983). Portanto, quando uma força é inicialmente aplicada ao fluido antes de atingir a tensão limite de escoamento, esta força provoca primeiramente a deformação do fluido. Esta deformação vai aumentando até ser atingida a tensão limite de escoamento, a partir da qual o fluxo se inicia.

Ao analisar alguns sistemas bifásicos com alto teor de sólidos, Bingham comprovou que antes de escoar como um fluido newtoniano, tais sistemas se comportavam como um sólido plástico e os denominou de fluidos viscoplásticos.

Um fluido binghamiano é expresso pela equação 2.5 e pela curva linear expressa na figura 2.3 a seguir.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma \quad (2.5)$$

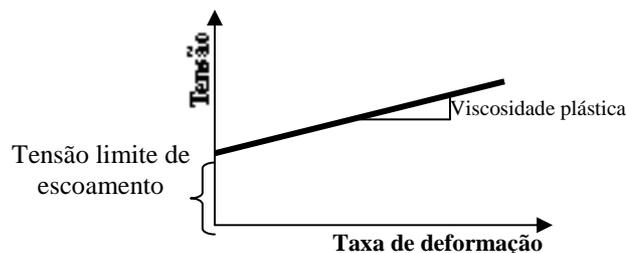
Onde :

$\tau$  – tensão de cisalhamento imposta ao sistema;

$\tau_0$  – é a tensão limite de escoamento;

$\eta_p$  – é a viscosidade plástica;

$\gamma$  - taxa de cisalhamento ou deformação.



**Figura 2.3** – Comportamento binghamiano modificado de FERRARIS (1999)

Na equação constitutiva de Bingham surge a componente viscosidade plástica em detrimento da viscosidade aparente, já que neste tipo de fluido, a viscosidade aparente não é constante sendo dependente da taxa de cisalhamento aplicada. A expressão de viscosidade aparente, para os fluidos binghamianos é obtida combinando as expressões da equação 2.4 (expressão newtoniana) e a 2.5, resultando:  $\eta_a = \eta_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$ , onde  $\eta_a$  é a viscosidade aparente.

Acredita-se que a presença da tensão residual ou limite de escoamento ocorra em composições concentradas, devido à interação inter partículas. Portanto, sistemas e suspensões concentradas, quando possuem concentração de sólidos elevada além de um valor crítico, ocasionam o aparecimento de um “esqueleto” por parte das partículas anteriormente dispersas. Este “esqueleto” além de ser responsável pelo aumento de viscosidade do sistema, impede que o material entre em sistema de fluxo normalmente, sendo necessário, portanto, destruir tal “esqueleto” para que o material realize um escoamento viscoso (NAVARRO, 1997).

Utilizando, agora, a teoria molecular-coloidal para explicar o que foi mencionado no parágrafo anterior, a viscosidade plástica é ocasionada pelo atrito entre as partículas dispersas e entre as moléculas do líquido dispersante. Já o limite de escoamento acontece devido às forças de interação entre as partículas dispersas, tanto que a tensão limite de escoamento é também conhecida como *componente eletroviscosa*.

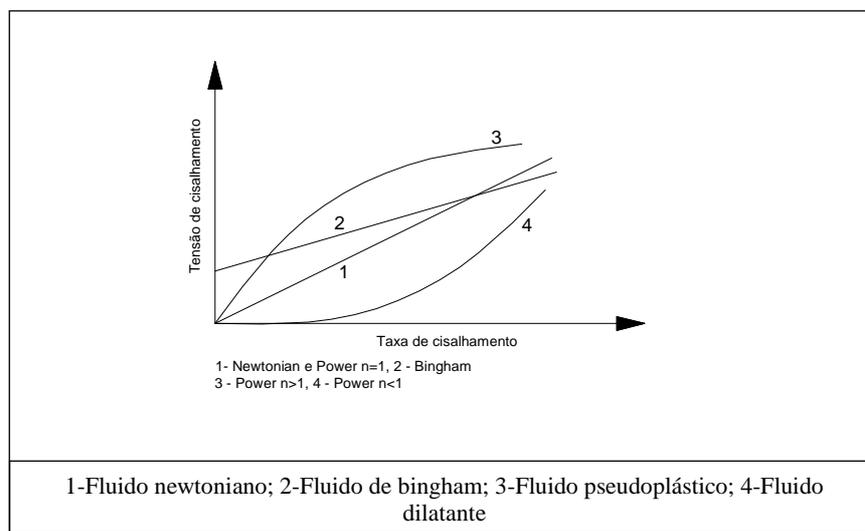
As equações que possuem uma base física e incluem no mínimo dois parâmetros, sendo um deles a tensão limite de escoamento, são as equações de Herschel-Bulkley e Bingham. As suspensões concentradas, como os concretos, são mais bem representadas por equações não lineares como as de Herschel e Bulkley (equação 2.6), já que a tensão limite de escoamento de suspensões exibe um comportamento plástico não linear NGUYEN & BOGER (1983).

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

Onde  $K$  é um índice de consistência do fluido relacionado à viscosidade aparente e  $n$  um índice de potência que determina a não linearidade da relação tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) versus taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ).

A equação de Herschel e Bulkley expressa uma lei de potência à qual a suspensão que obedece a tal equação tem comportamento pseudoplástico. Após a tomada de dados experimentais de tensão limite de escoamento e viscosidade em concretos auto adensáveis e concretos de alto-desempenho, pôde-se constatar que, em alguns casos, os resultados se adequavam melhor se fossem ajustados através da equação de Herschel e Bulkley (FERRARIS, 1999; NEHDI et al, 1998; FERRARIS et al, 2001; BANFILL, 2003; ROSHAVELOV, 2005). No entanto, e apesar disso, a equação mais comumente utilizada atualmente para representar o comportamento reológico do concreto, devido às simplificações, é a equação de Bingham.

Os comportamentos discutidos até o presente momento podem ser resumidos através da figura 2.4 a seguir:



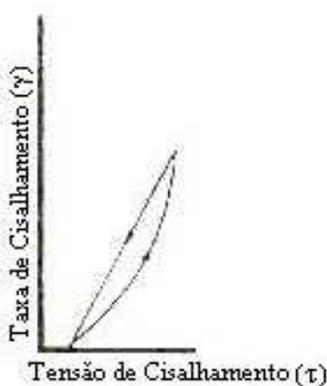
**Figura 2.4** - Comportamento da tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento considerando os diversos comportamentos de fluxo.

Pela observação das equações apresentadas anteriormente, percebe-se que as mesmas usam no mínimo dois parâmetros para descrever o fluxo, excetuando-se apenas os fluidos Newtonianos.

### 2.1.2.2 Fluidos não newtonianos dependentes do tempo

Os fluidos dependentes do tempo são aqueles em que a relação entre a taxa de deformação e a tensão aplicada depende do tempo em que o fluido é agitado ou permanece em repouso. Podem ser, dependendo do aumento ou diminuição da tensão com o tempo, quando o fluido está sob uma taxa de deformação constante, fluidos tixotrópicos e fluidos reotrópicos. O comportamento mais observado para concretos e argamassas é o comportamento tixotrópico.

A tixotropia é o resultado da quebra temporária na estrutura interna da pasta causada pela redução da atração entre as partículas da fase dispersa, cuja força de ligação não resiste ao cisalhamento imposto, POPOVICS (1982); NAVARRO (1997). Os movimentos de deformação cisalhante e vibrações provocam mudanças no espaçamento entre as partículas, causando um aumento na energia de repulsão, tornando o sistema menos viscoso. Após a retirada do esforço, as ligações quebradas são reconstituídas, tornando este um fenômeno reversível. A tixotropia é um fenômeno dependente do tempo de aplicação de uma dada taxa de deformação, ocasionando um decréscimo momentâneo da viscosidade do sistema. Esta propriedade é visualmente notada pela “fluidificação” aparente e momentânea quando se procede, por exemplo, uma vibração na argamassa ou no concreto frescos enquanto esta vibração é aplicada.



**Figura 2.5** – Ilustração do fenômeno da tixotropia

A figura 2.5 acima representa o comportamento tixotrópico do material.

## **2.2 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS**

No campo da construção, termos como trabalhabilidade, consistência e coesão são usados para descrever o comportamento do concreto em situação de escoamento. A trabalhabilidade é definida pelo American Concrete Institute (ACI) como a propriedade da mistura de concreto em estado fresco a qual determina a facilidade e a homogeneidade com a qual ele pode ser misturado, aplicado, adensado e acabado (FERRARIS, 1999). A trabalhabilidade é influenciada por diversos fatores: consistência, tipos de mistura, transporte, adensamento e lançamento, entre outros. A consistência é, sem dúvida, um dos principais fatores que mais influencia na trabalhabilidade dos concretos sendo o parâmetro mais utilizado para caracterizá-los no estado fresco. Sobretudo em se tratando dos concretos convencionais, a consistência, que na realidade é um conceito qualitativo da tensão limite de escoamento, é a principal propriedade relacionada com a trabalhabilidade. Nos concretos considerados fluidos (concretos auto-adensáveis, concretos de auto desempenho, concretos bombeados, entre outros), como a tensão limite de escoamento possui valores de ordem de grandeza baixos, a determinação da viscosidade é necessária para caracterizar adequadamente o comportamento de fluxo destes materiais (DE LARRARD et al, 1997; FERRARIS, 1999; BANFILL, 2003).

Pelo que foi apresentado até o presente momento, para caracterizar de modo adequado o fluxo do concreto ou o comportamento reológico deste, deve-se efetuar as determinações experimentais de no mínimo dois parâmetros, também conhecidos como unidades ou parâmetros fundamentais, quais sejam, a viscosidade e a tensão limite de escoamento do material, já que estes dois parâmetros mostram a resistência inicial ao fluxo, no caso da tensão limite de escoamento e a viscosidade plástica que governa o fluxo depois de iniciado (DE LARRARD et al, 1997; FERRARIS & DE LARRARD, 1998; FERRARIS, 1999; BANFILL, 2003).

Os ensaios comumente realizados no concreto são os ensaios de um fator, já que os mesmos mensuram apenas um valor reológico, geralmente indiretamente. FERRARIS (1999) comenta que, em muitos casos, os parâmetros fundamentais não podem ser calculados diretamente do único fator medido em tais ensaios. Os ensaios de um fator mais conhecidos estão constantes da tabela 2.1 a seguir:

**Tabela 2.1** – Alguns exemplos de ensaios que mensuram apenas um fator – correlação com a viscosidade ou com a tensão de escoamento (FERRARIS, 1999)

Ensaio	Breve descrição dos ensaios	Parâmetro reológico relacionado com o ensaio
Ensaio de abatimento (Slump test)	Neste ensaio, a tensão é ao material pelo seu peso próprio. O concreto escoar apenas se a tensão de escoamento é excedida, parando o escoamento quando a tensão conferida pelo peso próprio se torna menor do que a tensão limite de escoamento do material.	Tensão de escoamento
Kelly ball, Vicat, Ensaio de penetração de cone	O princípio destes ensaios é que a profundidade de penetração de um determinado corpo dependerá da tensão de escoamento do material testado.	Tensão de escoamento
Ensaio K-Slump	Uma sonda é inserida na mistura a ser ensaiada de concreto. Se o concreto apresentar uma determinada fluidez, uma parte da argamassa e/ou da pasta verterá através dos orifícios do equipamento. Se o material possuir uma carência de pasta/argamassas, o valor do resultado será zero ou próximo a zero, o que indicará um material pouco fluido, com pequena camada de lubrificação ou alta coesão.	Coesão; Segregação; Tensão de escoamento
Vebe time e ensaio de remoldagem	Tais ensaios fornecem como resultado uma medida correlacionada com a viscosidade porque eles mensuram a habilidade do concreto de escoar depois que a tensão atuante excede a tensão de escoamento pelo tempo de remoldagem. Neste caso a tensão é aplicada devido à vibração.	Viscosidade

Uma maneira de mensurar diretamente um parâmetro fundamental de suspensões concentradas, a tensão limite de escoamento, com um ensaio de um único fator é a utilização do ensaio da palheta ou *vane test*. Este ensaio tem se mostrado um método simples, porém eficiente, para se medir as propriedades de fluidos não-Newtonianos que exibem um grande efeito de deslizamento em superfícies lisas, comuns aos dispositivos utilizados nos diferentes tipos de reômetros – por exemplo os reômetros de discos paralelos ou cilindro coaxial – como será descrito mais detalhadamente a seguir. O valor de tensão de escoamento obtido por este aparelho tem apresentado uma boa concordância com os resultados encontrados pela maioria dos métodos reológicos atuais (NGUYEN, 1985; AUSTIN, 1999; BARNES, 2001). O ensaio da palheta tem sido usado com frequência para mensurar a tensão de escoamento de argamassas (ALVES, 2002; SANTOS, 2003; ARAÚJO JUNIOR, 2004; SOUZA, 2005) e o princípio de ensaio basicamente consiste em cravar uma palheta com duas lâminas em cruz em uma determinada amostra do material a ser ensaiado. Na seqüência, a palheta é girada lentamente em uma constante taxa de deformação (velocidade angular constante). No ensaio registra-se o momento do escoamento quando o torque exercido pela haste do

*vane tester* alcançar o valor máximo. Recomenda-se que a velocidade de rotação da palheta deva ser inferior a 10 rpm para evitar a influência da resistência da viscosidade e a inércia do instrumento na medida do torque máximo (NGUYEN, 1985).

Embora, na prática, os parâmetros sejam medidos com os ensaios constantes da tabela 2.1, ou com instrumentos que mensuram diretamente apenas um parâmetro fundamental, como é o caso do *vane test*, existe uma preocupação contínua em se desenvolver equipamentos com o objetivo de determinar ambos parâmetros fundamentais – viscosidade e tensão limite de escoamento. O instrumentos capazes de fornecer tais parâmetros são denominados reômetros. O desenvolvimento dos reômetros surgiu devido às impossibilidades de se utilizar os viscosímetros – os quais fornecem a medida reológica de fluidos considerando-os como puramente viscosos – para as medidas destas propriedades fundamentais, tais como: tipo de fluxo considerado, pouca sensibilidade para amostras heterogêneas, exigência de uniformidade de cisalhamento, necessidade de falta de variações da amostra com relação ao tempo, sendo essa característica última, em termos de ligações químicas ou físicas da amostra, entre outros (MACHADO, 2002; BRETAS & D'ÁVILA, 2005). Os reômetros são equipamentos desenvolvidos para investigar propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos e fluidos e permitem medidas da curva de fluxo descrevendo a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, já que os mesmos operam de forma a fornecer informações multiponto (ou seja, é traçada uma curva com as leituras de vários resultados de tensão de cisalhamento aplicado versus as taxas de cisalhamento resultantes).

O primeiro reômetro foi desenvolvido por Tattersall (FERRARIS, 1999). Este primeiro instrumento é constituído de um recipiente, no qual a amostra de concreto é acondicionada, e um torque é aplicado na amostra através de uma palheta com geometria especial. Com o aumento do torque aplicado, uma curva do torque versus a velocidade é traçada. O gráfico assim obtido é linear, portanto a tensão é extrapolada para o torque na velocidade igual a zero, o qual fornece a tensão limite de escoamento. A inclinação da curva fornece a viscosidade do material ensaiado.

Tattersall projetou o instrumento, mas outros pesquisadores como Gjørv, Wallewick, Beaupré e Domone e Banfill procederam melhorias no equipamento comercializando o

mesmo. A principal melhoria foi a automatização do aparelho, sendo que o torque e a velocidade são gravadas automaticamente usando um computador. Existem duas versões para tal instrumento: o reômetro BML e o IBB – Reômetro para concreto. A diferença é que a forma do equipamento que impele torque ao material é diferente – o BML possui um tipo de cilindro dentado enquanto o IBB usa uma palheta em forma de “H”. Em ambos os instrumentos, é plotada a curva do torque determinado versus a velocidade do rotor, sendo que os resultados possuem uma relação linear. A inclinação da curva ( $h$ ), e a interceptação desta na velocidade igual a zero ( $g$ ), podem ser relacionados respectivamente, à viscosidade plástica e à tensão de escoamento, como comentado anteriormente. Os reômetros de Tattersal fornecem a seguinte equação (FERRARIS, 1999):

$$T = (G/K) \tau_0 + (G.\eta)N \quad (\text{equação 2.7})$$

Onde:

$T$  = torque aplicado

$G$  = constante obtida pela calibração com fluidos newtonianos

$K$  = constante obtida pela calibração com fluidos não newtonianos

$N$  = velocidade impelida

$\tau_0$  = tensão de escoamento

$\eta$  = viscosidade

Portanto,  $\tau_0 = g/ (G/K)$  e  $\eta = h/G$ , onde  $g$  e  $h$  são os dois valores mensurados. De acordo com FERRARIS (1999), as constantes  $G$  e  $K$  são quase impossíveis de serem obtidas, tornando tais instrumentos de utilização limitada.

O aparelho Bertta foi desenvolvido no Centro de Pesquisa da Finlândia e consiste na acomodação da amostra de concreto entre dois cilindros de 480 mm e 330 mm de diâmetro (FERRARIS, 1999). O cilindro externo rotaciona e o torque induzido é medido no cilindro interno. Sua configuração permite ao operador calcular a viscosidade e a tensão de escoamento do concreto como uma função da frequência. A vantagem deste instrumento é permitir ao operador calcular os parâmetros reológicos intrínsecos dos materiais e não apenas dois valores relacionados, tais como  $g$  e  $h$  obtidos pelo equipamento de Tattersal. No entanto, este equipamento possui duas limitações. A primeira é relacionada com a dimensão máxima do agregado utilizado no concreto,

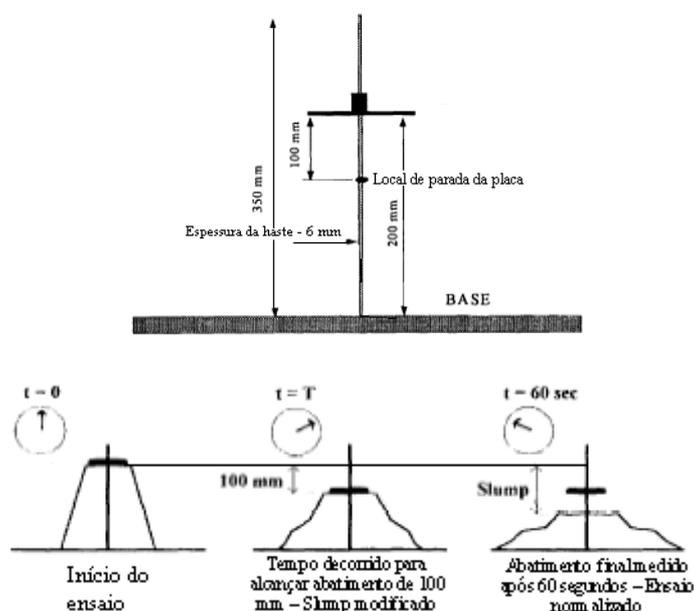
fixada em 13 milímetros. A outra limitação tem relação com a exatidão dos cálculos dos parâmetros reológicos devido ao alto valor da razão entre os raios dos dois cilindros.

O Reômetro BTRHEOM foi desenvolvido no Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, da França, por De LARRARD et al (1997). O equipamento consiste de um recipiente com um fundo dentado e um disco que gira no topo apoiando-se sobre a amostra a ser ensaiada. A distribuição da taxa de cisalhamento permite o cálculo direto da viscosidade e da tensão de escoamento, assumindo que o concreto tem um comportamento que obedece a um fluido de Bingham. Os resultados mostraram que essa suposição é correta para concretos com resultado de abatimento de tronco de cone maiores que 80 mm. As limitações deste instrumento estão relacionadas às faixas de utilização do material com relação à tensão de escoamento e viscosidade, ou seja, concretos com altos valores destes dois parâmetros não podem ser cisalhados.

Um outro reômetro foi apresentado por ROSHAVELOV (2005), o Tube Viscometer for concrete (TVC) com mecanismo de funcionamento bastante distinto dos equipamentos descritos até aqui. De acordo com o autor, este reômetro está habilitado para uso exclusivo em concretos fluidos. O TVC é um tubo longo com capacidade de 0,03 m<sup>3</sup> de concreto feito de aço acoplado a uma mangueira. A amostra é inserida no tubo metálico, onde um pistão é posicionado no topo da mesma. Seu princípio de operação é baseado no método de capilaridade clássico, onde a amostra do fluido é inserida para fluir através do tubo como resultado da pressão hidrostática. Este método é baseado na lei de Poiseuille's, a qual relaciona a taxa de fluxo capilar à viscosidade do fluido. As limitações do método são relativas às faixas de tensão de escoamento e viscosidade, como também à dimensão máxima do agregado, que não pode ser muito grande.

Uma modificação do abatimento do tronco de cone (ou slump test) foi desenvolvida com o objetivo de permitir uma mensuração da viscosidade. Como comentado anteriormente, o método do abatimento do tronco de cone padrão pode ser relacionado indiretamente com a tensão de escoamento. A modificação no ensaio consiste da medição não apenas da altura de abatimento final como também da velocidade na qual o concreto alcança um abatimento especificado. O método consiste na medida do tempo em que uma placa posicionada no topo da amostra, inserida numa haste, como pode ser

observado pela figura 2.6, desce junto ao concreto ao se deformar em um abatimento de 100 mm (FERRARIS & DE LARRARD, 1998).



**Figura 2.6** – Ilustração procedimento de ensaio do abatimento do tronco de cone modificado ( FERRARIS & DE LARRARD, 1998)

A tensão de escoamento  $\tau_0$  pode ser calculada do abatimento final, após 1 minuto do início do ensaio, usando a equação empírica:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347} (300 - S) + 212$$

Onde  $\rho$  é a densidade expressa em  $\text{kg/m}^3$ , e  $S$  é o abatimento final em mm. A viscosidade pode ser determinada através do tempo ( $T$ ) mensurado para a massa da amostra de concreto “descer” 100 mm usando uma outra equação empírica desenvolvida pelos mesmos autores:

$$\mu = \rho T \cdot 1,08 \times 10^3 (S-175) \text{ para } 200\text{mm} < S < 260\text{mm}$$

$$\mu = 25 \times 10^3 \rho T \text{ para } S < 200\text{mm}.$$

Estas equações foram desenvolvidas através da correlação entre as medidas dos parâmetros fundamentais tensão de escoamento e viscosidades das amostras realizadas no reômetro BTRHEOM e obtidas através do *slump* modificado (DE LARRARD et al 1997; FERRARIS & DE LARRARD, 1998). Este método pode ser aplicado em concreto com faixa de abatimento entre 120 mm a 260 mm.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DA AREIA QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS CONCRETOS

O concreto é um material que possui como principais componentes, aglomerantes, agregados miúdo e graúdo e água. Na realidade ele se constitui de uma suspensão concentrada de partículas sólidas (agregados, que podem ser naturais ou artificiais) em um líquido viscoso (pasta de cimento). A pasta de cimento não é um fluido homogêneo sendo composta de partículas, ou seja, grãos de cimento em um líquido que é a água. Sendo assim, em escala macroscópica, supõem-se que tais concentrações escoam como um fluido, podendo ser aplicada toda a teoria clássica que envolve o escoamento de fluidos conforme já discutido anteriormente.

De forma similar, POPOVICS (1982) define o concreto como uma dispersão<sup>2.2</sup> de sólidos (agregados) em meio a uma matriz cimentícia (pasta de cimento), onde a matriz cimentícia é o meio dispersante. Portanto, o comportamento reológico do concreto está diretamente ligado ao agregado (dimensão, forma e distribuição granulométrica dos grãos), à pasta (características químicas, físicas, quantidade dos materiais constituintes e teor de água) e à interação pasta-agregado.

O estudo reológico do concreto adquire uma certa complexidade por se tratar de um material muito heterogêneo, levando-se em consideração os diferentes fenômenos que ocorrem simultaneamente quando o material se encontra ainda no estado fresco. Além da grande heterogeneidade do material, ressalta-se também a vasta gama de dimensões dos grãos constituintes, o que torna o perfil reológico do concreto a mercê de fenômenos dependentes fundamentalmente (SOBRAL, 1990):

- Dos fenômenos de superfície devidos às partículas finas;
- Dos efeitos de massa devido aos grãos mais grossos.

---

<sup>2.2</sup> Dispersão: é uma suspensão de duas fases: sólido-líquido ou líquido-líquido ou gás-líquido (JASTRZEBSKI, 1976).

Os efeitos de superfície podem ser resumidos simplificadaamente como a predominância da capacidade dos microfinos (partículas menores que 0,075mm) de se atraírem mutuamente, formando aglomerados, ou de apresentarem repulsão eletrostática, formando um sistema disperso. Entende-se por efeito de massa, principalmente, o atrito interno ocasionado pelos grãos mais grossos do agregado quando aplicada uma deformação, notadamente o agregado graúdo.

Nos itens a seguir, será apresentada uma breve discussão de qual a influência que exercem a mudança de alguns características dos agregados miúdos nas propriedades reológicas do concreto, a saber: adição de partículas finas, distribuição granulométrica dos agregados e características de forma das partículas.

### **2.3.1 Adição de finos**

Como já é de amplo conhecimento, a adição de partículas muito finas, ou seja, partículas que passam pela peneira de abertura de malha 0,075mm ao concreto, estas conhecidas atualmente como microfinas ou filler, pode ocasionar uma perda de trabalhabilidade das misturas, pois geralmente a presença de altos teores de partículas finas proporciona um incremento na consistência e uma maior demanda de água. Existe uma tendência cada vez maior de se adicionar grandes quantidades de finos a concretos, principalmente em concretos convencionais e de alta resistência (SBRIGHI NETO, 1975; ÇELIC & MARAR, 1996; NEHDI et al, 1998; DE LARRARD, 1999; QUIROGA & FOWLER, 2003; AHN, 2000; MENOSSI, 2004; LANG, 2006; BASTOS, 2006; LODI & PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2006; RODOLPHO, 2007). Nos trabalhos onde a utilização de microfinos se dá pela substituição de uma parte do cimento da mistura, constatou-se uma melhoria das propriedades tanto no estado fresco quanto também no estado endurecido, se considerados principalmente os finos calcários. Nas pesquisas onde há substituição de parte dos grãos mais grossos da areia pelos microfinos, ou acréscimo destes ao agregado miúdo, houve melhorias nas propriedades do estado fresco e/ou endurecido considerando certos fatores específicos tais como: a presença de aditivos, geralmente superplastificantes ou consumo alto de cimento.

Os finos possuem alta superfície específica, o que pode provocar nos concretos e argamassas ricos em partículas finas, características diferenciadas devido a fenômenos de superfície. De acordo com JASTRZEBSKI (1976), os materiais particulados (ou pó), devido ao grande aumento da superfície específica em relação ao material *in natura*, são caracterizados por possuírem maior reatividade superficial. Esta reatividade está relacionada aos fenômenos de superfície.

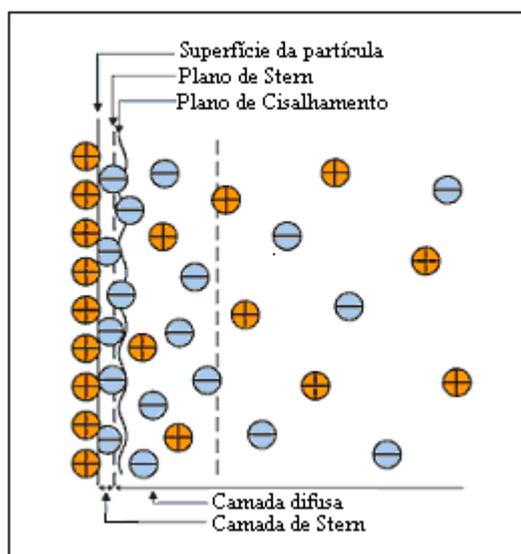
Uma superfície é considerada um limite heterogêneo entre duas fases adjacentes. Uma terminação abrupta da grade dos cristais pode resultar em um único arranjo cristalino dos átomos de superfície os quais, com seus orbitais preenchidos pela metade, tendem a atrair outro elétron. Isto causa um aumento na reatividade superficial das novas superfícies formadas a qual pode concorrer para o aparecimento da adsorção superficial, entre outros fenômenos (JASTRZEBSKI, 1976).

A interação de superfícies sólidas com líquidos ou gases leva à adsorção física ou à quimisorção de moléculas ou átomos na superfície sólida. O caráter desta adsorção depende da energia superficial dos sólidos e da natureza química dos adsorventes. A adsorção física aparece devido às forças de dispersão, como, por exemplo, as forças de Van der Waals. Este tipo de adsorção resulta em sucessivas camadas moleculares, sendo que as camadas adjacentes à superfície sólida estão sujeitas a muito mais forças de atração do que as camadas subseqüentes (JASTRZEBSKI, 1976).

Partículas coloidais dispersas em um líquido exibem um movimento oscilatório ou de “zigzag” conhecido como movimento Browniano. Este fenômeno é o resultado do bombardeamento de partículas pelas moléculas líquidas que estão em um estado de movimento térmico de caráter transitório ou vibracional. Na ausência de forças externas em todas as partículas suspensas, independente de seus tamanhos, as mesmas adquirem a mesma energia cinética translacional (JASTRZEBSKI, 1976).

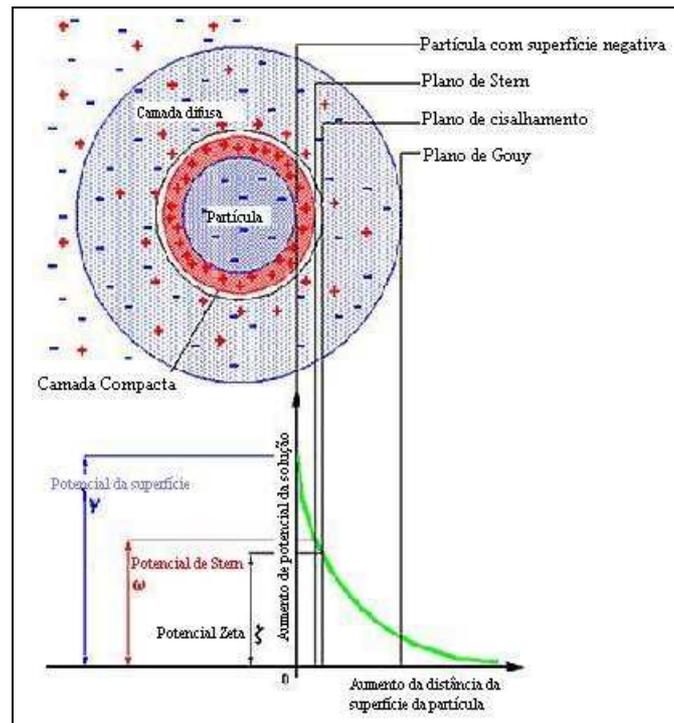
A maioria das superfícies de substâncias finamente divididas adquire carga na superfície, tornando-se eletricamente carregadas em contato com um meio polar (aquoso, por exemplo), resultante de um ou mais mecanismos envolvendo ionização de moléculas da superfície, dissociação de grupos da superfície, adsorção iônica e defeitos da estrutura da superfície. A carga da superfície influencia a distribuição espacial dos

íons próximos à superfície, atraindo íons de carga oposta e repelindo íons de mesma carga (JASTRZEBSKI, 1976; DI BERNARDO, 1993; SILVA, 1999). Este efeito somado ao atrito das partículas devido ao movimento Browniano leva à formação da dupla camada elétrica que consiste de uma superfície carregada e um excesso de contra-íons para neutralizar eletricamente e, afastados da superfície co-íons distribuídos de maneira difusa no meio polar, como se pode observar pela figura 2.7 a seguir:



**Figura 2.7** – Esquema da dupla camada elétrica que envolve a superfície da partícula

A camada de Stern marca a concentração elevada de íons de sinal contrário aos íons da superfície do colóide próximos à superfície, a partir da qual se forma a camada difusa. A dupla camada elétrica corresponde ao ordenamento de cargas positivas e negativas de um modo rígido nos dois lados (sólido/solução) da interface, justamente por isso dando origem à designação dupla camada (ou camada compacta). A camada difusa é uma camada de espessura variável e com a característica principal de que os íons que a constitui estão livres para se moverem (figuras 2.7 e 2.8).



**Figura 2.8** – Configuração esquemática da dupla camada elétrica

De acordo com STERN apud DI BERNARDO (2003) existe uma distância mínima entre a superfície do colóide e os íons de carga contrária, no qual o potencial elétrico decresce linearmente; em seguida a diminuição resulta exponencial passando pela fronteira entre a camada compacta e a difusa, local em que o potencial elétrico é designado potencial zeta. Deste modo, o potencial zeta (figura 2.8) é o potencial elétrico no plano de cisalhamento o qual caracteriza o limite entre os contraíons que conseguem se manter (camada compacta) e os que não conseguem se manter (camada difusa) ao redor da partícula em movimento, o qual é devido à aplicação de um campo elétrico (PAPINI et al, 2002). O potencial zeta, também conhecido pela notação  $\zeta$ , é o responsável pelo comportamento eletrostático da partícula coloidal, ou seja, é a diferença de potencial entre a partícula com a sua camada adsorvida na superfície e a solução (SILVA, 1999).

O potencial zeta é mensurado através da aplicação de um campo de força à dispersão (água + colóides), causando a movimentação das partículas em direção ao pólo de carga oposta àquela da sua superfície, já que partículas dispersas em um líquido apresentam carga superficial. Quando a partícula se movimenta, uma certa porção do meio, em torno da partícula, caminha junto com esta, caracterizando o plano de cisalhamento (DI

BERNARDO, 1993). A velocidade eletroforética<sup>2.3</sup> ( $V_{ep}$ ) destas partículas é proporcional a esta carga. Medindo-se a direção e a velocidade das partículas em um campo elétrico conhecido ( $E$ ), pode-se determinar a mobilidade eletroforética ( $\mu_{ep}$ ):

$$V_{ep} = \mu_{ep} \cdot E \quad (\text{equação 2.9})$$

O potencial zeta é calculado através da equação de Smoluchowski (PAPINI et al 2002):

$$\mu_{ep} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\eta} \cdot \zeta \quad (\text{equação 2.10})$$

Onde:

$\epsilon_r$  – constante dielétrica do líquido

$\epsilon_0$  – permissividade do vácuo

$\eta$  – viscosidade do líquido

$\zeta$  – potencial zeta

Para determinar a velocidade das partículas é utilizado um feixe laser que é espalhado ao atravessar a amostra posicionada entre os eletrodos. A frequência da luz espalhada será modificada proporcionalmente à velocidade das partículas (PAPINI et al 2002).

O potencial zeta indica o grau de estabilidade de um sistema coloidal. Como resultado do movimento browniano, são frequentes os choques entre as partículas, neste momento as forças de atração de Van der Waals<sup>2.4</sup> atuam sobre elas explicando a tendência de agregação das mesmas. A estabilidade da dispersão coloidal, que se opõe à agregação das partículas dispersas, é uma consequência da interação repulsiva entre duas camadas de cargas elétricas iguais, e da afinidade partícula-solvente (JASTRZEBSKI, 1976; DI BERNARDO, 1993; SILVA, 1999). Quando dois colóides semelhantes se aproximam um do outro, ocorre interação entre as camadas difusas fazendo com que haja repulsão devida à força eletrostática entre os mesmos. Deste modo, estão atuantes nas partículas

---

<sup>2.3</sup> A velocidade eletroforética está relacionada à velocidade de movimentação de uma partícula carregada em uma suspensão frente a um campo elétrico aplicado ao sistema.

<sup>2.4</sup> Correspondem a ligações secundárias de atração entre moléculas. Estas forças se tornam significativas quando o tamanho das partículas atinge dimensões inferiores a 10  $\mu\text{m}$ .

de dimensão coloidal ao mesmo tempo forças atrativas, como já explicitado anteriormente e forças dispersivas resultantes da interação entre camadas difusas com potencial elétrico semelhante (ou seja, com carga de mesmo sinal). O efeito resultante destas últimas determinará se as partículas aderirão na colisão e finalmente se precipitam devido às forças gravitacionais (JASTRZEBSKI, 1976).

A floculação e a defloculação são fenômenos que ocorrem apenas na dupla camada iônica difusa. Como já comentado anteriormente, visto que o valor do potencial zeta determina se a partícula coloidal fica em suspensão ou precipitada, então existe um valor de potencial zeta crítico, no qual deflocular ou estabilizar significa possuir um potencial zeta superior ao crítico, enquanto que flocular é possuir um potencial zeta inferior ao crítico. De acordo com PAPINI et al (2002), a estabilização eletrostática de uma suspensão pouco concentrada, à temperatura ambiente, é assegurada para um valor absoluto de potencial zeta de 20mV. Conforme SILVA (1999), existe uma correlação entre potencial zeta e estabilidade de colóides, a qual pode ser observada pela tabela 2.2 a seguir:

**Tabela 2.2** – Relação entre estabilidade de colóides e potencial zeta (SILVA, 1999)

<b>Características de estabilidade</b>	<b>Potencial zeta (milivolts)</b>
Máxima aglomeração ou floculação	+ 3 a zero
Excelente aglomeração ou floculação	-1 a -4
Fraca aglomeração ou floculação	-5 a -10
Fronteira de aglomeração (aglomeração de 2 a 10 colóides)	-11 a -20
Patamar de pequena estabilidade (poucos aglomerados)	-21 a -30
Estabilidade moderada (sem aglomerados)	-31 a -40
Boa estabilidade	-41 a -50
Estabilidade muito boa	-51 a -60
Estabilidade excelente	-61 a -80
Máxima estabilidade	-81 a -100

A energia potencial de repulsão diminui com a distância a partir da superfície do colóide enquanto que para dois átomos a força atrativa de Van der Waals é inversamente proporcional à sétima potência da distância entre os mesmos, porém, para duas partículas constituídas de grande número de átomos, as forças atuantes sobre cada

par de átomos são aditivas, resultando em uma energia de atração inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as superfícies das mesmas. Portanto, dependendo da magnitude das cargas das camadas difusas de duas partículas quaisquer, quanto menor a distância entre suas superfícies, maior a tendência de instabilidade ou floculação (devido às forças atrativas) ou maior a tendência de estabilidade ou repulsão (devido às forças eletrostáticas).

Pela tabela 2.2 acima, pode-se inferir que quanto maior a eletronegatividade das partículas, maior a estabilidade da solução, devido à maior magnitude das forças de repulsão entre as partículas como também devido à maior camada de moléculas de um líquido polar (como é o caso da água) adsorvida na dupla camada (UNIKOWSKI apud ANGELIM, 2000). Esta última característica de estabilidade está possivelmente relacionada às partículas hidrofílicas, ou seja, que possuem afinidade com a água as quais resultam da presença de certos grupos polares, em sua superfície. Esses grupos são solúveis em água e assim atraem firmemente o revestimento de água em volta da partícula, que se chama camada de solvatação. Em outras palavras, partículas hidrofílicas adsorvem fisicamente moléculas de água em sua superfície, e a intensidade desta adsorção possivelmente está associada à magnitude das cargas das partículas.

Diante do exposto, pode-se supor que o fenômeno da solvatação das partículas aconteça em alguns materiais usados na construção civil, como é o caso das argilas, cales e sílica ativa. No caso de algumas argilas, devido à sua eletronegatividade quando em contato com a água, fixa-se uma primeira camada, bastante fina, fortemente ligada, que possui características distintas da água líquida, pois possui moléculas organizadas em uma espécie de estrutura rígida (SOUZA SANTOS apud ANGELIM, 2000). As extremidades negativas das moléculas compondo esta camada podem, por sua vez, atrair uma segunda camada de moléculas orientadas, formando uma camada fracamente ligada, de espessura maior do que a primeira. Esta camada separa a água fortemente ligada da água intersticial – água líquida ou livre. Desta forma, em volta das partículas argilosas – ou possivelmente para outras partículas com outras constituições minerais bastante eletronegativas – existe fixação de uma lâmina de água em volta destas partículas, e mesmo, eventualmente, entre as camadas citadas anteriormente, que age como meio lubrificante, facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras. Tal fenômeno é importante quando o concreto e/ou argamassa se encontram no estado

fresco, porque proporciona uma maior plasticidade de tais misturas. No entanto, esse incremento de plasticidade devido à adsorção de água na superfície se apresenta mais efetivo se as partículas envolvidas apresentarem formato de grãos placóide.

LIDUÁRIO et al (2004) sugere a hipótese que os finos das areias britadas se tornariam aglomerantes devido à energia eletrostática liberada pela quebra das moléculas na britagem. Sendo assim, a adição de microfinos em concretos e argamassas provavelmente pode ocasionar, no estado fresco, as seguintes características:

- O aumento da coesão, viscosidade e da tensão limite de escoamento da mistura devido à floculação das partículas, quando possuírem cargas superficiais com baixas características de estabilidade;
- Aumento da plasticidade, ocasionando uma diminuição da tensão limite de escoamento e da viscosidade, quando as partículas apresentarem cargas eletronegativas até um certo limite, possuindo capacidade de adsorção de água entre seus interstícios;
- Um provável aumento da tensão limite de cisalhamento quando as cargas das partículas se apresentam excessivamente eletronegativas, o que contribui para uma alta retenção de água ao redor da partícula dos microfinos do agregado, diminuindo a quantidade de água disponível do sistema, incrementando assim a consistência da mistura.

Quando as suspensões tendem a ser instáveis ou floculadas, como é o caso das suspensões de partículas de cimento em água, existem algumas maneiras de dispersar o sistema, tornando as pastas de cimento menos coesa e mais fluida, melhorando consideravelmente a trabalhabilidade de concretos e argamassas. Com o objetivo de conferir uma maior dispersão ao sistema água-cimento, foram desenvolvidos os aditivos tensoativos incorporadores de ar e redutores de água ou plastificantes, além dos aditivos superplastificantes. Contudo, os tipos de aditivos que foram concebidos efetivamente com o objetivo de fornecer uma estabilização eletrostática, estérica e/ou eletroestérica foram os aditivos plastificantes e os superplastificantes.

### 2.3.2 Distribuição Granulométrica

Os primeiros estudos abordando a otimização da curva granulométrica dos agregados (tanto miúdo quanto graúdo) tinham como principal objetivo maximizar a compacidade ou densidade de empacotamento do corpo granular, como uma alternativa econômica, já que, teoricamente, ao minimizar o volume de vazios do agregado, menor a necessidade de pasta aglomerante para preenchê-los. A distribuição granulométrica afeta significativamente algumas propriedades do concreto tais como densidade de empacotamento, teor de vazios, e, conseqüentemente, trabalhabilidade, segregação, durabilidade, entre outras propriedades.

A distribuição de tamanhos do agregado miúdo desempenha um importante papel na trabalhabilidade, segregação e bombeabilidade do concreto fresco. Muitos autores reivindicam que misturas realizadas com agregados de distribuição granulométrica uniformemente distribuída ou contínua produzem concretos com melhor trabalhabilidade do que distribuições descontínuas (*gap-graded*), embora altos resultados de abatimento do tronco de cone foram alcançados com estas distribuições (QUIROGA & FOWLER, 2003). Cabe salientar aqui que, na realidade, a distribuição granulométrica do agregado irá otimizar as propriedades do concreto se levados em consideração a forma, o grau de angulosidade das arestas e a textura superficial dos grãos. Portanto, uma distribuição granulométrica que pode ser adequada para areias naturais pode não levar a melhores resultados quando consideradas as areias artificialmente britadas (HUDSON & JOHANSSON apud QUIROGA & FOWLER, 2003).

O conceito de densidade de empacotamento não é novo já que desde 1907 Fuller e Thompson investigaram a importância da distribuição de tamanhos do agregado e das propriedades do concreto com base na densidade de empacotamento dos materiais constituintes (GLAVIND & PEDERSEN, 1999). SUENSON apud GLAVIND & PEDERSEN (1999) apresentou em 1911 diagramas experimentais baseados na densidade de empacotamento dos agregados, enquanto que Powers desenvolveu um extenso trabalho de pesquisa com o objetivo de alcançar o melhor proporcionamento dos materiais de acordo com a densidade de empacotamento das partículas (PILEGGI, 2001).

A pesquisa básica sobre a teoria do empacotamento foi iniciada por Furnas em 1931, sendo que este pesquisador elaborou sua teoria considerando as partículas com formato esférico além de assumir que as partículas mais finas preencheriam todas as cavidades das partículas mais grossas, sem alterar, entretanto, o empacotamento dos grãos maiores (GLAVIND & PEDERSEN, 1999). Então, desde Furnas, os modelos de empacotamento têm sido desenvolvidos. Estes modelos iniciais foram desenvolvidos considerando apenas partículas com formato esférico, sistemas polidispersos com dois ou três tamanhos sem interação significativa, ou seja, nenhuma perturbação de volume – uma partícula com relação à outra – como também nenhuma interação física e/ou química de superfície dos microfios adicionados.

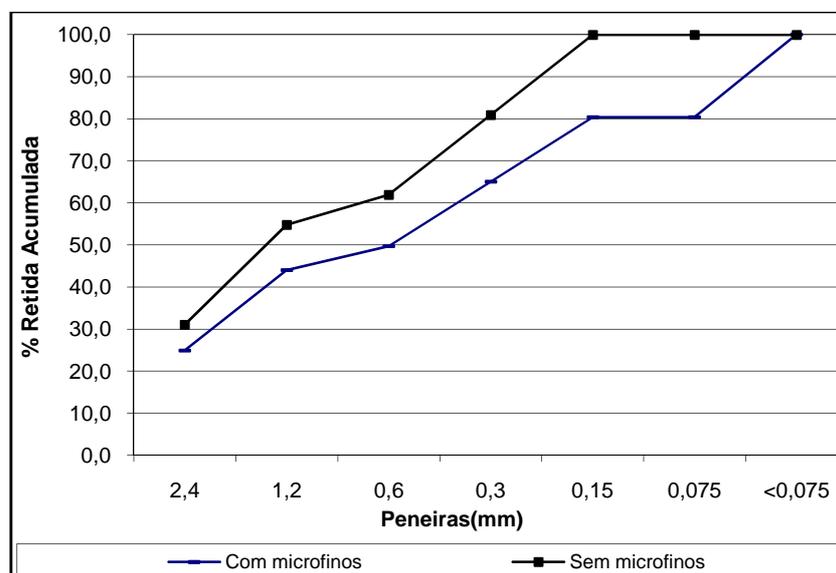
Atualmente existem alguns modelos que objetivam prever a composição de traço mais otimizada levando em consideração a densidade de empacotamento e/ou a distribuição granulométrica dos grãos. Dentre eles poderiam ser citados: o método de GLAVIND & PEDERSEN (1999); Método Shilstone e o Europack (QUIROGA & FOWLER, 2003); método Aïtcin-Faury modificado (SILVA, 2004; FORMAGINI, 2005); Teoria das Misturas de Partículas (DEWAR apud QUIROGA & FOWLER, 2003) e o Modelo do Empacotamento Compressível (DE LARRARD, 1999). Na realidade, o método Europack não é um método de dosagem propriamente dito, mas sim um programa para o cálculo da densidade de empacotamento de misturas secas com dois ou três componentes e o proporcionamento de traço do concreto é realizado pelo método de dosagem do ACI.

O modelo de empacotamento de uma mistura granular de partículas mais comumente aceito e utilizado atualmente é o Modelo do Empacotamento Compressível (M.E.C.), desenvolvido por DE LARRARD (1999). Tal método é estruturado dentro de um quadro teórico científico solidamente estabelecido. Sua eficiência tem sido comprovada para diferentes tipos de concreto, podendo-se dosar com este método, dentre outros, concretos de resistência normal, concretos de alto desempenho, com pós-reativos, jateados, auto-adensáveis, compactados a rolo e de diferentes densidades (FORMAGINI, 2005).

O Modelo do Empacotamento Compressível divide-se em dois módulos distintos, a saber: empacotamento virtual e empacotamento real. O primeiro módulo corresponde a um modelo matemático-teórico que possibilita a obtenção da máxima compacidade possível de uma mistura granular, que seria obtida com o ajuste geométrico das partículas uma a uma. Já no segundo módulo desenvolve-se um índice de compactação real (K) o qual é dependente unicamente do protocolo de compactação utilizado (vibração com compressão, vibração, pilonamento, molhagem, etc.). Desse modo, o empacotamento real está correlacionado ao empacotamento virtual por meio deste índice de compactação K. Os dois módulos relacionados através de tal índice, permitem o cálculo da compacidade real de uma mistura granular, compacidade esta que é otimizada através do procedimento de empacotamento com vibração adicionada a uma compressão (DE LARRARD, 1999).

O método de proporcionamento de Larrard é um grande avanço em relação aos outros métodos de dosagem, pois, além de considerar no cálculo das compacidades infinitas classes polidispersas (ou seja, vários tamanhos de grãos dispersos), leva em consideração em sua formulação indiretamente a composição litológica dos agregados e o formato dos grãos – já que a forma dos grãos depende da litológica, no caso de agregados britados e a densidade de empacotamento depende bastante da forma das partículas – além da adição de fibras, microsilica, adições e aditivos, como também uma tentativa de prever o empacotamento de partículas finas com o procedimento de empacotamento úmido (demanda de água) com o intuito de prever os fenômenos de superfície descritos anteriormente (já que as partículas finas só adquirem carga superficial em presença de água). Entretanto, FERRARIS (1999) comenta que o modelo de De Larrard assume que o concreto é formado por um empacotamento de partículas, mas nenhuma força interpartícula é considerada diretamente. A única referência das interações interpartículas é o conhecimento de que todas as propriedades são dependentes do tempo, implicando que fenômenos tais como floculação das partículas de cimento e hidratação, ocorrem continuamente na massa de concreto fresca. Dessa forma, apesar de proporcionar uma dosagem bastante eficiente dos concretos, considerando os estados fresco e endurecido, o concreto dosado com o Método do Empacotamento Compressível eventualmente necessita de ajustes de dosagem no laboratório.

De acordo com os estudos desenvolvidos por QUIROGA & FOWLER (2003), existem curvas granulométricas de agregados miúdos que proporcionam um melhor resultado do abatimento do tronco de cone. Tais curvas foram compostas baseadas no Modelo do Empacotamento Compressível e estão constantes na figura 2.9 a seguir:



**Figura 2.9** – Curvas que proporcionam otimização nos resultados de Abatimento do Tronco de Cone QUIROGA & FOWLER (2003).

Os autores desenvolveram tais curvas para concretos com a presença de aditivos plastificantes e sem aditivos plastificantes para diversos tipos de areia britada e dois tipos de areia natural de rio. Quando foram adicionados microfios (partículas menores que 0,075 mm), não foram adicionados finos com tamanho de partícula igual a 0,075 mm e vice-versa. Neste estudo, foi notado que os microfios calcários, mesmo em altos teores (>12%), proporcionaram uma melhoria da consistência dos concretos se comparados aos finos das areias com os demais tipos litológicos utilizados.

### 2.3.3 Forma e textura dos grãos das areias

O estudo das características granulométricas dos agregados que afetam as propriedades dos concretos e argamassas tem sido extensivamente pesquisados pelo meio científico. No entanto, existe uma maior escassez de pesquisas que correlacionem aspectos de forma e textura dos grãos dos agregados com as propriedades destes produtos, principalmente as propriedades no estado fresco (ARAÚJO, 2001). Sabe-se que a forma das partículas exerce bastante influencia nas propriedades dos concretos, tanto no

estado endurecido, quanto no estado fresco. Em relação às propriedades no estado fresco, quanto mais alongada e/ou achatada a forma do agregado, menor a densidade de empacotamento deste, ou seja, maior o volume de vazios, e mais necessidade de pasta aglomerante para uma mesma consistência (SOBRAL, 1990; MEHTA & MONTEIRO, 1994; DE LARRARD, 1999). Partículas onde os eixos dimensionais não são proporcionais (alongada ou achatada, por exemplo), possuem tendência de incremento da tensão limite de escoamento e da viscosidade, devido ao maior atrito interno gerado pelos grãos maiores (SOBRAL, 1990; DE LARRARD, 1999), enquanto que grãos cúbicos oferecem pouca resistência ao movimento na pasta de cimento (HUDSON, 1999).

Devido à crescente preocupação de se utilizar areias artificialmente britadas em argamassas e concretos pelos meios científico e técnico, um maior número de pesquisas técnicas e/ou científicas têm sido realizadas com o enfoque de analisar a forma, grau de arredondamento e textura dos grãos do agregado, como também os métodos de análise de tais características, para melhor inferir sobre o comportamento dos concretos e argamassas confeccionados com este tipo de areia (D'AGOSTINHO & SOARES, 2001; ARAÚJO, 2001; QUIROGA & FOWLER, 2003; CUNHA et al, 2005; GONÇALVES, 2005). QUIROGA & FOWLER (2003) realizaram, por exemplo, uma série de análises dos aspectos de forma tanto do agregado graúdo quanto do miúdo, utilizando vários métodos de análise das características de formas dos grãos, sem, contudo, obter correlações satisfatórias entre tais métodos. Neste mesmo trabalho, foi realizada uma tentativa de correlacionar os índices de forma obtidos com os diferentes métodos com as densidades de empacotamento realizadas com diferentes métodos também. Chegou-se à conclusão principal de que, no geral, quanto maior a densidade de empacotamento dos agregados, maiores os resultados de abatimento de tronco de cone e de espalhamento, com agregados possuindo uma mesma curva granulométrica.

De acordo com a NBR 7389 (ABNT, 1992), a forma do grão é avaliada visualmente, seja a olho nu ou com o auxílio de lupa, através de comparação com uma figura contendo formas padrões de grãos (figura 2.10). O resultado será obtido de acordo com o grau de esfericidade (alto ou baixo) e o grau de arredondamento (angular, subangular, subarredondado ou arredondado).



**Figura 2.10** – Carta de avaliação visual dos graus de esfericidade e arredondamento constante na NBR 7389 (1992)

Matematicamente o arredondamento é definido por Wadell apud SUGUIO (1980) pela seguinte fórmula:

$$P = \sum \left( \frac{r_i}{R} \right) \cdot \frac{1}{N}$$

Em que:

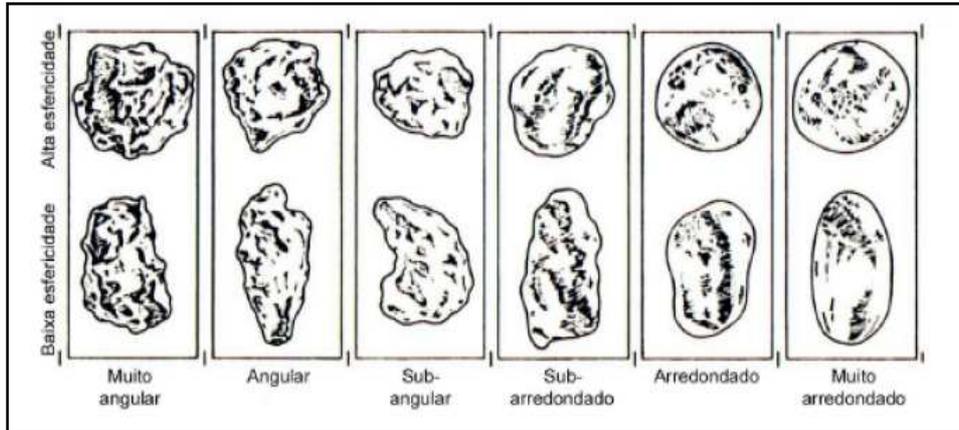
$r_i$  são os raios individuais das arestas;

$N$  é o número de arestas;

$R$  é o raio da circunferência máxima inscrita.

O Arredondamento de partículas é definido como uma medida do grau de curvatura dos cantos (pontas e arestas) e independe da forma do grão (SUGUIO,1980). O índice proposto por SHEPPARD apud SUGUIO (1980) foi o adotado neste trabalho em razão de ser acompanhado de um índice numérico (figura 2.11). Este índice possui seis classes de arredondamento, sendo que a classe muito angular e angular correspondem à classe anguloso da NBR 7389 (ABNT, 1992) e, da mesma forma, as classes arredondado e muito arredondado correspondem à classe arredondado da citada norma. Os valores numéricos correspondentes a cada classe estão expressos a seguir SHEPPARD apud SUGUIO (1980):

Muito angular – 0.12 a 0.17;  
 Angular – 0.17 a 0.25;  
 Subangular – 0.25 a 0.35;  
 Subarredondado – 0.35 a 0.49;  
 Arredondado – 0.49 a 0.70;  
 Bem arredondado – 0.70 a 1.00.



**Figura 2.11** - Carta visual de índice de arredondamento proposto por SHEPPARD apud SUGUIO (1980)

Considerando três eixos dimensionais, a esfericidade é uma medida de quão aproximadamente iguais são os três eixos da partícula. O formato dos grãos é um índice baseado na relação entre os três eixos (eixo maior, intermediário e menor). O formato dos grãos é também usado para distinguir entre partículas que possuam graus de esfericidade similares (MEHTA, 1994; HUDSON, 1998). Além da esfericidade e do formato dos grãos, dois outros parâmetros têm sido usados para definir a forma dos grãos: o fator de alongamento e o fator de achatamento. Considerando as três dimensões principais de uma partícula como sendo dimensões longa, intermediária e curta (L, I C), então:

A esfericidade é dada pela fórmula :  $\sqrt[3]{\frac{C.I}{L^2}}$

O fator de forma (ou formato dos grãos) é dado pela fórmula:  $\frac{L.C}{I^2}$

O fator de alongamento pode ser obtido de acordo com a relação:  $\frac{I}{L}$

E o fator de achatamento é dado pela relação:  $\frac{C}{I}$

De acordo com a NBR 7389 (ABNT, 1992), a textura é o aspecto ou feição superficial do grão, independente do formato da partícula, arredondamento e tamanho do grão.

Portanto, de acordo com a supracitada norma, a textura varia segundo as qualificações:

- Lisa: textura de superfície plana que reflete a luz.
- Fosca: textura de superfície sem brilho, não reflete a luz.
- Rugosa: textura de superfície que apresenta irregularidades: dobras, pregas, ranhuras. Pode refletir a luz ou não.
- Polida: textura de superfície não plana que reflete a luz.
- Mista: o mesmo grão apresenta texturas diferentes (lisa e polida, rugosa e lisa, etc).

No entanto, acredita-se que a textura superficial é importante para a trabalhabilidade dos concretos e argamassas se for encarada como a rugosidade superficial, ou seja, a quantidade de reentrâncias que aumentam a área superficial dos grãos, portanto, ela é a soma de mini-superfícies adicionais se comparadas com um grão com superfície completamente lisa. HUDSON (1998) sugere que o formato da partícula é um índice que exerce maior influência na trabalhabilidade de concretos e argamassas do que a textura superficial da mesma. MURDOCK apud HUDSON (1999) sugeriu um índice de superfície que é tanto mais alto quanto maior a influência negativa na consistência dos concretos. Para Murdock, as faixas granulométricas que exercem efeitos mais negativos quando possuem formato de grãos inapropriado estão compreendidas entre 1.2 mm a 0.15 mm.

## 2.4 AVANÇOS RECENTES RELACIONADOS À UTILIZAÇÃO DE AREIA BRITADA NOS CONCRETOS

Neste item serão discutidos alguns resultados referentes aos estudos técnicos-científicos mais recentes acerca da viabilização da utilização da areia britada em concretos. Apesar dos muitos trabalhos publicados, percebe-se que a grande maioria das pesquisas na área, até o presente momento permanecem enfocando as propriedades no estado endurecido, sem, no entanto, realizarem uma investigação detalhada acerca das propriedades do concreto no estado fresco como também poucos trabalhos dão ênfase à otimização das características da própria areia britada para se obter melhores parâmetros de trabalhabilidade, tais como, otimização da curva granulométrica, estudo dos aspectos de forma e textura dos grãos e definição de qual parâmetro real dos grãos influenciariam na consistência, viscosidade e tensão de escoamento, a influência e contribuição das partículas microfinas nas propriedades reológicas e de consistência, dentre outros.

Nos trabalhos de WESTERHOLM et al (2008) e ERDOGAN et al (2008) nota-se uma preocupação com a influência da forma e textura dos grãos de areia nas propriedades reológicas do concreto, sendo que o primeiro estudo foi realizado em argamassas para concreto. Os principais resultados mostraram que a rugosidade dos grãos não exerce influência significativa nos parâmetros reológicos, enquanto que o formato dos grãos parece exercer maior efeito na viscosidade plástica em detrimento da tensão limite de escoamento. Foi concluído também que, ao se aumentar o teor de pasta das argamassas e concretos, o efeito negativo – em relação à consistência – das areias com formato pobre, ou seja, mais alongadas ou achatadas, era reduzido ou totalmente eliminado.

No trabalho de RODOLPHO (2007) foram realizadas várias séries de concreto, no qual o objetivo principal era avaliar a influência nas propriedades do estado fresco dos teores de finos (material menor do que 0.15 mm) de duas areias britadas (calcário dolomítico com tratamento de forma e sem tratamento de forma) e misturas controle produzidas com areia natural. As conclusões apontaram que para os consumos entre  $540\text{kg/m}^3$  a  $615\text{kg/m}^3$  não se observou lubrificação efetiva por parte dos finos das areias, sendo a viscosidade dos concretos comandada pelo teor de cimento. Os finos se apresentaram como lubrificantes, com redução da viscosidade, para consumos de cimento entre  $390\text{kg/m}^3$  a  $540\text{kg/m}^3$  nas areias natural e britada com tratamento de forma, e não

resultaram em efeito lubrificante nas misturas produzidas com o agregado miúdo sem tratamento de forma, sendo tal comportamento observado para os concretos com e sem aditivo plastificante. Para a faixa de consumo de cimento entre  $330 \text{ kg/m}^3$  a  $390 \text{ kg/m}^3$  e nas misturas sem aditivos, foi observado um aumento de viscosidade nos teores de 0, 18 e 25% de finos, mas, no entanto, com 10% de finos os concretos apresentaram, no geral, uma queda no valor da viscosidade. Um fato interessante é que, para as misturas realizadas nesta pesquisa, com a adição de aditivo plastificante houve uma tendência de aumento da viscosidade independente das faixas de consumo de cimento e relação água/cimento. Já em relação à propriedade reológica tensão de escoamento, verificou-se, principalmente para a areia britada com tratamento de forma, uma tendência de diminuição desta propriedade nos teores de finos de 10% e 18% e um aumento para 0% e 25%, se considerados os consumos acima de  $390 \text{ kg/m}^3$ . Os concretos produzidos com a areia sem tratamento de forma e na faixa de consumo entre 390 a  $540 \text{ kg/m}^3$  apresentaram tensão de escoamento decrescente nos teores 18 e 25%. Já as misturas com faixa de consumo de cimento entre 330 a  $390 \text{ kg/m}^3$  resultaram em acréscimo na tensão de escoamento se considerados os teores de 18 e 25% e uma diminuição desta com a quantidade de finos igual a 10%, se comparada à mistura com 0% destas partículas. Cabe salientar que, no entanto neste trabalho, os parâmetros de mistura relação água/materiais secos, teor de argamassa seca e consumo de cimento não foram fixados, sendo os resultados analisados em relação às faixas de valores destes mesmos parâmetros.

LANG (2006) utilizou em seu trabalho areias de origem balsática lavada (sem microfinos) e sem lavagem, sendo o método de dosagem usado o do ITERS/ IPT/ EPUSP onde foi encontrado um teor de argamassa de 63%, mesmo com o alto consumo da mistura piloto em torno de  $370 \text{ kg/m}^3$  com o objetivo de se encontrar abatimento de 90 mm, com utilização de aditivo plastificante na mistura piloto. Com aproximadamente 13% de microfinos, a areia britada não lavada necessitou de maior consumo de água, para um mesmo abatimento, mas mesmo tal fato não impossibilitou o melhor desempenho mecânico em comparação com a areia lavada. O autor concluiu que no geral, a areia com presença de alto teor de microfinos apresentou melhor desempenho, apesar de, nesse trabalho, não terem sido realizadas tentativas de se utilizar outros teores de materiais pulverulentos a fim de analisar o efeito destes nas propriedades dos concretos.

(LODI & PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2006) realizaram um estudo sobre a influência nas características de consistência e estado endurecido da areia britada, usando para tal fim agregado miúdo de origem basáltica, com grãos arredondados e 16,7 % de material pulverulento, e uma segunda areia de mesmo tipo litológico e formato lamelar com teor de microfinos igual a 11,1%, ambas em substituição parcial à areia natural de leito de rio. Com este estudo, foi concluído que a substituição de areia natural por areia de britagem resultou ótima com as percentagens 65% de areia de britagem e 35% de areia natural, estudo este realizado em argamassas. Ao se usar estes teores em concretos, foi concluído que a substituição com areia lamelar necessitou de um maior consumo de água para uma dada consistência, fixada para um abatimento de  $100 \pm 20$  mm. As resistências à compressão encontradas, considerando uma mesma relação água/cimento, foram superiores no concreto constituído de 65% de areia basáltica arredondada e 35% de areia natural, e a menor resistência mecânica, para os concretos realizados com areia basáltica lamelar. Os menores consumos de cimento foram obtidos com a composição de 65% de areia de britagem arredondada e 35% de areia natural, seguida do concreto produzido com 100% de areia natural, para uma mesma resistência. É importante observar que nesse estudo, não houve uma tentativa de utilização de concreto com substituição total de areia natural pela basáltica. Além disso, não foi realizada análise de forma e textura dos grãos, nem uma otimização do teor de finos com o objetivo de avaliar o comportamento das misturas no estado fresco.

BASTOS et al (2006) ao dosar o concreto pelo método ABCP utilizando areia britada com valor aproximado de 13% de microfinos, concluíram que tal concreto obteve consistência mais fluida do que a mistura produzida com areia natural, necessitando, inclusive, de menor consumo de água para uma mesma consistência. A areia de britagem proporcionou também melhores resultados de resistência mecânica (compressão e módulo de deformação). No entanto não houve, neste trabalho, tentativa de utilização de outros teores de microfinos como uma maneira de avaliar as propriedades, tanto no estado fresco, como no endurecido.

GONÇALVES (2005) classificou a areia britada através da diminuição do teor de microfinos (partículas com dimensões menores que 0,075 mm) para a utilização em concretos, e fez uma caracterização com índices de forma – esfericidade e fator de

forma, sendo este último relacionado à lamelaridade do material – dos finos contidos na faixa 0,115 a 0,075 mm da areia natural, areia natural do IPT, pó-de-pedra e areia britada classificada. Encontrou uma maior lamelaridade para o pó-de-pedra, seguido da areia britada. No entanto, este trabalho não apresenta correlação entre as propriedades no estado fresco diferenciais dos concretos realizados com tais agregados miúdos e os índices de forma supracitados. Notou-se, entretanto, que as areias britadas apresentaram maior densidade de empacotamento (protocolo de empacotamento com  $k=9$ , DE LARRARD, 1999) do que as areias do IPT e areia natural de leito de rio. O abatimento foi mantido constante através de aditivo superplastificante, sendo que o objetivo principal do trabalho foi a investigação das propriedades mecânicas ao se substituir as areias naturais supracitadas pela areia britada. O autor chegou à conclusão que a substituição da areia natural pela areia britada é plenamente possível, já que, principalmente considerando a areia de britagem sem classificação, foi notado um aumento das propriedades mecânicas.

REIS (2005) beneficiou a areia britada de gnaiss e calcária de forma que, por peneiramento, as mesmas apresentassem mesmo valor em massa por peneira – análogo à areia normal para ensaio de cimento do IPT, em relação às peneiras 1.2 até 0.15 – além de usar os teores de finos (material passante da peneira 0.15 mm) igual a 2, 3 e 5% para as areias natural, gnaiss e calcário, respectivamente. Com tais mudanças na composição granulométrica e no teor de finos, foi verificada que se precisou de um teor baixo de argamassa seca (em torno de 45%), para um abatimento de 70 mm. Neste trabalho foi também observado pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), um contato mais íntimo entre a areia de calcário (com presença preponderante do mineral calcita) e a pasta de cimento hidratada, maior do que com a areia de gnaiss. Houve um desempenho mecânico melhor das areias britadas em relação à natural de leito de rio. O autor concluiu que, no geral, as propriedades dos concretos resultaram melhores com uma substituição parcial do agregado natural em 80% em relação à areia britada. Como o trabalho foi realizado baseado em substituição parcial e total, e enfatizando-se apenas as propriedades no estado fresco, chegou-se a um maior valor de abatimento com o concreto no qual houve substituição total do agregado natural pela areia de gnaiss, menores resultados com o uso de 100% de areia natural e areia calcária, ambas as misturas com 70 mm de abatimento. Outra fato interessante é que o concreto com 100% de areia natural obteve curva granulométrica que se adequou perfeitamente à curva

contínua de Bolomey. Apesar da experimentação em relação à curva granulométrica, neste trabalho também não houve a preocupação em variar os teores de microfinos e conseqüente investigação da influência destes nas propriedades dos concretos.

MENOSI (2004) ao proceder à substituição parcial e total da areia natural por pó-de-pedra com aproximadamente 13% de material fino, notou que a consistência se apresentou maior no concreto produzido com este último, mas que o mesmo propiciou ganhos de resistência mecânica significativo, mesmo necessitando de um consumo de água maior, sem aditivos. Nesse estudo também, notou-se uma acentuada perda de abatimento, a qual o autor apontou como uma solução para tal característica, a adoção de aditivos polifuncionais.

QUIROGA & FOWLER (2003) do International Center for Aggregate Research , Austin, Texas, desenvolveram um estudo bastante extenso com a utilização de areias britadas de diferentes tipos litológicos em argamassas e concretos. As areias adotadas neste estudo foram: areia natural de duas procedências, areias artificialmente britadas de calcário, granito e basalto denso. Os concretos foram executados com uma relação água/cimento fixa (0,41) e com aditivos superplastificantes. Foi notado, dentre outras coisas que, com relação às propriedades no estado fresco:

- A utilização de altos teores de microfinos aumentou a demanda de água, principalmente a partir de 15% de microfinos, para um dado valor de abatimento;
- A utilização de altos teores de microfinos, independente do tipo litológico, causou o efeito de diminuição do abatimento do tronco de cone;
- Os microfinos calcários demandaram menores teores de água do que os finos graníticos e de basalto denso e menos aditivos superplastificantes, dada uma mesma trabalhabilidade;
- A utilização de um tipo de cinza volante resultou na diminuição da quantidade de superplastificante requerida para uma dada consistência;
- Pelos resultados alcançados neste estudo, não houveram correlações significativas entre os diversos métodos usados para predizer a forma, textura e grau de arredondamento dos grãos;

- As areias britadas apresentaram resultados de densidade de empacotamento pouco inferiores do que as areias naturais consideradas;
- Não foram correlacionados de forma direta, neste estudo, a influência da forma, textura e grau de arredondamento nas propriedades reológicas e de consistência do concreto. Houve uma tentativa de correlacionar tais características de forma das partículas mensuradas com dois métodos diferentes – nas partículas de 0,6 mm e 1,2 mm – com a densidade de empacotamento das misturas (mensuradas com 4 métodos diferentes, incluindo o método do empacotamento compressível – DE LARRARD, 1999). Não foram encontradas correlações conclusivas entre os índices de forma e os métodos que avaliaram a densidade de empacotamento, com curva de ajuste que apresentaram  $R^2$  menores que 0,40;
- Foi concluído pelos autores que nem sempre a densidade de empacotamento máximo deve ser a principal meta, já que para alcançar altas densidades de empacotamento, uma grande quantidade de grãos maiores deve ser adicionada à mistura, aumentando assim a aspereza no estado fresco e incrementando a capacidade de segregação das misturas frescas, considerando os concretos realizados neste estudo.
- Foi inferido ainda, com os resultados alcançados, que a composição granulométrica é a característica que desempenha maior importância na trabalhabilidade dos concretos e argamassas, sendo que os perfis uniformes, ligados a altas densidades de empacotamento, proporcionaram adequados valores de consistência. No entanto estes autores chegaram à conclusão que a granulometria ideal depende da propriedade fim a que se quer otimizar, como exemplo, a consistência, viscosidade plástica ou densidade de empacotamento, comentando que em geral, as misturas otimizadas para máxima consistência são muito grossas, propensas à segregação e apresentavam baixa trabalhabilidade devido à falta de finos, apesar dos altos resultados de abatimento destas curvas granulométricas com a adição de aditivo superplastificante. Esta curva foi proposta por DE LARRARD (1999) como a curva ótima que proporcionaria alto valor de abatimento.
- Houve baixa relação entre a mudança na granulometria e resistências mecânicas.
- O modelo do empacotamento compressível (M.E.C.) considera a forma e a textura (através da densidade de empacotamento) dos agregados e dos materiais

cimentíceos para predizer o comportamento no estado fresco e endurecido de argamassas e concretos. Para misturas com a mesma relação água/cimento, o M.E.C. fez predições que se relacionaram bem com os resultados experimentais. Desta forma, segundo os autores, este método confere uma boa ferramenta para otimizar misturas com diferentes composições granulométricas e proporções de materiais, embora algumas tentativas de misturas foram realizadas no início para calibrar o modelo;

Não obstante as várias conclusões interessantes, as tentativas de melhorias dos concretos no estado fresco não levaram em consideração a investigação criteriosa dos aspectos de forma e textura, a influência do aumento de microfinos ou otimização de curva granulométrica, ou seja, ao se desejar encontrar misturas mais fluidas, a primeira opção sugerida e efetivamente utilizada foi o uso de aditivo superplastificante.

Na pesquisa realizada por BASTOS (2002) a substituição parcial da areia natural por areia de britagem obteve melhores características (melhor composição granulométrica) ao se diminuir a superfície específica dos agregados, pela substituição de areia miúda muito fina. Ao se proceder tal substituição, houve uma diminuição no consumo de água, para um dado abatimento. Até 50% de substituição da areia natural pela britada de basalto, não houve perda de abatimento. Com 70% de substituição, houve perda de abatimento de 30% e textura superficial do concreto, o qual a autora justificou pela forma inadequada dos grãos, sem, no entanto, realizar uma análise qualitativa ou quantitativa de forma dos grãos. Houve um decréscimo da relação água/cimento com o aumento da substituição seguido de um aumento no consumo de cimento. Não houve tentativa de maximização da quantidade de microfinos, sendo que estes resultaram entre 3 a 7%. Com o aumento de substituição houve também um aumento da resistência à compressão da resistência à compressão e tração por compressão diametral além de uma redução da porosidade refletida na absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, ascensão capilar máxima e profundidade de carbonatação, para a substituição de 70% da areia natural. As misturas foram produzidas com o uso de aditivos plastificantes. O melhor abatimento ficou em torno de 80 mm. A substituição 70% de areia britada e 30% de areia natural foi considerada como a que apresentou os melhores resultados no geral.

AHN (2000) realizou um estudo com diversos agregados de diversas procedências dos Estados Unidos, usando-os em argamassas e concretos. Chegou à conclusão de que em relação às propriedades no estado fresco, as areias apresentaram baixo desempenho em relação aos ensaios de abatimento e VEBE devido ao alto teor de finos além da baixa relação água/materiais secos utilizada se comparados ao resultado do concreto de referência. Apesar disso, os agregados britados propiciaram, no geral, resistências mecânicas superiores ao do concreto de referência. O principal objetivo deste trabalho foi analisar a influência das características físicas dos agregados, como também da adição de microfinos, nas propriedades do concreto no estado endurecido. Baseado nos resultados das propriedades mecânicas dos concretos, o autor sugeriu que se pode usar um teor de microfinos maior que 18%, desde que se utilize, para tanto, aditivos superplastificantes para corrigir a consistência das misturas.

A maioria dos estudos científicos que abordam uma substituição completa da areia natural pela areia artificialmente britada geralmente o faz considerando apenas um tipo litológico FARIA & CRUZ (2003); MENOSSI et al (2004); ALMEIDA (2005); GONÇALVES (2005); CUNHA et al (2005); LANG (2006); RODOLPHO (2007) entre outros. FARIA & CRUZ (2003) procederam a uma tentativa de substituição completa da areia natural lavada de leito de rio pela areia artificialmente brita do tipo litológico calcário, mas não obtiveram resultados adequados de trabalhabilidade, na qual os concretos foram qualificados como muito ásperos. ALMEIDA (2005) e GONÇALVES (2005) usaram areias britadas do tipo litológico granítico e obtiveram propriedades adequadas dos concretos com a adição de aditivo plastificante (ALMEIDA, 2005) e de superplastificante (GONÇALVES, 2005). Ambos os estudos apontam como restrição ao uso de areia britada, a necessidade de aumento do teor de cimento das misturas contendo areia de britagem em detrimento das misturas com areia natural.

PRUDÊNCIO et al (1995) realizaram uma investigação granulométrica do pó-de-pedra usando a metodologia de separar o pó de pedra através de material retido e passante na peneira 0.6 mm, onde chegaram à conclusão que a mistura contendo 70% de material retido nesta peneira e 30% passante na mesma, resultaram em melhor resultado de abatimento, mesmo se comparado ao concreto de referência, além de menor consumo de água. No entanto, tal mistura se apresentou menos coesa que a obtida usando-se como material retido na peneira 0.6mm e passante desta, respectivamente 60% e 40%.

Apesar de realizar uma tentativa de otimização granulométrica, neste trabalho não foi contemplado o aumento do teor de finos e/ou microfinos dos concretos como forma de melhorar a coesão das misturas.

Os estudos os quais os objetivos principais eram avaliar as propriedades dos concretos produzidos com areias naturais e britadas de diferentes litologias (SBRIGHI, 1975; DONZA et al, 2003; QUIROGA & FOWLER, 2003; MONTEGRO FILHO & MACHADO, 2003) chegaram a conclusões semelhantes. Os concretos produzidos com altos teores de microfinos só apresentaram adequadas características no estado fresco com a utilização de aditivos superplastificantes, para uma dada consistência previamente fixada, independente do tipo litológico considerado. MONTENEGRO FILHO & MACHADO (2005) notaram também a necessidade de aumentar o teor de argamassa das misturas com tipo litológico calcário dolomítico em relação às misturas realizadas com a litologia micaxisto e a areia natural. DONZA et al (2003) reduziram o consumo de cimento dos concretos de alto desempenho executados com areia britada de diferentes litologias, com o aumento do teor de aditivo superplastificantes. Nesse estudo foi concluído que a areia dolomítica apresentou inadequadas características de consistência, o que impossibilitou a sua utilização. A mistura com areia calcária resultou com melhores características das areias britadas analisadas neste estudo – mesmo apresentando alto teor de microfinos – considerando menor consumo de cimento em relação inclusive à areia natural, porém com maior consumo de aditivo superplastificante e resultados de abatimento do tronco de cone similar aos das misturas confeccionadas com areia natural.

Em relação às propriedades no estado endurecido, todos os trabalhos citados neste item realizaram a determinação de propriedades tais como resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, porosidade, absorção capilar entre outros, e parece não haver problemas em relação à substituição das areias naturais pelas areias britadas, já que, em sua maioria, as propriedades mecânicas de concretos realizados com a areia britada se mostram inclusive superiores aos dos concretos produzidos com areias naturais. As propriedades se tornam diferenciadas em relação à areia natural no estado fresco, mais precisamente em relação à trabalhabilidade das misturas. Os concretos produzidos unicamente com areia britada apresentaram menores índices de consistência,

provavelmente devido à grande quantidade de partículas microfinas e grande aspereza superficial, devido às características de forma das partículas.

Portanto e como observado até o presente momento, a areia britada é bastante utilizada em diversos países como substituição integral ou parcial geralmente em concretos de alto desempenho, no qual as características físicas dos agregados são minimizadas devido à presença de outras adições no concreto como a microsílica, o aditivo superplastificante, diversos tipos de materiais pozolânicos entre outros. A areia britada possui características diferentes da areia natural, principalmente se forem levados em consideração o teor de materiais microfinos, distribuição de tamanho de partículas, características de forma dos grãos, além dos tipos litológicos que podem ser encontrados no país.

Do ponto de vista reológico, as areias britadas provavelmente proporcionam misturas com altas tensões limites de escoamento, viscosidade, coesão e atrito interno. A tensão limite de escoamento é comandada principalmente pela fricção interna dos grãos maiores da areia, que se reflete no atrito interno gerado. Acredita-se que o atrito interno é tanto maior quanto mais angulosos forem os grãos dos agregados, situação esta que é encontrada quando da utilização da areia britada em detrimento da areia artificial. Uma maior coesão da mistura também pode aumentar a tensão limite de escoamento e a viscosidade da mesma. A coesão do concreto é conferida principalmente pelo teor de partículas finas presentes na massa fresca. Como, geralmente, o teor de partículas finas das areias britadas é excessivamente alto, esta propriedade pode ser incrementada em relação à utilização da areia natural. Um outro requisito importante para a trabalhabilidade das misturas realizadas com areia britada é a colocabilidade ou método de lançamento do concreto fresco. As misturas realizadas com areia de britagem devem possuir características adequadas de bombeabilidade – ou seja, teor de argamassa ótima, diminuição da segregação e aumento da coesão – já que a maioria dos concretos produzidos atualmente são lançados nos elementos estruturais através do bombeamento direto da mistura nos elementos estruturais.

Como descrito até o presente momento, existe uma preocupação em se proceder a um estudo científico abordando a viabilidade da substituição total da areia natural pela artificialmente britada. No entanto, a maioria dos trabalhos se concentram na avaliação

das propriedades do estado endurecido dos concretos em detrimento das características do estado fresco. Geralmente, fixa-se uma dada consistência para se atingir o máximo de desempenho mecânico, e, quando esta consistência não é atingida, corrige-se a fluidez através de aditivos plastificantes, multifuncionais ou até mesmo, superplastificantes, sem a preocupação, entretanto, de prover estudo e entendimento aprofundado das características inerentes à areia britada que provocariam tais perdas de desempenho das misturas no estado fresco.

### **CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Neste item serão descritas as diversas fases do programa experimental, a saber: metodologia utilizada propriamente dita e materiais e métodos. O presente programa experimental foi elaborado com o objetivo de estudar e avaliar como as distintas características das areias britadas artificialmente influenciam nas propriedades no estado fresco dos concretos. Para tanto, o programa experimental foi dividido em quatro projetos experimentais, constituídos em etapas, de tal forma que cada etapa vise a obtenção de um parâmetro isolado dos demais.

A primeira fase do programa experimental consiste de um estudo piloto, que teve como principal finalidade fundamentar as hipóteses consideradas para o desenvolvimento desta pesquisa. Estas hipóteses levaram em consideração as características físicas das areias britadas diferenciais em relação à areia natural, as quais impediriam ou dificultariam o desempenho dos concretos no estado fresco. Portanto, esta fase teve como objetivo principal a investigação dos principais parâmetros das areias britadas considerados como definidores das propriedades dos concretos no estado fresco.

Com os resultados da primeira fase, foram definidas as variáveis de estudo dos quatro projetos experimentais que serão descritos a seguir. Cabe salientar que este estudo tem caráter exploratório, procurando sempre identificar as tendências no comportamento e propriedades no estado fresco dos concretos, de acordo com as mudanças operadas nas areias.

Antes de discriminar as etapas, processos e materiais e métodos adotados para o cumprimento dos projetos desse programa experimental, torna-se fundamental a descrição do estudo piloto realizado, já que os projetos experimentais desta pesquisa foram definidos após a análise dos resultados de tal estudo. Um outro item descrevendo o método de dosagem adotado neste trabalho se tornou necessário, pois a adoção de tal método se tornou de fundamental importância para as diversas etapas do programa experimental desta pesquisa.

### **3.1– ESTUDO PILOTO**

Para definir as variáveis desse programa experimental, um estudo piloto se tornou necessário a fim de avaliar se as hipóteses levantadas preliminarmente exerceriam mudanças significativas nas propriedades dos concretos no estado fresco. As principais hipóteses investigadas neste estudo piloto foram:

- Hipótese 1: O formato dos grãos influenciaria mais nas propriedades do concreto no estado fresco do que o arredondamento de cantos e aresta e a textura superficial;
- Hipótese 2: O formato dos grãos (se eqüidimensional ou não eqüidimensional) não seria tão importante se os grãos possuírem cantos e arestas arredondados e textura superficial lisa;
- Hipótese 3: O aspecto mais importante o qual define as propriedades dos concretos no estado fresco seria a rugosidade;
- Hipótese 4: A energia superficial das partículas microfinas poderiam definir o comportamento de consistência dos concretos.

O estudo piloto consistiu da avaliação, no estado fresco, de argamassas dosadas com areias britadas dos tipos litológicos calcário, basalto denso, micaxisto, granitos (de duas procedências distintas, os quais serão denominados para efeito de análise como granito 1 e 2) e metagrauvaca, além da areia natural. Neste estudo preliminar foram mantidos fixos a relação água/cimento em 0,65 e o proporcionamento dos materiais em 1:1,63 em volume.

As areias foram compostas de forma que permanecessem com o mesmo volume de grãos, considerando-se, apesar disso, os vazios formados. Para tanto, as areias foram peneiradas e separadas por frações granulométricas, a saber: material retido nas peneiras 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm; 0,075 mm e < 0,075 mm. Após a separação por frações, foram determinadas as massas unitárias em estado solto, numa adaptação à norma NBR 7251. Cabe salientar que o proporcionamento dos materiais em volume foi obtido a partir do proporcionamento em massa 1:2,76, e o traço em volume foi calculado tendo como referência a areia natural.

Os resultados da avaliação morfoscópica de forma e textura dos grãos das areias citadas acima estão constantes da tabela 3.1 a seguir. O índice de forma apresentado a seguir, foi determinado de acordo com as formas padrões observadas na análise morfoscópica, conforme a NBR 7389/1992 – Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. O índice diz respeito principalmente ao grau de angulosidade dos cantos e arestas dos grãos como também da superfície destes e foi determinado comparando-se visualmente a amostra com cartas de índice de arredondamento (figura 2.10 do capítulo 2 desse trabalho). O grau de esfericidade dos grãos e a forma da partícula foram obtidos de forma qualitativa, também através de comparação visual.

Os resultados dos ensaios realizados nas argamassas estão apresentados na tabela 3.2 e figura 3.1 a seguir.

**Tabela 3.2** – Resultados de forma das areias utilizadas no projeto preliminar 1

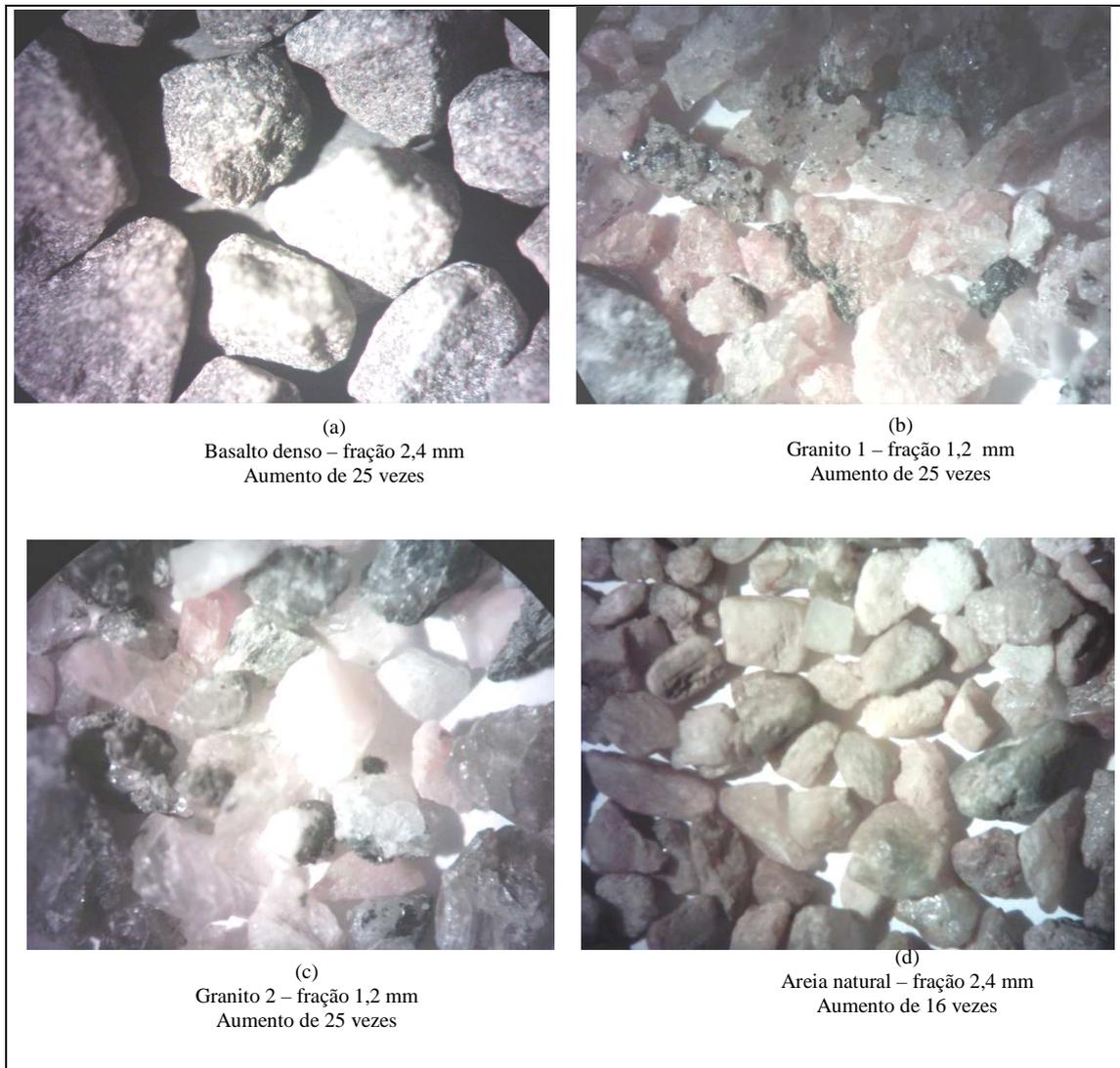
Tipo litológico	Índice de Arredondamento e textura		Índice de arredondamento e textura médio	Forma dos grãos		Potencial Zeta (mV)	Tensão de escoamento (Kpa)
	1,2 mm	2,4 mm		1,2 mm	2,4 mm		
Basalto denso	0,37	0,43	0,40	equidimensional, com grãos maiores mais prismáticos e menores mais esféricos	equidimensional, com grãos menores mais esféricos	-41,46	2,36
Metagrauvaca	0,34	0,30	0,32	achatada e equidimensional	achatada e equidimensional	-30,65	2,34
Granito 1	0,28	0,30	0,29	equidimensional (grande predominância) e prismáticos	equidimensional (grãos menores) e prismáticos (grãos maiores)	-24,80	1,06
Natural	0,59	0,57	0,58	equidimensional	equidimensional	-35,87	1,11
Granito 2	0,32	0,43	0,38	equidimensional	equidimensional e prismáticos	-27,05	1,41
Calcário	0,36	0,38	0,37	achatada e prismática	achatada e prismática	-22,00	1,18
Micaxisto	0,30	0,34	0,32	prismática, achatada e equidimensional	prismática e achatada	-30,21	2,22

Considerando as misturas confeccionadas no estudo preliminar 1 (tabela 3.2), percebe-se que há uma tendência das tensões de escoamento possuírem menores valores quando os grãos se apresentaram predominantemente, conforme o pesquisado na bibliografia consultada, equidimensionais/cúbicos em detrimento dos grãos cuja relação entre os três eixos dimensionais é prismática/alongada e achatada. Isso provavelmente se deve ao maior atrito interno dos grãos quando os mesmos possuem forma desproporcional considerando os três eixos de dimensões.

No caso das argamassas realizadas com os tipos litológicos basalto denso e calcário parece haver uma maior influência dos fenômenos de superfície relacionados aos finos adicionados em detrimento das características de forma das frações maiores dos grãos de areia, pois, apesar da maioria dos grãos serem equidimensionais, as argamassas realizadas com basalto denso apresentaram altos valores de tensão de escoamento, ao passo que as misturas realizadas com areia calcária se mostraram mais fluidas dado os baixos resultados de consistência. Cabe aqui salientar que as areias usadas neste estudo preliminar continham cerca de 14% de material microfino.

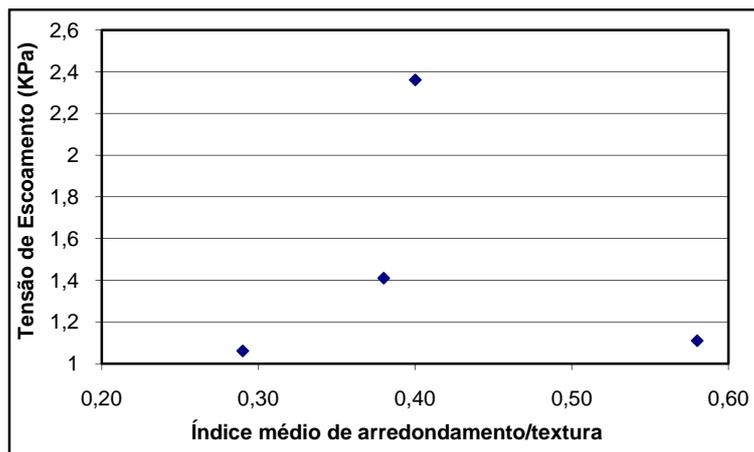
Agrupando-se as misturas em dois grupos de tal forma que o grupo I contenha apenas as argamassas confeccionadas com areias cuja forma dos grãos seja predominantemente

equidimensional e o grupo II com as demais (forma desproporcional, se forem considerados os três eixos de dimensões), percebe-se que o grupo I é formado pelas argamassas realizadas com basalto denso, granito 1, areia natural e granito 2. Pela figura 3.1 percebe-se as diferentes características de forma das areias do grupo I.



**Figura 3.1** – Aspectos de forma das areias – Grupo I

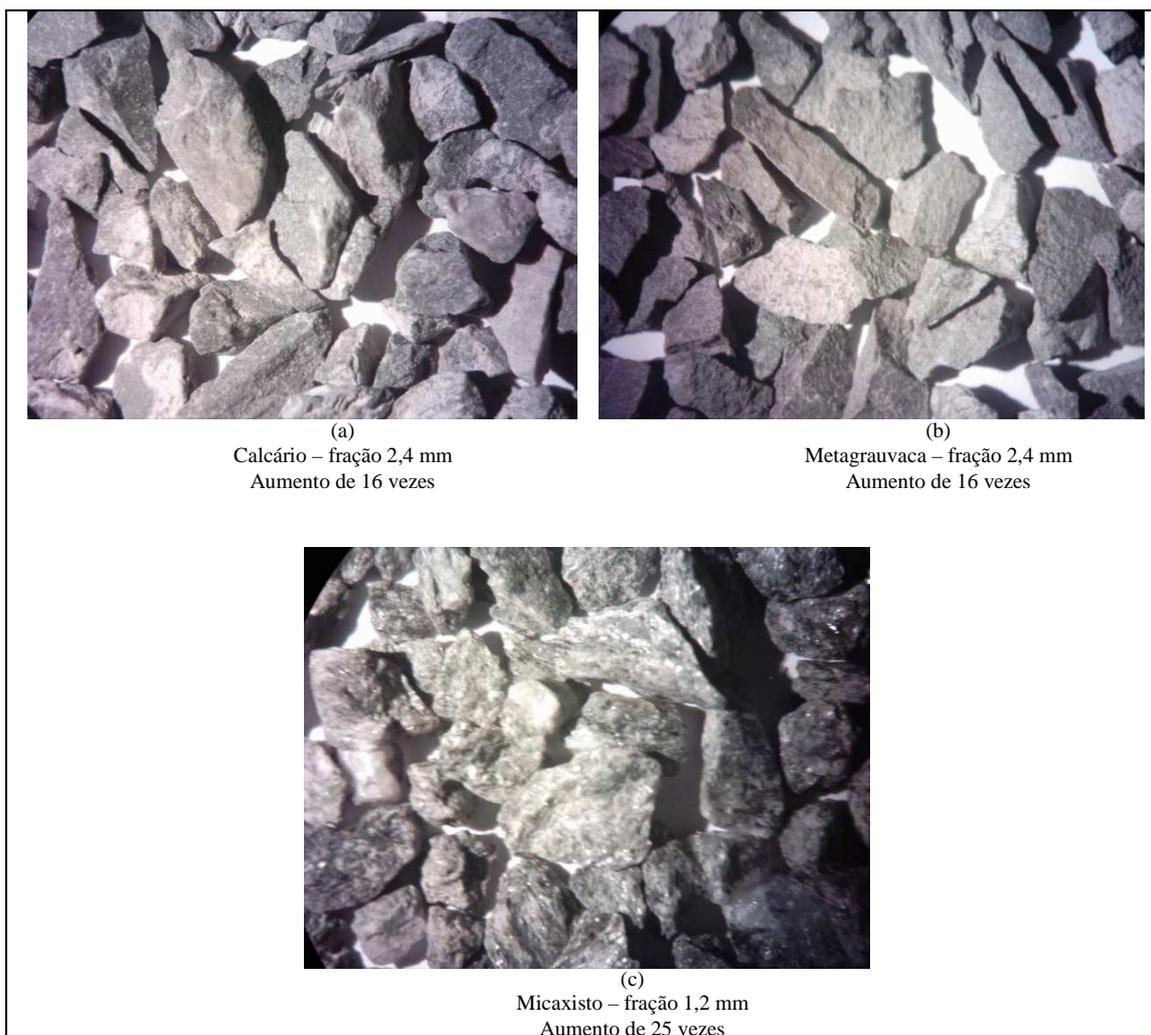
As argamassas realizadas com basalto denso apresentaram o maior valor de tensão de escoamento, apesar da forma dos grãos equidimensional, alto índice de arredondamento/textura (inferior apenas ao índice da areia natural) e da maior média de grãos com alto grau de esfericidade.



**Figura 3.2** – Relação entre índice médio de arredondamento/textura e tensão de escoamento das argamassas do estudo preliminar 1 – Grupo I

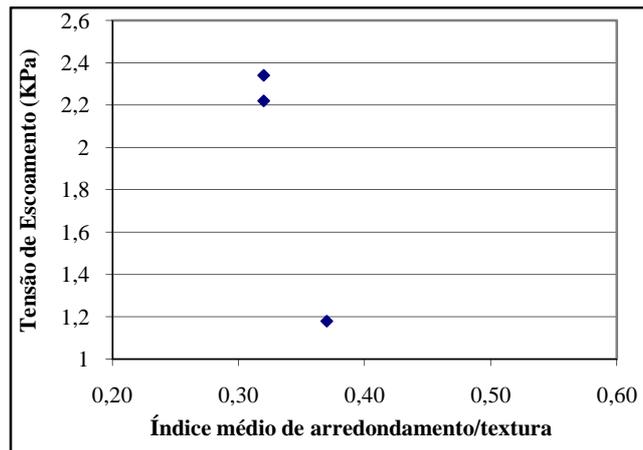
O grau de arredondamento da superfície e dos cantos dos grãos parece não influenciar significativamente na tensão de escoamento das argamassas do estudo preliminar 1, como pode ser visto pela figura 3.2 acima. Não foi observado, como o esperado, uma diminuição da tensão de escoamento com o aumento do grau de arredondamento dos grãos.

Os aspectos de forma das areias constituintes do grupo II podem ser observados pela figura 3.3 a seguir.



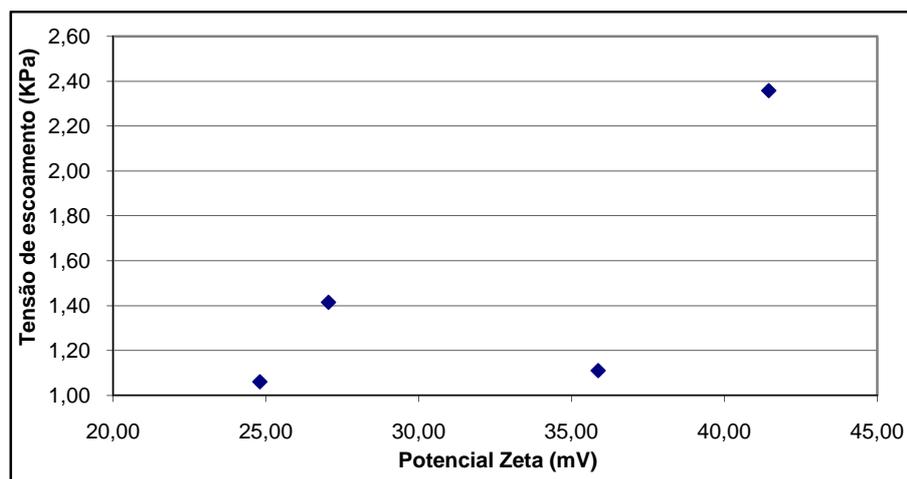
**Figura 3.3** – Aspectos de forma das areias – Grupo II

Como mencionado anteriormente, nota-se que as argamassas realizadas com os agregados do grupo II apresentaram altos valores de tensão de escoamento com relação às do grupo I, com exceção da argamassa de calcário. Este fato leva a crer que as propriedades de superfície devem influenciar no resultado das argamassas realizadas com este tipo litológico.



**Figura 3.4** – Relação entre índice médio de arredondamento/textura e tensão de escoamento das argamassas do estudo preliminar 1 – Grupo II

As partículas estudadas neste trabalho tendem provavelmente a ser hidrofílicas, que como já foi comentado anteriormente adsorvem fisicamente moléculas de água em sua superfície, tornando-se partículas solvatadas, como acontece com as argilas (ANGELIM, 1999) e as cales (RAGO, 1999). Acredita-se que quanto maior as cargas superficiais de atração (negativas) em sistemas coloidais, até um certo ponto, maior a camada de solvatação das partículas (SILVA, 1999). Sabe-se que, quando se adicionam tais partículas a materiais cimentícios, há uma tendência de incremento da plasticidade das misturas, causada justamente pela presença de água adsorvida interpartículas.



**Figura 3.5**- Relação entre potencial zeta (valores em módulo) e tensão de escoamento – argamassas grupo I

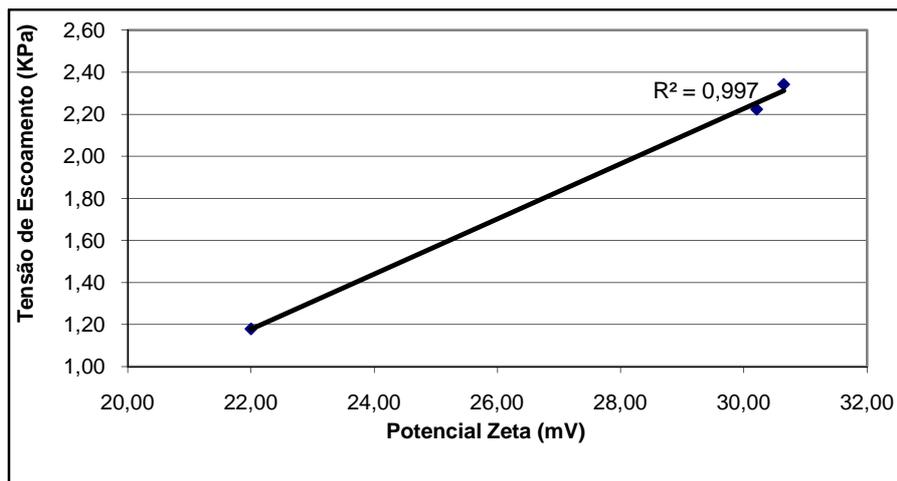
Excetuando-se a argamassa realizada com areia natural (com pares de valores tensão de escoamento/potencial zeta iguais a 1.11 Kpa e 35.87 mV, respectivamente), nota-se pela

figura 3.5 que houve uma tendência de aumento da tensão de escoamento das misturas, provavelmente causada pelo incremento da coesão, que por sua vez possivelmente aumentou a tensão de escoamento e a viscosidade das misturas quando foi utilizada uma grande quantidade de partículas bastante eletronegativas (basalto denso). O mesmo resultado não foi observado na argamassa realizada com areia natural, pois a tensão de escoamento se apresentou relativamente baixa, apesar do valor mais eletronegativo dos finos da areia natural em relação aos granitos 1 e 2.

Outra possível explicação para este comportamento está no fato de que, pode existir um certo valor limite de potencial zeta a partir do qual, quanto mais eletronegativas as partículas microfinas, possivelmente mais água ficaria retida em suas superfícies, influenciando inclusive na quantidade de água de amassamento disponível no sistema, havendo assim um aumento da tensão de escoamento das misturas. Por outro lado, deve existir um certo valor limite de energia superficial no qual o efeito de solvatação das partículas eletronegativas ajude a contribuir para o aumento da lubrificação interna do sistema, procedendo a uma melhoria da plasticidade, principalmente se os microfinos envolvidos possuírem formato de grãos placóide (como é o caso das argilas). Desta forma, haveria, como resposta, uma diminuição da tensão de escoamento e da viscosidade das misturas.

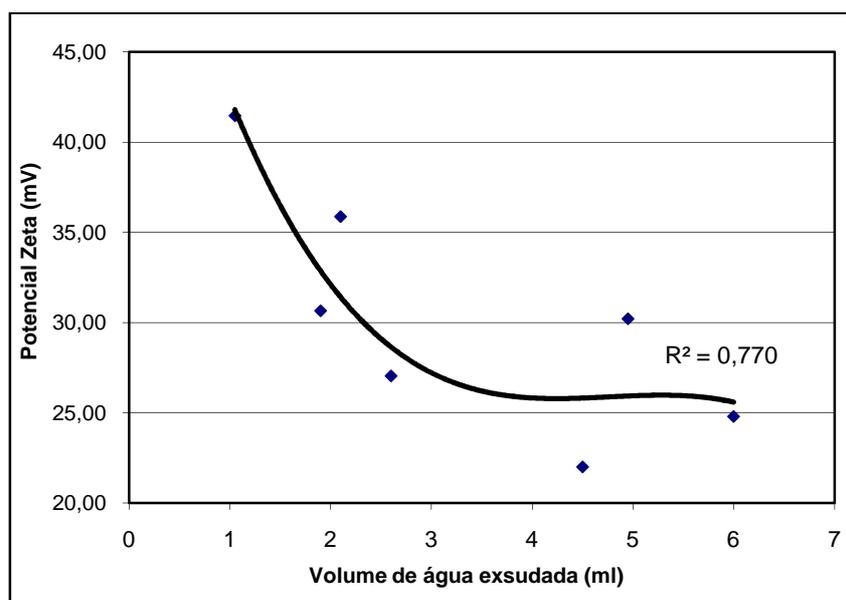
Pela figura 3.6 a seguir, nota-se que também houve uma tendência de aumento da tensão de escoamento das argamassas do grupo II com o aumento do valor de potencial zeta das areias utilizadas.

Observando as figuras 3.5 e 3.6, nota-se que houve uma equivalência nos resultados de tensão de escoamento e potencial zeta já que quando os valores de potencial zeta se apresentaram maiores que  $-30$  mV, as tensões de escoamento resultaram no geral maiores que 2,0 Mpa.



**Figura 3.6-** Relação entre potencial zeta e tensão de escoamento – argamassas **grupo II**

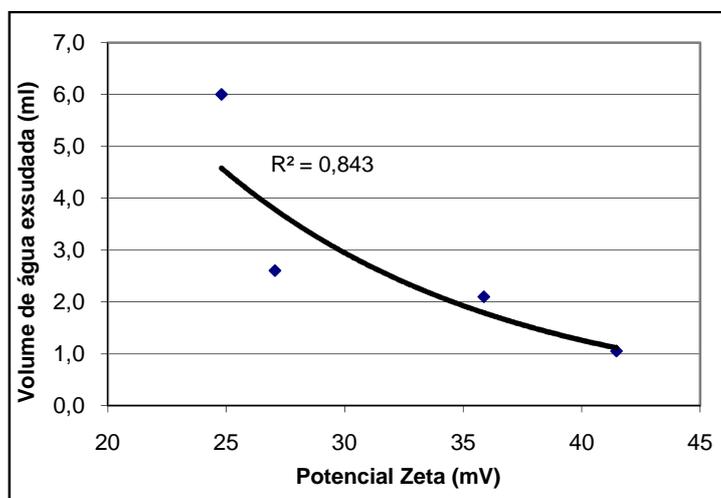
Na figura 3.7 a seguir está expressa a relação entre o potencial zeta (com valores em módulo) dos microfins das areias e o volume total de água exsudada pelas argamassas executadas no estudo preliminar 1.



**Figura 3.7** – Relação entre potencial zeta (valores em módulo) dos finos e volume total de água exsudada

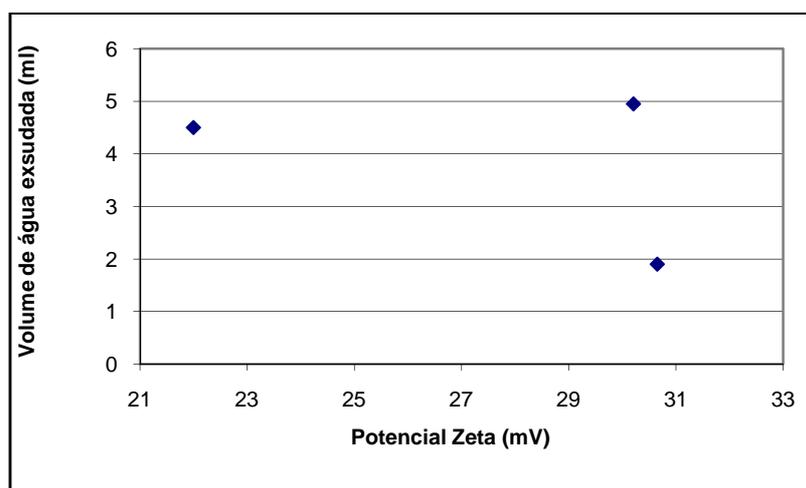
Pela figura 3.7, observa-se que houve uma tendência de aumento de volume total de água exsudada com a diminuição dos resultados, em valores absolutos de potencial zeta dos finos, provavelmente devido à maior adsorção física das moléculas de água das partículas mais eletronegativas.

Agrupando pelos índices de forma da partícula, da mesma maneira como foi feita para os resultados de tensão de escoamento, tem-se as figuras 3.8 e 3.9 a seguir:



**Figura 3.8**– Relação entre potencial zeta (valores absolutos) dos finos e volume total de água exsudada-grupo I

Quando observadas as figuras 3.8 e 3.9 a seguir, percebe-se que houve uma tendência de diminuição do volume de água exsudada com o aumento do potencial zeta dos finos utilizados, apesar da não linearidade da correlação, principalmente considerando as argamassas do grupo I.



**Figura 3.9** – Relação entre potencial zeta dos finos e volume total de água exsudada-grupo II

Já para as argamassas do grupo II, não se observou tendência clara de diminuição do volume de água exsudada com o aumento no resultado de potencial zeta dos finos

analisados, já que foi registrado uma alta quantidade de água exsudada com a argamassa realizada com micaxisto (aproximadamente 5 ml).

Com base nos resultados obtidos neste estudo piloto, pode-se constatar que as propriedades de energia superficial, mensurada pelo potencial zeta dos microfinos das areias, possivelmente exerce influência significativa nas características do estado fresco das misturas realizadas, influenciando no grau de exsudação e possivelmente na viscosidade das argamassas realizadas. Já em relação aos aspectos de forma dos grãos mais grossos, parece haver uma influência maior da equidimensionalidade das partículas na consistência das argamassas sendo que o grau de arredondamento/textura dos grãos não apresentou correlação significativa com as variáveis medidas neste estudo preliminar.

### **3.2 – Dosagem dos concretos – Método de Faury**

O método de Faury foi o método de dosagem escolhido por proporcionar a obtenção de uma curva de agregados (miúdo e graúdos) contínua, considerando para tanto o volume de sólidos real e não apenas a massa dos mesmos. De acordo com este método, existe uma curva de referência à qual deve-se ajustar ao máximo as curvas granulométricas reais dos agregados, de forma a obter também uma curva de distribuição contínua, proporcionando assim um aumento de compacidade na combinação dos agregados. Para o traçado da curva de referência, são considerados o efeito de parede (que nada mais é do que o aumento do volume de vazios, sendo este causado por uma alteração na granulometria dos agregados junto às faces das fôrmas), as dimensões dos elementos estruturais, a densidade de armadura, a consistência desejada do concreto, os meios de concretagem, tipos de concretagem e, o mais importante levando em consideração o objeto principal do presente trabalho, a metodologia de dosagem de Faury leva em consideração características de forma dos agregados, formalizando um índice para agregados rolados (ou arredondados) e agregados britados.

As curvas de referência foram obtidas com os índices expressos nas tabelas 3.3 e 3.4 a seguir:

**Tabela 3.3** – Valores dos índices necessários para o traçado da curva de referência –  
Areia natural e Areia britada

<b>Parâmetros</b>	<b>Natural</b>	<b>Britada</b>
A	32	36
B	2	2
D	25	25
R/D	0,5	0,5
K	0,385	0,43
K'	0,004	0,004

Sendo:

A – parâmetro que varia de 22 a 38, dependendo da consistência que vai de “terra úmida” a fluida e da rugosidade da superfície dos agregados, variando de agregados rolados a britados;

B – parâmetro que varia de 1 a 2,5, dependendo do meio de colocação do concreto, que por sua vez é compatível com a consistência;

D – máxima dimensão do agregado, expressa em mm;

R/D – fator ligado ao efeito de parede

R – raio médio do molde onde se colocará o concreto

K – parâmetro usado na determinação do índice de vazios, que varia de 0,25 a 0,46, dependendo da rugosidade da superfície dos agregados, de rolados a britados;

K' – parâmetro usado na determinação do índice de vazios, variando de 0,002 a 0,004, dependendo do grau de consistência que se pretende, que por sua vez está relacionado com os meios de compactação previstos.

Os valores expressos anteriormente na tabela 3.3 foram obtidos de acordo com VASCONCELLOS (1976) e COUTINHO (2003).

O ponto central da curva contínua de referência é dada pela equação 3.1 a seguir VASCONCELLOS (1976) e COUTINHO (2003):

$$P_{D/2} = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0,75} \quad (3.1)$$

Onde  $P_{D/2}$  é a ordenada da abscissa no ponto D/2.

As curvas de referência obtidas para o agregado miúdo rolado (areia natural) e britado estão expressas nas figuras 3.10 e 3.11 a seguir:

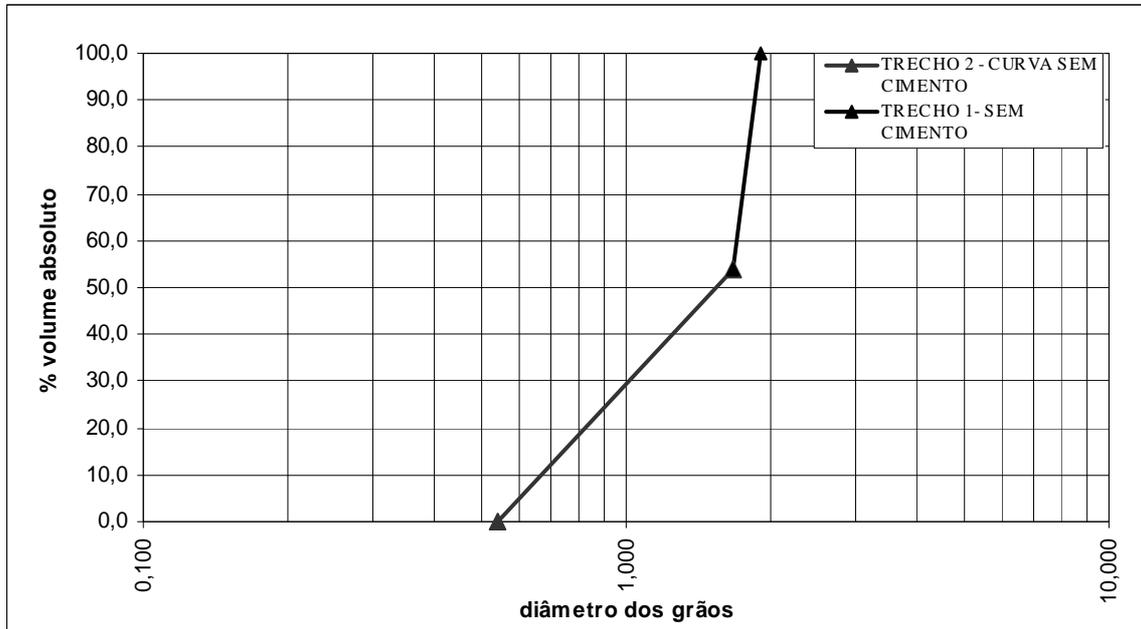


Figura 3.10 – Curva de referência da areia britada

Pelas figuras 3.10 e 3.11, nota-se um pequeno aumento na declividade - considerando o trecho 1 – da curva da areia britada em relação à curva da areia natural.



Figura 3.11 – Curva de referência da areia rolada

Na tabela 3.4 estão apresentados os parâmetros de mistura e as principais características da curva de referência:

**Tabela 3.4** – Parâmetros de mistura realizados com o método de Faury e algumas características da curva de Faury

	Agregado Rolado	Agregado Britado
P(D/2)	50,0	56,4
Volume de água + vazios (l/m <sup>3</sup> ) - I	186	210
Volume absoluto de sólidos (l/m <sup>3</sup> ) - V <sub>s</sub>	814	790
Volume de vazios (l/m <sup>3</sup> ) - V <sub>v</sub>	15	15
Cágua (l) = I - V <sub>v</sub>	171	195
a/c	0,59	0,59
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	330	330
Volume absoluto de cimento (l)	102	102
Volume absoluto de inertes (l/m <sup>3</sup> )	712	688
% cim / inertes	12,5	12,9
módulo de finura da curva de referência	5,02	5,07

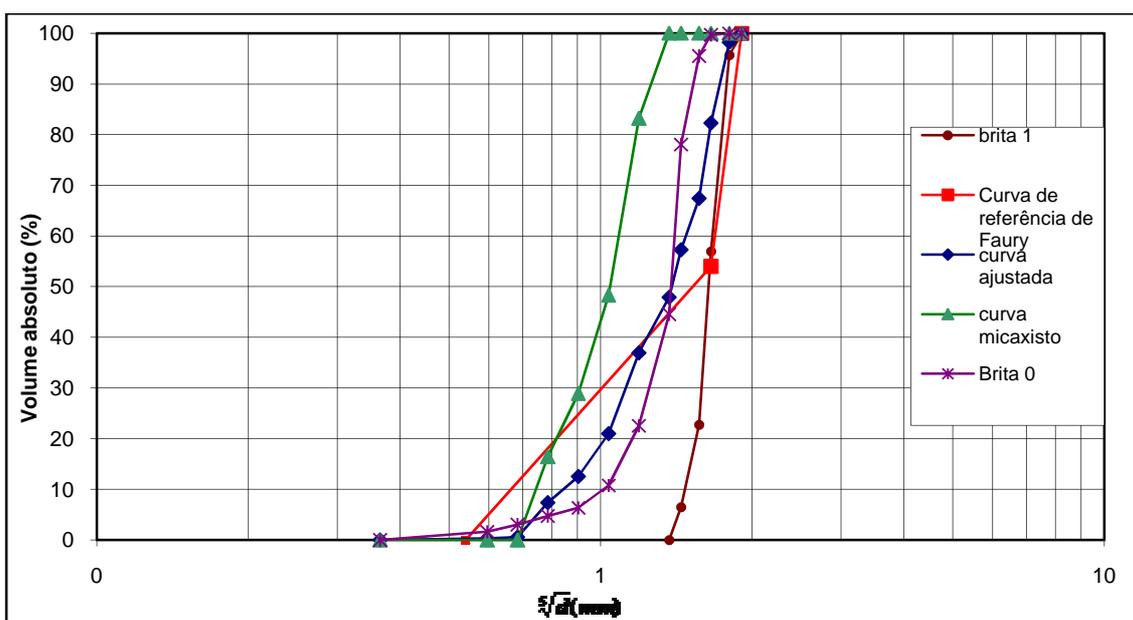
Os valores de volume de vazios é um índice tabelado constante do próprio método de dosagem, já o índice volume de vazios e água, leva em consideração principalmente as características texturais dos agregados, a relação raio de moldagem e dimensão máxima característica além da consistência do concreto no estado fresco, sendo dado pela equação 3.2 descrita abaixo:

$$I = \frac{K}{\sqrt{D}} + \frac{K'}{R/D - 0,75} \quad (3.2)$$

O volume absoluto de sólidos foi encontrado com o volume unitário diminuído do índice do volume de água e vazios. O volume absoluto de inertes foi encontrado

diminuindo-se o volume absoluto de sólidos do volume absoluto de cimento. A relação água/cimento foi calculada pelo consumo de água, sendo este tabelado e dependente também das características texturais das areias e da consistência do concreto no estado fresco. O consumo de cimento foi obtido através das curvas de HELENE (1992) que relacionam o consumo de cimento em  $\text{kg/m}^3$  com curvas de acordo com o tipo de cimento, relação água/cimento e resistência à compressão.

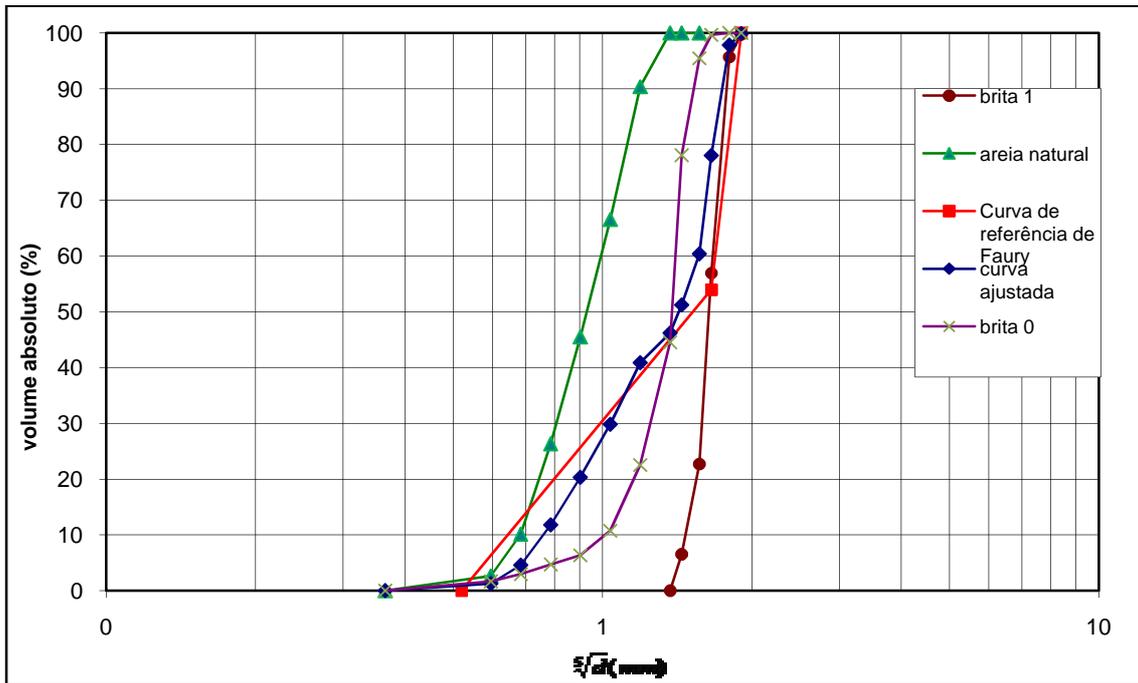
As figuras 3.12 a 3.16 a seguir mostram os melhores ajustes das curvas das areias, com as curvas granulométricas originais, excetuando-se os microfinos e britas. A curva ajustada deveria resultar em módulo de finura igual ou próximo a 5.07, que foi o módulo encontrado para a curva de referência de Faury. Tais ajustes foram necessários para definir qual curva granulométrica deveria ser usada no projeto 1. Além disso os percentuais de areia, brita 0 e brita 1 dos demais projetos experimentais também foram determinados através da distribuição granulométrica mais ajustada.



**Figura 3.12** – Ajuste da areia de micaxisto à curva granulométrica de Faury

Percebe-se pela figura 3.12 que o ajuste procedido com o tipo litológico micaxisto se apresentou bastante satisfatório já que as áreas da curva ajustada sobre e sob a curva de referência são bastante similares. Esta curva foi ajustada utilizando-se os percentuais de 41% de brita 1, 20% de brita 0 e 39% de areia, o que resultou em um módulo de finura igual a 5.08.

Pela figura 3.13 a seguir, nota-se que o ajuste da areia natural à curva geométrica de Faury se apresentou aceitável, mas um pouco menos acurado do que o ajuste anterior.



**Figura 3.13** – Ajuste da areia de natural à curva granulométrica de Faury

O melhor ajuste com a areia natural foi alcançado ao se compor 51% de brita 1, 5% de brita 0 e 44% de areia natural. O módulo de finura desta curva resultou no valor de 5.08.

Pode-se notar pela figura 3.14 que a combinação dos agregados calcários equidimensional e brita não favoreceram um ajuste adequado, sendo que a curva resultante apresentou uma área sobre a curva contínua de Faury, sem demonstrar área sob a mesma.

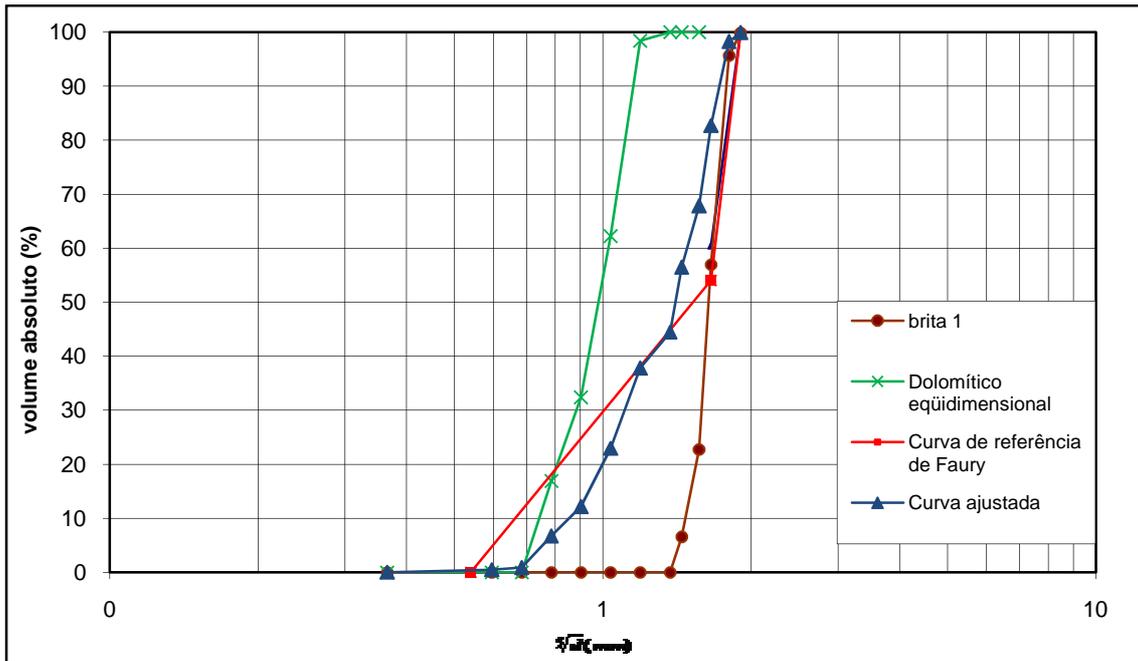


Figura 3.14 – Ajuste da areia de dolomítico eqüidimensional à curva granulométrica de Faury

Na figura 3.15 a seguir, nota-se que o ajuste com a areia granítica resultou um tanto irregular, mas, mesmo assim, ainda satisfatório. As áreas sobre e sob a curva de referência se mostram bastante equivalentes. O melhor ajuste foi encontrado com a combinação de 38% de brita 1, 30% de brita 0 e 32% de areia. O módulo de finura da composição 5.09.

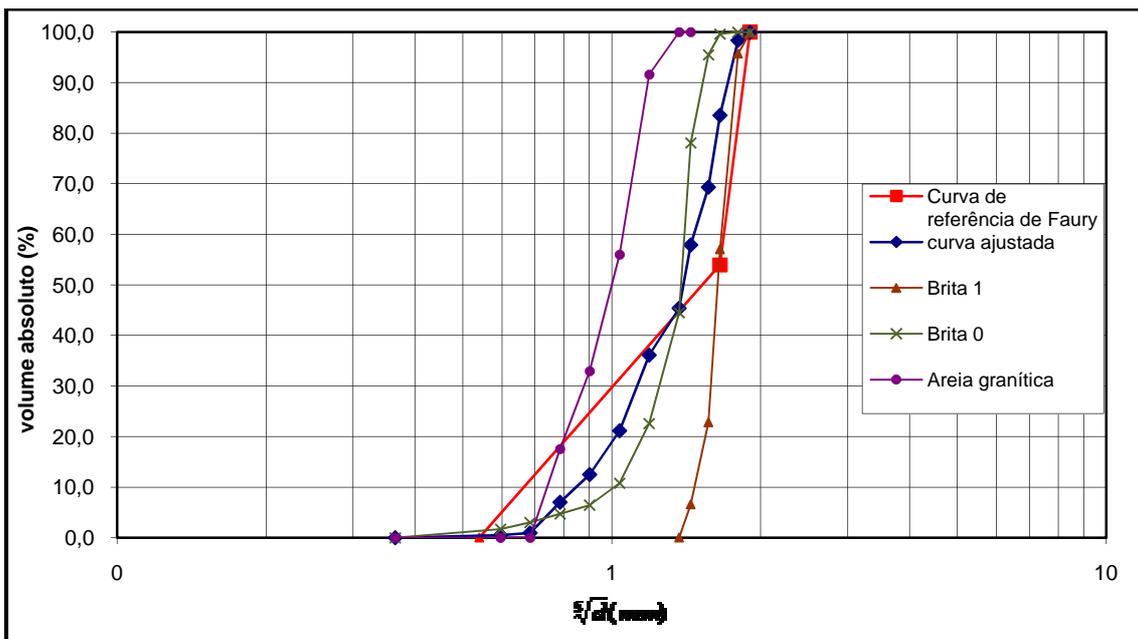
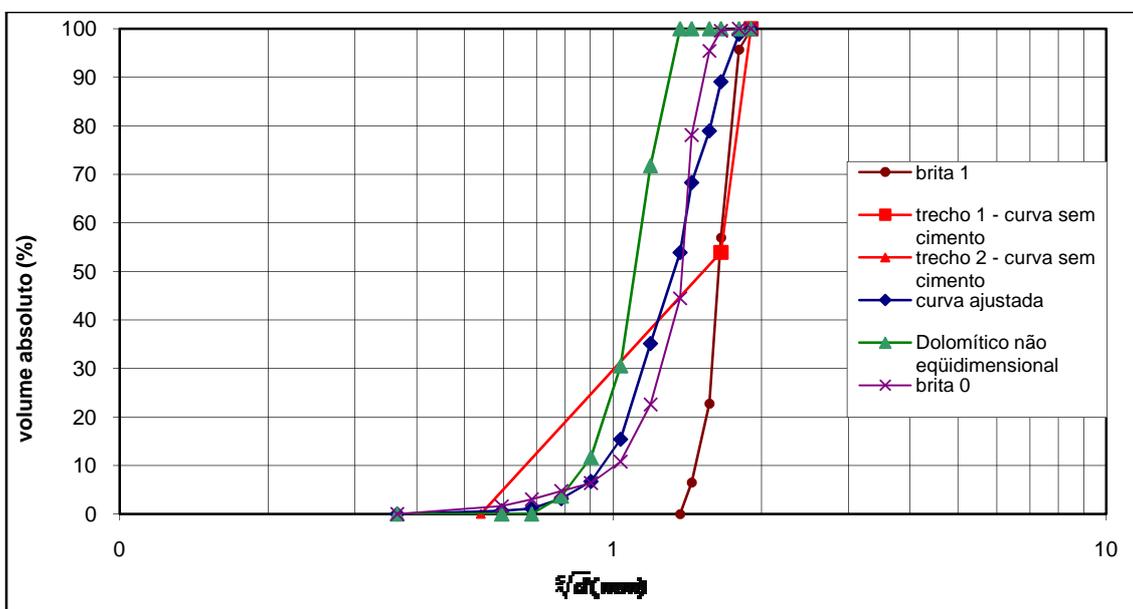


Figura 3.15 – Ajuste da areia de granítica à curva granulométrica de Faury

Pela figura 3.16 nota-se que o ajuste foi realizado com a areia britada de calcário lamelar, resultou em áreas grandes abaixo e acima da curva. A curva melhor ajustada obteve 40% de brita 1, 28% de brita 0 e 32% de areia resultando em módulo de finura igual a 5.09.



**Figura 3.16** – Ajuste da areia de natural à curva granulométrica de Faury

De acordo com COUTINHO (2003) a curva de um agregado se configura bem ajustada à curva de referência de Faury quando as áreas abaixo e acima formadas por esta curva ajustada e a curva de referência são iguais ou possuem valores próximos. Após determinação destas áreas formadas com a distribuição granulométrica ajustada e a curva contínua de Faury, chegou-se à conclusão que a composição mais adequada foi alcançada pelo ajuste com a areia de micaxisto. Portanto, para a realização do projeto experimental 1, descrito a seguir, todas as areias foram compostas de forma a obter o mesmo volume de sólidos, por faixa granulométrica, da areia micaxisto. Além disso, os percentuais de areia, brita 0 e brita 1 foram mantidos constantes nos quatro projetos experimentais realizados neste trabalho.

### 3.3 – ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL - PROJETOS EXPERIMENTAIS

Como explicitado anteriormente, o programa experimental desse trabalho foi dividido em quatro projetos experimentais com objetivos distintos. O *projeto experimental 1*

tem como objetivo principal a análise das características de forma e textura das areias e avaliar a influência destas nas propriedades do estado fresco. O *projeto experimental 2* foi elaborado com o objetivo de investigar o desempenho dos concretos ao se efetuar composições granulométricas distintas. Já o *projeto experimental 3* visou avaliar a influência do teor dos microfinos nas propriedades reológicas e de consistência, usando para tanto a composição granulométrica mais contínua obtida no projeto experimental 2. No *projeto experimental 4* foi realizada uma tentativa de melhoria das misturas confeccionadas no projeto experimental anterior, por meio da diminuição dos grãos passantes na peneira 0.6 mm.

### **3.3.1 – Projeto experimental 1**

O principal objetivo desse projeto experimental foi analisar a influência das características morfoscópicas das areias nas propriedades do estado fresco dos concretos. Para tanto e como já comentado anteriormente, a composição granulométrica dos agregados foi mantida constante e igual à distribuição de tamanhos de grãos da areia micaxisto, considerada a areia com granulometria original mais contínua dentre as demais. Para os concretos desse projeto experimental as partículas microfinas das areias foram removidas. As composições granulométricas foram fixadas através da composição das areias pela técnica do peneiramento, mantendo assim o mesmo volume absoluto de sólidos das frações 2.4 mm, 1.2 mm, 0.6 mm, 0.3 mm e 0.15 mm da areia de micaxisto. Os concretos produzidos neste projeto experimental foram constituídos de cimento, areia, britas e água sem adição de aditivos. A proporção de materiais foi do mesmo modo mantida fixa e foi obtida pelo método de dosagem de Faury, como descrito anteriormente. O consumo de cimento e a relação água/cimento foram escolhidos de forma a exercerem a menor influência possível nos resultados.

As propriedades do concreto mensuradas neste projeto foram consistência, teor de ar incorporado, exsudação e segregação. A figura 3.17 a seguir apresenta as variáveis de estudo desse projeto experimental 1.

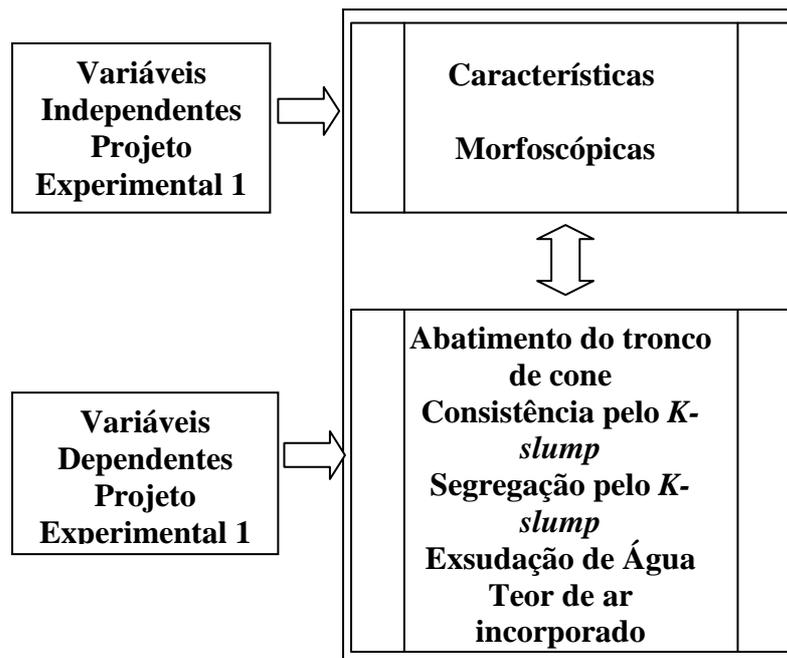


Figura 3.17 – Variáveis do projeto experimental 1

### 3.3.2 – Projeto experimental 2

Na maior parte das usinas do Distrito Federal as areias britadas são obtidas através de uma composição dos grãos que ficam retidos na peneira com abertura de malha 0.6 mm e dos grãos que passam por essa peneira. A idéia então, neste projeto experimental, foi variar a composição granulométrica das areias usadas neste trabalho de forma similar ao que se faz na prática, ou seja, variar as proporções dos grãos que ficam retidos na peneira 0,6 mm e os que passam pela mesma peneira, controlando apenas o teor de microfinos, que foi fixado em torno de 3%, neste projeto experimental. A tabela 3.1 a seguir mostra as composições utilizadas neste trabalho. O procedimento adotado foi baseado na pesquisa de PRUDÊNCIO et al (1995).

Nesta etapa, o percentual de areia e britas foi mantido constante, variando-se, por tipo litológico, o consumo de cimento, relação água/cimento, relação água/materiais secos e o teor de argamassa seca. Ou seja, para as composições efetuadas de cada tipo litológico mantinham-se fixos tais parâmetros, no entanto, eles resultaram diferentes para as diversas areias.

Os consumos de cimento, teores de argamassa seca e relações água/materiais secos foram determinados, para cada grupo de agregado miúdo, de forma a resultar em abatimento igual ou superior a 120 mm. Tal exigência se tornou necessária para a

determinação das propriedades reológicas viscosidade e tensão de escoamento através do ensaio abatimento de tronco de cone modificado.

A tabela 3.5 apresenta as composições granulométricas utilizadas nesta pesquisa.

**Tabela 3.5** – Variação da composição granulométrica das areias - Projeto Experimental  
2

<b>Composições</b>	<b>Material retido na peneira 0,6 mm (%)</b>	<b>Material passante na peneira 0,6 mm (%)</b>
<b>A</b>	80	20
<b>B</b>	70	30
<b>C</b>	60	40
<b>D</b>	50	50

As determinações dos consumos de cimento e relação água/materiais secos das misturas foram efetuadas utilizando-se as composições que mantinham retidos 70% de grãos na peneira 0.6 mm e passantes, nesta mesma peneira 30% dos grãos. Após determinação dos consumos de cimento e relações água/materiais secos necessários para atingir o abatimento mínimo de 120 mm, estes foram fixados para as demais composições de cada areia. Os parâmetros de mistura obtidos para cada agregado miúdo serão apresentados no capítulo subsequente que trata da apresentação e análise dos resultados.

A figura 3.18 a seguir apresenta as variáveis de estudo do projeto experimental 2.

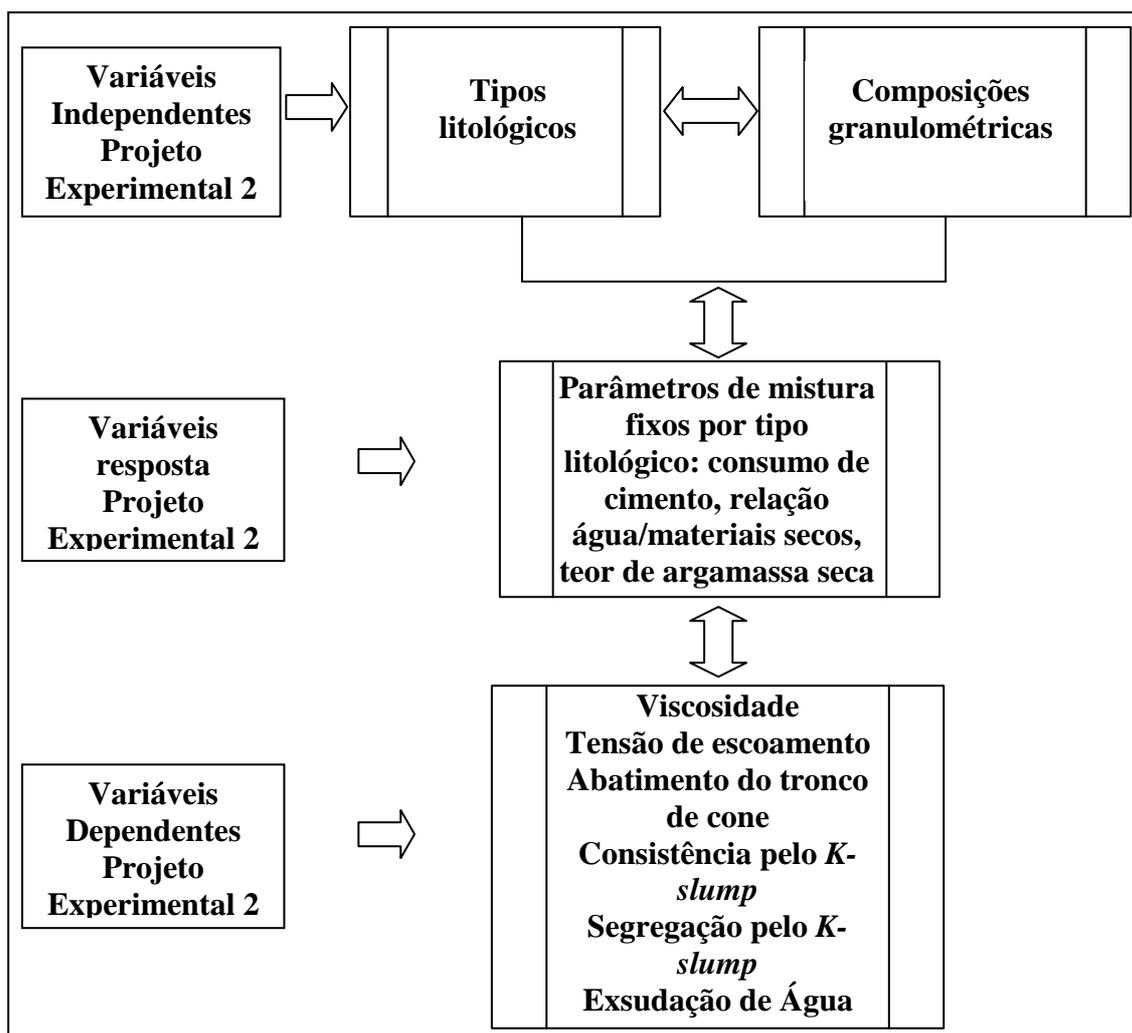
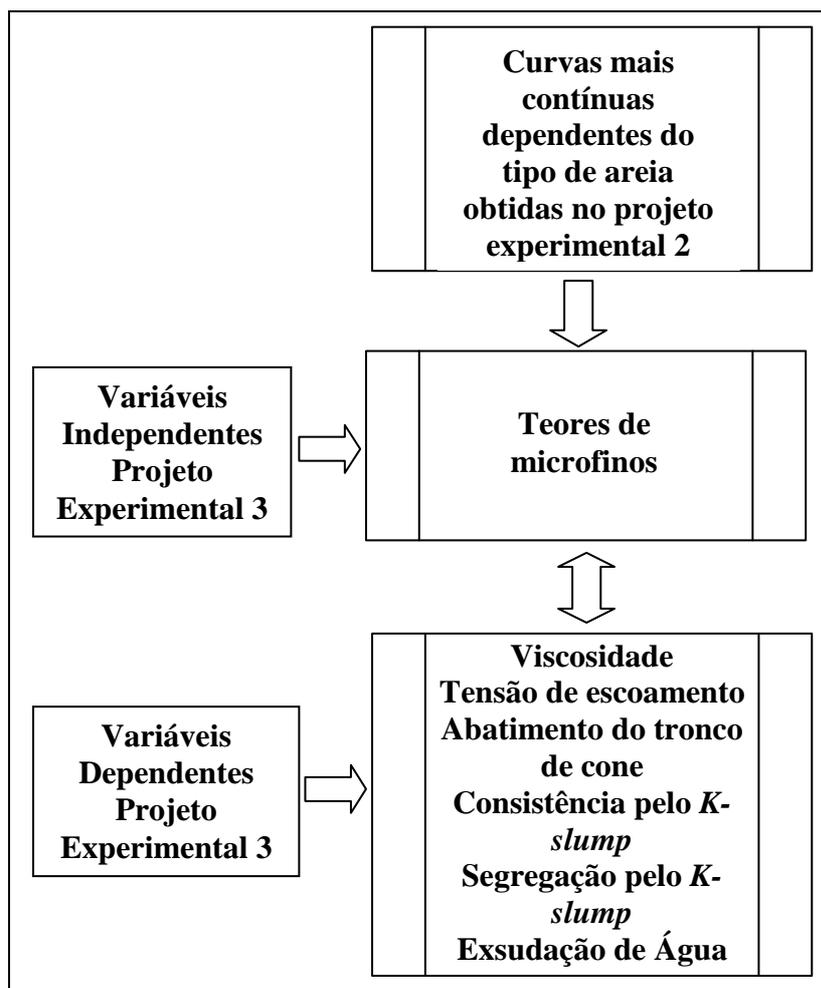


Figura 3.18 – Variáveis do projeto experimental 2

### 3.3.3 – Projeto experimental 3

O projeto experimental 3 teve como objetivo principal a avaliação dos concretos com adição de altos teores de microfinos. Para tanto, foram selecionados os concretos cujas composições de agregados definidos no projeto experimental 2 resultaram mais contínuas segundo a curva de referência de Faury. Os teores de microfinos adicionados às areias foram 7%, 12% e 18% em massa, em relação à massa total do agregado miúdo.

As variáveis do projeto experimental 3 estão apresentadas na figura 3.19 a seguir.



**Figura 3.19** – Variáveis do projeto experimental 3

Cabe salientar que para efeito de comparação de comportamento, os concretos realizados neste projeto experimental foram produzidos com os mesmos parâmetros de mistura definidos no projeto anterior.

### **3.3.4 – Projeto experimental 4**

O projeto experimental 4 foi idealizado com a finalidade de encontrar melhores valores de viscosidade, tensão de escoamento e consistência dos concretos confeccionados no projeto experimental 3. De acordo com os resultados alcançados no projeto experimental 2 desse trabalho e sabendo-se do efeito que os grãos mais finos exercem no concreto devido ao acréscimo de área superficial e ainda levando-se em consideração o coeficiente de Murdock descrito por HUDSON (1999), as misturas produzidas no projeto experimental 3 foram repetidas, com a diferença que as composições

granulométricas foram fixadas em 80% de grãos retidos na peneira 0.6 mm, 12.9% de grãos passantes nesta mesma peneira, em massa. Essa composição repete a distribuição granulométrica original do calcário dolomítico não equidimensional, já que a distribuição de tal agregado miúdo foi escolhida por apresentar o menor teor de material passante na peneira 0.6 mm (sem considerar os microfinos) dentre as demais. As variáveis do projeto experimental 4 estão descritas na figura 3.20 a seguir.

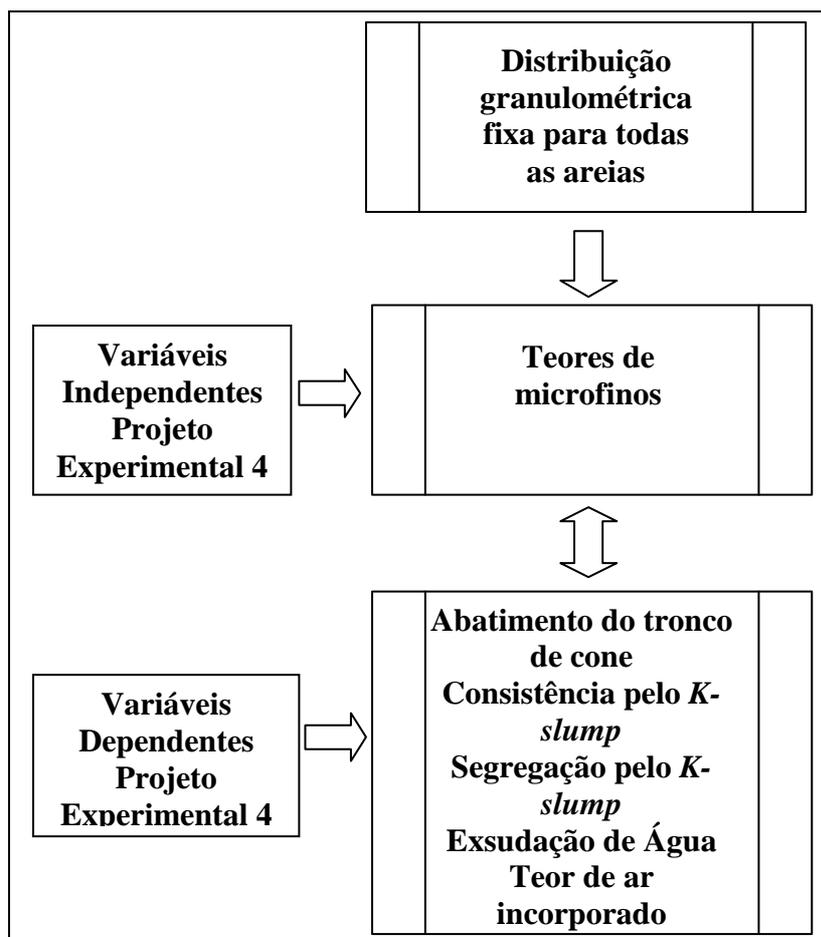


Figura 3.20 – Variáveis do projeto experimental 4

### 3.4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão descritos os métodos de ensaio realizados para alcançar o objetivo do programa experimental além dos materiais usados para tal finalidade.

### 3.4.1 - Materiais utilizados na pesquisa

Como comentado anteriormente, os concretos produzidos nesta pesquisa foram dosados com os materiais cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e água, sem o uso de aditivos. Os agregados graúdos usados neste trabalho foram brita 1 e brita 0, como popularmente conhecidos. Em relação aos agregados miúdos, as misturas foram dosadas com areia natural de leito de rio – apenas no projeto experimental 1 – areia de calcário dolomítico com e sem tratamento de forma, areia de calcário calcítico, além dos agregados miúdos de granito e micaxisto.

#### 3.4.1.1 – Caracterização do Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi do tipo CPII-Z32 produzido pela empresa CIPLAN (Cimento Planalto S.A.), localizada no Distrito Federal. As caracterizações química e física do cimento estão apresentadas nas tabelas 3.6 e 3.7 a seguir.

**Tabela 3.6** – Caracterização física do cimento CP II-Z32 usados nos projetos experimentais

Características físicas				
Característica		Resultados	Limites (NBR 11578/91)	Método de ensaio
Massa específica		3.2 g/cm <sup>3</sup>	-	NBR NM 23/03
Finura Blaine *		4836 cm <sup>2</sup> /g	-	NBR NM 23/03
Finura (#200)		1.2%	≤ 12.0%	NBR NM 76/98
Água de Consistência normal		30.5%	-	NBR NM 43/03
Tempos de pega *	Início	180 min	≥ 60 min	NBR NM 65/03
	Fim	320 min	≤ 600 min	
Resistência à compressão	7 dias	21.1 MPa	≥ 20 MPa	NBR 7215/96
	28 dias	32.3 MPa	≥ 32 MPa	
Expansibilidade a quente *		0.5 mm	≤ 5 mm	NBR 11582/96

\* Resultados fornecidos pelo fabricante

**Tabela 3.7** – Caracterização química do cimento CP II-Z32 usados nos projetos experimentais

<b>Características químicas</b>			
Ensaio químicos*	Resultados	Limites (NBR 11578/91)	Método de ensaio
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.9%	-	NBR NM 14
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	22.6%	-	NBR NM 14
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.96%	-	NBR NM 14
Óxido de cálcio (CaO)	52.6%	-	NBR NM 14
Óxido de magnésio	4.54%	≤ 6.5 %	NBR NM 14
Anidrido sulfúrico (MgO)	2.77%	≤ 4.0 %	NBR NM 16
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0.21%	-	NBR NM 17
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0.77%	-	NBR NM 17
Perda ao fogo (PF)	5.75%	≤ 6.5 %	NBR NM 18
Óxido de cálcio livre (CaOL)	1.52%	-	NBR NM 13
Equivalente alcalino	0.72%	-	Cálculo

\*Ensaio fornecidos pelo fabricante

Além dos ensaios de caracterização física e química do cimento, foi realizado nas partículas de cimento o potencial zeta, que é um ensaio relacionado à energia superficial das partículas. O potencial zeta foi determinado com o equipamento Zetâmetro da marca *Brookhaven Corporation*, com aplicação de campo elétrico entre 13.0 e 14 milivolts. Além da determinação do potencial zeta no pH original, foi realizada também a determinação dessa propriedade em pH básico próximo – corrigido com soluções de NaOH (0.1M) – ao pH do concreto em situação real. Os resultados de potencial zeta estão apresentados na tabela 3.8 a seguir.

**Tabela 3.8** – Resultados do ensaio para determinação do potencial zeta do cimento CII - Z32

pH's	Valores de pH	Resultado de potencial zeta (mV)
pH original	12.4	2.99
pH corrigido	12.0	4.07

### 3.4.1.2 – Caracterização dos agregados

Nesta pesquisa foram usados sete agregados diferentes entre agregados graúdos e miúdos. Os agregados miúdos foram classificados, segundo análise petrográfica, em quatro tipos litológicos que são areia natural quartzosa, areias de calcário dolomítico (estas com e sem tratamento de forma), calcário calcítico, micaxisto e granito.

Os agregados graúdos brita 1 e brita 0, como popularmente conhecidos, foram adquiridos juntos à empresa Cimentos Planalto S.A. localizada no Distrito Federal. A caracterização física das britas está apresentada na figura 3.21 e tabela 3.8 abaixo.

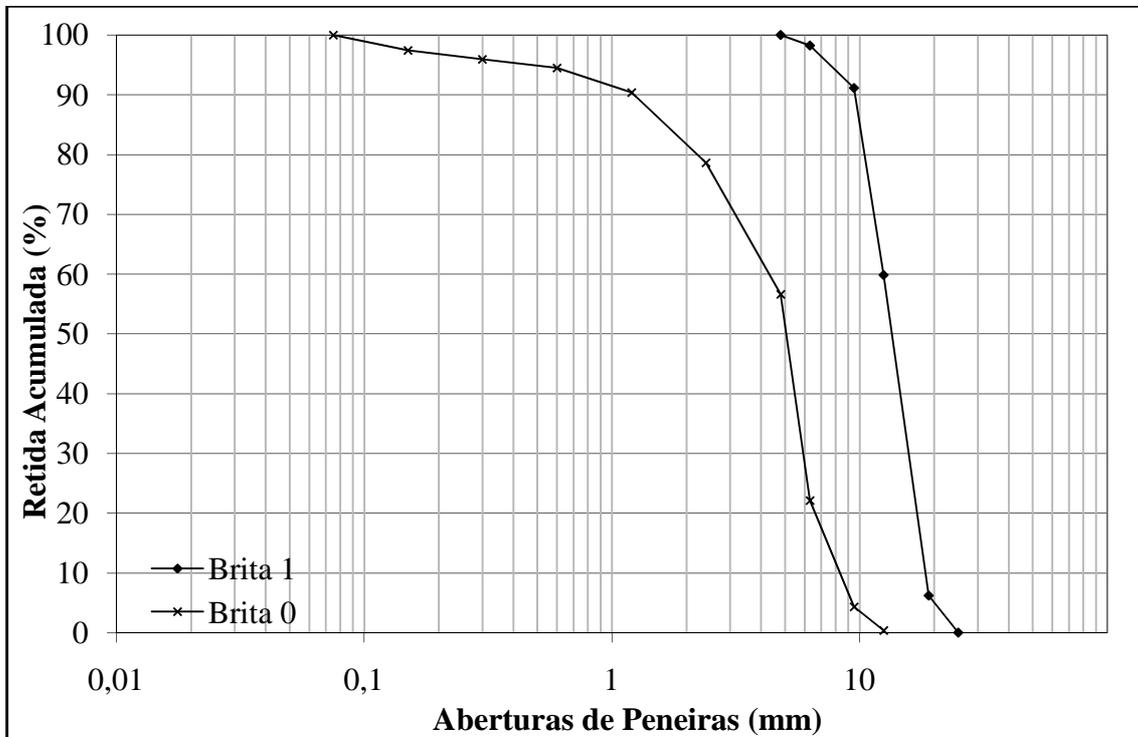


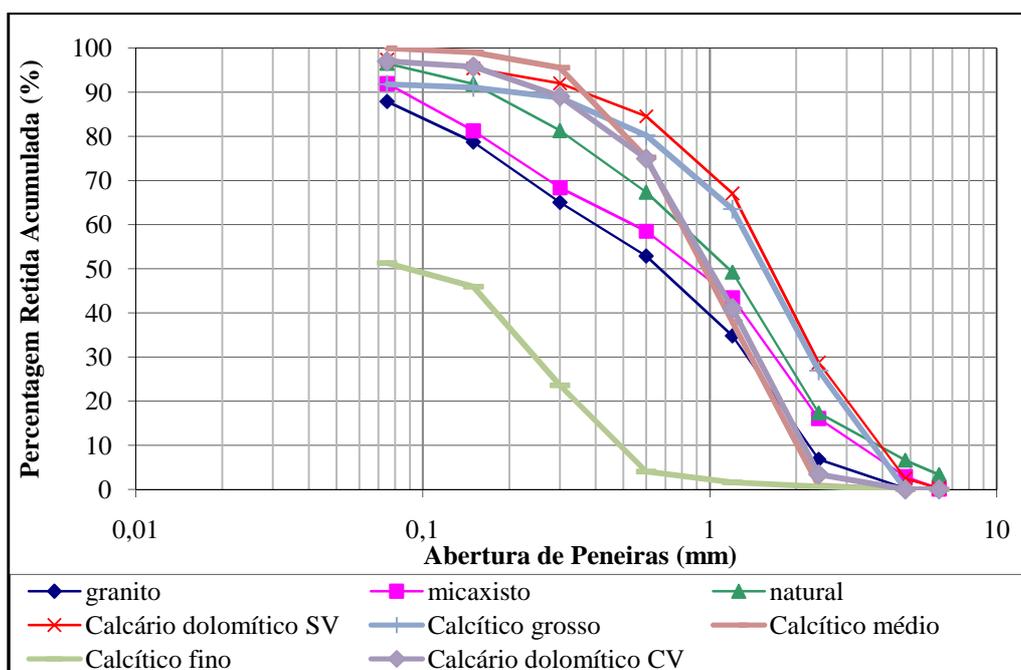
Figura 3.21 – Distribuição granulométrica da brita 0 e brita 1

Tabela 3.9 – Caracterização física dos agregados graúdos

Características físicas	Brita 0	Brita 1	Normas técnicas
Módulo de Finura (%)	5.18	6.97	NBR NM 248/03
Diâmetro máximo (mm)	9.5	25	NBR NM 248/03
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	2.70	NBR NM 53/03
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1.49	1.43	NBR NM 45/06
Absorção (%)	0.7	0.5	NBR NM 53/03

Na realidade, as areias britadas foram coletadas nas empresas sem beneficiamento prévio. Entende-se por beneficiamento prévio o tratamento que se realiza normalmente para retirar do resíduo de britagem as partículas mais grossas – com diâmetro igual ou superior a 4.8 mm – e as microfinas (<0.075 mm).

As areias britadas de calcário dolomítico com (Calcário dolomítico CV) e sem tratamento de forma (Calcário dolomítico SV) têm procedência da Pedreira CIPLAN – Cimentos Planalto S.A. localizada no Distrito Federal. Os resíduos de micaxisto e granito procedem da Itaúna Pedreira, localizada no município de Aparecida de Goiânia – Goiás. Já o pó de pedra de calcário calcítico era originário da central de britagem da empresa Briccal, localizada no município de Padre Bernardo–Goiás. As características físicas das areias britadas estão apresentadas na figura 3.22 e tabela 3.9 a seguir.



**Figura 3.22** – Curvas granulométricas originais dos agregados miúdos usados na pesquisa

**Tabela 3.10** – Caracterização física dos agregados graúdos

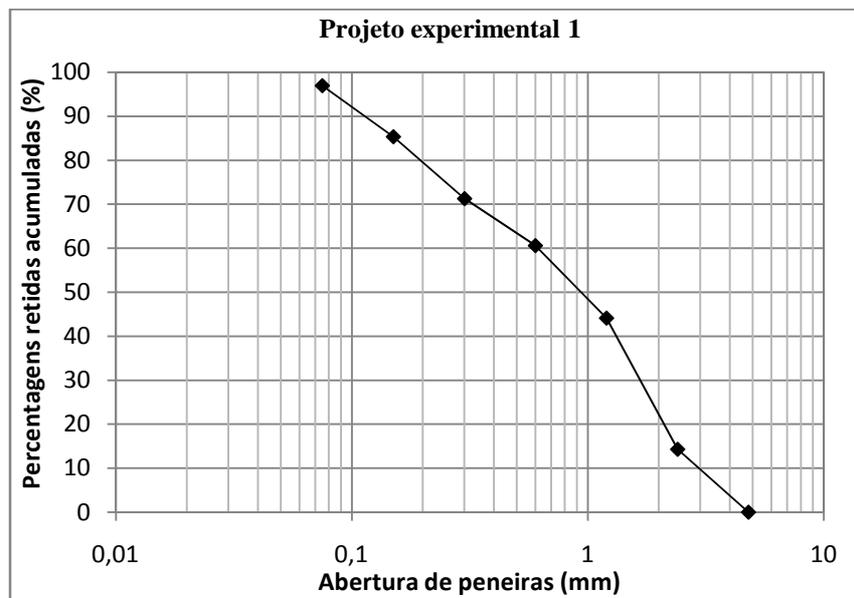
Características	Gra nito	Dolo mítico SV	Dolomí tico CV	Mica xisto	Natu ral	Calcítico grosso	Calcítico médio	Calcítico fino	Normas técnicas
$D_{máx}$	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	2.4	0.3	NBR NM 248/03
MF (%)	2.38	3.47	3.04	2.7	3.14	3.5	3.09	1.48	NBR NM 248/03
M.E. ( $g/cm^3$ )	2.54	2.64	2.59	2.69	2.52	2.70	2.70	2.70	NBR NM 52/03
AA (%)	0.70	0.05	0.04	1.70	3.30	0.40	0.40	0.40	NBR NM 53/03
M.P. (%)	14.0	13.0	3.3	10.0	3.9	9.5	1.5	52.0	NBR NM 46/03
MASSAS UNITÁRIAS ( $g/cm^3$ )									
P.E.-1	1.47	1.60	1.66	1.56	1.54	1.64			NBR NM 45/06
P.E.-2 80%-20%	1.56	1.59	1.62	1.61	-	1.65			NBR NM 45/06
P.E.-2 70%-30%	1.65	1.64	1.65	1.61	-	1.42			NBR NM 45/06
P.E.-2 60%-40%	1.53	1.65	1.62	1.58	-	1.63			NBR NM 45/06
P.E.-2 50%-50%	1.51	1.59	1.63	1,51	-	1.56			NBR NM 45/06
PE-3(7% de microfinos )	1.55	1.56	1.64	1.64	-	1.65			NBR NM 45/06
PE-3(12% de microfinos )	1.57	1.65	1.65	1.61	-	1.67			NBR NM 45/06
PE-3(18% de microfinos )	1.56	1.63	1.63	1.62	-	1.66			NBR NM 45/06

$D_{máx}$  – Dimensão máxima característica; M.F. – módulo de finura; M.E. – massa específica; AA – absorção de água; M.P. – material pulverulento e P.E. – Programa experimental.

Como visto anteriormente, a composição granulométrica original dos agregados miúdos britados foi completamente alterada quando da realização dos projetos experimentais. Por esse motivo, as massas unitárias no estado solto foram determinadas com as areias compostas. Cabe salientar ainda que os resíduos de britagem de calcário calcítico foram fornecidos separadamente, por faixas granulométricas (figura 3.22), e que para a realização dos projetos experimentais 2 e 3 foram realizadas diversas tentativas de combinação a fim de que estas resultassem nos valores percentuais definidos em tais

projetos, no que diz respeito à percentagem de material retido e passante da peneira 0.6 mm.

As figuras 3.23 a 3.27 a seguir apresentam as curvas granulométricas resultantes dos projetos experimentais 1, 2 e 3.



**Figura 3.23** – Curva granulométrica referência para todas as areias – projeto experimental 1

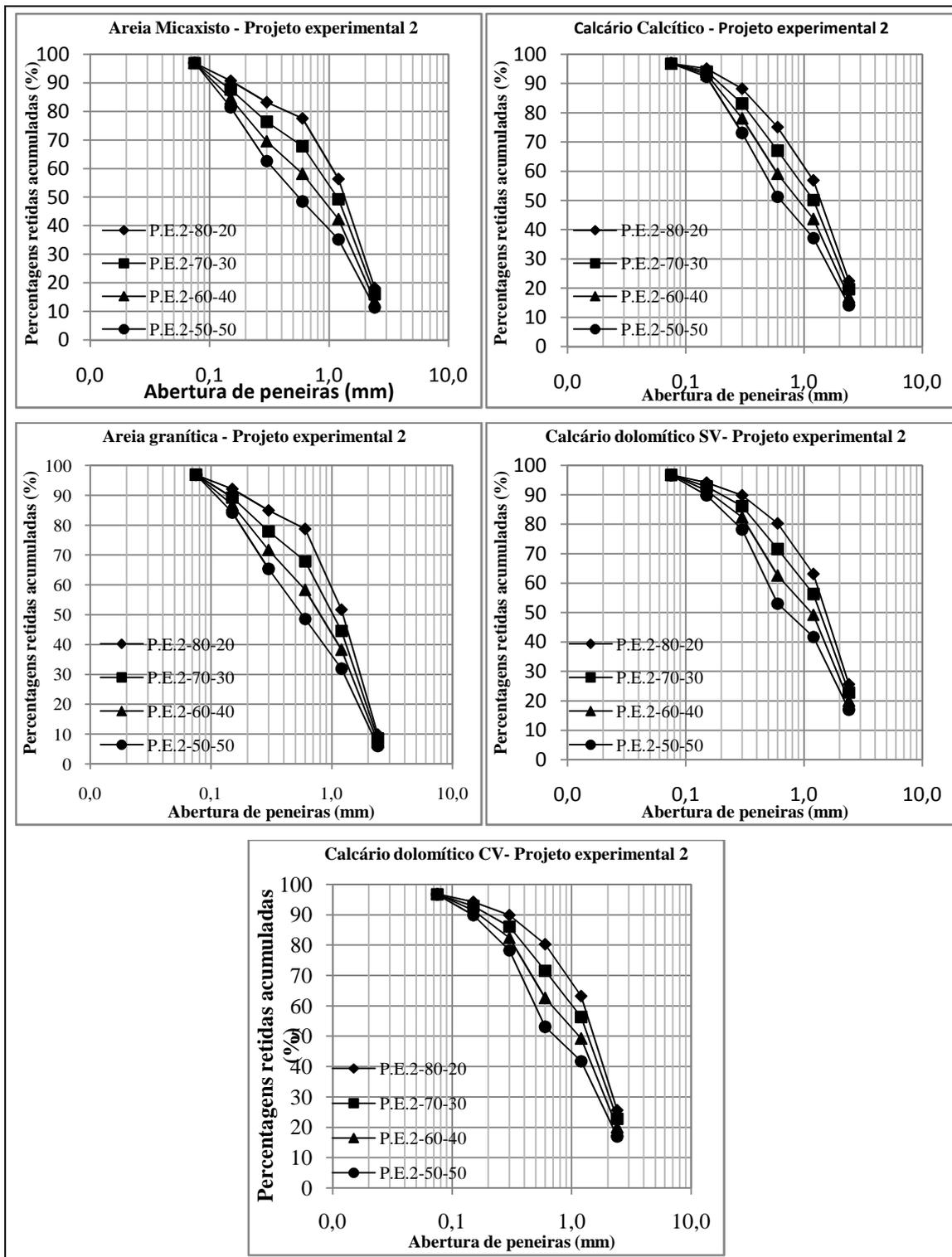


Figura 3.24 – Curvas granulométricas do projeto experimental 2

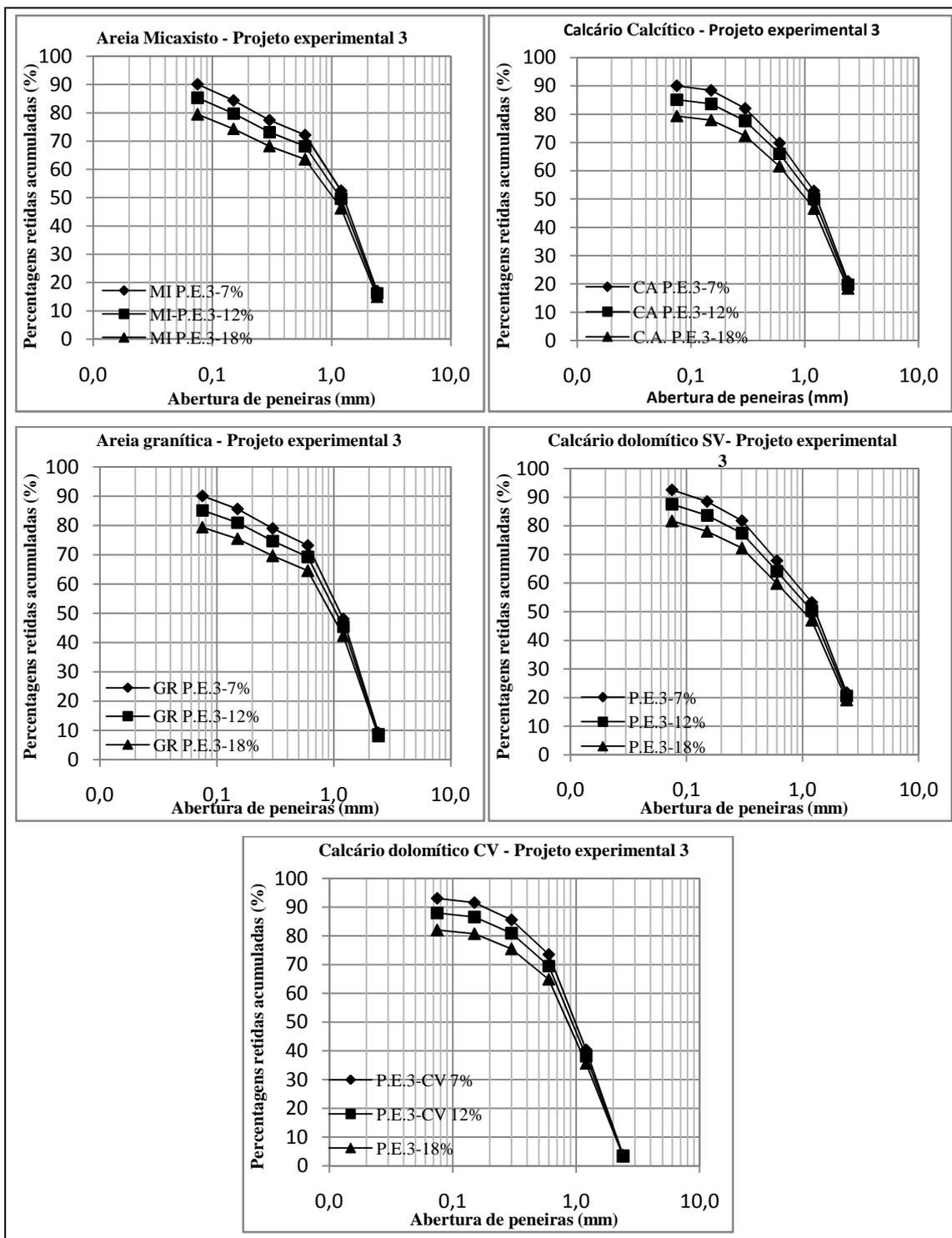


Figura 3.25 – Curvas granulométricas do projeto experimental 3

### **3.4.2 – Procedimento de mistura dos materiais na produção dos concretos**

A fim de minimizar a interferência e variabilidade nos resultados dos ensaios o procedimento de mistura e a quantidade de materiais em a massa foram mantidos constantes. Os materiais foram utilizados secos, mantidos e armazenados em ambiente de laboratório.

Antes do uso, a betoneira de capacidade 120 litros foi imprimada com argamassa de traço em massa 1:2 e relação água cimento igual a 0.5.

A seqüência de introdução e mistura do material na betoneira seguiu a seguinte ordem:

1. Massa total dos agregados graúdos;
2. 50% da massa de água;
3. Mistura até molhagem total dos grãos dos agregados graúdos;
4. Massa total da areia;
5. Massa total do cimento;
6. Mistura por 40 segundos com a betoneira coberta por plástico a fim de evitar a perda de finos e parada para limpeza das pás e paredes;
7. Adição do restante de água;
8. Mistura por mais 1,5 minutos;

Cabe salientar ainda que todos os ensaios foram realizados dentro de quarenta minutos a contados a partir do fim da mistura do concreto na betoneira, com temperatura entre 29 °C e 31 °C e umidade relativa do ar entre 50% a 60%. Os ensaios foram realizados numa ordem de execução fixa, a saber: ensaio de abatimento modificado, ensaio de abatimento do tronco de cone, *k-slump 1 e 2*, teor de ar incorporado e, por último, exsudação.

### **3.4.3 - Definição da nomenclatura adotada**

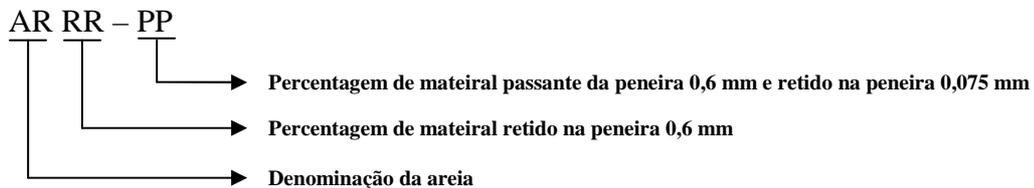
Neste item será definida a nomenclatura das areias britadas e suas composições adotadas no Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados. A nomenclatura foi adotada como forma de simplificar ao se redigir as avaliações efetuadas.

Primeiramente, as denominações das areias foram reduzidas a apenas duas letras, a saber:

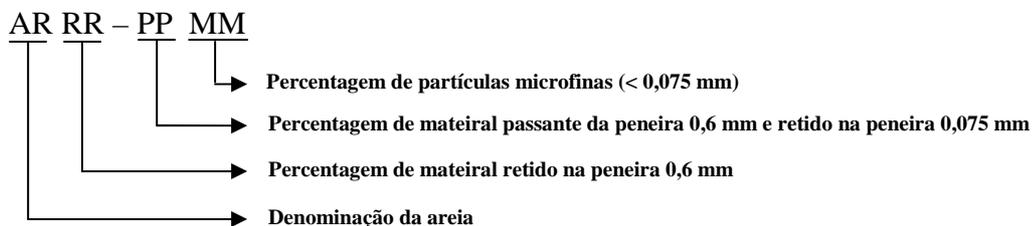
- Areia natural – NA;
- Areia de calcário dolomítico com tratamento de forma – CV;
- Areia de calcário dolomítico sem tratamento de forma – SV;
- Areia granítica – GR;
- Areia de calcário calcítico – CA;
- Areia de micaxisto – MI.

Em relação às composições foi adotada a seguinte nomenclatura:

a) Composições do projeto experimental 2



a) Composições dos projetos experimentais 3 e 4



### 3.4.4 – Ensaio de abatimento do tronco de cone ou *slump test*

O ensaio de abatimento de tronco de cone é um método que determina a resistência à deformação ou consistência de concretos desde que a dimensão máxima dos agregados não seja superior a 37,5 mm e que as misturas resultem em abatimentos superiores a 10 mm. Este ensaio é preconizado pela NBR NM 67/98.

Para a execução do ensaio, deve-se ter a seguinte aparelhagem:

- Molde tronco-cônico com diâmetro da base de 200 mm, diâmetro superior de 100 mm e altura de 300±2 mm;

- Haste de compactação com diâmetro de 16 mm e comprimento de 600 mm;
- Placa de base plana, quadrada, com dimensões mínimas de 500 x 500 mm.

O procedimento do ensaio consiste em umedecer o molde e preenchê-lo com o concreto fresco em três camadas de aproximadamente um terço da altura do molde. A cada camada, deve-se proceder à compactação com a haste, aplicando-se 25 golpes, tomando-se o cuidado de não ultrapassar a camada em questão. Como operação final deve-se proceder à rasadura da superfície, levantar o molde tronco-cônico no sentido vertical em um tempo de 5 a 10 segundos, colocá-lo junto à massa de concreto e invertê-lo, medindo a diferença de altura entre a altura do molde e a altura da mistura recém desmoldada. A figura 3.26 ilustra a execução do ensaio.



**Figura 3.26** – Ensaio de abatimento de tronco de cone

#### **3.4.4 – Viscosidade e Tensão de Escoamento – Abatimento de tronco de cone modificado**

O ensaio de abatimento modificado foi descrito no item 2.2 do Capítulo 2 – Revisão bibliográfica. Este ensaio foi implementado por FERRARIS & DE LARRARD (1998) como uma maneira prática de se obter a viscosidade e tensão limite de escoamento de concretos com consistência mensurada pelo abatimento de tronco de cone mínima de 120 mm.

Para a realização deste ensaio, são necessários os equipamentos listados a seguir:

- Molde tronco-cônico;

- Cronômetro com precisão de 0,01s;
- Base quadrada com haste vertical central;
- Placa de formato circular com furo no centro para encaixe na haste;
- Anel de vedação para encaixe no orifício da placa.
- Graxa para lubrificação da haste

O primeiro passo para o início deste ensaio é umedecer a haste, base e tronco de cone. Em seguida, unta-se a haste vertical central com a graxa e posicionar o tronco de cone na base, de forma que a mesma fique centralizada em relação à haste. Da mesma forma como feito para o *slump test*, deve-se preencher o tronco de cone em três camadas de 25 golpes cada e proceder à rasadura da superfície. Como ao colocar o concreto no molde, ocorre perda da graxa na haste, deve-se limpar e untá-la novamente. Logo após, deve-se inserir a placa de formato circular com o anel de vedação encaixado no orifício da placa. Por final, deve-se levantar verticalmente o cone e com auxílio do cronômetro mensurar o tempo decorrido do início do ensaio até a parada da placa na marcação da haste, sendo esta com altura de 100 mm contando a partir da extremidade superior. Após retirada da placa, deve-se medir o abatimento com uma régua milimetrada. A figura 3.27 ilustra o ensaio abatimento modificado.



**Figura 3.27** – Ensaio de tronco de cone modificado

### **3.4.5 – Ensaio *k-slump* ou *flow-gauge***

Este ensaio é normalizado pela ASTM C 1362 – 04 e possui duas formas de medida, a saber: ao se inserir o penetrômetro na massa de concreto recém compactada, o que resultaria numa leitura mais relacionada à segregação de acordo com FERRARIS (1999), sendo esta a leitura 1, como mostrado na figura 3.27 a seguir. A leitura 2 é determinada ao se retirar o penetrômetro do molde cilíndrico com a haste

completamente suspensa, e ao se deixá-la cair novamente no material remanescente no fundo do equipamento, sendo que esta leitura estaria mais relacionada à fluidez da mistura.

Para a realização do ensaio deve-se ter a seguinte aparelhagem:

- Penetrômetro com escala graduada com escala em percentuais;
- Recipiente cilíndrico metálico de 15 centímetros de diâmetro;
- Haste para compactação;
- Concha para enchimento do recipiente;
- Colher de pedreiro.



**Figura 3.28** – Ensaio flow gauge. Penetrômetro graduado.

O penetrômetro, além da haste graduada, possui furos na parte inferior para permitir a entrada do microconcreto e um disco que serve de elemento fixador, depois de inserido o aparelho no concreto, conforme mostrado figura 3.28.

O procedimento definido pela norma segue os seguintes passos:

1. Umedecimento do recipiente metálico;
2. Adensar a amostra de concreto em três camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando 30 golpes de socamento, tomando o cuidado para que os golpes sejam distribuídos uniformemente;
3. Arrasar a superfície de concreto;
4. Inserir o penetrômetro no centro do recipiente, de forma que o disco encoste na superfície do concreto (figura 3.28), com a haste suspensa;
5. Aguardar 60 segundos, para que a pasta de cimento penetre no aparelho através dos furos e preencha o vazio interno;
6. Soltar a haste;

7. Realizar a leitura pela escala graduada.

### 3.4.6 – Ensaio de Exsudação.

A NBR NM 102/96 especifica dois métodos de ensaio para a determinação do percentual de água exsudada pelo concreto no estado fresco. O método A é aplicado a uma amostra compactada manual e no método B a amostra é adensada por vibração e depois sujeita à vibração intermitente através de uma mesa vibratória. Neste trabalho foi escolhido o método B por representar melhor as condições reais de campo.

A aparelhagem necessária à realização do ensaio está listada a seguir:

- Mesa vibratória com dispositivo que proporciona vibrações sucessivas em intervalos de tempo periódicos;
- Recipiente metálico com 282mm de altura e 292mm de diâmetro;
- Recipiente para coleta do material exsudado;
- Vibrador de imersão;
- Balança com precisão de 0,01 g;
- Estufa;



**Figura 3.29** – Mesa vibratória e recipiente utilizados no ensaio de exsudação.

O método consiste em determinar a parte da água que se separa da mistura do concreto e tende a subir para a superfície do concreto recém após vibração intermitente. Coloca-se concreto suficiente para atingir metade da altura do recipiente, pesa-se o conjunto e submete-se a mistura a um ciclo de vibração intermitente por 1 hora. A mesa vibratória

permanece ligada por 3 segundos e desligada por 30 segundos. O tempo cessar a vibração da mesa, mesa após desligada é fixado em 7 segundos.

Transcorrido o período de uma hora de vibrações periódicas, é coletada a água mais resíduos exsudada com auxílio de uma pipeta onde a mesma é transferida para um bécker. A massa de água mais resíduos ( $m_p$ ) é determinada e após evaporação de toda água em estufa, a massa final ( $m_q$ ) é mensurada.

O resultado do ensaio é obtido através das equações 3.2 e 3.3 a seguir:

$$m_{ar} = \frac{m_{am}}{m_t} \cdot m_e \quad \text{equação 3.2}$$

Onde:

$m_{ar}$  é a massa de água do concreto do recipiente em gramas;

$m_{am}$  é a quantidade de água de mistura usada no traço em gramas;

$m_t$  é a massa total do traço em gramas;

$m_e$  é a massa da amostra ensaiada em gramas.

Com o valor de  $m_{ar}$  o teor de água exsudada é calculado através da seguinte expressão:

$$E = \frac{m_{ae}}{m_{ar}} \cdot 100 \quad \text{equação 3.3}$$

Onde:

$m_{ae}$  é a massa de água exsudada.

E é o teor de água exsudada em percentual;

### 3.4.7 – Teor de ar incorporado pelo método pressométrico

A determinação do teor de ar incorporado do concreto no estado fresco seguiu o preconizado pela NBR NM 47/2002. A aparelhagem necessária para a realização do ensaio está descrita a seguir:

- Recipiente metálico com capacidade nominal de 15 dm<sup>3</sup> e tampa com manômetro e bomba de ar acoplados;
- Haste de adensamento de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento;

- Balança com precisão de  $\pm 0.5\%$  da massa a determinar;
- Régua metálica;
- Bomba de água de borracha.

Após colocado dentro do recipiente metálico, o concreto deve ser adensado manualmente com a haste, em três camadas com alturas aproximadamente iguais com 25 golpes cada. Depois do processo de adensamento, deve-se rasar o concreto com a régua metálica, e pesar o conjunto recipiente mais amostra. Depois de pesado o recipiente é vedado com a tampa e a válvula de ar do manômetro é fechada. Insere-se água limpa em um dos orifícios da tampa, até que todo ar existente entre a câmara e a superfície da amostra seja expelido. Em seguida, os orifícios são fechados, a bomba de ar é acionada até que o ponteiro atinja a posição inicial do manômetro. Então, abre-se a válvula de pressão (figura 3.30) e realiza-se a leitura do teor de ar incorporado pelo concreto.



**Figura 3.30** – Determinação do teor de ar incorporado pelo concreto

## CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item, serão apresentados e analisados os resultados obtidos conforme as variáveis dependentes e independentes descritas anteriormente no capítulo 3 – Programa experimental. Inicialmente, serão apresentados os resultados obtidos para os Projetos Experimentais 1, 2 e 3 e em seguida serão obtidas as possíveis correlações entre os mesmos para proceder à análise dos resultados alcançados.

### 4.1 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROJETO EXPERIMENTAL 1

Como já mencionado no capítulo anterior, o projeto experimental 1 foi elaborado com a finalidade de avaliar possíveis influências dos aspectos de forma (grau de arredondamento, esfericidade) textura superficial e do tipo litológico nas propriedades do estado fresco do concreto. Para tanto, a seguir, serão apresentados e analisados os resultados e dados das seguintes variáveis dependentes e independentes: agregados miúdos - aspectos de forma e textura, mineralógicos e índices de vazios; nos concretos (estado fresco) – consistência pelo abatimento e *k-slump*, exsudação, teor de ar incorporado e segregação.

#### 4.1.1- Apresentação dos resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em forma de tabelas e gráficos de barras, sem, no entanto, serem realizadas as correlações possíveis entre as variáveis, sendo estas realizadas no item subsequente a este, análise dos resultados.

##### 4.1.1.1 – Apresentação dos resultados de análise morfoscópica

Nas tabelas 4.1 e 4.2 a seguir apresentam os resultados da análise morfoscópica realizada nos grãos de areia britada, como também nos grãos de areia natural.

**Tabela 4.1** – Resultados, em percentual, das características de forma e textura dos agregados miúdos

Natureza petrográfica	Grau de Esfericidade		Grau de Arredondamento					Textura Superficial			
	Alta esfericidade (%)	Baixa esfericidade (%)	Muito angular (%)	Angular (%)	Sub angularo (%)	Sub-arredondado (%)	Arredondado (%)	Alta rugosidade (%)	Rugoso (%)	Baixa rugosidade (%)	Liso (%)
CV	85,0	15,0	-	35,0	35,0	25,0	5,0	-	57,5	40,0	2,5
SV	40,0	60,0	13,3	43,3	33,3	3,3	6,7	20,0	36,7	21,7	21,7
CA	33,0	67,0	13,3	53,3	23,3	10,0	-	3,3	68,3	25,0	3,3
NA	37,0	63,0	-	6,7	43,3	33,3	16,7	1,7	15,0	51,7	31,7
MI	20,0	80,0	23,1	38,5	30,8	7,7	-	3,3	76,7	20,0	-
GR	56,7	43,3	40,0	36,7	20,0	3,3	-	50,0	40,0	6,7	3,3

Da tabela 4.1 acima, percebe-se que em termos de esfericidade, as areias que obtiveram maioria de grãos com formato esférico em ordem decrescente de valores foram CV, GR e SV – 85%, 56.7% e 40%, respectivamente – as demais apresentaram baixos percentuais de grãos esféricos em sua composição, sendo que das amostras, o agregado miúdo MI foi o que apresentou menores quantidades de grãos esféricos (20%).

Em termos de grau de arredondamento dos cantos e arestas dos grãos, os materiais GR, CA, MI e SV apresentaram maioria (mais de 50%) de grãos enquadrados nas categorias muito angular e/ou angular, com valores respectivos de 76.7%, 66.7%, 61.5% e 56.7%, o que significa que tais materiais possuem cantos e arestas pouco arredondados. A areia NA obteve o maior percentual de grãos com cantos e arestas arredondados, seguido da amostra de CV, com valores de grãos arredondados ou sub-arredondados iguais a 50% para os grãos de NA e 30% para o agregado miúdo CV.

Em relação à textura superficial, a areia que apresentou alto grau de rugosidade foi a GR, com 90% de seus grãos se enquadrando nas classes alta rugosidade e/ou rugoso (50% e 40%, respectivamente), seguido do tipo Natureza petrográfica MI, com 80% de material possuindo nível elevado de rugosidade, já que foram encontrados grãos altamente rugosos (3.3%) e rugosos (76.7%). Os agregados miúdos de CA e SV também apresentam um percentual significativo de grãos rugosos – 3% de exemplares altamente rugosos e 68.3% rugosos – para o material CA e um total de 56.7% de grãos rugosos em relação ao SV, com 20% de grãos altamente rugosos e 36.7% de grãos rugosos. Os produtos que obtiveram maior percentual de grãos lisos ou com baixa

rugosidade foram a areia NA, SV e CV, com valores respectivos de 83.4%, 43.4% e 42,5%. Cabe aqui salientar que, apesar de possuírem tratamento de forma diferenciado, e mesma natureza petrográfica, os resultados em termos de rugosidade dos dois agregados de calcário dolomítico (SV e CV) foram bastante similares, não obstante o material obtido sem tratamento de forma, SV, apresentar maior quantidade de grãos altamente rugosos.

Tendo como base os dados apresentados até o presente momento, pode-se inferir que o agregado miúdo mais adequado ao uso e à trabalhabilidade dos concretos, de acordo com a bibliografia consultada neste trabalho, é a areia calcária com tratamento de forma (CV). É interessante notar que, em termos de características de forma, o agregado britado CV apresentou resultados inclusive superiores à da areia natural de leito de rio NA.

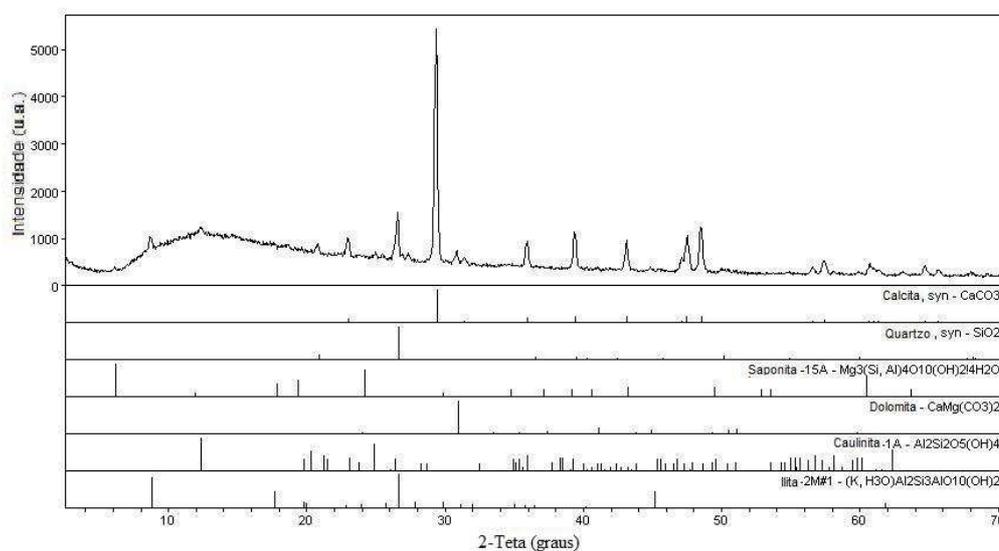
Os resultados das características petrográficas realizadas se encontra na tabela 4.2 a seguir:

**Tabela 4.2** – Características petrográficas/mineralógicas das areias analisadas

<b>Tipo litológico</b>	<b>Análise das características petrográficas e mineralógicas das areias</b>
<b>CV</b>	Amostra de rocha calcária de composição homogênea. Formada por fragmentos cinza de rocha calcária fina, grãos de calcita individualizados, numerosos em quantidade e de cor branco leitoso e rosado, grãos de quartzo translúcido e placas de lamelas de muscovita.
<b>SV</b>	Amostra homogênea em termos de composição, composta quase completamente por fragmentos de rocha calcária de cor cinza, poucos grãos individualizados de calcita branca e quantidades traço de muscovita. Em comparação à outra amostra de calcário dolomítico CV analisada, esta SV apresenta maior quantidade de fragmentos de rocha em relação aos grãos de calcita, ou seja, apresenta menor quantidade de grãos calcita individualizados.
<b>CA</b>	Amostra de rocha calcária rica em calcita. Apresenta composição mineralógica homogênea representada por fragmentos de rocha calcária fina de cor cinza médio, grãos individualizados de calcita com cor branca a rosada, além de quantidades traço de quartzo, muscovita e pirita limonitizada.
<b>NA</b>	Grãos heterogêneos, representando mistura de fragmentos de rocha granítica, rocha calcária, grãos de quartzo leitoso e translúcido e grãos individualizados de turmalina, mica branca e minerais metálicos. Ocorrem também fragmentos de rocha alterada (laterizada) e rocha xistosa, sendo grande parte da amostra formada por quartzo. Apresenta quantidades traço de granada rosa.
<b>MI</b>	A amostra apresenta fragmentos inequegranulares de rocha xistosa composta por quartzo, granada, mica escura (esverdeada) e mica branca; Os fragmentos que representam a rocha xistosa aparecem menos arredondados, com formas alongadas e placóides devido à xistosidade e a clivagem das micas.
<b>GR</b>	Amostra composta por fragmentos inequegranulares de rocha granítica leucocrática. A composição mineralógica é formada por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, e rica em minerais micáceos (muscovita e biotita).

Pelos resultados das análises petrográficas e mineralógicas constantes da tabela 4.2, pode-se inferir que três areias possuem em sua composição o mineral calcita (CV, SV e CA), o que era esperado, pois estas, em relação à petrografia, são calcários. O que cabe salientar, entretanto, é que, considerando a amostra analisada, as areias britadas CV e CA possuem quantidades substanciais de calcita, ao contrário da areia britada SV. De acordo com trabalhos tais como AHN (2000), DONZA et al (2003) e QUIROGA & FOWLER (2003), as areias britadas de calcário calcítico resultaram em concretos mais fluidos, os quais necessitavam de um menor teor aditivos para uma mesma consistência. Nota-se, também, que há presença de minerais micáceos (principalmente muscovita) em todos os tipos petrográficos estudados, minerais estes que, de acordo com SBRIGHI NETO (2005), geralmente comprometem os concretos em termos de resistências mecânicas, devido aos planos de clivagem orientados destes materiais. Outro mineral constante em quase todos os exemplares analisados foi o quartzo. Percebeu-se, ainda, que a areia natural de leito de rio (NA) possui a composição mineralógica mais heterogênea das analisadas, mas, como esperado, o mineral mais presente foi o próprio quartzo.

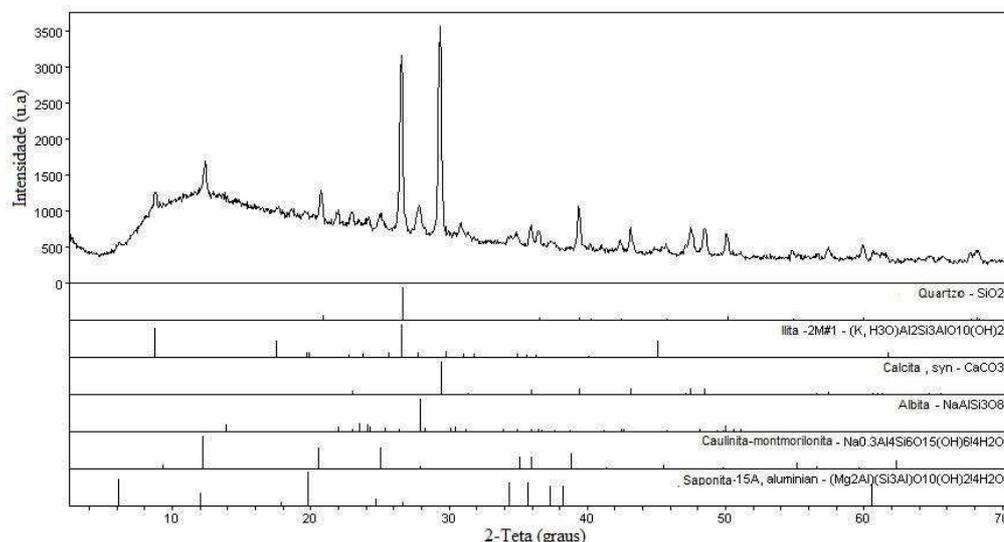
A análise mineralógica pode ser ratificada com os resultados do ensaio de difratometria de raio-X apresentados nas figuras 4.1 a 4.6 a seguir:



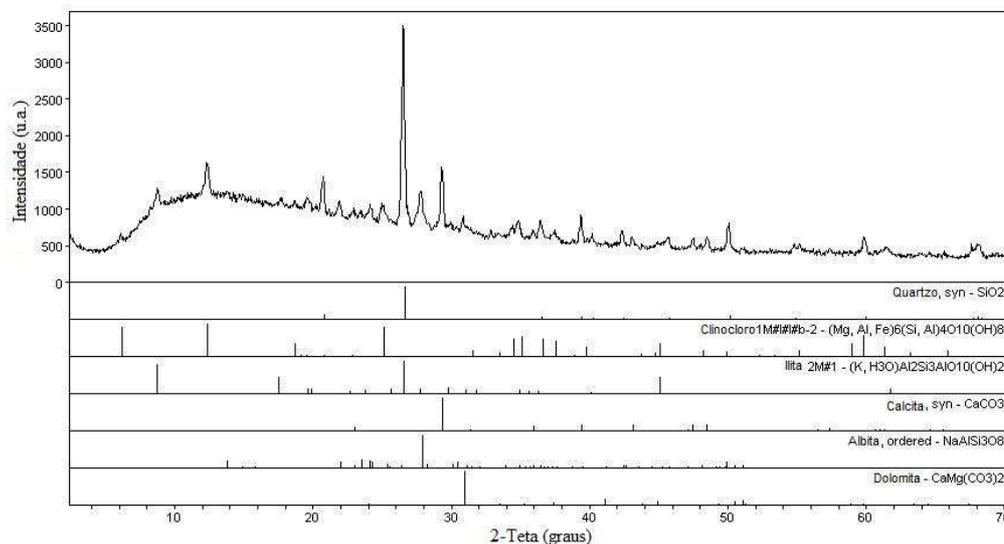
**Figura 4.1** – Fases encontradas na Difratosmetria de raio X – Areia CA

Pelo difratograma expresso na figura 4.1 nota-se que ao se comparar os picos 100% das fases minerais encontradas, o mineral mais presente na areia britada CA é a calcita e em bem menor quantidade o quartzo.

Pela figura 4.2 a seguir, nota-se que, ao se comparar os picos 100%, as fases mais presentes na areia CV são a calcita, seguido de perto do quartzo. As demais fases minerais se apresentam em menor quantidade.

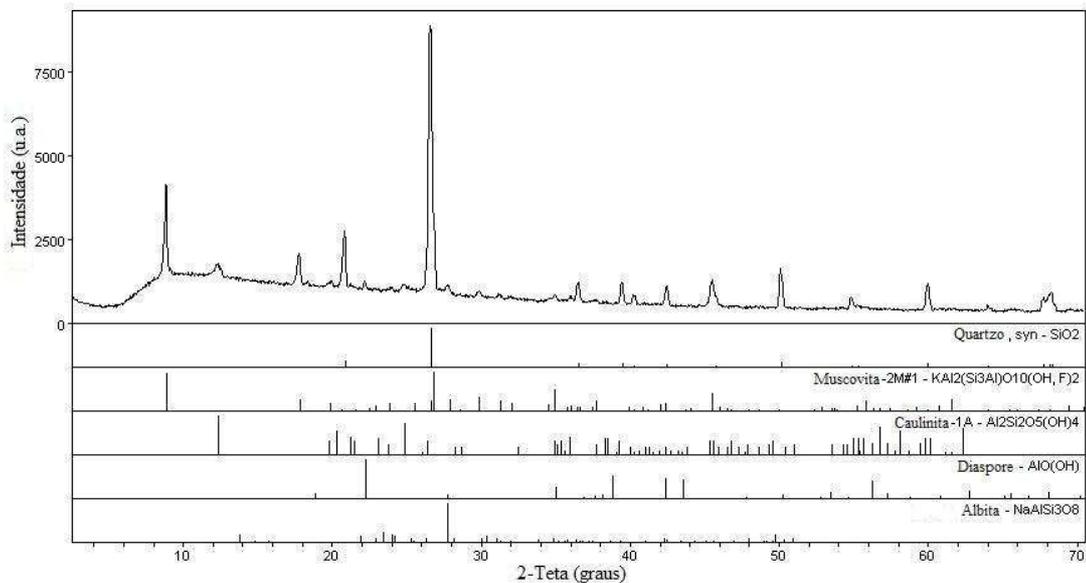


**Figura 4.2 – Fases encontradas na Difractometria de raio X – Areia CV**



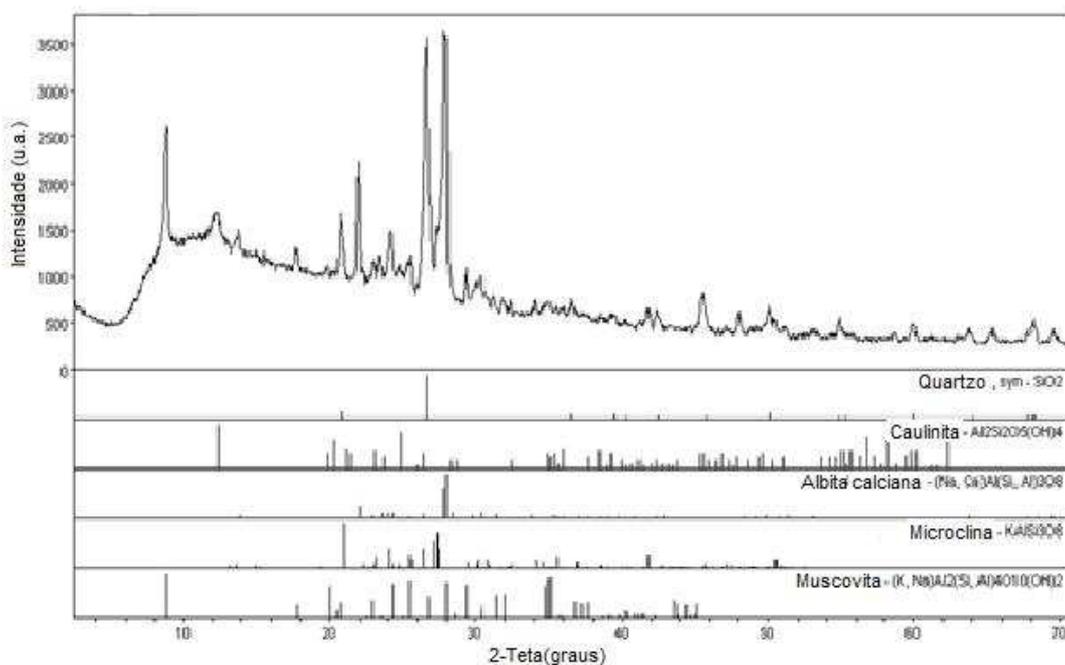
**Figura 4.3 – Fases encontradas na Difractometria de raio X – Areia SV**

De acordo com o difratograma expresso na figura 4.3, nota-se que o mineral mais presente em se tratando da areia SV é o quartzo ou ilita – os picos 100% estão sobrepostos, não sendo possível identificar com clareza – com bem menos teores do mineral clinocloro, seguido de calcita.



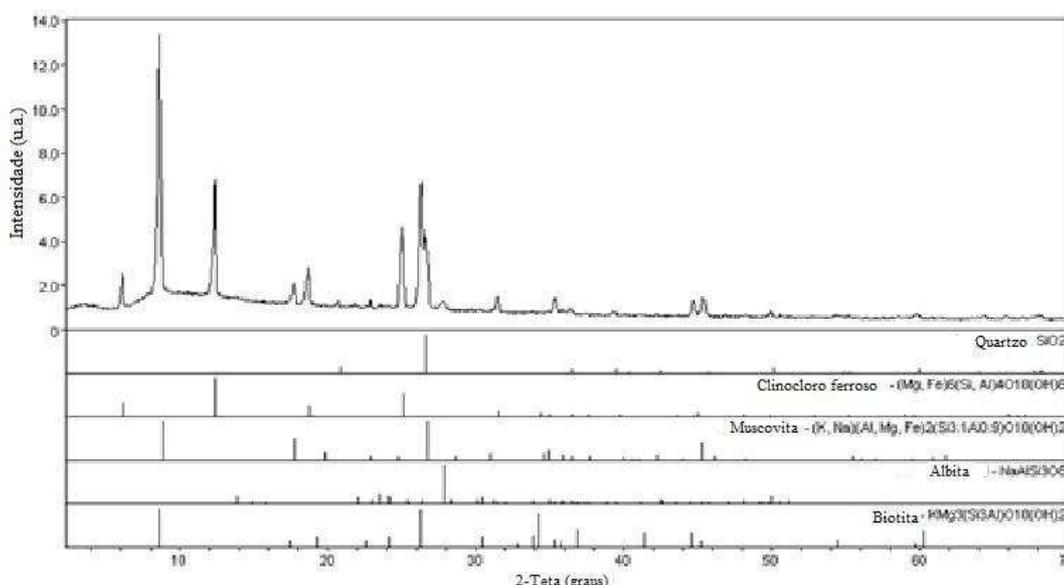
**Figura 4.4 – Fases encontradas na Difractometria de raio X – Areia NA**

Nota-se pela figura 4.4 que analisando os picos 100% da areia NA, o mineral predominante é o quartzo, seguido em bem menor quantidade pela muscovita. As demais fases minerais, se comparados principalmente ao mineral quartzo, se apresentam em quantidades bem menos significativas.



**Figura 4.5 – Fases encontradas na Difractometria de raio X – Areia GR**

O difratograma expresso na figura 4.5 mostra em quantidades significativamente maiores, a presença dos minerais albita calciana, quartzo, e em menor número, o mineral micáceo muscovita.



**Figura 4.6** – Fases encontradas na Difractometria de raio X – **Areia MI**

A areia MI apresenta como mineral preponderante a muscovita, além de quartzo e clinocloro, com estes últimos em menores teores.

#### 4.1.1.2 – Apresentação dos resultados nos concretos

Neste item serão apresentados os resultados referentes aos concretos produzidos com os agregados miúdos compostos, com a distribuição granulométrica igual à da areia britada de micaxisto, como explicado no item 3 – Programa experimental. Para produzir tais concretos foram fixadas a proporção de materiais ( $I:a:p:x$ ), a relação água/materiais secos (H%), o teor de argamassa seca ( $\alpha\%$ ) e o consumo de cimento (C), como descrito na tabela 4.3 a seguir.

**Tabela 4.3** – Proporção de traço e parâmetros de mistura - **projeto experimental 1**

Proporção de cimento	Proporção de materiais ( $I:a:p:x$ )				Relação água/materiais secos (H%)	Teor de argamassa seca ( $\alpha\%$ )	Consumo de cimento (C)-kg/m <sup>3</sup>
	Proporção de areia (a)	Proporção de brita 0 ( $p_1$ )	Proporção de brita 1 ( $p_2$ )	Relação água/cimento (x)			
1	2,21	0,86	1,97	0,62	10,75	53,2	356,0

Os resultados dos ensaios realizados nos concretos em estado fresco estão descritos na tabela 4.4, como também os índices de vazios das areias no estado solto (índice de vazios MUS) e estado compactado (MUC) e nas figuras 4.1 a 4.6 abaixo:

**Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios nos concretos - projeto experimental 1**

Tipo Litológico	K-Slump Leitura 1 (mm)	K-Slump Leitura 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de água exsudada (%)	Teor de ar incorporado (%)	Índice de vazios MUC (%)	Índice de Vazios MUS (%)
NA	40,0	40,0	80	2,913	3,2	35,2	39,0
SV	37,5	40,0	80	0,595	2,1	31,4	39,4
MI	95,0	32,5	80	5,385	2,8	35,4	41,9
GR	62,5	45,0	105	1,068	3,4	35,9	42,1
CA	125,0	47,5	210	4,434	3,5	34,2	39,2
CV	110,0	65,0	110	1,134	2,8	29,5	37,2

Pela tabela 4.4 percebe-se que os valores mensurados pelo k-slump (leituras 1 e 2) foram distintos se comparadas as areias dos diferentes tipos litológicos, e que não houve variação nos resultados de abatimento de tronco de cone para os agregados miúdos NA, SV e MI. Já para as demais areias GR, CA e CV, tanto os resultados de abatimento quanto os de K-Slump se mostram diferentes, podendo-se inferir que as diferenças de litologia, além das características de graus de arredondamento, textura e esfericidade influem bastante na maior ou menor fluidez dos concretos.

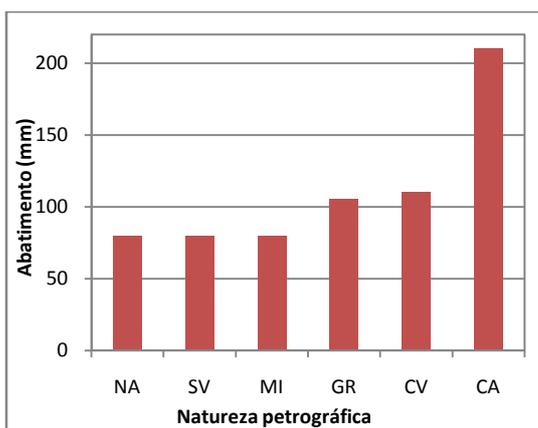
O teor de ar incorporado das misturas se mostrou praticamente constante para as areias NA, GR e CA, igual em valor nos concretos feitos com MI e CV e em valor inferior com a mistura realizada com a areia SV.

O teor de água exsudada se mostrou em valores bastante diferenciados para os diversos tipos litológicos, sendo que o maior resultado obtido foi o do concreto com micaxisto, e o menor, o da mistura realizada com SV.

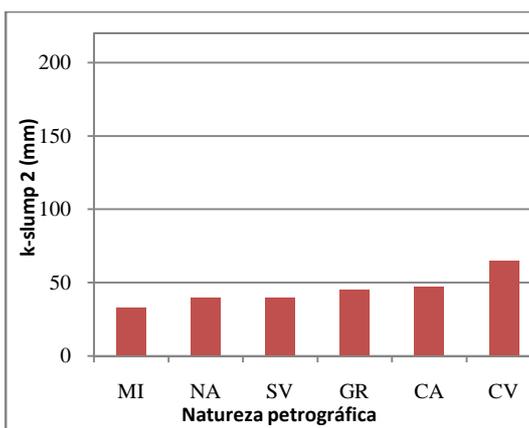
Em relação aos índices de vazios, percebe-se que as variações nos valores foram pequenas, tanto nos valores determinados com a massa unitária compactada, quanto nas determinações utilizando a massa unitária no estado solto. Em relação aos índices

encontrados com as massas unitárias nos estados solto e compactado, a areia CV resultou no menor valor e o maior ficou com a areia GR.

Pelas figuras 4.7 e 4.8, percebe-se que os resultados de *k-slump 2* – considerados os valores que representam a consistência dos concretos – se apresentam em magnitude muito inferiores aos valores de abatimento, além da ordem de fluidez pelo ensaio *k-slump 2*, comparativamente, ser bem distinto (os menos fluidos, segundo o abatimento de tronco de cone, são os concretos de NA, SV e MI e o de maior fluidez a mistura realizada com a areia CA, ao passo que pelo *k-slump 2*, o menos fluido é o concreto de MI, sendo, no entanto, o mais fluido o produzido com a areia CV. Torna-se interessante notar ainda que, enquanto com o ensaio de abatimento de tronco de cone os concretos das areias NA, SV e MI obtiveram o mesmo resultado (80 mm), com o ensaio *k-slump 2* o valor resultante da mistura com o agregado miúdo MI foi diferente das outras duas, denotando, assim, uma possível maior sensibilidade deste ensaio em relação àquele.

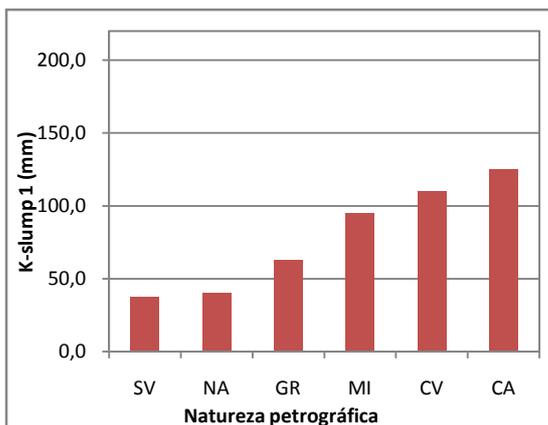


**Figura 4.7** – Resultados de abatimento – projeto experimental 1

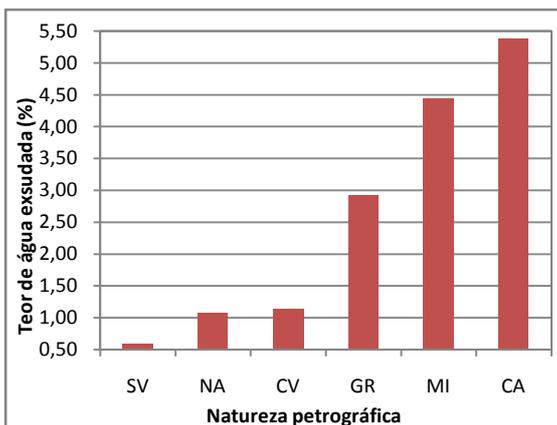


**Figura 4.8** – Resultados de K-Slump Leitura 2 – projeto experimental 1

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados dos ensaios de *k-slump 1* – que significa primeira leitura feita com esse ensaio, indicando, de acordo com FERRARIS (1999), o potencial de segregação do concreto – e o teor de água exsudada, respectivamente. Pelas figuras, nota-se que o concreto SV foi o que menos segregou e também obteve o menor valor de quantidade de água exsudada, e a mistura realizada com CA apresentou o maior valor de segregação, como também o maior resultado de teor de água exsudada.

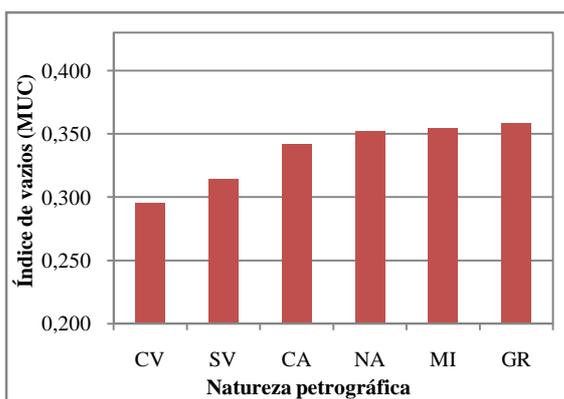


**Figura 4.9** – Resultados de k-slump 1 – projeto experimental 1

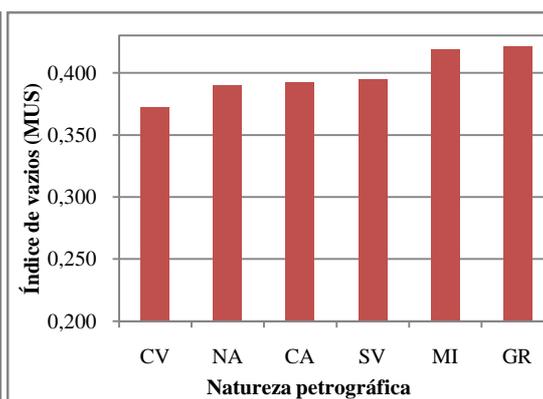


**Figura 4.10** – Resultados de teor de água exsudada – projeto experimental 1

Pelas figuras 4.11 e 4.12 abaixo, percebe-se que os resultados de índice de vazios, como era de se esperar, foram inferiores para os encontrados com a massa unitária compactada. A areia CV apresentou os menores índices de vazios, enquanto que a areia GR apresentou os maiores.



**Figura 4.11** – Resultados de Índice de vazios com a massa unitária estado compactado – projeto experimental 1



**Figura 4.12** – Resultados de Índice de vazios com a massa unitária estado solto – projeto experimental 1

No item 4.1.2 a seguir, os resultados apresentados nesta seção serão analisados.

#### 4.1.2 – Análise dos resultados – Projeto experimental 1

Neste item serão analisados os resultados apresentados até o presente momento, procurando-se sempre correlações possíveis e prováveis entre as variáveis dependentes e independentes deste projeto experimental 1.

#### 4.1.2.1 – Análise do grau de arredondamento, esfericidade e textura superficial das areias

Na tabela 4.5 abaixo estão representados os resultados do exame das características de forma das areias, com a diferença que os mesmos foram transformados em relações. Tais relações têm como objetivo principal o de facilitar a análise dos resultados como um todo. As relações obtidas foram:

##### a) Grau de arredondamento dos cantos e arestas

**Relação de arredondamento (RA);**

**Relação sub-anguloso/muito anguloso (RSA/MA);**

**Relação anguloso/muito anguloso (RA/MA).**

Sendo:

- Relação de arredondamento – divisão da percentagem de grãos com cantos e arestas arredondados e/ou sub-arredondados pela divisão cujos grãos possuem classificação sub-anguloso e/ou anguloso e/ou muito anguloso;
- Relação sub-anguloso/muito anguloso – divisão da percentagem de grãos com cantos sub-angulosos dividida pelo percentual de grãos muito angulosos;
- Relação anguloso/muito anguloso – divisão da percentagem de grãos com cantos angulosos dividida pelo percentual de grãos muito angulosos;

##### b) Textura superficial dos grãos

**Relação rugosidade (RR);**

**Relação textura lisa+baixa rugosidade/alta rugosidade (RLB/AR);**

**Relação rugoso/alta rugosidade (R/AR);**

Onde:

- Relação rugosidade: relação entre a percentagem dos grãos cuja textura superficial se apresenta lisa e/ou com baixa rugosidade dividida pelo percentual de grãos rugosos e/ou muito rugosos;
- Relação textura lisa+baixa rugosidade/alta rugosidade: relação entre a percentagem de grãos lisos e/ou com baixa rugosidade dividido pelo percentual de grãos muito rugosos;
- Relação rugoso/alta rugosidade: relação entre os percentuais de grãos rugosos divididos pelo percentual de grãos muito rugosos.

##### c) Grau de esfericidade

Relação esfericidade (RE): relação entre as percentagens de grãos altamente esféricos divididas pelas percentagens de grãos com baixa esfericidade.

As relações serão apresentadas na tabela 4.5 adiante:

**Tabela 4.5** – Relações das características de forma: grau de arredondamento, textura superficial e grau de esfericidade

Tipo Litológico	Relação de arredondamento (RA)	Relação Sub-anguloso/muito anguloso (RSA/MA)	Relação anguloso/muito anguloso (RA/MA)	Relação rugosidade (RR)	Relação rugoso/Alta rugosidade (R/AR)	Relação Liso+baixa rugosidade/Alta rugosidade (RLB/AR)	Relação esfericidade (RE)
NA	1,00	não tem*	não tem*	4,80	9,00	48,00	0,58
SV	0,11	1,50	1,75	0,54	1,60	1,40	0,63
MI	0,11	2,00	0,67	0,25	0,60	0,60	0,25
GR	0,03	0,58	0,92	0,07	0,80	0,20	1,31
CA	0,11	1,75	4,00	0,40	20,00	8,50	0,50
CV	0,43	não tem*	não tem*	0,74	não tem**	não tem**	5,67

\*não apresentou nenhum grão, da amostra analisada, com a classificação muito anguloso;

\*\* não apresentou nenhum grão, da amostra analisada, com a classificação alta rugosidade.

Quanto maiores os valores das relações, mais favoráveis seriam as determinadas características de forma às propriedades no estado fresco dos concretos produzidos. Com base na tabela 4.5, pode-se chegar às seguintes análises:

A areia NA é a areia mais arredondada, pois, além de apresentar o maior valor da relação RA, percebe-se pelas relações RSA/MA e RA/MA que a mesma não possui grãos muito angulosos. Esta areia pode ser considerada também como a menos rugosa dentre as demais, já que possui o maior valor da relação RR e valores altos das relações R/AR e RLB/AR. Entretanto, em termos de esfericidade dos grãos (RE) o agregado miúdo NA apresentou maiores percentuais de grãos com baixa esfericidade em relação aos grãos com alta esfericidade, tornando a mesma relativamente equidimensional.

Apesar de não possuir, em relação à amostra analisada, nenhum grão muito anguloso ou muito rugoso, em relação à areia NA, pode-se considerar que o

agregado miúdo CV obteve resultado inferior ao daquela, já que, considerando as relações, a areia NA apresentou maiores quantidades de grãos arredondados e/ou sub-arredondados, além de apresentar grãos mais lisos e/ou com baixa rugosidade. No entanto, a areia CV apresentou grãos mais esféricos de todos os agregados miúdos (RE).

As areias SV, MI e CA apresentaram arredondamentos similares, com valores bastante baixos se ponderada a relação RA, o que significa dizer que estes agregados possuem grãos pouco arredondados. No entanto, notam-se algumas diferenças entre as mesmas em termos de angulosidade de cantos e arestas, já que a areia MI possui maior número de grãos sub-angulosos em relação aos grãos muito angulosos como pode ser deduzido da relação RSA/MA, e menos grãos angulosos em relação aos muito angulosos (relação RA/MA). O agregado miúdo SV, comparativamente ao MI, possui menos grãos sub-angulosos e mais grãos angulosos em relação aos muito angulosos. Já a areia CA apresenta relação RSA/MA em valor um pouco superior ao da SV, denotando que a mesma possui um teor de grãos sub-angulosos ligeiramente superior ao da areia SV. Entretanto, em termos de teor de grãos angulosos (em relação aos muito angulosos), a areia CA possui o maior valor entre as três, tornando-a a mais angulosa dentre elas. A areia MI parece ser a mais rugosa (menor relação RR e baixas relações R/AR e RLB/AR), seguida da areia SV, que, apesar de possuir um valor ligeiramente maior da relação RR em relação à areia CA, apresenta maiores teores de grãos com alta rugosidade em relação à mesma (relações R/AR e RLB/AR). Em termos de esfericidade, para estas três areias, a ordem de equidimensionalidade dos grãos destas três areias seria SV, CA (com valores muito próximos) e MI, sendo esta considerada a menos esférica dentre todas as demais.

A areia GR pode ser avaliada como a mais angulosa entre as areias utilizadas neste trabalho, pois possui baixíssima relação de arredondamento RA e também baixas relações RSA/MA e RA/MA, significando que possui altos percentuais de grãos muito angulosos. O agregado miúdo de GR possui também o menor valor da relação RR (0.07) valor este que indica que este agregado miúdo é o agregado mais rugoso dentre as seis areias, pois possui pequenos teores de grãos lisos ou com baixa rugosidade, como pode ser deduzido também pela relação RLB/AR. Além disso, possui altas percentagens de grãos rugosos e muito

rugosos (R/AR como também na relação RLB/AR). No entanto, esta areia possui boa esfericidade já que a sua relação RE (valor 1,31) sugere maior percentual de grãos esféricos ou equidimensionais em relação aos não esféricos.

Tendo como base as considerações realizadas até o presente momento, as areias estão apresentadas na tabela 4.6 a seguir por ordem de classificação em termos das características de arredondamento de cantos e arestas, textura superficial e esfericidade/equidimensionalidade. Assim, quanto menor o número de ordem de classificação, melhores são tais características.

**Tabela 4.6** – Ordem de classificação das areias em termos das características de forma dos agregados miúdos

Tipo Litológico	Grau de arredondamento (ordem de classificação)	Grau de rugosidade (ordem de classificação)	Grau de esfericidade (ordem de classificação)
NA	1°	1°	4°
SV	4°	4°	3°
MI	3°	5°	6°
GR	6°	6°	2°
CA	5°	3°	5°
CV	2°	2°	1°

Com as ordens de classificação específicas para cada característica de forma e textura superficial dos grãos expostos na tabela 4.6, pode-se realizar uma estimativa de qual material teria forma e textura superficial mais propícias, considerando-as globalmente, para a utilização em concretos apenas realizando-se o somatório das classificações. Assim, quanto menor o valor do somatório das classificações específicas, melhores os fatores de forma como um todo dos grãos. Na tabela 4.7 apresentada adiante estão contidas as classificações gerais de forma após os somatórios, além das classificações quanto à esfericidade (tendo em vista a importância de tal aspecto, como inferido pelos resultados do estudo piloto descrito no [capítulo 3](#) deste trabalho), aspectos de mineralogia efetuados com a análise petrográfica e os aspectos mineralógicos obtidos com a Difração de raio-X.

**Tabela 4.7** – Principais análises em relação aos aspectos morfoscópicos dos grãos.

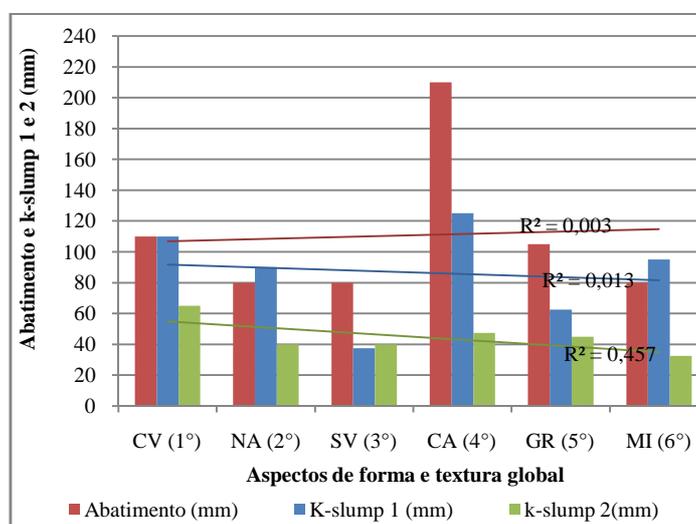
Tipo Litológico	Grãos com melhores resultados de forma de maneira global (ordem de classificação)	Melhores resultados de esfericidade ou eqüidimensionalidade (ordem de classificação)	Resumo dos tipos de minerais presentes (Análise petrográfica)	Resumo dos tipos de minerais presentes (Difração de raio-X)
CV	1°	1°	Calcita (quantidade expressiva),quartzo e muscovita	Predominâncias de calcita, seguido de quartzo+ilita
NA	2°	4°	Predominantemente quartzo	Predominância de quartzo e com presença bem menor de muscovita
SV	3°	3°	Menor quantidade de calcita em relação à CV e muscovita	Predominância de quartzo+ilita, com menores presenças de clinocloro e calcita
CA	4°	5°	Calcita (rica em calcita),quartzo e muscovita	Presença predominante de calcita, com presença bem inferior de quartzo + ilita
GR	5°	2°	Quartzo, feldspato,muscovita e biotita	Predominância de albita e quartzo, com presença também de muscovita
MI	6°	6°	Quartzo, granada e mica	Predominância de muscovita e biotita, com presença também de clinocloro

#### 4.1.2.2 – Influência dos aspectos morfoscópicos nas propriedades do estado fresco do concreto

Em um primeiro momento será analisada a influência dos aspectos de forma nas propriedades dos concretos no estado fresco, considerando inicialmente o desempenho em relação aos aspectos de forma (desempenho geral analisado no item anterior) e em seguir serão analisadas as correlações obtidas com as variáveis consideradas neste trabalho.

##### 4.1.2.2.1 – Influência das características de forma e textura na consistência dos concretos

Para analisar a influência dos aspectos globais de forma e textura– resultados apresentados na primeira coluna da tabela 4.7 – na consistência e potencial de segregação das misturas produziu-se o gráfico da figura 4.7 com os resultados de abatimento, k-slump 1e k-slump 2.



**Figura 4.13** – Relação entre os aspectos gerais de forma e consistência e segregação/consistência – **projeto experimental 1**

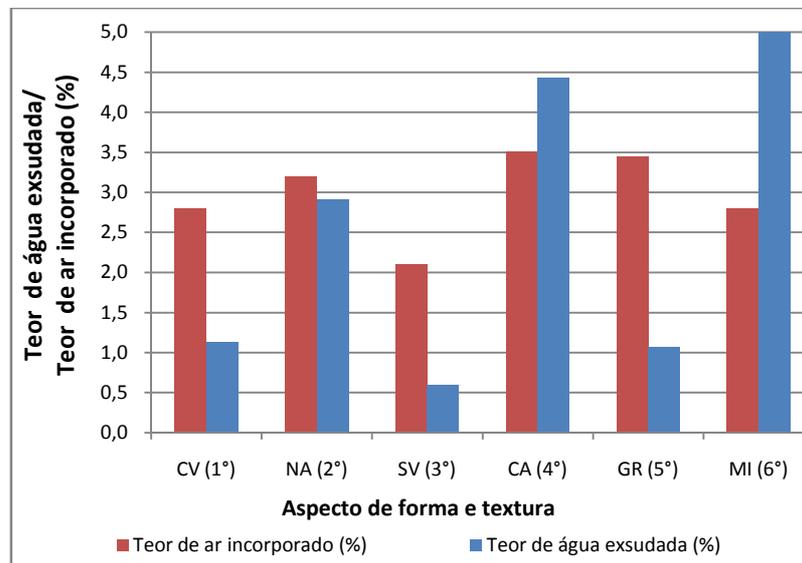
Pela figura acima, nota-se que, provavelmente para os agregados analisados no presente trabalho, ao considerar as características de forma e textura globalmente (analisando o formato, arredondamento de cantos e arestas e textura superficial conjuntamente) as mesmas não influenciam predominantemente na propriedade de consistência das misturas pois não foi observada correlação significativa, com  $R^2$  de abatimento muito

baixo. Deve-se lembrar que o agregado se torna mais desfavorável quanto maior sua ordem de classificação. Ao analisar a figura, percebe-se que o 4º melhor agregado (mistura realizada com agregado miúdo de CA) resultou no concreto mais fluido e com resultado bem superior ao do concreto realizado com a areia CV, que se configurou no agregado miúdo com melhor resultado de forma de grãos e textura superficial. Areias que obtiveram resultados de forma mais satisfatórios que o da areia CA (areias NA e SV) apresentaram resultados de abatimento com valores bem abaixo desta (80 mm), inclusive valores estes iguais ao da areia com formato e textura de grãos menos favoráveis (areia MI). A penúltima areia menos favorável em relação a formato e textura superficial dos grãos (areia GR) obteve um dos maiores resultados de abatimento (105 mm).

Em relação à consistência mensurada com o k-slump 2 nota-se uma correlação um pouco melhor ( $R^2=0,457$ ), ainda que não significativa, entre parte dos resultados de análise de forma e fluidez. Assim, considerando os concretos produzidos com as areias CV, NA, SV e MI, quanto mais desfavorável a forma e textura superficial dos agregados, menor a fluidez (valores mais baixos de k-slump 2), sendo que, inclusive, o agregado CV considerado o melhor em termos de aspecto de forma e textura superficial e o agregado MI, em contrapartida, o mais desfavorável, resultaram, respectivamente, no concreto mais fluido e menos fluido dos produzidos. Entretanto, apesar de estarem enquadrados entre os três piores resultados de características de forma e textura superficial, os agregados CA e GR apresentaram valores de consistência mensurada pelo k-slump 2 menores do que nos concretos produzidos com NA e SV.

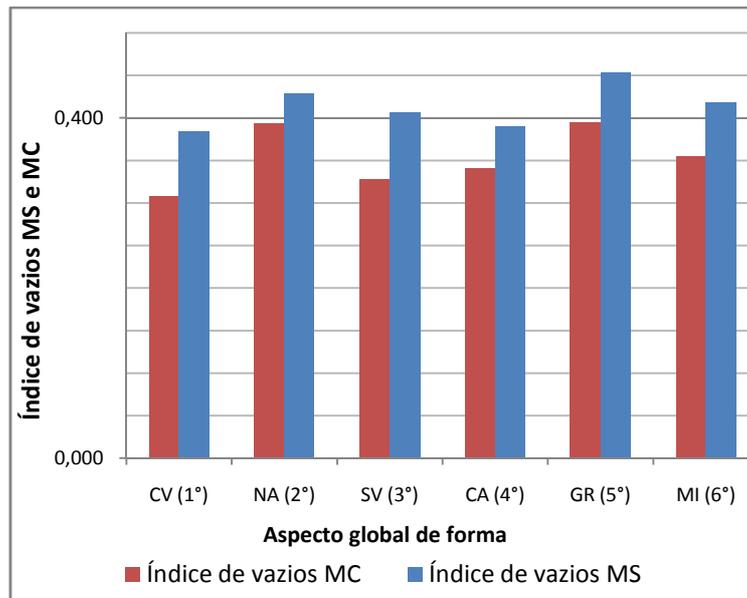
Com o ensaio k-slump 1 (relacionado à segregação/fluidez) percebe-se uma tendência similar ao ensaio de abatimento, com resultado de segregação/consistência maiores com as misturas realizadas com CA e CV, com valores menores para os concretos de SV e GR, mas com valores comparativamente superiores em relação às areias NA e MI. Ou seja, segundo os resultados obtidos com o k-slump 1, as misturas mais segregáveis/fluidas seriam, em ordem da maior para a menor, aquelas produzidas com CA, CV, MI, NA, GR e SV, o que coloca o concreto produzido com a areia mais desfavorável (MI) como o terceiro mais segregável/fluido, e o concreto de SV como o menos segregável/fluido.

Na figura 4.14 a seguir estão expressos os resultados de teor de água exsudada e teor de ar incorporado em função dos aspectos de forma e textura, onde se percebe que também não houve correlação significativa entre as variáveis e os aspectos de forma e textura determinados.



**Figura 4.14** – Relação entre os aspectos gerais de forma e teor de água exsudada e teor de ar incorporado – **projeto experimental 1**

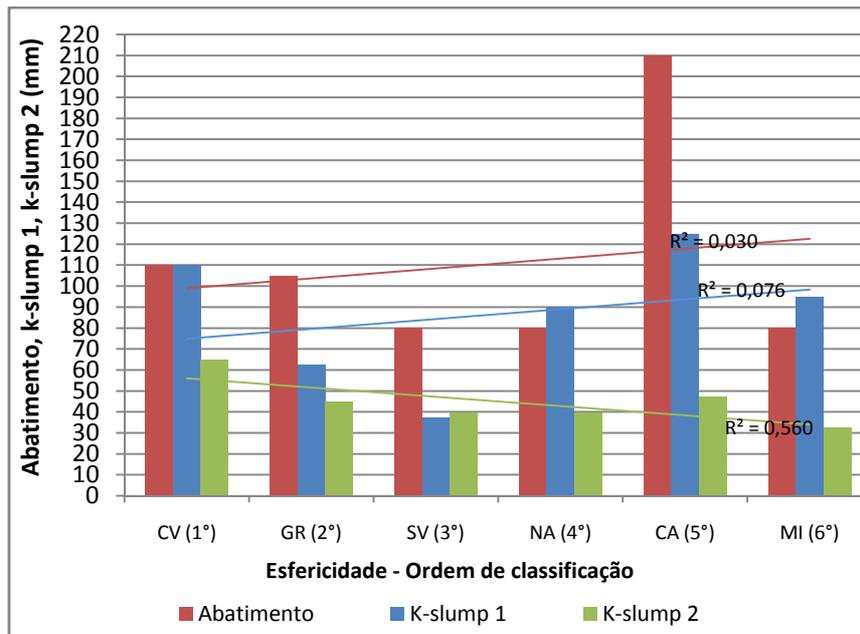
Percebe-se que houve uma maior quantidade de água exsudada para os concretos realizados com duas das três areias que apresentaram baixo desempenho em relação às características globais de forma e que dentre os três melhores resultados destas características, o concreto realizado com a areia NA resultou no maior teor de água exsudada.



**Figura 4.15** – Relação entre os aspectos gerais de forma e índice de vazios com massa unitária no estado solto (MS) e índice de vazios com massa unitária no estado compactado (MC) – projeto experimental 1

Ao se analisar a correlação entre forma e textura dos grãos e índice de vazios nota-se que a areia que apresenta o melhor desempenho em relação aos aspectos de forma (no geral) também apresentou menores índices de vazios tanto para o índice MC quanto para o índice MS. Das três areias com menores desempenhos em relação à forma e textura de uma maneira global, a única que resultou em valores altos de índices de vazios foi a GR. A areia NA, apesar de ter apresentado um dos melhores desempenhos em relação à forma e textura dos grãos, obteve valores altos de índices de vazios. Os agregados miúdos SV e CA resultaram em relativamente baixos índices de vazios tanto MS quanto MC, sendo que, para a areia CA o valor do índice de vazios MS foi da mesma ordem de grandeza do índice da areia CV, consistindo este agregado o de melhor aspecto de forma dentre os demais. Portanto, de acordo com as análises realizadas e pela figura acima, percebe-se que não houve correlação entre índices de vazios e características de forma e textura dos grãos.

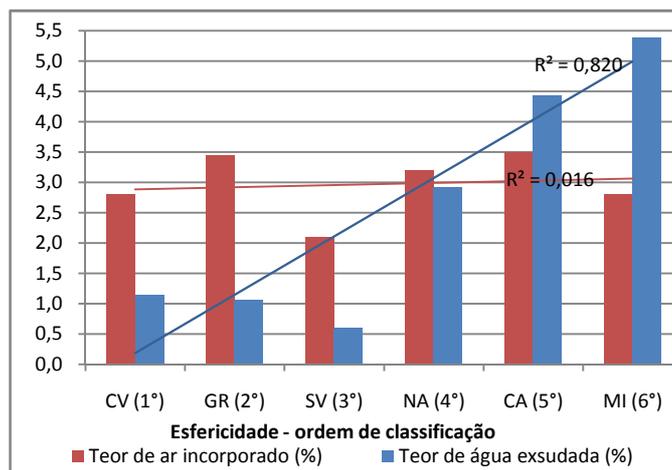
Como visto até o presente momento, ao se considerar os aspectos de forma no geral, não se obteve correlação significativa com nenhuma das variáveis de estudo, portanto, foram construídos gráficos considerando isoladamente as características de forma, a saber: grau de arredondamento de cantos e arestas, textura superficial e formato esférico/equidimensional. Assim como os gráficos anteriores, as figuras seguintes apresentam o resultado dos aspectos de forma por ordem de classificação.



**Figura 4.16** – Relação entre esfericidade e consistência e segregação/consistência – projeto experimental 1

Ao se isolar a característica de forma grau de esfericidade, por ordem do mais esférico para o menos esférico, nota-se que a correlação entre esta e a consistência dos concretos é visível entre os concretos produzidos com os três agregados mais esféricos (CV, GR e SV), onde se pode notar que quanto mais esférico o agregado, mais fluido o concreto, considerando-se tanto a consistência mensurada pelo abatimento e k-slump 2, quanto segregação/consistência medida pelo k-slump 1. Já em relação aos agregados miúdos cujos grãos se apresentaram como os três menos esféricos (NA, CA e MI), houve uma certa correspondência entre abatimento e k-slump 2, excetuando-se a areia calcítica que se apresentou como a mais fluida como também a mais segregável, de acordo com o ensaio k-slump 1. Ao se considerar as areias sem separar em grupos, no entanto, nota-se que não houve correlação entre a esfericidade e abatimento e k-slump 1, com valores de  $R^2$  respectivos de 0,030 e 0,076 e, em relação ao k-slump 2, nota-se uma certa correlação, com  $R^2$  igual a 0,560.

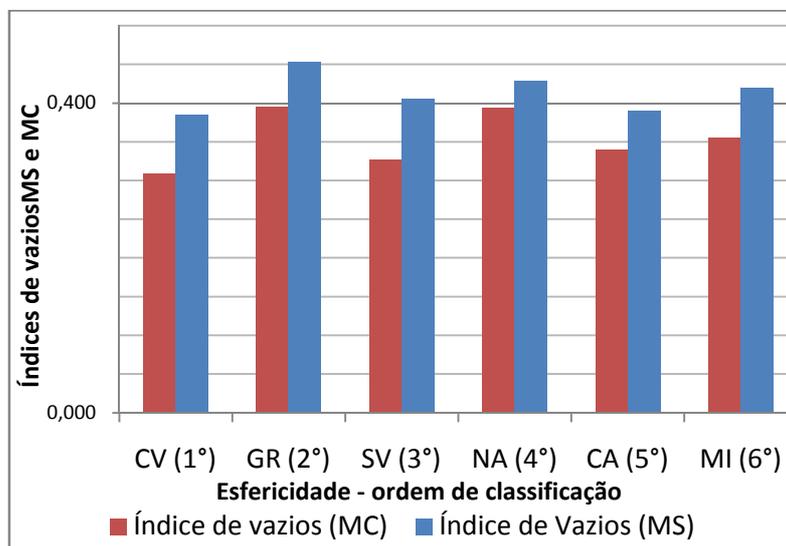
Na figura 4.17 a seguir, nota-se que parece haver uma correlação clara entre esfericidade e teor de água exsudada dos concretos produzidos, sendo esta tanto maior quanto menos esféricos os grãos dos agregados miúdos. Já em relação ao teor de ar incorporado, percebe-se que não houve, mais uma vez, correlação significativa.



**Figura 4.17** – Relação entre esfericidade e teor de ar incorporado e teor de água exsudada– **projeto experimental 1**

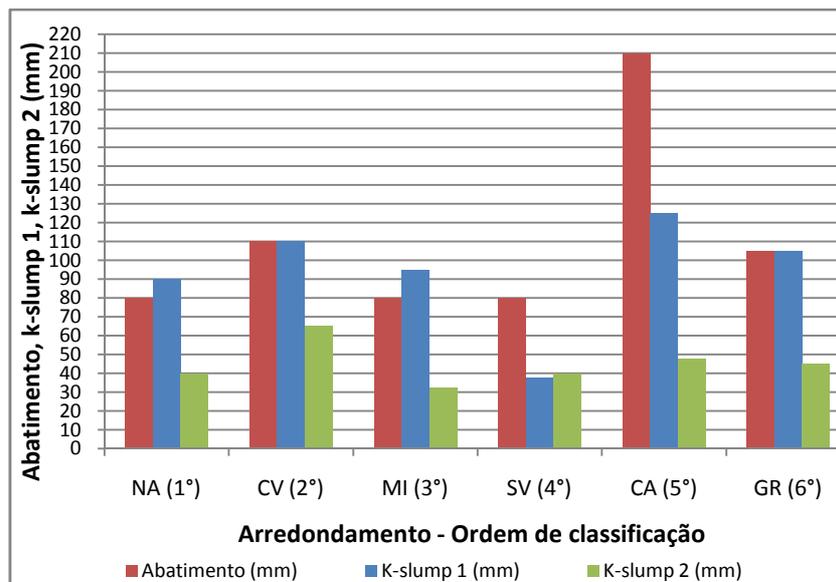
Nota-se ainda pela figura 4.17 que, apesar da areia SV não ser a mais esférica, o concreto realizado com esta se apresentou como o de menor teor de água exsudada dentre os demais, além de possuir também o menor valor de teor de ar incorporado.

Ao observar a figura 4.18 abaixo, nota-se que não houve correlação significativa entre esfericidade dos grãos e índice de vazios, apesar destes se apresentarem com valores muito próximos.



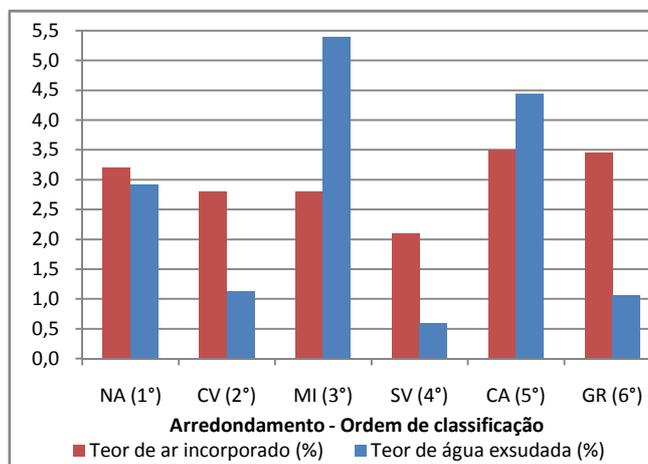
**Figura 4.18** – Relação entre esfericidade e índice de vazios (MC) e índice de vazios (MS)– **projeto experimental 1**

Agora considerando a possibilidade de correlação entre o grau de arredondamento de cantos e arestas e consistência, consistência/segregação, teor de ar incorporado, teor de água exsudada, índice de vazios da massa unitária no estado solto (MS) e da massa unitária no estado compactado (MC), foram construídos as figuras 4.19 a 4.20 a seguir.



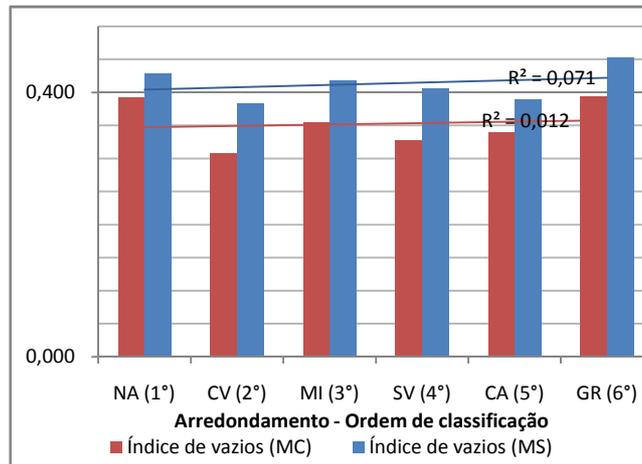
**Figura 4.19** – Relação entre arredondamento e consistência e segregação/consistência– **projeto experimental 1**

Pela figura 4.19 apresentada acima, nota-se que não houve correlação satisfatória ao se isolar o aspecto de forma arredondamento de cantos e arestas e consistência e/ou segregação consistência, mensurados respectivamente pelo abatimento, k-slump 2 para consistência e k-slump 1 em relação à variável segregação/consistência.



**Figura 4.20** – Relação entre arredondamento e teor de ar incorporado e teor de água exsudada– **projeto experimental 1**

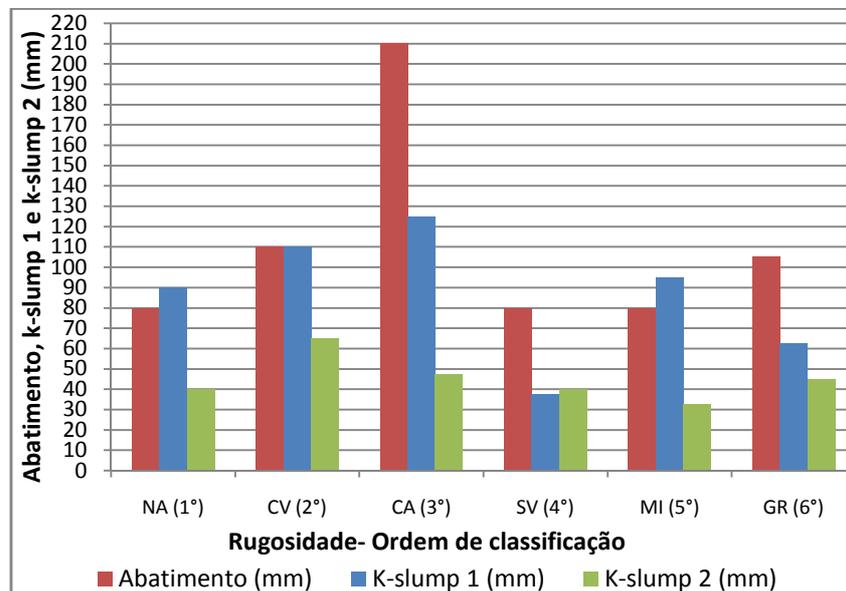
Ao se analisar a figura 4.20 nota-se que também não houve correlação entre teor de ar incorporado ou teor de água exsudada dos concretos e grau de arredondamento de cantos e arestas das areias com as quais as misturas foram produzidas.



**Figura 4.21** – Relação entre arredondamento e índice de vazios (MC) e índice de vazios (MS)– projeto experimental 1

Ao se observar a figura 4.21, nota-se que não houve correlação entre grau de arredondamento e os índices de vazios MC e MS, apesar de uma das areias mais arredondadas (CV) possuir os menores índices de vazios comparativamente com as demais.

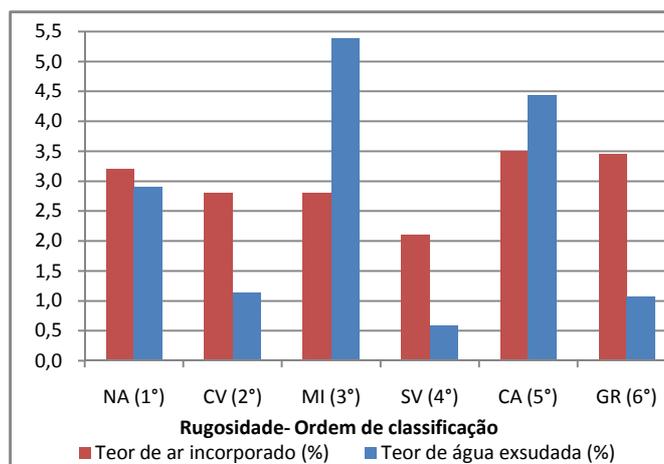
Em relação à textura superficial foram construídos os gráficos constantes das figuras 4.22 a 4.23 a seguir.



**Figura 4.22** – Relação entre textura superficial dos grãos e consistência e segregação/consistência– projeto experimental 1

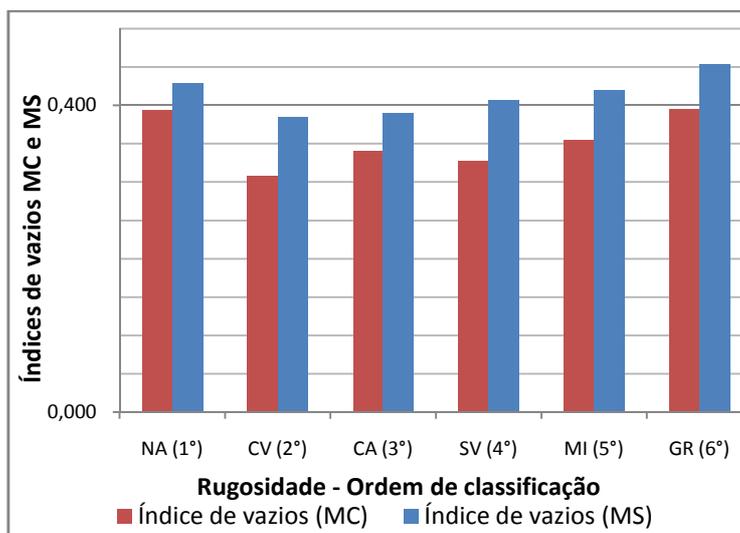
Analisando-se a figura 4.22, nota-se que as correlações entre consistência e segregação/consistência não resultaram significativas. Na figura 4.23 a seguir estão

apresentadas as possíveis correlações entre a rugosidade dos agregados miúdos e os teores de ar incorporado e água exsudada.



**Figura 4.23** – Relação entre textura superficial dos grãos e teor de ar incorporado e teor de água exsudada– projeto experimental 1

Observa-se pela figura acima que também não houve correlação razoável entre os teores de ar incorporado e teor de água exsudada em relação à textura superficial das areias, se mais ou menos rugosa.



**Figura 4.24** – Relação entre textura superficial dos grãos e índice de vazios MC e MS– projeto experimental 1

Pela figura 4.24 percebe-se que, apesar de não ser configurada correlação satisfatória entre textura superficial dos grãos e índice de vazios MS, se consideradas as areia CV a GR, apesar de valores de índice de vazios MS muito próximos, houve uma tendência de aumento deste quanto maior a rugosidade dos grãos. Em relação ao índice de vazios MC tal tendência não foi observada.

Após realizadas as análises em relação às características de forma e textura globalmente e, em um segundo momento, isolando as mesmas, percebeu-se que as correlações entre tais características e as variáveis dependentes deste trabalho foram pouco significativas. Com o intuito de complementar a análise dos resultados do projeto experimental 1 e notando-se que os agregados utilizados nesta pesquisa podem ser classificados em dois grandes grupos, dependendo da predominância mineralógica nos grãos, as areias foram separadas em dois grupos, a saber:

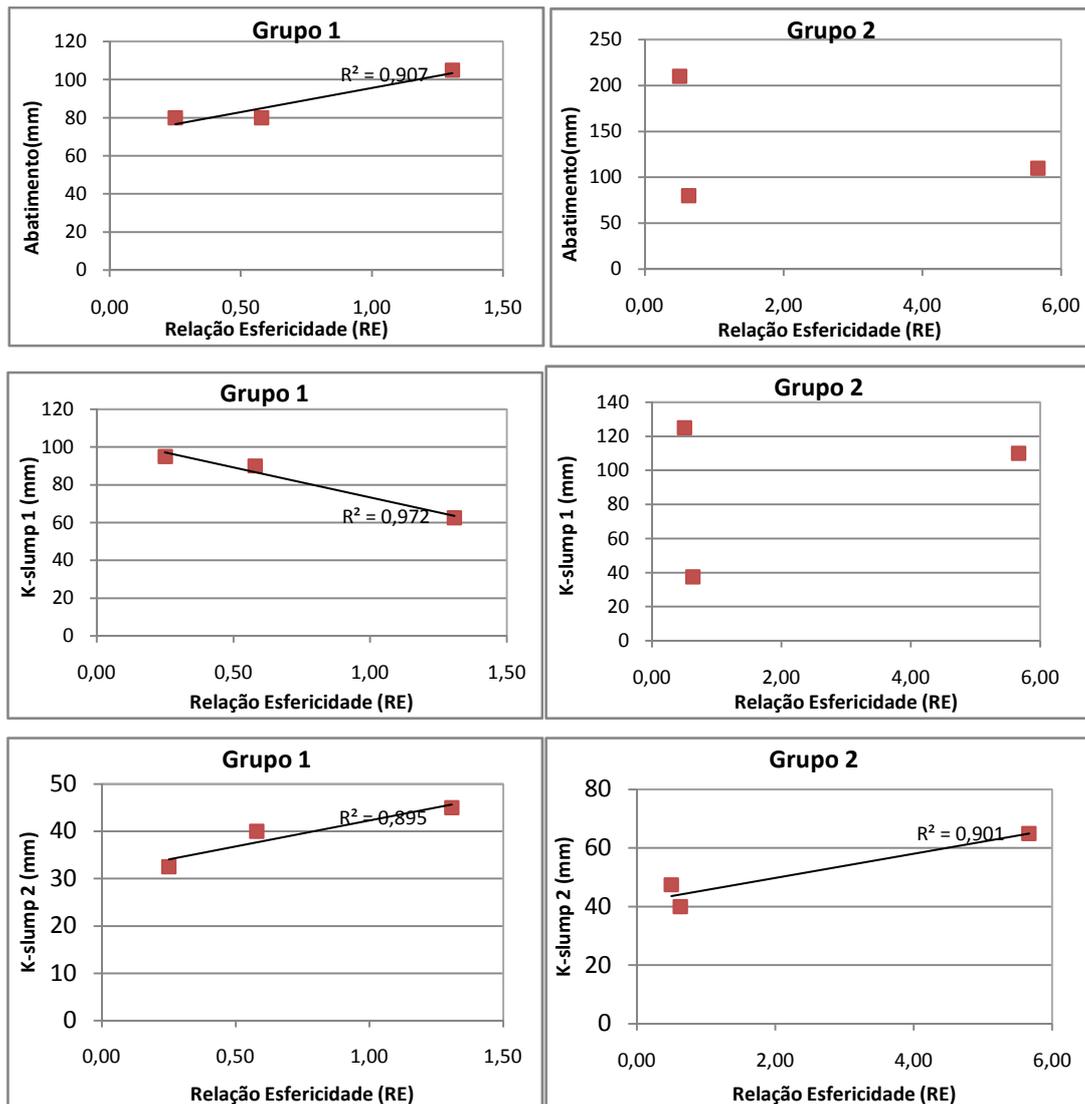
**Grupo 1** – agregados cuja base mineralógica é o quartzo. Estes agregados são os NA, GR e MI;

**Grupo 2** – agregados cuja base mineralógica se constitui a calcita, sendo estes SV, CV e CA.

Esta medida foi tomada para assegurar que, ao se proceder às tentativas de correlação entre variáveis, garantir análises e comparações entre materiais mineralogicamente semelhantes. Tais análises estão contidas no item 4.1.2.2.2 a seguir.

#### 4.1.2.2.2 – Influência das características morfoscópicas das areias nas propriedades do estado fresco dos concretos

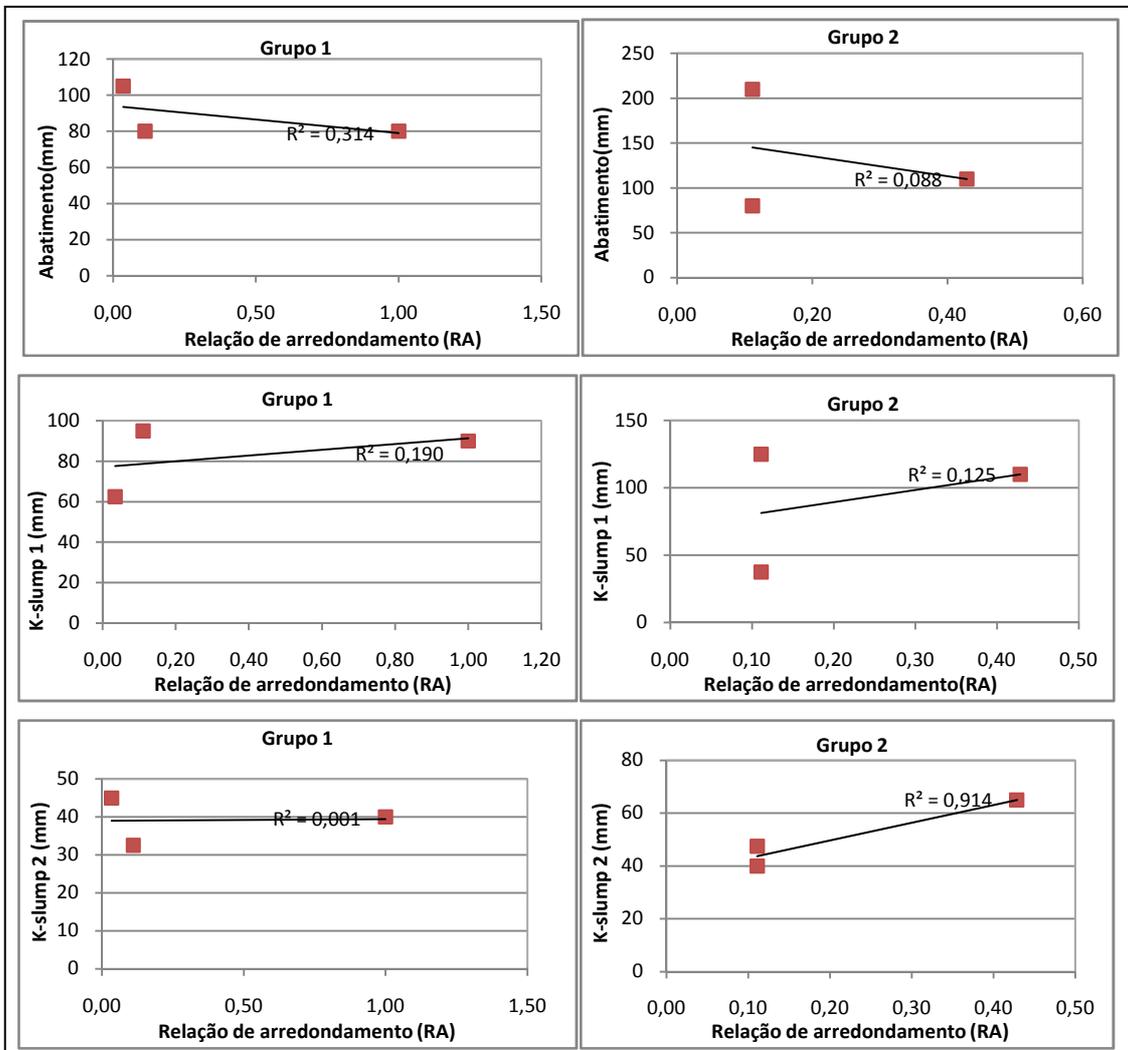
Como descrito anteriormente, neste item as areias foram agrupadas em dois grupos distintos, segundo a predominância mineralógica. A análise das possíveis correlações das propriedades dos concretos no estado fresco será realizada tendo como base tal agrupamento. Primeiramente será realizada a análise da influência dos aspectos de forma isoladamente, sendo que, para tanto, as discussões serão obtidas através das correlações existentes entre as relações de esfericidade (RE), arredondamento (RA) e rugosidade (RR), apresentadas anteriormente no item 4.1.2.1 e as propriedades do estado fresco mensurada pelo abatimento de tronco de cone, k-slump 1, k-slump 2, teor de água exsudada e teor de ar incorporado.



**Figura 4.25** – Correlação entre relação esfericidade-consistência e consistência/segregação grupos 1 e 2 – projeto experimental 1

Na figura 4.25 estão expressas as correlações entre a relação esfericidade e os resultados de abatimento, segregação/consistência (k-slump 1) e consistência (k-slump 2) para os grupos 1 e 2. Percebe-se, como esperado, que ao se analisar o gráfico do grupo 1, na referida figura, quanto mais esférico o agregado miúdo, mais fluido o concreto, tanto em relação ao ensaio de abatimento de tronco de cone quanto em relação ao k-slump 2. Já em relação às amostras que representam o grupo 2, não se observa correlação expressiva, se considerados os ensaios de abatimento e k-slump 1. Tal fato se deve aos resultados elevados destes ensaios do concreto executado com a areia (CA), apesar de a mesma não possuir o maior valor da relação esfericidade. No entanto, pelo que foi apresentado na tabela 4.7 através da análise petrográfica no item 4.1.2.1, nota-se que o agregado miúdo CA possui o maior teor de calcita dentre as demais areias do grupo 2.

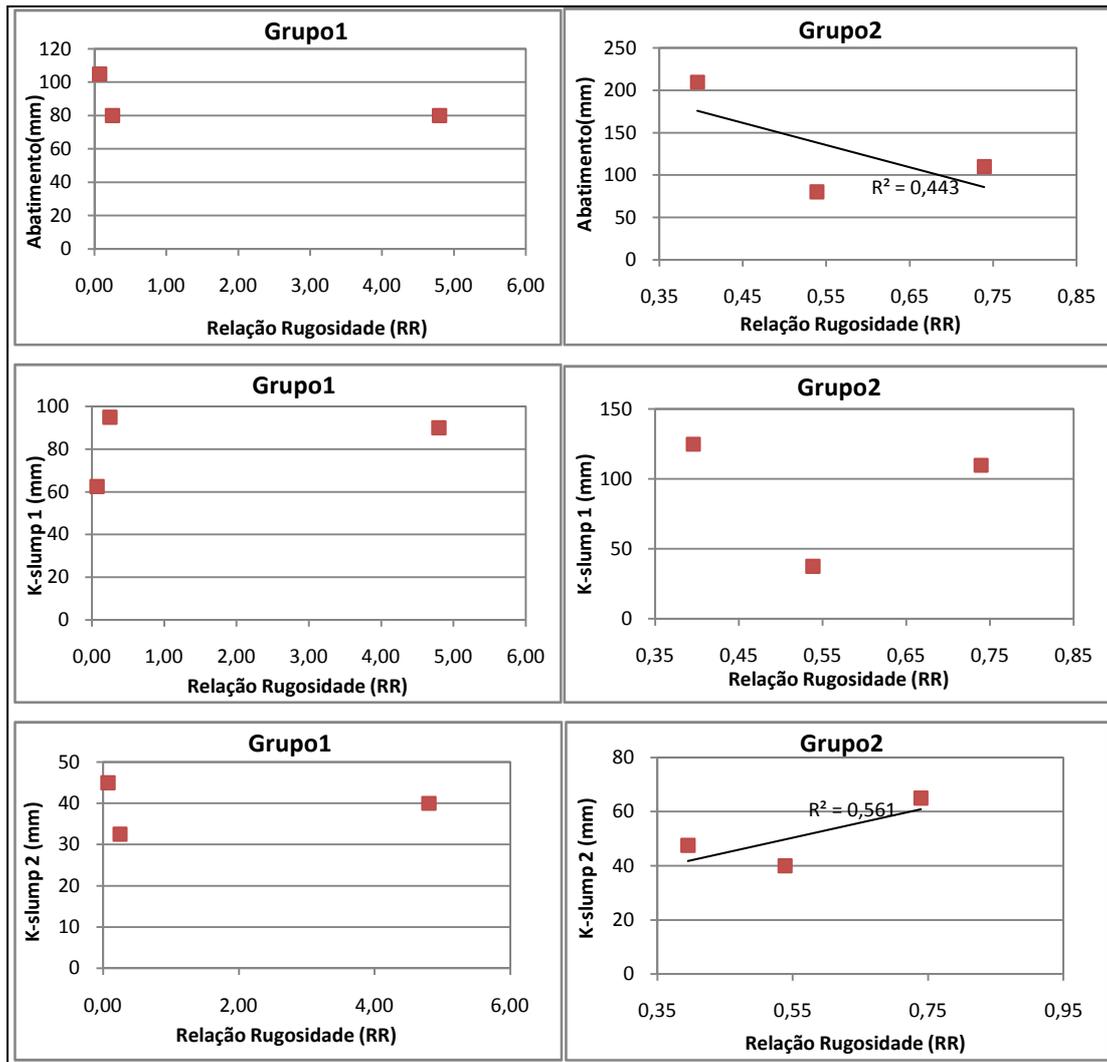
Provavelmente, este fator propiciou uma maior fluidez do concreto produzido com tal agregado, como pode ser inferido também através dos trabalhos AHN (2000), DONZA et al (2003) E QUIROGA & FOWLER (2003), como já citado anteriormente. Já em relação ao ensaio k-slump 2 observou-se que, quanto maior a relação esfericidade, maior a fluidez dos concretos das areias do grupo 2. Cabe salientar que o ensaio k-slump 2, apesar de ser realizado em uma amostra de concreto, efetivamente o material ensaiado seria o conjunto pasta de cimento e agregados miúdos. Ao se observar as correlações entre segregação/consistência (k-slump1) e relação esfericidade nota-se que, em relação aos concretos realizados com as areias do grupo 1, quanto mais esférico os agregados miúdos, menos segregável as misturas, fato este evidenciado pela redução nos valores obtidos nos resultados de k-slump 1.



**Figura 4.26** – Correlação entre relação arredondamento-consistência e consistência/segregação grupos 1 e 2– projeto experimental 1

Pela figura 4.26 pode-se perceber que não houve correlação significativa entre abatimento de tronco de cone (consistência) e k-slump 1 (segregação/consistência) com a relação arredondamento para ambos os grupos. Já em relação ao k-slump 2 nota-se uma excelente correlação entre o k-slump 2 (consistência do microconcreto) e o grau de arredondamento dos cantos e arestas dos grãos das areias formadoras do grupo 2, sendo a consistência do microconcreto tanto menor quanto maior este grau de arredondamento. Apesar de aparentemente o grau de arredondamento de cantos e arestas parecer influenciar na fluidez mensurada pelo k-slump 2, deve-se levar em consideração que o grupo 2 é formado pelos agregados miúdos que possuem, em sua constituição mineralógica, a calcita e este pode ser um fator preponderante em relação à maior fluidez apresentada justamente pelo concreto produzido com a areia possuidora do mais alto teor de calcita (CA), efeito este provavelmente capaz, inclusive, de sobrepujar as características de forma e textura superficial das areias. A calcita pode influenciar desta maneira nos resultados possivelmente devido às ligações epitáxicas, que conferem uma maior intimidade dos cristais deste mineral e os cristais de cimento ou mesmo devido à dureza da calcita ser menor do que a de outros minerais tais como o quartzo e dolomita, por exemplo (SBRIGHI NETO, 1975).

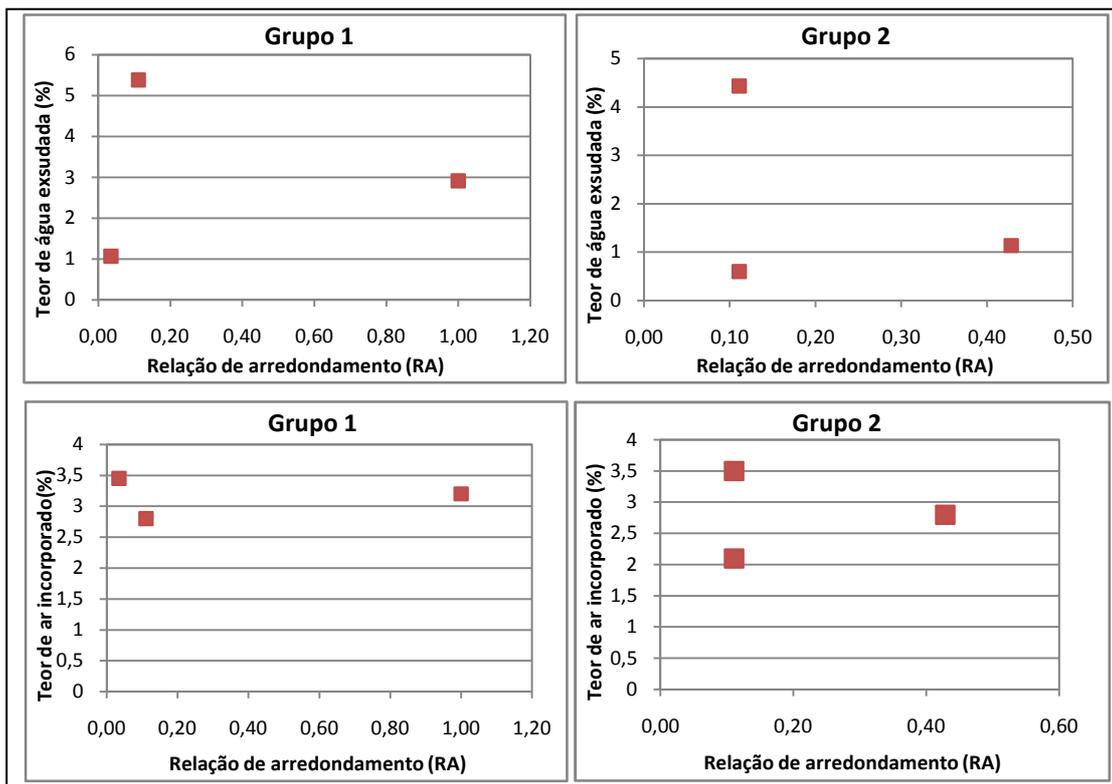
Na figura 4.27 a seguir estão expressas as correlações entre a relação rugosidade e consistência mensurada pelo abatimento e k-slump 2, além da segregação/consistência expressa pelo ensaio k-slump 1.



**Figura 4.27** – Correlação entre relação rugosidade-consistência e consistência/segregação grupos 1 e 2– projeto experimental 1

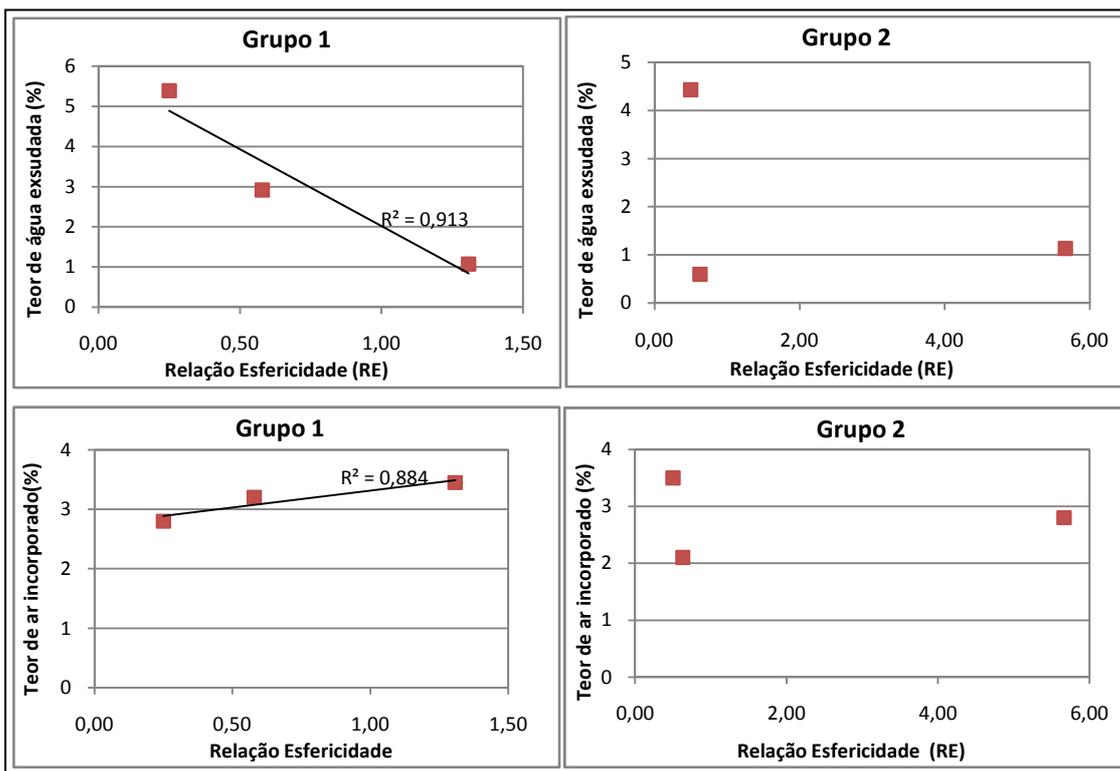
Através da figura 4.27, percebe-se que não houve correlação significativa entre textura superficial dos grãos e consistência e/ou segregação dos concretos. Em relação à consistência mensurada pelo k-slump 2 do grupo 2, pode-se afirmar que houve uma apenas razoável correlação entre tal ensaio e a relação rugosidade, sendo o microconcreto tanto mais fluido quanto menos rugoso o agregado miúdo. A correlação pouco significativa entre as propriedades, tanto em relação às areia do grupo 1 quanto às do grupo 2, pode indicar que outra(s) característica(s) do agregado miúdo exerce(m) maior influência na fluidez dos concretos do que a textura superficial dos grãos.

Nas figuras 4.28, 4.29 e 4.30 a seguir estão apresentadas as possíveis correlações entre as características de forma arredondamento, esfericidade e rugosidade com o teor de água exsudada, e teor de ar incorporado.



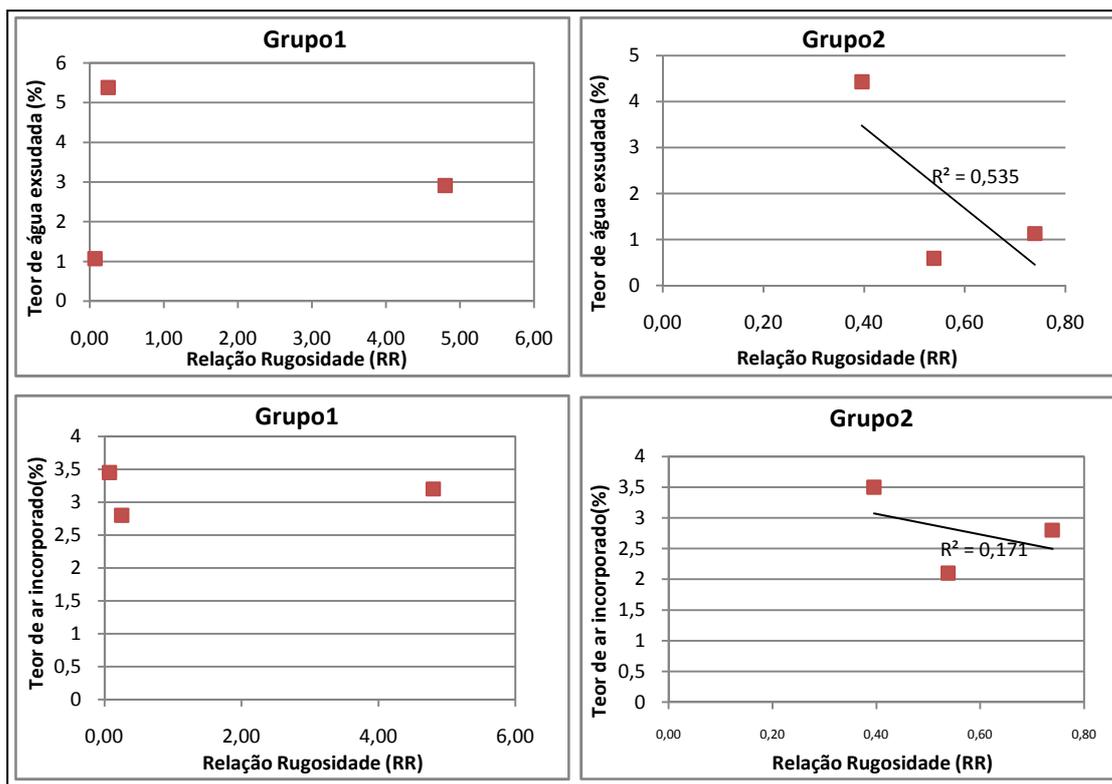
**Figura 4.28** – Correlação entre relação arredondamento - teor de água exsudada e teor de ar incorporado grupos 1 e 2– projeto experimental 1

Ao se analisar a figura 4.28, nota-se que não houve correlação significativa entre a relação arredondamento e teor de água exsudada nem também com o teor de ar incorporado dos concretos produzidos, considerando ambos os grupos das areias. A figura 4.29 apresentada a seguir contém as possíveis correlações entre a relação esfericidade-teor de água exsudada e relação esfericidade-teor de ar incorporado:



**Figura 4.29** – Correlação entre relação esfericidade - teor de água exsudada e teor de ar incorporado grupos 1 e 2– projeto experimental 1

Pela figura 4.29 apresentada acima, nota-se que, em relação às areias do grupo 1, houveram correlações bastante significativas, principalmente em relação ao teor de água exsudada, já que, quanto mais esféricos os grãos das areias menos água exsudada proporcionada. Já em relação ao teor de ar incorporado, a correlação foi inversa à anterior, pois que, para os agregados miúdos do grupo 1, quanto mais esféricos os agregados, maior o teor de ar incorporado encontrado. Cabe enfatizar, no entanto, que o teor de ar incorporado apresentado pelas misturas produzidas com os agregados do grupo 1 possuem valores muito próximos (2,8 a 3,4%). Em se tratando, agora, da correlação entre o teor de água exsudada e a relação esfericidade, cabe salientar que a tendência apresentada foi muito similar à deparada na figura 4.25, já que, assim como o resultado de abatimento, a areia CA, mais uma vez, proporcionou o concreto com os maiores valores de teor de água exsudada e teor de ar incorporado. Provavelmente o elevado percentual de grãos de calcita desta areia possa explicar tais resultados um tanto quanto dissonantes dos demais.

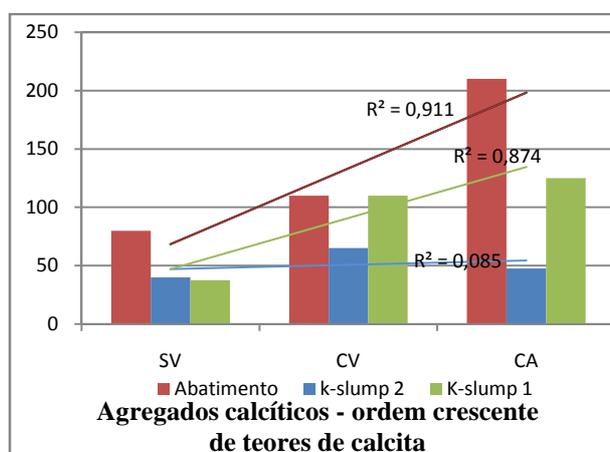


**Figura 4.30** – Correlação entre relação rugosidade - teor de água exsudada e teor de ar incorporado grupos 1 e 2– projeto experimental 1

Na figura 4.30 estão expressas as correlações entre a relação rugosidade das areias e teor de água exsudada, como também com o teor de ar incorporado. Nota-se que não houve correlação significativa entre as variáveis, apesar da relação razoavelmente significativa entre a textura superficial dos grãos e teor de água exsudada, sendo tanto menor o teor de água exsudada quanto menos rugosas as areias.

Através dos resultados expressos até o presente momento, pode-se inferir inicialmente que o aspecto de forma mais relevante em termos das propriedades no estado fresco foi o grau de esfericidade dos grãos, principalmente se considerados os agregados miúdos cuja predominância mineralógica é o quartzo. Em relação aos concretos produzidos com agregados cuja presença predominante é a calcita, estes não apresentaram correlação significativa em relação à maioria dos ensaios mesmo considerando as características de forma analisadas neste trabalho, o que leva a crer que o mineral calcita pode exercer influência significativa em relação às propriedades do estado fresco das misturas executadas neste trabalho. De acordo com essa última análise, foram contruídos os gráficos das figuras 4.31 e 4.32 correlacionando os resultados dos concretos com o teor de calcita das areias do grupo 2, sendo este descrito pela

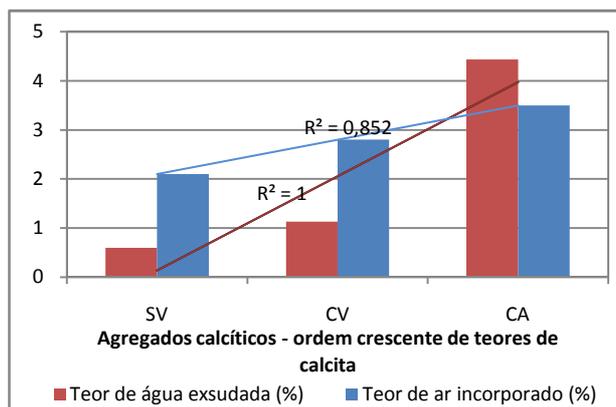
apreciação petrográfica (tabela 4.7). Conforme tal análise, os agregados por ordem crescente em relação ao teor de calcita são SV, CV e CA.



**Figura 4.31** – Correlação entre teor de calcita (agregados grupo 2) e abatimento de tronco de cone, k-slump 2 e k-slump 1 – projeto experimental 1

Pela figura 4.31 nota-se que quanto maior o teor de calcita da areia britada, maior a fluidez dos concretos mensurada pelo ensaio de abatimento ( $R^2=0,911$ ), sendo estes também mais segregáveis (*k-slump 1*), independente do formato dos grãos agregados, pois o grão com formato mais equidimensional/esférico pertence à areia CV. Já a consistência mensurada pelo *k-slump 2* se apresentou mais fluida justamente para este último agregado miúdo, levando a crer que, talvez, o *k-slump 2*, seja um ensaio que demonstra mais sensibilidade em reproduzir o efeito do formato dos grãos em relação ao ensaio de abatimento de tronco de cone. Outra possibilidade é que esse efeito do formato das partículas seja mais acentuado ao se considerar apenas o microconcreto (ensaio *k-slump 2*) em detrimento do concreto como um todo (ensaio de abatimento).

Na figura 4.32 estão apresentadas as correlações entre os teores de calcita dos agregados e teor de água exsudada como também o teor de ar incorporado.



**Figura 4.32** – Correlação entre teor de calcita (agregados grupo 2) – teor de água exsudada e teor de ar incorporado – **projeto experimental 1**

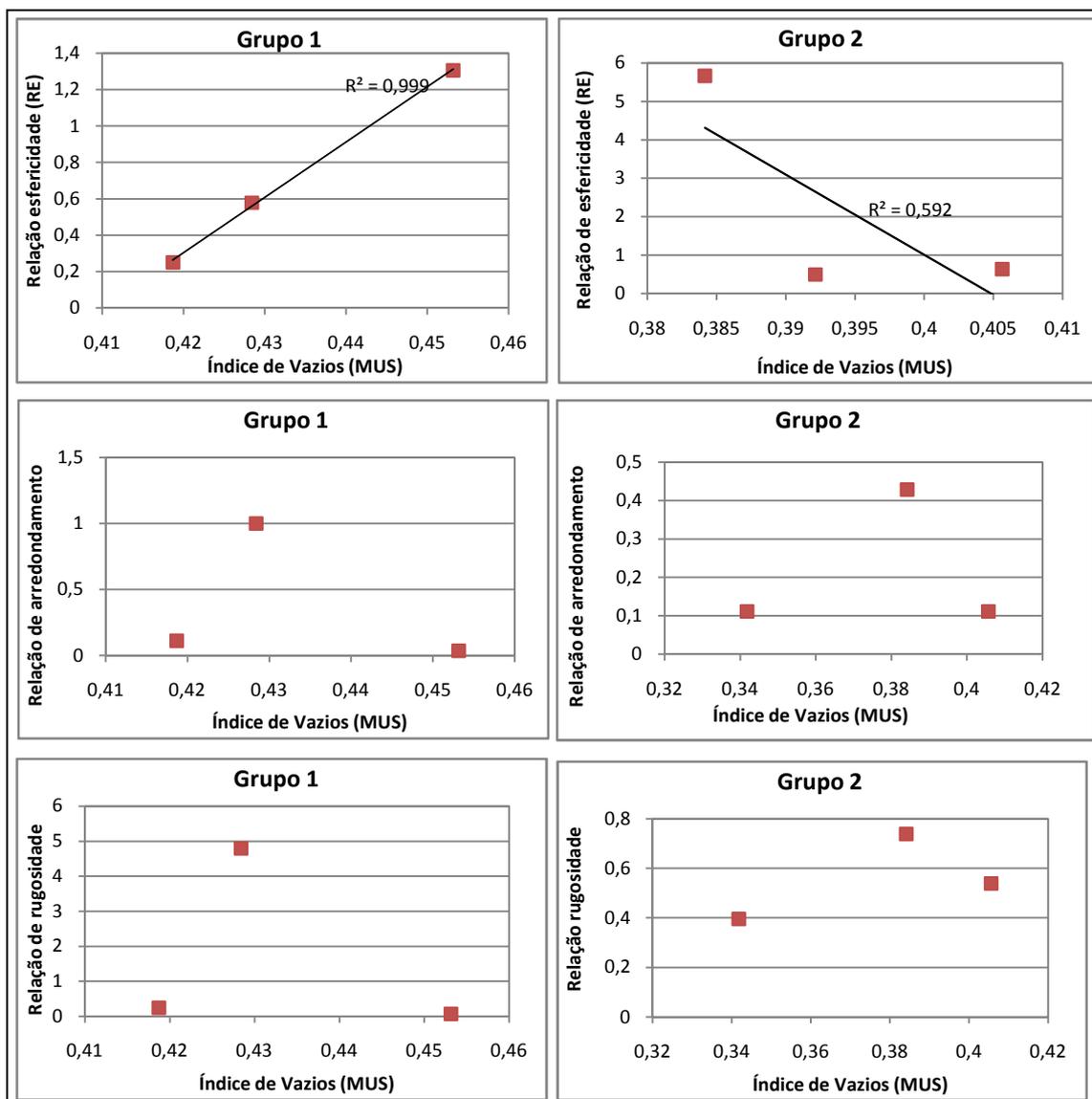
Nota-se pela figura 4.32 que quanto maior o teor de calcita das areias, maior o teor de água exsudada, sendo tal correlação perfeita ( $R^2=1$ ) e linear. Em relação ao teor de ar incorporado, também houve correlação significativa, resultando este tanto maior quanto maior também o teor de calcita dos grãos.

No item 4.1.2.2.3 serão apresentadas outras correlações entre as variáveis avaliadas até o presente momento.

#### 4.1.2.2.3 – Avaliações complementares – **Projeto Experimental 1**

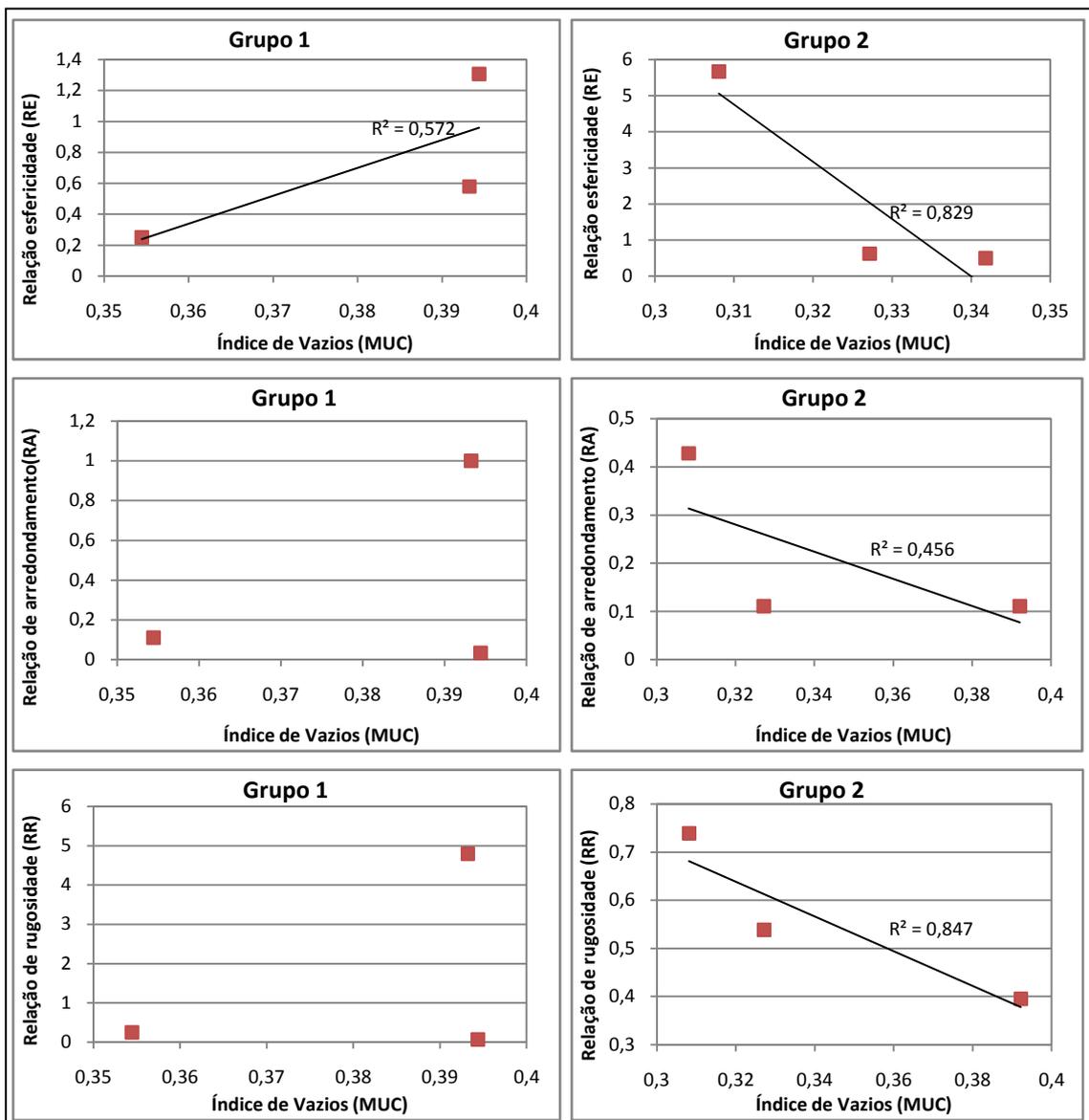
Neste item serão realizadas algumas análises complementares envolvendo correlações entre variáveis dependentes, índices de vazios e demais variáveis consideradas no estudo deste projeto experimental 1.

Nas figuras 4.33 e 4.34 serão apresentadas as correlações entre os aspectos de forma individualmente – grau de arredondamento de cantos e arestas, textura superficial e esfericidade/equidimensionalidade – e os índices de vazios encontrados com a massa unitária no estado solto e, logo em seguida, as mesmas correlações com o índice de vazios com a massa unitária no estado compactado.



**Figura 4.33** – Correlação entre esfericidade, grau de arredondamento e textura superficial – Índice de vazios no estado solto (MUS) – **projeto experimental 1**

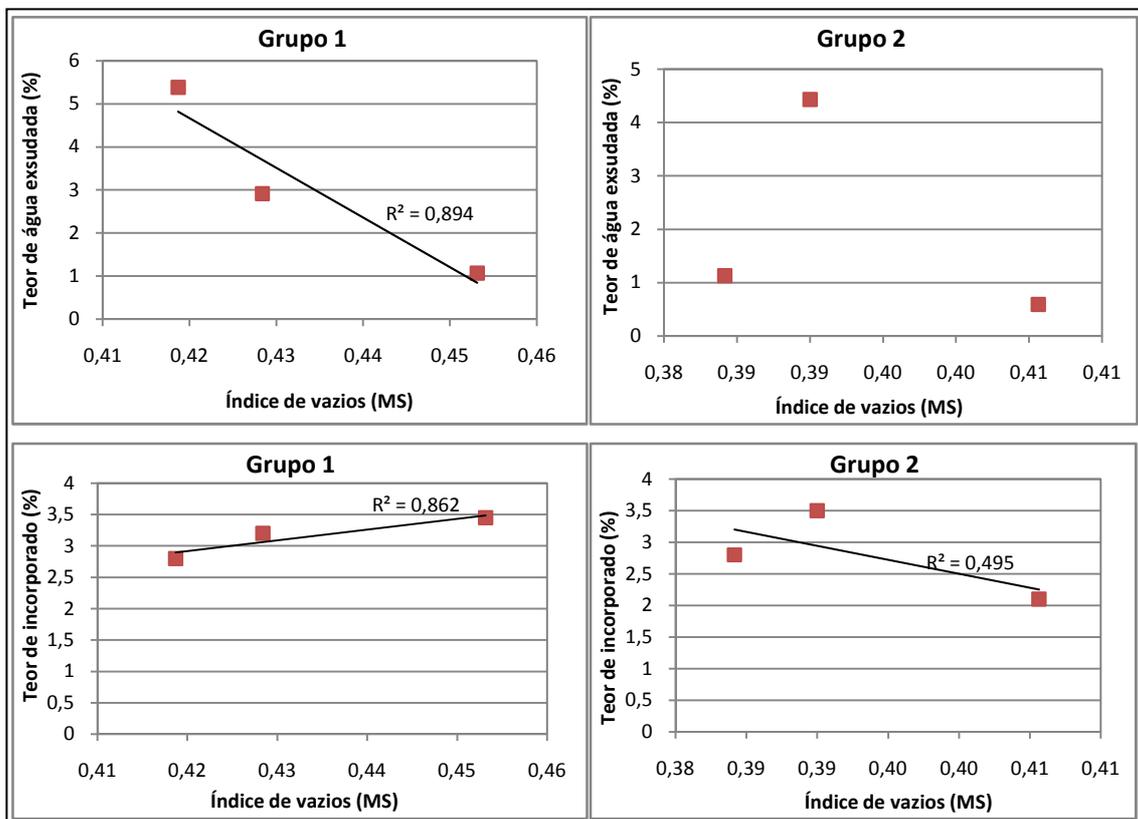
Pela figura 4.33 percebe-se que o único aspecto de forma o qual se obteve correlação satisfatória com o índice de vazios MUS foi a esfericidade/equidimensionalidade, onde foi encontrado que quanto mais esféricos os grãos maior o índice de vazios das composições, se considerados os agregados do grupo 1, e com razoável correlação ( $R^2=0,592$ ) para as areias do grupo 2, sendo, neste caso, o índice de vazios tanto menor quanto mais esféricos os grãos. Cabe salientar que de acordo com a bibliografia consultada, quanto mais esféricos, mais arredondados e menos rugosos os grãos dos agregados, maior densidade de empacotamento se alcança, fato este, no geral, contrariado pelos resultados obtidos pelas areias usadas nesta pesquisa, considerando o índice de vazios da massa unitária no estado solto.



**Figura 4.34** – Correlação entre esfericidade, grau de arredondamento e textura superficial – Índice de vazios no estado compactado (MUC) – projeto experimental 1

Na figura 4.34 estão apresentadas as correlações entre as características de forma e os índices de vazios no estado compactado. Nota-se que as melhores correlações foram as conseguidas com as areias do grupo 2, nas variáveis independentes esfericidade e rugosidade, de onde pode-se afirmar que quanto mais esférico o agregado miúdo, menores os índices de vazios e quanto mais rugosa a textura superficial das areias, maiores os índices de vazios encontrados, ou seja, quanto mais esférico e menos rugoso o agregado miúdo, maior a densidade de empacotamento das areias. Já em relação aos agregados miúdos do grupo 1, houve uma razoável correlação entre esfericidade e o volume de vazios, sendo que mais uma vez, assim como exposto anteriormente, o índice

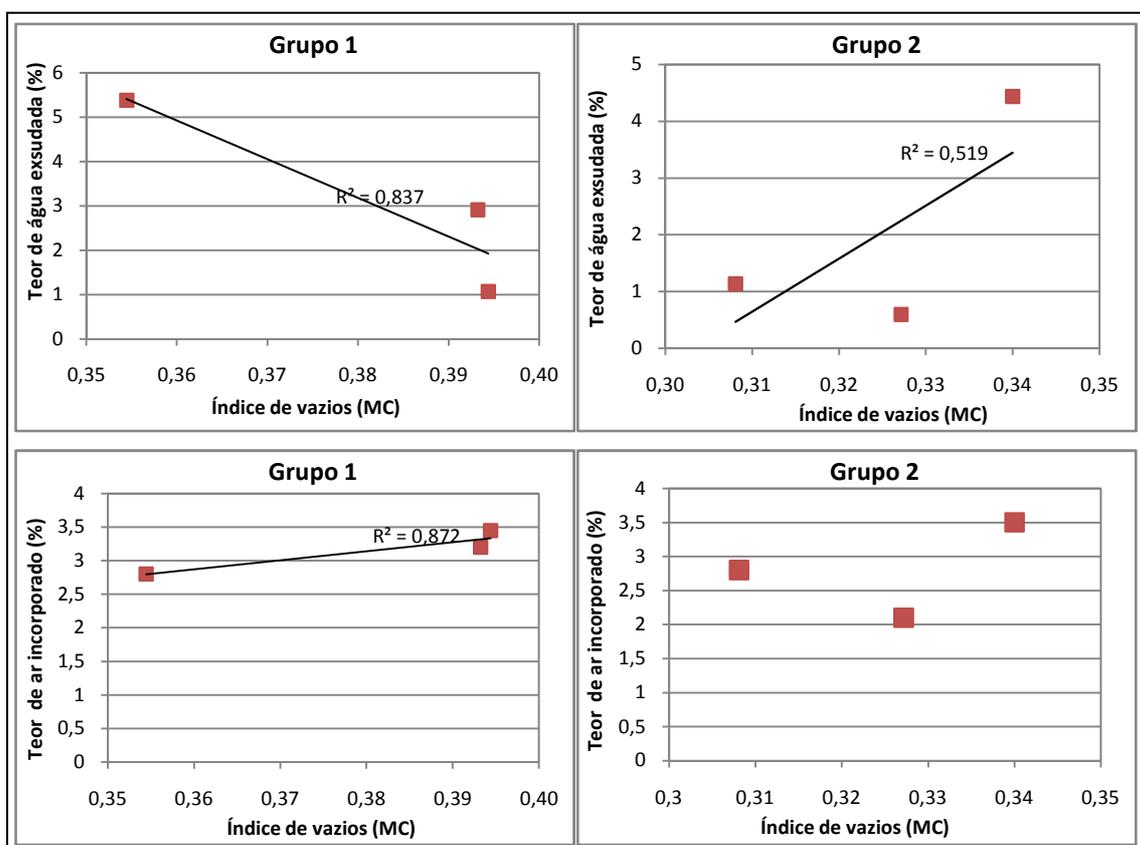
de vazios se apresentou maior quanto mais esféricos os grãos das areias, o que vai de encontro ao preconizado na bibliografia consultada. O grau de arredondamento dos cantos e arestas parece não exercer efeito significativo em relação ao índice de vazios para as areias analisadas neste trabalho.



**Figura 4.35** – Correlação entre teor de água exsudada e teor de ar incorporado – Índice de vazios no estado solto (MUS) – projeto experimental 1

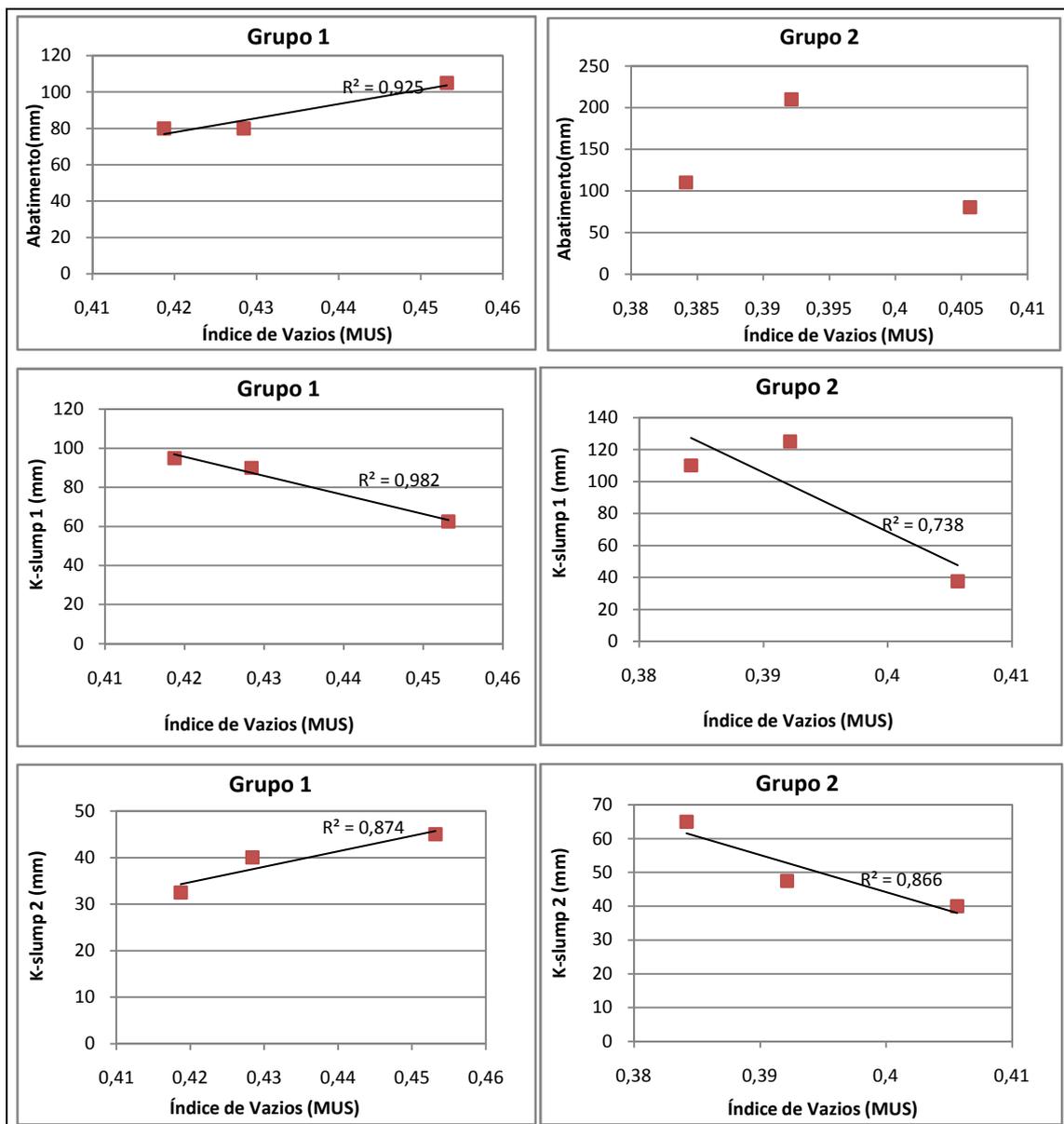
Com a figura 4.35 acima, percebe-se que houve correlação significativa com as areias constantes do grupo 1 e baixa correlação em relação às areias do grupo 2. Ao se analisar as figuras acima e a tabela 4.4 apresentada anteriormente, nota-se que provavelmente a discrepância nos resultados nos agregados miúdos do grupo 2 se deve aos altos valores de teor de água exsudada e teor de ar incorporado da areia britada CA. Já em relação aos agregados do grupo 1, percebe-se que quanto maior a quantidade de vazios (em relação à massa unitária no estado solto), menor o teor de água exsudada. Este resultado pode ser explicado considerando-se que, quanto mais compacta (menor valor de índice de vazios) a areia, menor a quantidade disponível de espaços vazios para a água/pasta preenchê-los e, portanto, maiores os teores de água exsudada da mistura e vice-versa. Em relação ao teor de ar incorporado, apesar da pequena diferença entre os

valores, houve uma tendência do mesmo ser tanto maior, quanto maiores os valores de índices de vazios.



**Figura 4.36** – Correlação entre teor de água exsudada e teor de ar incorporado – Índice de vazios no estado compactado (MUC) – projeto experimental 1

Pela figura 4.36 nota-se que, assim como ocorreu na figura 4.35 anterior, houve uma tendência de diminuição da quantidade de água exsudada com o aumento do índice de vazios (MC) e aumento do teor de ar incorporado nas misturas, com o também aumento deste índice, levando-se em consideração as areia do grupo 1. Já em relação às areias constantes do grupo 2, percebe-se uma correlação razoável entre o teor de água exsudada dos concretos e índice de vazios das mesmas, sendo a quantidade de água exsudada tanto maior, quanto maior o volume de vazios dessas areias. Este resultado aconteceu possivelmente devido à alta quantidade de água exsudada pelo concreto produzido com a areia CA, como comentado anteriormente. Em relação ao teor de ar incorporado, não houve correlação significativa desta propriedade para os concretos produzidos com os agregados miúdos do grupo 2.



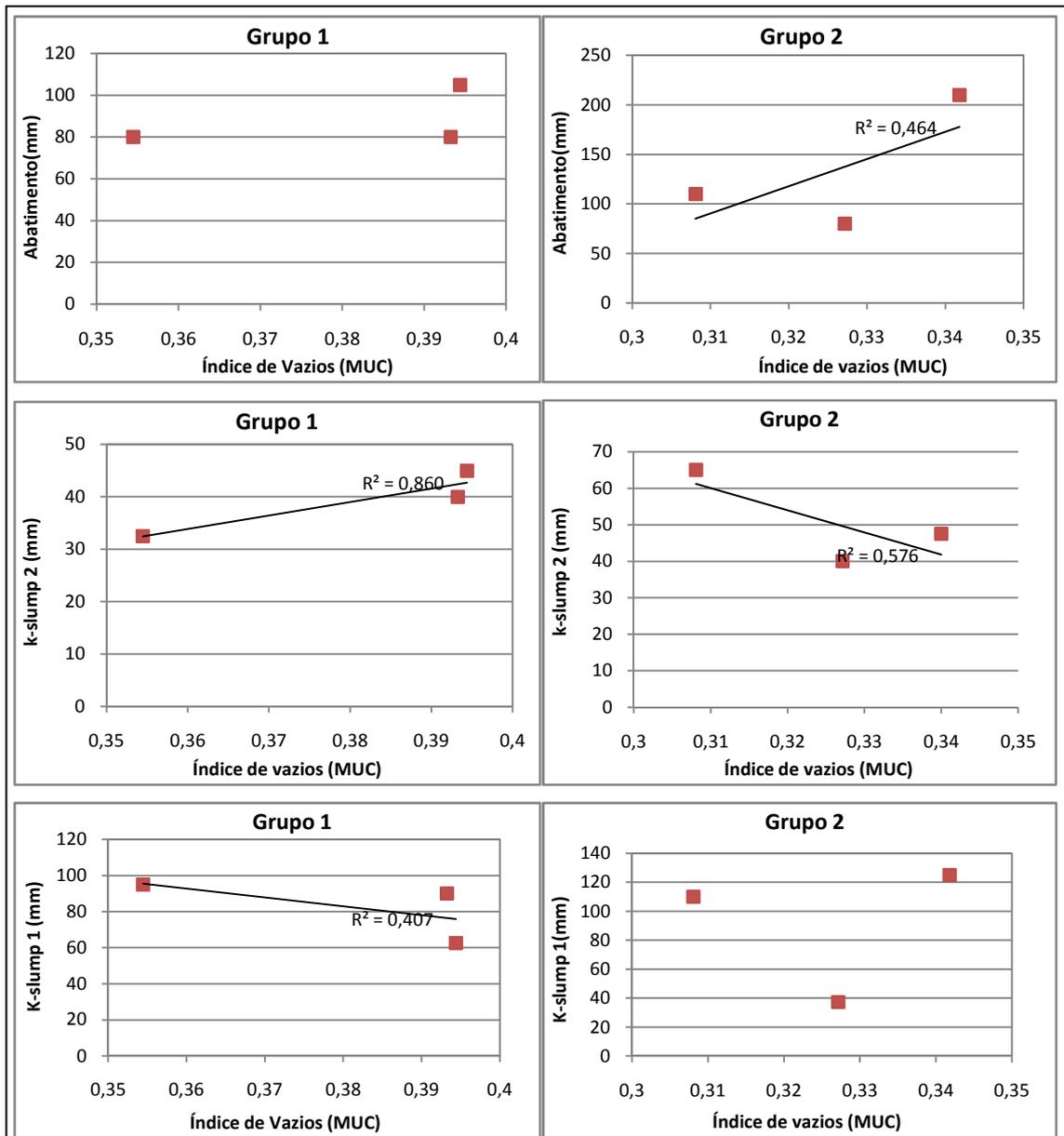
**Figura 4.37** – Correlação entre consistência pelo abatimento e k-slump 2, segregação (k-slump1) – Índice de vazios no estado solto (MUS) – **projeto experimental 1**

Na figura 4.37 estão apresentadas as relações entre os índices de vazios no estado solto e consistência pelo ensaio abatimento de tronco de cone e *k-slump* 2, além da correlação destes índices com o *k-slump* 1, que mensura segregação. Percebe-se que ao se observar os gráficos de consistência do grupo 1 – abatimento e *k-slump* 2 – os mesmos apresentaram a mesma tendência, ou seja, quanto maior o índice de vazios (MUS), também mais fluidos os concretos. Este resultado possivelmente se deve à areia GR, que mesmo possuindo o mais alto valor de índice de vazios (0.45), proporcionou a mistura mais fluida dentre as areias do grupo 1 (considerando os dois ensaios de consistência). Provavelmente, o baixo grau de arredondamento dos cantos e arestas desta areia – como pode ser comprovado pelas tabelas 4.5 e 4.6 mostradas

anteriormente – propiciou o mais alto teor de vazios dentre as areias, considerando o índice de vazios MS. Porém, essa areia britada possui alto grau de esfericidade, fato este que provavelmente viabilizou a maior fluidez do concreto produzido com tal agregado miúdo.

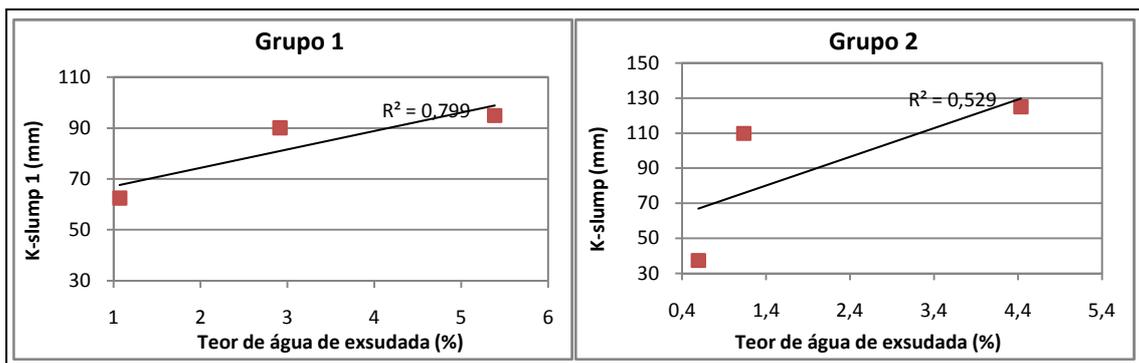
Em relação ao abatimento do grupo 2, nota-se que, mais uma vez, não houve correlação significativa entre a consistência mensurada por este ensaio e o índice de vazios MS. Apesar disto, parece haver maior sensibilidade nos resultados encontrados com o *k-slump 2*, já que o mesmo propiciou uma boa correlação entre as variáveis, e indicou que quanto mais compacta a composição da areia, maior a fluidez do microconcreto.

Ao se levar em consideração, agora, o ensaio de *k-slump 1*, percebe-se que tanto para os agregados pertencentes ao grupo 1, quanto para os pertencentes ao grupo 2, houve uma tendência significativa de obter maior segregação dos concretos quanto maior a compacidade das areias, apesar da correlação das areias do grupo 1 ser mais expressiva do que a mostrada pelos agregados do grupo 2. Mais uma vez, apesar de não resultar no menor valor de índice de vazios, o concreto de CA apresentou o maior valor dentre os demais de segregação, o que pode explicar a correlação menos significativa do que a encontrada com os agregados miúdos do grupo 1. Ainda analisando os resultados do ensaio *k-slump 1* para os dois grupos, provavelmente, as areias, ao apresentarem o esqueleto granuloso compacto (fechado), deixaram menos espaços vazios disponíveis para a pasta de cimento, que deve ter segregado dos concretos e adentrado no orifício do aparelho *k-slump*, o qual indicou uma maior segregação das misturas confeccionadas com as mesmas.



**Figura 4.38** – Correlação entre consistência pelo abatimento e k-slump 2, segregação (k-slump1) – Índice de vazios no estado solto (MUC) – projeto experimental 1

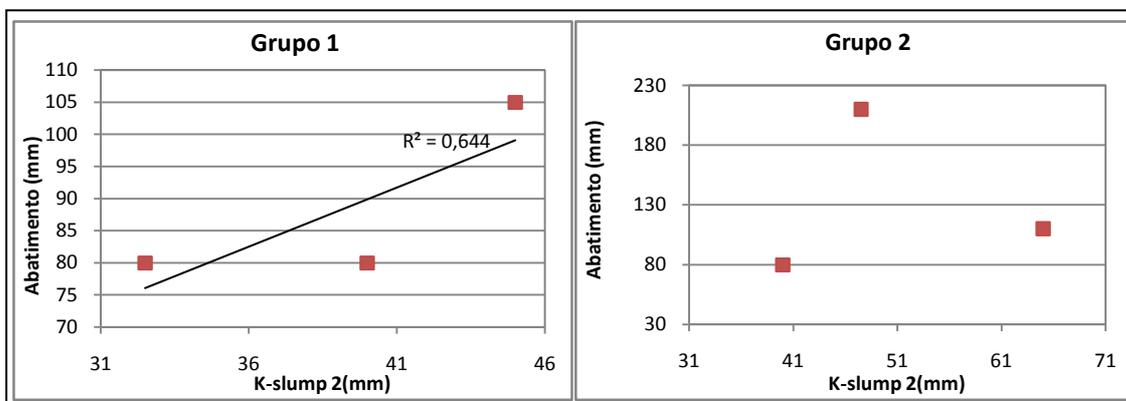
Através da figura 4.38, nota-se que, no geral, as correlações não se apresentaram satisfatórias entre os resultados de consistência, segregação e os índices de vazios encontrados com a massa unitária no estado compactado. A única exceção se deve à relação entre tal índice e a consistência mensurada pelo *k-slump 2*, onde o microconcreto se apresentou tanto mais fluido quanto maiores os valores de índices de vazios dos agregados pertencentes ao grupo 1, resultado este muito similar ao presenciado ao se correlacionar tal propriedade ao índice de vazios MUS, correlação esta presente na figura 4.36 apresentada anteriormente.



**Figura 4.39** – Correlação entre segregação (k-slump 1) e teor de água exsudada – **projeto experimental 1**

A figura 4.39 mostra a correlação existente entre a segregação mensurada pelo *k-slump 1* e o teor de água exsudada, para os dois grupos considerados. Nota-se que existe uma tendência de aumento do teor de água exsudada, quanto maior também a segregação dos concretos de ambos os grupos, apesar da correlação apenas razoável das misturas produzidas com as areias do grupo 2.

A figura 4.40 a seguir apresenta as relações entre o *k-slump 2* e o abatimento de tronco de cone.



**Figura 4.40** – Correlação entre medidas de consistência pelo *k-slump 2* e abatimento – **projeto experimental 1**

Para os agregados do grupo 1 percebe-se que houve correlação, apesar de apenas razoável ( $R^2=0,644$ ), entre os dois métodos de mensuração de consistência. Entretanto, para os concretos dosados com os agregados do grupo 2, não se observou correlação. Como comentado anteriormente, isto leva a crer que, principalmente em relação às misturas do grupo 2, o microconcreto possui propriedades distintas das do concreto, ou, então, o ensaio do *k-slump 2* reproduz particularidades que o ensaio do abatimento de tronco de cone se mostrou menos sensível, como pode ser comprovado em análises anteriores.

## **4.2 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROJETO EXPERIMENTAL 2**

Neste item serão apresentados e analisados os resultados encontrados com as variáveis do projeto experimental 2, a saber: grau de continuidade, índices de vazios com massa unitária no estado solto e compactado, teor de partículas passantes na peneira 0,6 mm e retidas na peneira 0,075 mm; as variáveis resposta: consumo de cimento, relação água/materiais secos, teor de argamassa seca e relação água/cimento; além das variáveis dependentes viscosidade, tensão de escoamento, consistência pelo abatimento de tronco de cone e *k-slump* 2, segregação, mensurada pelo *k-slump* 1, exsudação e teor de ar incorporado, como já explicado anteriormente no capítulo 3 – Programa experimental.

### **4.2.1- Apresentação dos resultados – Projeto experimental 2**

Os resultados alcançados a partir das variáveis definidas no projeto experimental 2 serão apresentados neste item, ao passo que a análise das mesmas será realizada no item subsequente. Os resultados serão apresentados preponderantemente em forma de tabelas.

#### **4.2.1.1 – Apresentação dos resultados variáveis resposta**

Como descrito no capítulo 3 deste trabalho, a proporção de materiais referência foi obtida com a curva contínua de Faury da areia britada MI, já que essa areia apresentou, *in natura*, a curva granulométrica mais ajustada à de referência de Faury (curva de ajuste agregado miúdo + agregados graúdos). Com as proporções de materiais base, foi-se ajustando o teor de cimento e água das misturas com as areias CV, SV, MI, GR e CA até alcançar abatimento maior ou igual a 120 mm, com os menores valores possíveis de teores de argamassa seca e relações água/materiais secos. Para tanto, cada grupo de concreto, por areia britada, apresentou diferentes consumos de cimento (C), relação água/materiais secos (H%), teor de argamassa seca ( $\alpha$  %) e relação água cimento (a/c), ou seja, para cada grupo de quatro composição granulométrica, tais parâmetros se apresentaram diferenciados ao se alterar o agregado miúdo. Já em relação à proporção de agregados, a mesma resultou fixa em relação a todos os concretos, para todas as areias consideradas nesta pesquisa.

Na tabela 4.8 a seguir é apresentada a proporção de materiais de referência e na tabela 4.9, a seguir os traços resultantes dos ajustes, considerando as cinco areias britadas SV, CV, GR, CA e MI.

**Tabela 4.8** – Traço de referência obtido com a curva contínua de Faury – Projeto Experimental 2

TRAÇO DE REFERÊNCIA						
Proporção de cimento	Proporção de areia (a)	Proporção de brita 0 (p <sub>1</sub> )	Proporção de brita 1 (p <sub>2</sub> )	Relação água/cimento (x)	Relação água/materiais secos (H%)	Consumo de cimento (C)-kg/m <sup>3</sup>
1	2,05	0,81	1,86	0,65	11,35	365,6

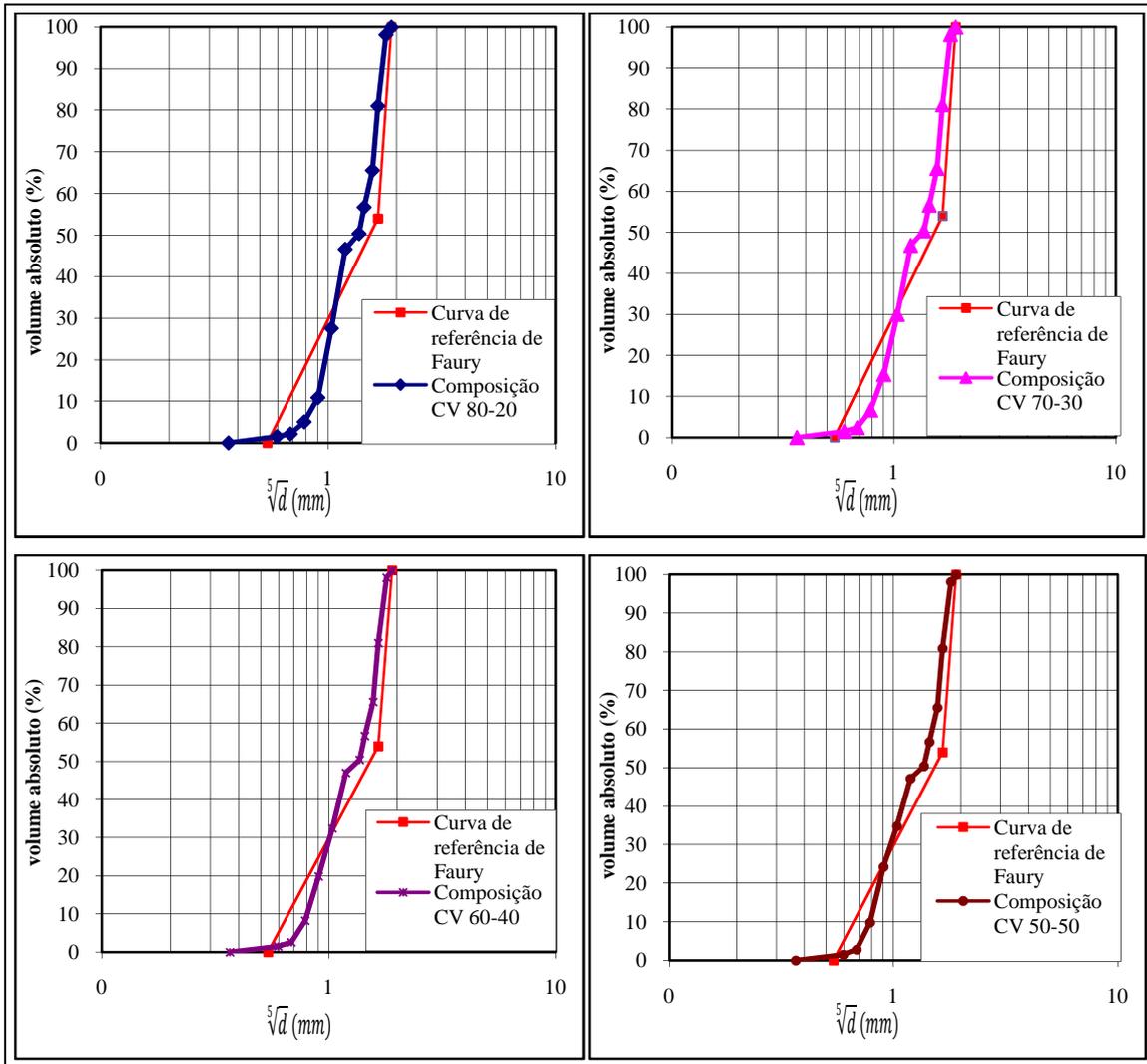
Como já exposto anteriormente, a curva de Faury forneceu a proporção de agregados, sendo que os demais parâmetros foram conseguidos através da adoção da máxima relação água/cimento possível recomendada pelas normas técnicas brasileiras.

**Tabela 4.9** – Traços ajustados – Projeto Experimental 2

Tipos Litológicos	Proporção de cimento	Proporção de areia (a)	Proporção de brita 0 (p <sub>1</sub> )	Proporção de brita 1 (p <sub>2</sub> )	Relação água/cimento (x)	H(%)	a (%)	Consumo de cimento (C)-kg/m <sup>3</sup>
SV	1	1,73	0,70	1,60	0,65	12,95	54,3	404,7
CV	1	1,84	0,74	1,70	0,60	11,36	53,8	397,1
GR	1	1,74	0,70	1,61	0,63	11,93	54,3	401,9
CA	1	1,87	0,76	1,73	0,60	11,29	53,6	395,4
MI	1	1,74	0,70	1,61	0,62	11,69	54,3	410,2

Com a tabela 4.9, percebe-se que os ajustes que resultaram no menor consumo de cimento e menor valor da relação água/cimento foram os obtidos com os agregados miúdos CA e CV, os quais apresentaram proporções de materiais e parâmetros de mistura com valores muito próximos. A areia SV, por outro lado, proporcionou o concreto com o ajuste menos favorável à resistência, com o mais alto teor de relação água/cimento e relação água/materiais secos também com valor elevado. Cabe salientar que os ajustes foram procedidos com todas as areias compostas nas proporções setenta por cento do material retido na peneira 0.6 mm e trinta por cento do material passante da peneira 0.6 mm e retido na peneira de abertura de malha 0.075 mm (composição 70-30), por ser esta considerada a composição granulométrica intermediária.

As figuras 4.41 a 4.45 mostram as curvas de distribuição granulométrica das quatro composições realizadas para as cinco areias britadas consideradas neste trabalho, juntamente com a curva contínua de referência de Faury. Já nas tabelas 4.10 a 4.14, a seguir, estão apresentadas as quatro composições realizadas para cada areia britada, em conjunto com os índices e relações obtidas através das mesmas.



**Figura 4.41** – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia CV e curva de referência de Faury – projeto experimental 2

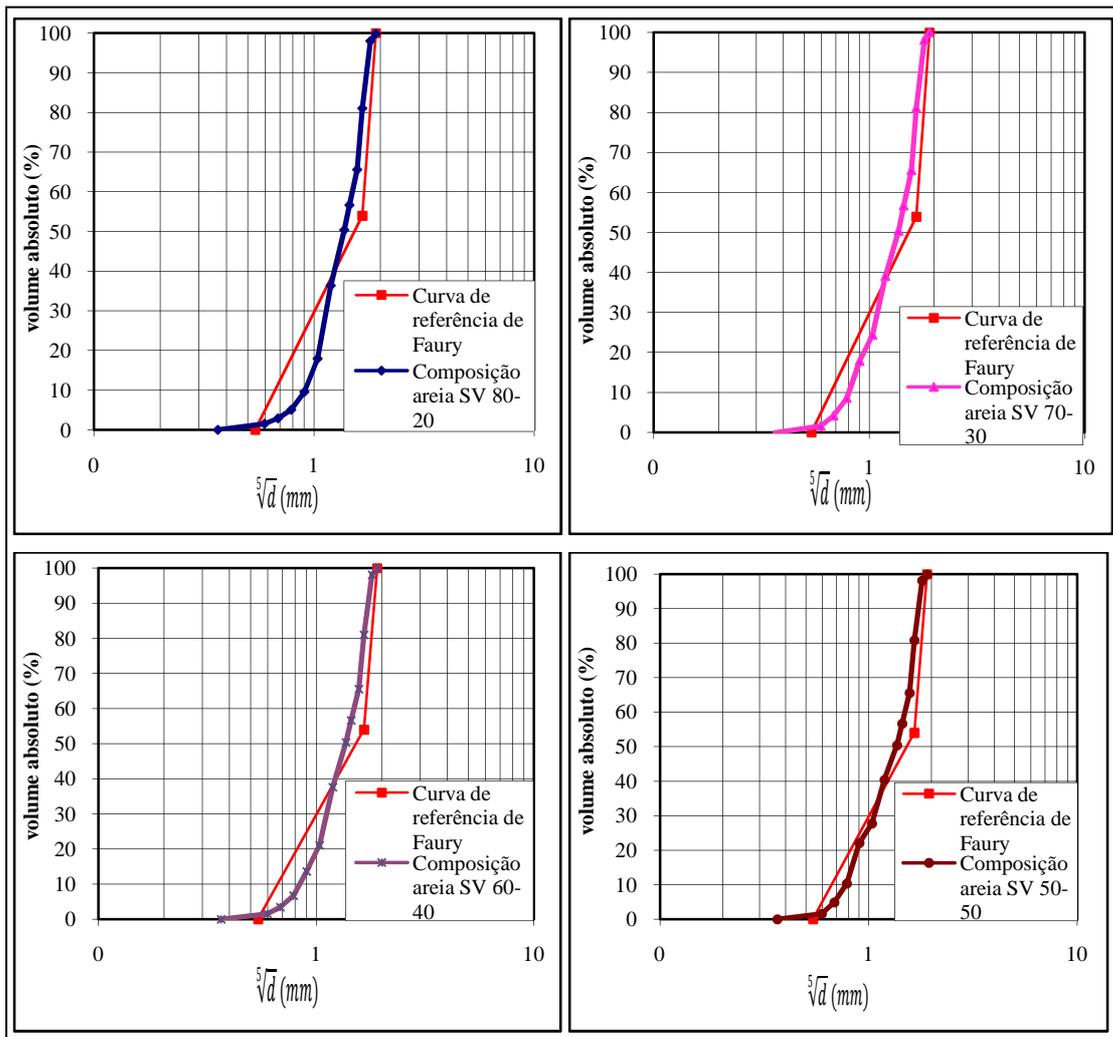
Pela figura 4.41 e tabela 4.10 a seguir, nota-se que a composição que resultou em maior continuidade, ou seja, menor valor da relação “grau de continuidade”, foi a composição CV 80-20, o que significa dizer que ficou retido na peneira 0,6 mm 80% do material e 20% se encontrou passando na mesma peneira e retido na peneira 0.075 mm. Cabe salientar que o grau de continuidade foi calculado como o percentual da relação entre as áreas superior e inferior à curva de Faury. Assim, quanto menor o valor percentual deste índice, mais contínua a distribuição granulométrica da composição. Apesar da

maior continuidade apresentada pela areia composta CV 80-20, parece que a mesma não apresentou, considerando também as demais composições, a maior compacidade, como se pode perceber pela tabela 4.10, observando os índices de vazios encontrados. Nota-se, ainda, que os valores destes índices são bastante próximos tanto para os índices considerando a massa unitária no estado solto, quanto para a massa unitária no estado compactado. A composição mais descontínua foi a CV 50-50 seguida de perto pela areia composta CV 60-40 as quais apresentaram altos valores de graus de continuidade, respectivamente, 151.03% e 107.89%, o que significa dizer que a área superior à curva contínua de Faury é 151.03 vezes maior que a área abaixo dessa mesma curva em relação à composição CV 50-50, e 107.89 vezes maior na composição CV 60-40. De acordo com COUTINHO (2003), quanto menor o valor da relação “área superior à curva de referência de Faury/área inferior à curva de Faury”, maior a continuidade de uma dada composição.

**Tabela 4.10** – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia CV – Projeto Experimental 2

Composições	Percentual de finos (passante $\neq$ 0,6 – retido $\neq$ 0,075 mm) (%)	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC	Grau de continuidade (%)
<b>CV 80-20</b>	20	0.388	0.318	5.49
<b>CV 70-30</b>	30	0.375	0.310	35.50
<b>CV 60-40</b>	40	0.385	0.308	107.89
<b>CV 50-50</b>	50	0.384	0.307	151.03

A figura 4.42 a seguir apresenta as curvas granulométricas das composições da areia SV, além da curva de referência de Faury e a tabela 4.11 estão contidos os índices e relações resultantes destas composições.

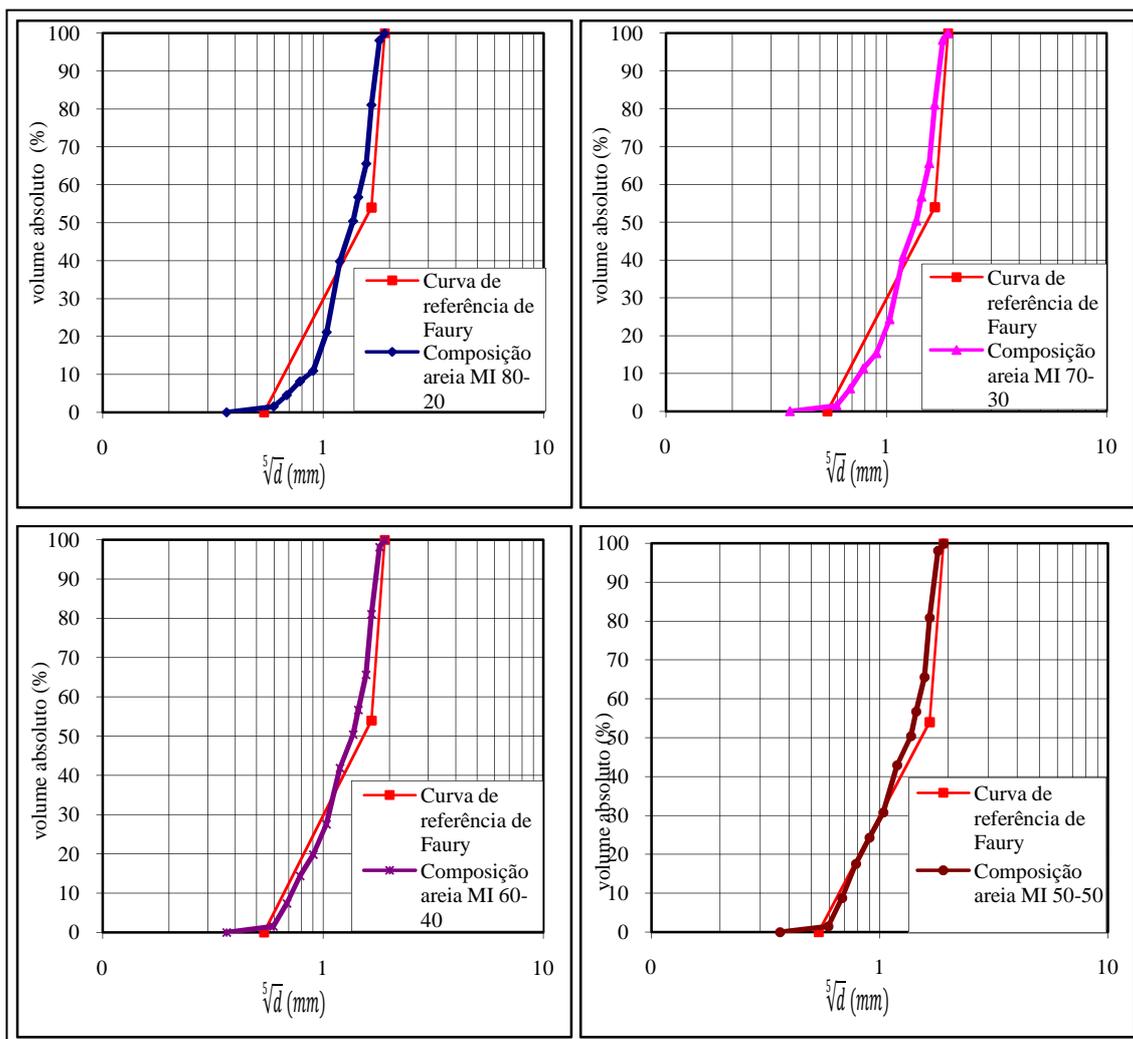


**Figura 4.42** – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia SV e curva de referência de Fauy – projeto experimental 2

Pela figura 4.42 e tabela 4.11, apresentada a seguir, pode-se influir que a composição da areia SV com maior continuidade foi a SV 70-30 e a menos contínua a SV 50-50. Nota-se, no entanto, que a descontinuidade das composições da areia SV foi menor do que a descontinuidade das composições de CV. Em relação aos índices de vazios, nota-se que além de ser a mais contínua, o arranjo formado pela SV 70-30 resultou também no menor valor de índice de vazios.

**Tabela 4.11** – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia SV – Projeto Experimental 2

Composições	Percentual de finos (passante $\neq$ 0,6 – retido $\neq$ 0,075 mm) (%)	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC	Grau de continuidade (%)
SV 80-20	20	0.401	0.299	29.98
SV 70-30	30	0.374	0.260	4.99
SV 60-40	40	0.383	0.278	14.35
SV 50-50	50	0.399	0.290	88.12



**Figura 4.43** – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia MI e curva de referência de Faury – projeto experimental 2

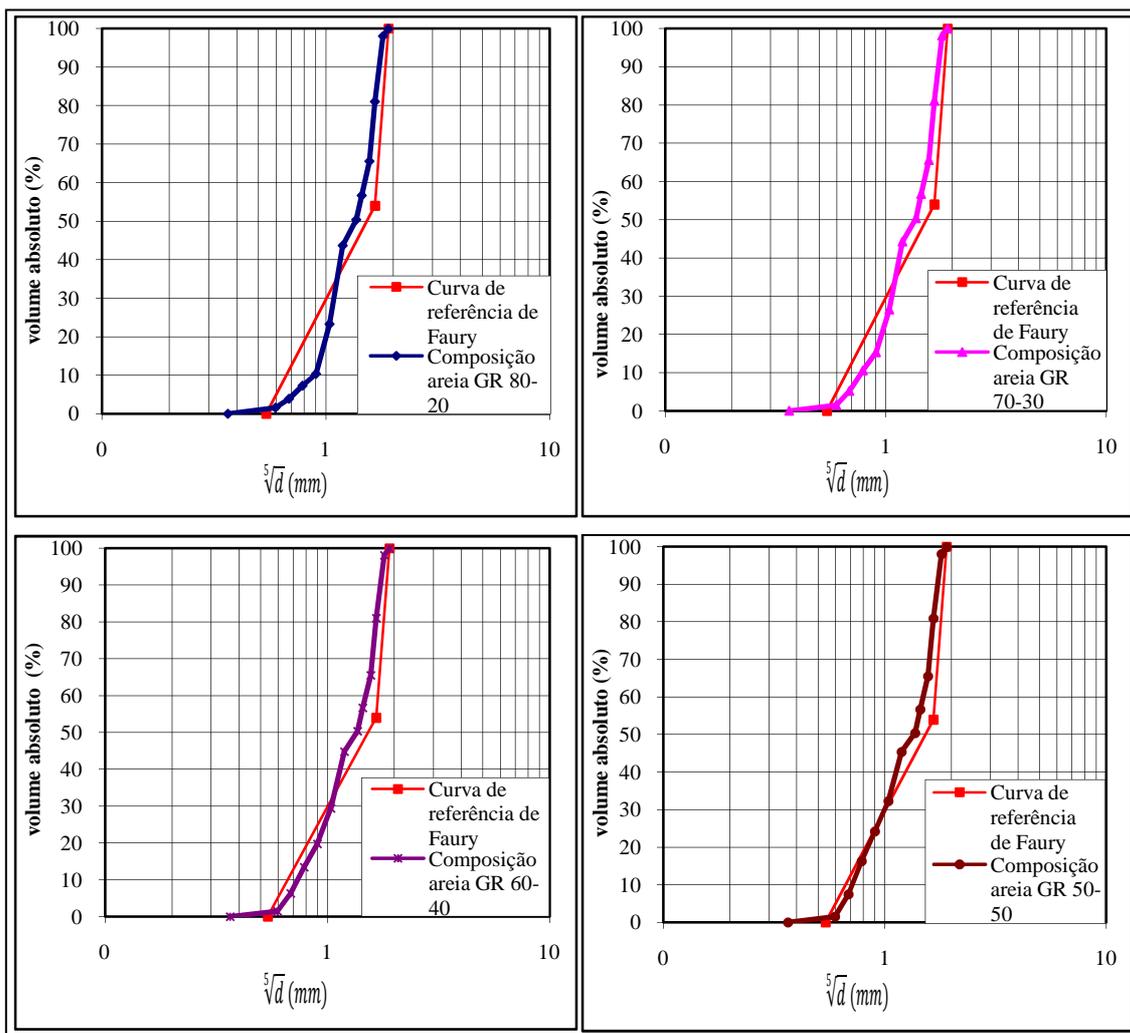
A figura 4.43 apresenta as curvas de ajuste agregados graúdos e composições das areias britadas realizadas com o agregado miúdo MI sendo que os índices e relações resultantes de tais composições da areia MI estão expressas na tabela 4.12 a seguir.

**Tabela 4.12** – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia MI – Projeto Experimental 2

Composições	Percentual de finos (passante $\neq$ 0,6 – retido $\neq$ 0,075 mm) (%)	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC	Grau de continuidade (%)
<b>MI 80-20</b>	20	0.400	0.400	1.71
<b>MI 70-30</b>	30	0.400	0.332	39.13
<b>MI 60-40</b>	40	0.413	0.336	145.88
<b>MI 50-50</b>	50	0.437	0.342	872.96

Nota-se que a composição a qual apresentou maior continuidade foi a MI 80-20, sendo que a MI 50-50 resultou na maior descontinuidade entre todas as demais composições das diversas areias. Apesar disso, ao se comparar os índices de vazios, percebe-se que, para a areia MI, o índice MS foi tanto menor quanto mais contínua as areias, mas, entretanto, ao se observar o índice de vazios MC, percebe-se que a composição MI 50-50 apresentou valor mais baixo do que a MI 80-20, apesar dos valores se mostrarem bastante próximos.

Na figura 4.44 e tabela 4.13 estão expressas, respectivamente, as curvas de distribuição granulométrica das areias britadas GR compostas mais curva de agregados graúdos e distribuição contínua de referência de Faury e os índices de vazios, graus de continuidade e percentual de finos destas areias compostas. Percebe-se que o melhor resultado de continuidade pela figura e tabela citadas foi a GR 80-20 (menor valor da relação “grau de continuidade”). Mais uma vez, a curva mais descontínua foi apresentada pela composição GR 50-50. Percebe-se também que, apesar de não apresentar a composição mais contínua, a GR 70-30 resultou nos menores valores de índices de vazios.

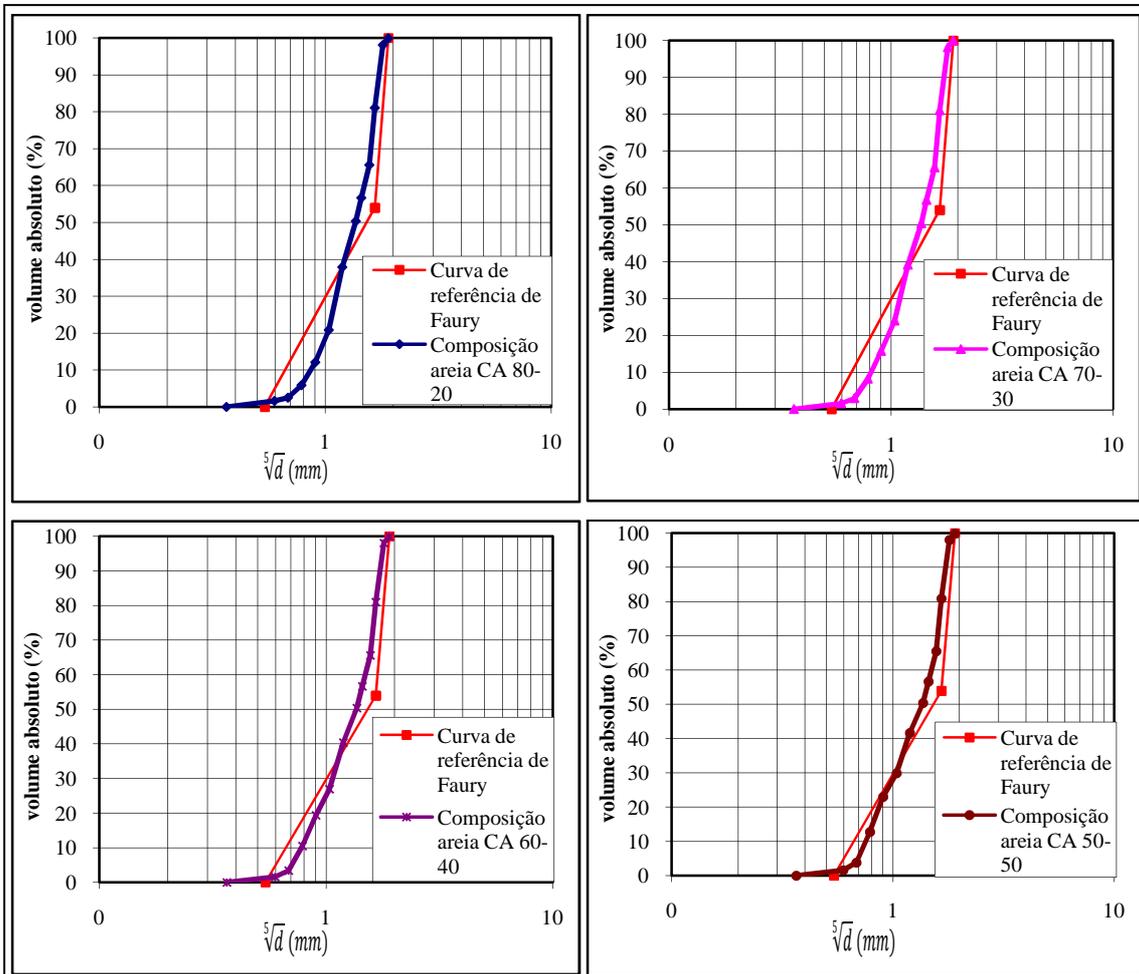


**Figura 4.44** – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia GR e curva de referência de Faury – projeto experimental 2

**Tabela 4.13** – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia GR – Projeto Experimental 2

Composições	Percentual de finos (passante $\neq$ 0,6 – retido $\neq$ 0,075 mm) (%)	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC	Grau de continuidade (%)
<b>GR 80-20</b>	20	0.385	0.299	3.02
<b>GR 70-30</b>	30	0.350	0.283	26.63
<b>GR 60-40</b>	40	0.399	0.297	150.34
<b>GR 50-50</b>	50	0.404	0.304	562.03

Da mesma maneira que as demais, as curvas granulométricas das composições dos agregados e os índices e relações resultantes das mesmas estão representados pela figura 4.44 e tabela 4.14



**Figura 4.45** – Curva granulométrica agregados graúdos e composições da areia CA e curva de referência de Faury – projeto experimental 2

A figura 4.45 e a tabela 4.14 mostram que a composição a qual resultou no maior grau de continuidade foi a CA 70-30, apesar desta não apresentar o arranjo mais compacto se comparada às demais composições.

**Tabela 4.14** – Percentual de finos, índices de vazios e grau de continuidade das composições granulométricas areia CA – Projeto Experimental 2

Composições	Percentual de finos (passante $\neq$ 0,6 – retido $\neq$ 0,075 mm) (%)	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC	Grau de continuidade (%)
CA 80-20	20	0.414	0.323	20.61
CA 70-30	30	0.473	0.401	3.21
CA 60-40	40	0.395	0.324	62.95
CA 50-50	50	0.423	0.352	168.52

Pelo apresentado até o momento, percebe-se que as composições areia britada + agregados graúdos que mais se ajustaram à curva de referência de Faury foram as misturas agregados graúdos e areias com menor percentual de finos. Torna-se interessante notar, que na realidade, considerando as composições de areia isoladamente, os melhores resultados em se tratando da continuidade pela curva contínua de Faury foi mais bem alcançada com agregados miúdos com distribuição granulométrica mais descontínua.

#### 4.2.1.2 – Apresentação dos resultados nos concretos – Projeto experimental 2

Neste item, serão apresentados os resultados dos concretos no estado fresco produzidos com as areias CV, SV, GR, MI e CA compostas, cujas características foram apresentadas no item anterior.

A tabela 4.15 a seguir, apresenta os resultados dos concretos produzidos com as quatro composições de areia CV.

**Tabela 4.15** – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia CV – projeto experimental 2

Composição	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)	Teor de Água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	k-slump 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Consumo cimento (C) kg/m <sup>3</sup>	Relação água/cimento (x)
CV 80-20	44.41	1015.8	1.91	72.5	45.0	120	2.90	397.1	0.6
CV 70-30	30.63	968,6	0.43	62.5	45.0	120	2.35		
CV 60-40	30.73	980.8	0.70	67.5	32.5	110	2.45		
CV 50-50	40.96	985.5	1.13	67.5	40.0	145	2.40		

Pelo mostrado na tabela acima, percebe-se que os melhores resultados de viscosidade, tensão de escoamento, *k-slump 1*, *k-slump 2* e teor de água exsudada foram alcançados com a composição CV 70-30. Já em relação ao ensaio de abatimento de tronco de cone, o concreto mais fluido foi o produzido com a areia CV 50-50 e os menos favoráveis em relação às variáveis reológicas, teor de água exsudada, segregação/consistência (*k-slump 1*) e teor de ar incorporado foram encontrados nos concretos produzidos com a areia CV 80-20.

**Tabela 4.16** – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia SV – projeto experimental 2

Composição	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)	Teor de Água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	k-slump 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Consumo cimento (C) kg/m <sup>3</sup>	Relação água/cimento (x)
SV 80-20	33.57	932.6	3.47	111.2	30.0	145	2.35	404.7	0.65
SV 70-30	44.47	914.9	1.39	90.0	62.5	140	2.20		
SV 60-40	33.76	895.1	1.63	61.0	30.0	135	2.60		
SV 50-50	>37.4	1066.8	0.44	72.5	42.5	100	1.95		

Pela tabela 4.16 exposta anteriormente, percebe-se que, os melhores resultados de viscosidade, tensão de escoamento e k-slump 2 foram alcançados quando usada a composição SV 70-30. Entretanto, a composição SV 80-20 apresentou resultados de viscosidade muito próximo da composição anterior, o melhor resultado de abatimento de tronco de cone dentre todos os demais e os mais desfavoráveis resultados em relação ao *k-slump 1*, teor de água exsudada e *k-slump 2*.

Na tabela 4.17 a seguir estão expressos os resultados das misturas realizadas com as composições da areia GR. Nota-se que os resultados, no geral, foram favoráveis ao se usar GR 80-20 e GR 70-30 nos concretos. A areia GR 80-20 resultou nas melhores respostas em relação à viscosidade, tensão de escoamento, *k-slump 2* e abatimento e nos resultados menos satisfatórios em relação ao *k-slump 1*, teor de água exsudada como também, teor de ar incorporado. Quanto às areias GR 60-40 e GR 50-50, percebe-se que os resultados em relação à consistência e variáveis reológicas das misturas se mostraram menos favoráveis que as composições anteriores, mas apresentaram melhores resultados de teor de água exsudada e *k-slump 1*.

**Tabela 4.17** – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia SV – projeto experimental 2

Composição	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)	Teor de Água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	k-slump 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Consumo cimento (C) kg/m <sup>3</sup>	Relação água/cimento (x)
GR 80-20	29.03	926.13	2.64	105	57.5	150	3.1	401.9	0.63
GR 70-30	30.65	939.35	1.20	25	30	120	2.1		
GR 60-40	>30.6	1154.1	0.17	20	30	80	2.3		
GR 50-50	>30.6	1171.4	0.91	22.5	20	75	2.45		

Ao se observar a tabela 4.18 abaixo, percebe-se que, em termos de variáveis reológicas, a areia MI 60-40 resultou nos menores valores. Em se tratando do abatimento de tronco de cone e *k-slump* 2, os resultados mais favoráveis foram encontrados para a composição MI 70-30, enquanto que os melhores valores em termos de teor de água exsudada, *k-slump* 1 e teor de ar incorporado serem apresentados pela MI 50-50. Apesar disso, esta última resultou nas menos favoráveis respostas em termos das variáveis reológicas e dos ensaios de consistência.

**Tabela 4.18** – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia MI – projeto experimental 2

Composição	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)	Teor de Água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	k-slump 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Consumo cimento (C) kg/m <sup>3</sup>	Relação água/cimento (x)
MI 80-20	35.9	956.8	2.65	90	35	125	2.7	410.2	0.62
MI 70-30	38.7	920.6	1.93	80	40	135	3.8		
MI 60-40	19.7	886.3	3.95	95	32.5	130	2.8		
MI 50-50	>38.7	1078.8	1.63	15	27.5	90	2.4		

Pela tabela 4.19 apresentada a seguir, nota-se que os melhores resultados das variáveis reológicas como também da propriedade consistência (tanto em relação ao abatimento quanto ao *k-slump* 2) foram proporcionados pela composição CA 80-20. Já a composição CA 70-30 propiciou melhores resultados médios em relação aos ensaios de teor de água exsudada e *k-slump* 1. O mais alto teor de água exsudada foi obtido usando nas misturas a areia CA 50-50 e o maior valor de *k-slump* 1 foi encontrado ao se proceder a mistura com a composição CA 80-20.

**Tabela 4.19** – Resultados dos ensaios no estado fresco produzidos com as composições areia CA – projeto experimental 2

Composição	Viscosidade (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)	Teor de Água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	k-slump 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Consumo cimento (C) kg/m <sup>3</sup>	Relação água/cimento (x)
CA 80-20	26.3	897.3	3.72	125	75.5	160	2.45	395.4	0.6
CA 70-30	44.5	914.9	1.63	61	35	180	2.6		
CA 60-40	31.2	944.7	3.19	90	42.5	140	2.2		
CA 50-50	36.7	958.9	4.71	60	32.5	130	2.6		

Cabe salientar que as composições realizadas com as areias britadas CA e CV foram as únicas entre as demais que proporcionaram abatimento de tronco de cone em valores iguais ou maiores que 120 mm, considerando todas as composições, além do que, os

mesmos foram os únicos agregados onde se conseguiu registrar resultados de viscosidade e tensão de escoamento em relação, do mesmo modo, à todas as composições.

#### **4.2.2 – Análise dos Resultados – Projeto Experimental 2**

Neste item serão efetivamente analisados os resultados apresentados no item anterior. Em um primeiro momento, serão analisados as variáveis resposta: índice de vazios, continuidade, teor de finos (material passante peneira 0,6 mm e retido na peneira 0,075 mm), além de, nos concretos, serem analisados comparativamente, os consumos de cimento, relações água materiais secos, relações água/cimento e teor de argamassa seca.

##### **4.2.2.1 – Influência do grau de continuidade nas propriedades do estado fresco dos concretos**

Neste item, as propriedades reológicas, viscosidade e tensão de escoamento, e as demais propriedades do estado fresco abatimento, *k-slump* 1 e 2, teor de água exsudada e teor de ar incorporado serão analisadas em função da característica granulométrica grau de continuidade.

4.2.2.1.1 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0,6 mm na tensão de escoamento

Na figura abaixo se vê as possíveis correlações entre o grau de continuidade das composições e a tensão de escoamento dos concretos confeccionados com as mesmas.

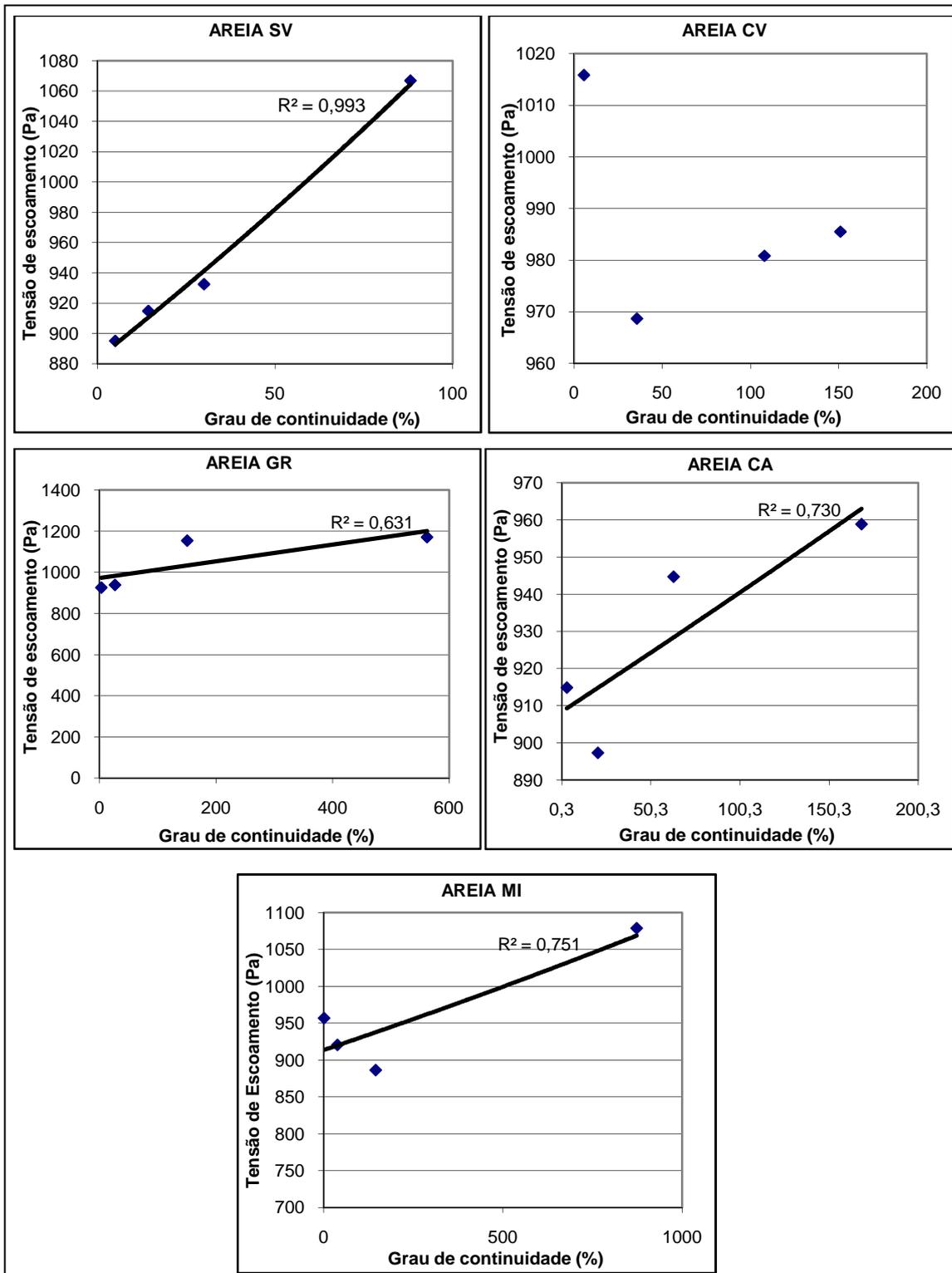
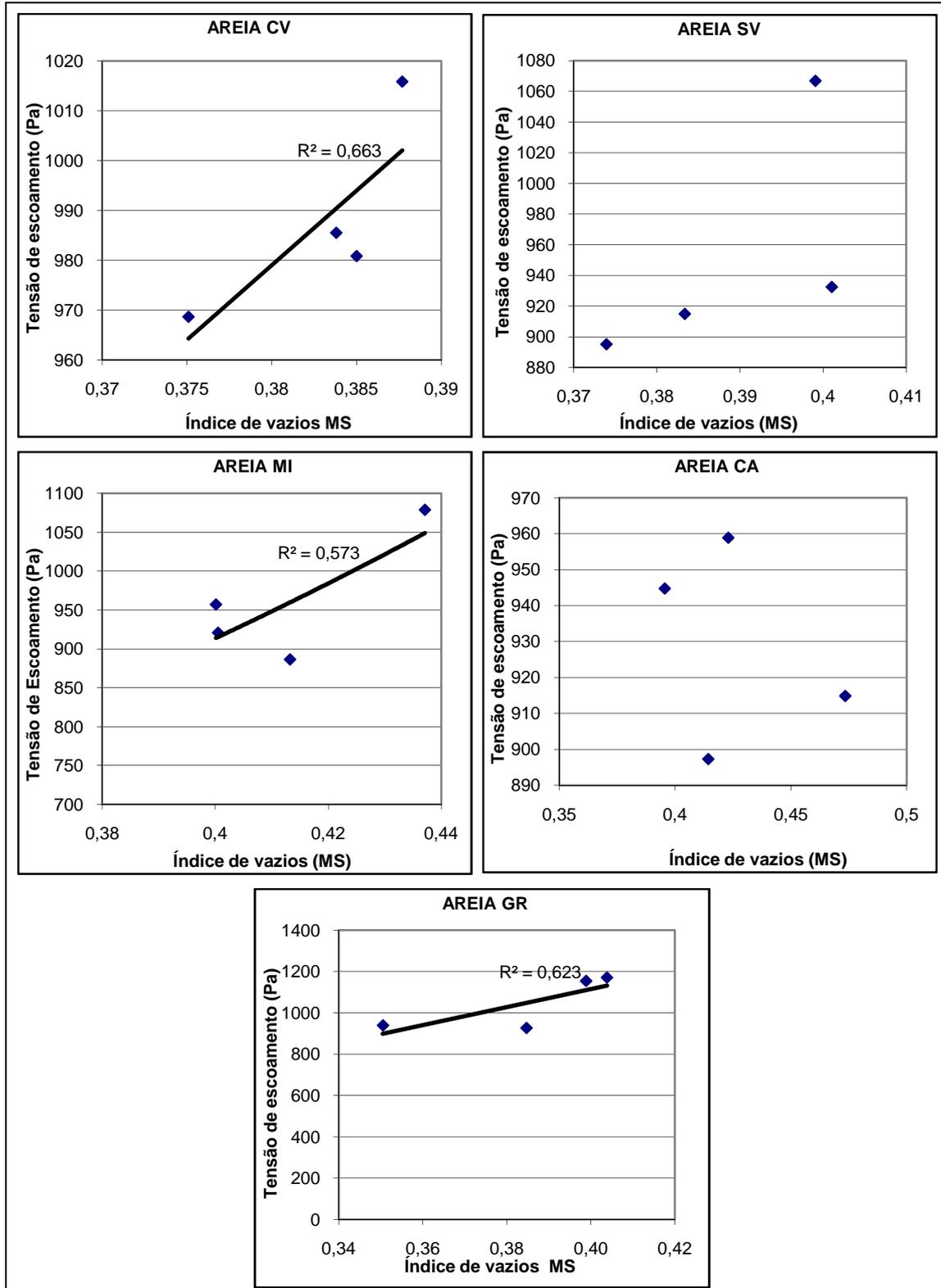


Figura 4.46 – Correlação entre tensão de escoamento e grau de continuidade considerando as diversas areia e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.46 percebe-se que houve ótima correlação entre o grau de continuidade e a tensão de escoamento dos concretos da areia SV, e boas correlações para as composições das areias MI e CA, e apenas razoável em se tratando da areia GR, indicando que, para essas últimas, outros fatores possam influenciar conjuntamente na tensão de escoamento. Apesar desta última afirmação, é importante perceber que para tais areias, quanto mais contínua a curva de agregados (agregados miúdos + graúdos), menor a tensão de escoamento no concreto. Ou seja, provavelmente uma melhor distribuição de tamanhos de grãos reduziu o atrito interno proveniente principalmente dos grãos mais grossos, já que quanto maior a continuidade da curva, maior preenchimento da estrutura sólida, minimizando-se assim o atrito. Já em relação aos concretos produzidos com a areia CV, nota-se pela figura acima e tabela 4.15 apresentada anteriormente, que a composição de agregados mais contínua (CV 80-20) resultou no maior valor de tensão de escoamento, portanto devido ao concreto de tal composição, não se observou correlação satisfatória, já que, sem a existência deste ponto específico, os outros três pontos resultariam em correlação satisfatória. Para tal fato pode haver duas explicações, a saber: a quantidade de grãos mais grossos – retidos na peneira de abertura 0,6 mm da composição CV 80-20 – se mostrou excessiva, causando maior atrito interno entre eles, incrementando assim o valor da tensão de escoamento, ou ainda, a maior continuidade resultou em um maior volume de vazios, fator este que influenciaria na perda de água/pasta de lubrificação do sistema, aumentando também assim o valor da tensão de escoamento, por do mesmo modo aumentar o atrito interno entre os grãos.

A figura 4.47 a seguir traz as tentativas de correlação entre o índice de vazios conseguido com a massa unitária no estado solto e a tensão de escoamento. Percebe-se que houve correlação apenas razoável para três das cinco areias compostas: areia CV, MI e GR. Pelos gráficos, pode-se inferir que quanto maiores as quantidades de vazios, maior o incremento na tensão de escoamento, considerando as quatro composições dos três agregados miúdos supracitados. Uma possível explicação para este fato, como já comentado anteriormente é que um teor maior de vazios possibilitaria a perda de pasta/argamassa de lubrificação do sistema, com o propósito de preencher tais vazios. Assim, com menor lubrificação total do sistema, as partículas se atritariam mais, incrementando o valor da tensão de escoamento. Cabe salientar que apesar de distintos, os resultados de índices de vazios se mostraram muito próximos levando-se em

consideração as quatro composições de cada areia. Não houve correlação significativa entre tensão de escoamento e índice de vazios calculado com a massa unitária no estado compactado.



**Figura 4.47** – Correlação entre tensão de escoamento e índice de vazios MS considerando as diversas areia e composições – Projeto experimental 2

A figura 4.48 a seguir apresenta as correlações entre o teor de material passante na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0.075 mm e a tensão de escoamento. Cabe salientar que esta análise tem sua importância já que segundo MURDOCK apud HUDSON (1999) principalmente a partir da peneira 1.2 mm a área específica das partículas se torna mais efetiva e esse fato é apontado como o principal causador da perda de consistência dos concretos.

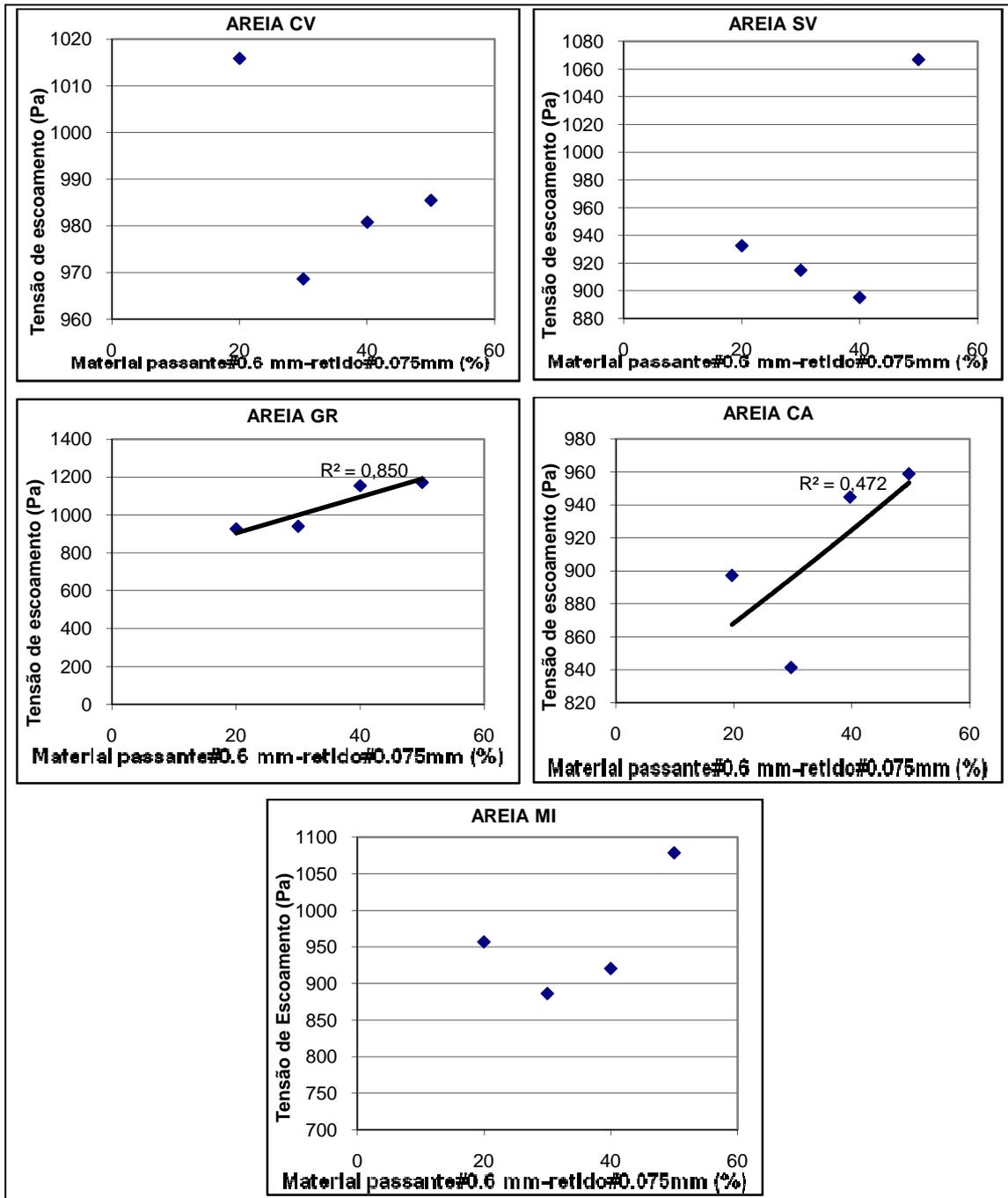


Figura 4.48 – Correlação entre tensão de escoamento e grãos passantes na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0.075 mm considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.48 percebe-se que o único agregado miúdo o qual sua composição obteve correlação significativa entre teor de material passante na peneira 0.6mm e retido na 0.075 mm foi a areia GR. Segundo tal correlação, quanto maior o teor deste material, maiores os valores de tensão de escoamento. A explicação para tal fato é que, provavelmente, ao se incrementar a área específica dos agregados necessita-se de mais água de mistura, retirando assim do sistema a água/pasta responsável pela lubrificação do mesmo, resultando no aumento da tensão de escoamento. Já em relação aos demais agregados, pode haver duas possíveis explicações para a não influência deste material na tensão de escoamento: a distribuição de tamanho de grãos desta faixa granulométrica (passante 0.6 mm e retido 0.075 mm) é formada por grãos mais grossos do que os das areias GR e CA, ou ainda, a influência das relações grau de continuidade e índice de vazios é muito superior à característica atualmente analisada.

4.2.2.1.2 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm na viscosidade

Da mesma forma que no item anterior nesta seção serão avaliadas as características decorrentes das mudanças no grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm nesta propriedade reológica. Serão expostos a seguir os resultados cujos concretos propiciaram a determinação da viscosidade de pelo menos três composições. As misturas produzidas com a areia GR não atingiram essa condição, já que só foi possível determinar a viscosidade de apenas duas das quatro composições realizadas.

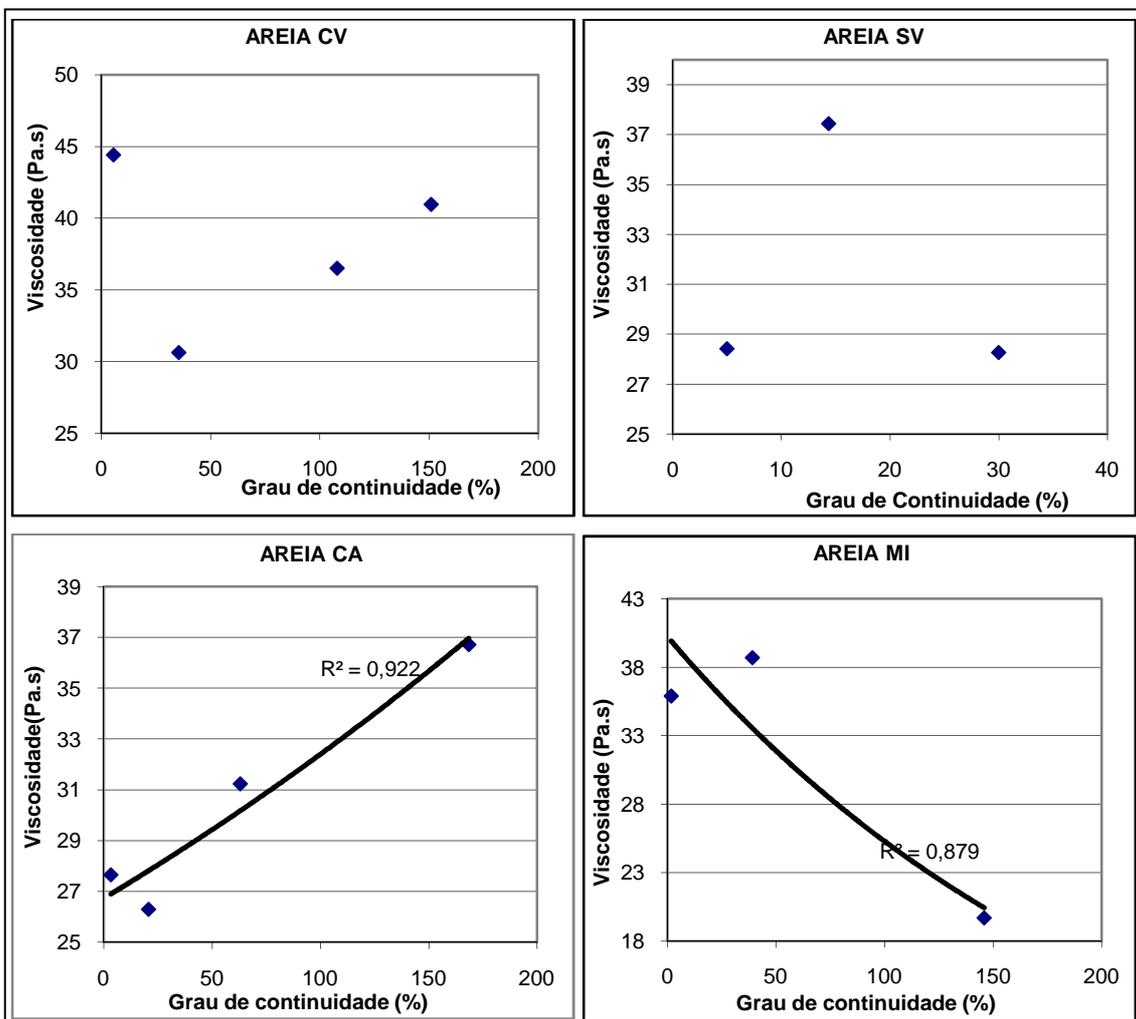
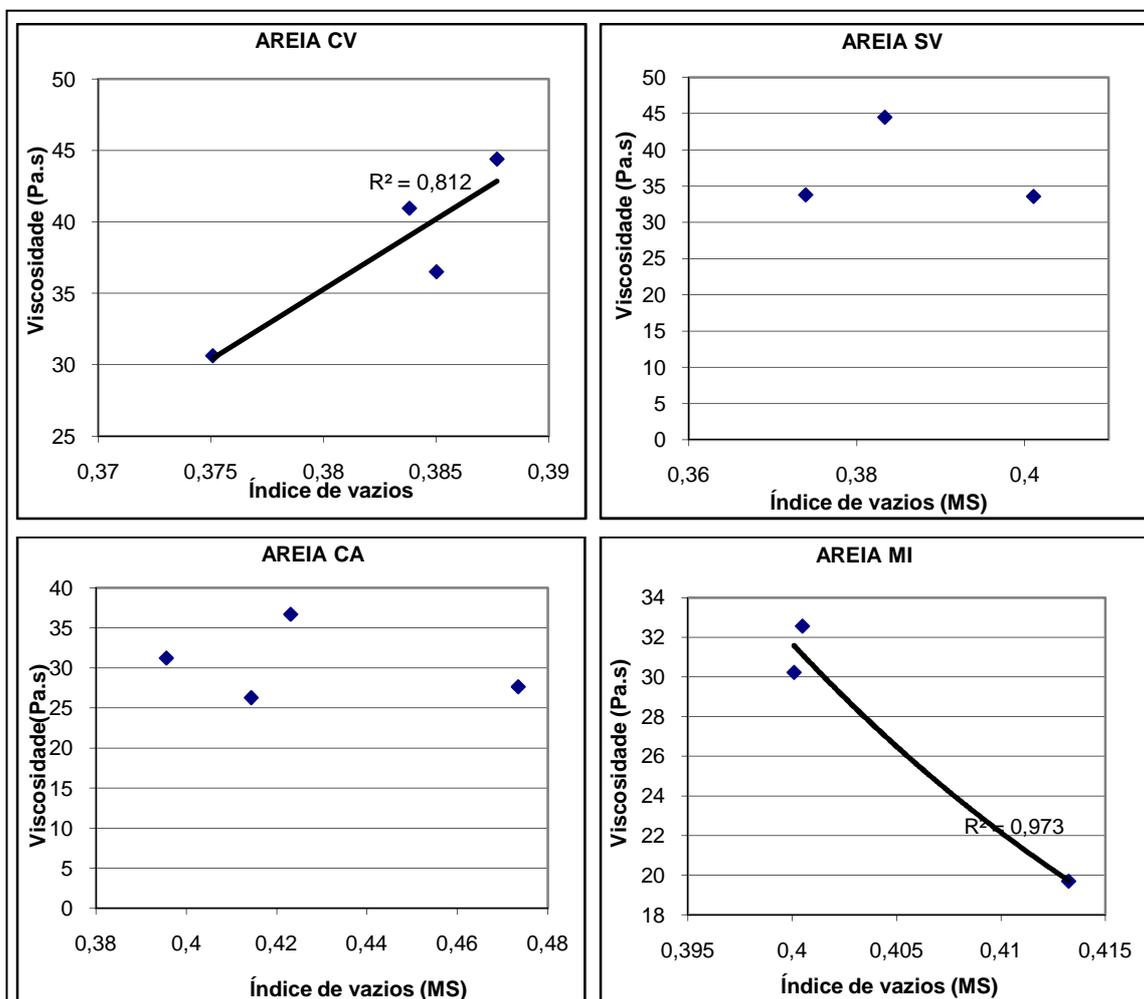


Figura 4.49 – Correlação entre viscosidade e grau de continuidade considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Ao se analisar figura 4.49, fica clara a correlação entre grau de continuidade e viscosidade apenas para os concretos confeccionados com a areia MI e areia CA, sendo a viscosidade tanto menor quanto mais descontínua a areia MI e o inverso acontece com a areia CA . É interessante notar também pela supracitada figura que em relação à areia CV, apesar de não apresentar correlação satisfatória, se descartado o primeiro ponto haveria tendência de uma elevação da viscosidade com o aumento da descontinuidade da curva.

Na figura 4.50 a seguir estão representadas as possíveis correlações entre índice de vazios e viscosidade.

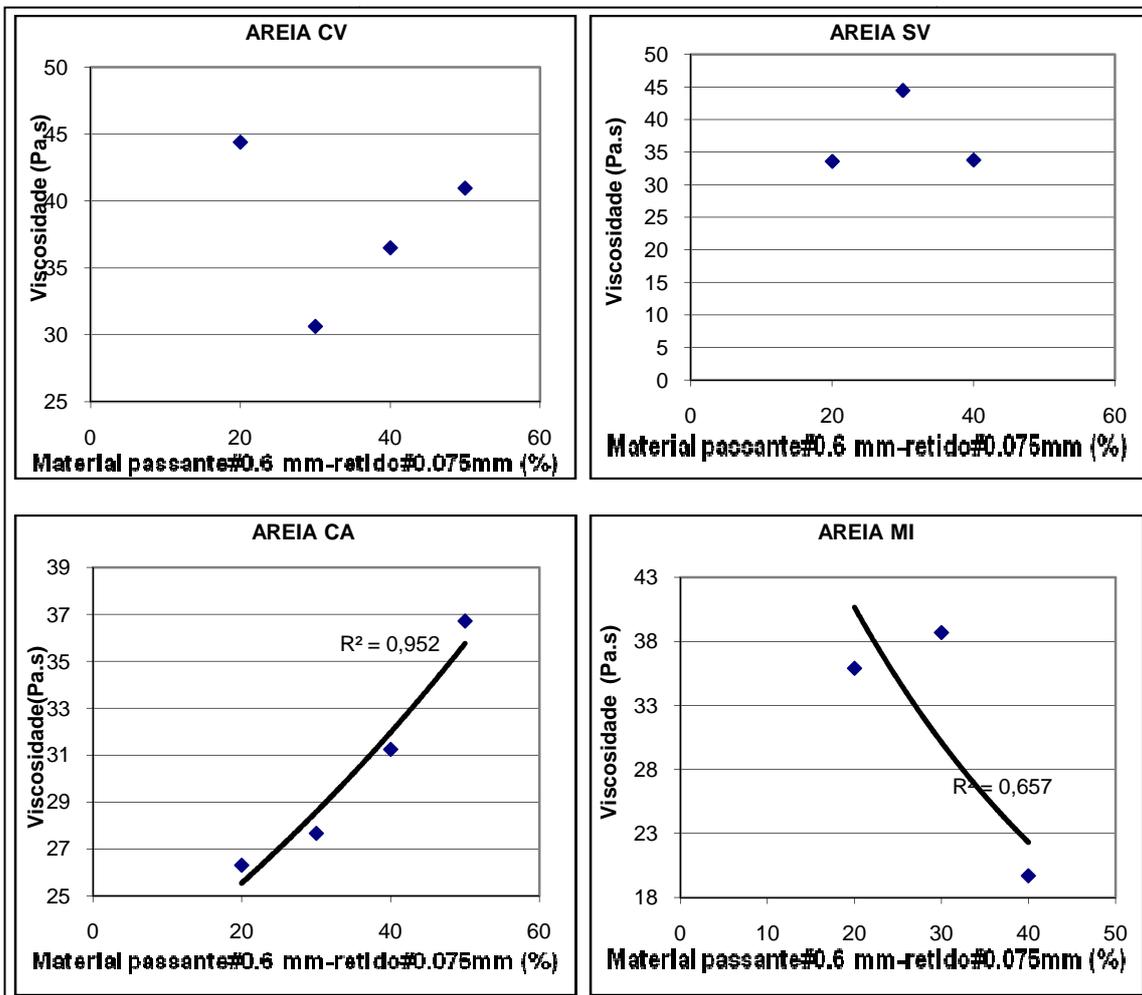


**Figura 4.50** – Correlação entre viscosidade e índice de vazios MS considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.50 nota-se que houve correlação significativa entre o índice de vazios MS e viscosidade apenas para as areias CA e MI. Em relação à areia CA, nota-se que não houve tendência definida de aumento da viscosidade dos concretos, com o também

aumento do índice de vazios das composições, o que já é preconizado pela literatura atual. No entanto, ao se observar a correlação das misturas produzidas com as composições da areia MI, nota-se que quanto maior o índice de vazios, menores os resultados de viscosidade, o que vai de encontro com a bibliografia consultada. Cabe salientar aqui que, apesar de em muitos itens se proceder à correlação dos índices de vazios com as propriedades no estado fresco dos concretos produzidos neste estudo, é importante notar que os resultados de tais índices se encontram muito próximos, mesmo considerando todas as areias utilizadas.

A figura 4.51 a seguir mostra as possíveis correlações existentes entre o material passante da peneira 0.6 mm e retido na peneira 0.075 mm e viscosidade.



**Figura 4.51** – Correlação entre viscosidade e material passante na peneira 0.6 mm - retido peneira 0.075 mm considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.51, nota-se que, na tentativa de correlação entre o percentual de material passante da peneira 0.6 mm e retido na peneira 0.075 mm e viscosidade dos concretos,

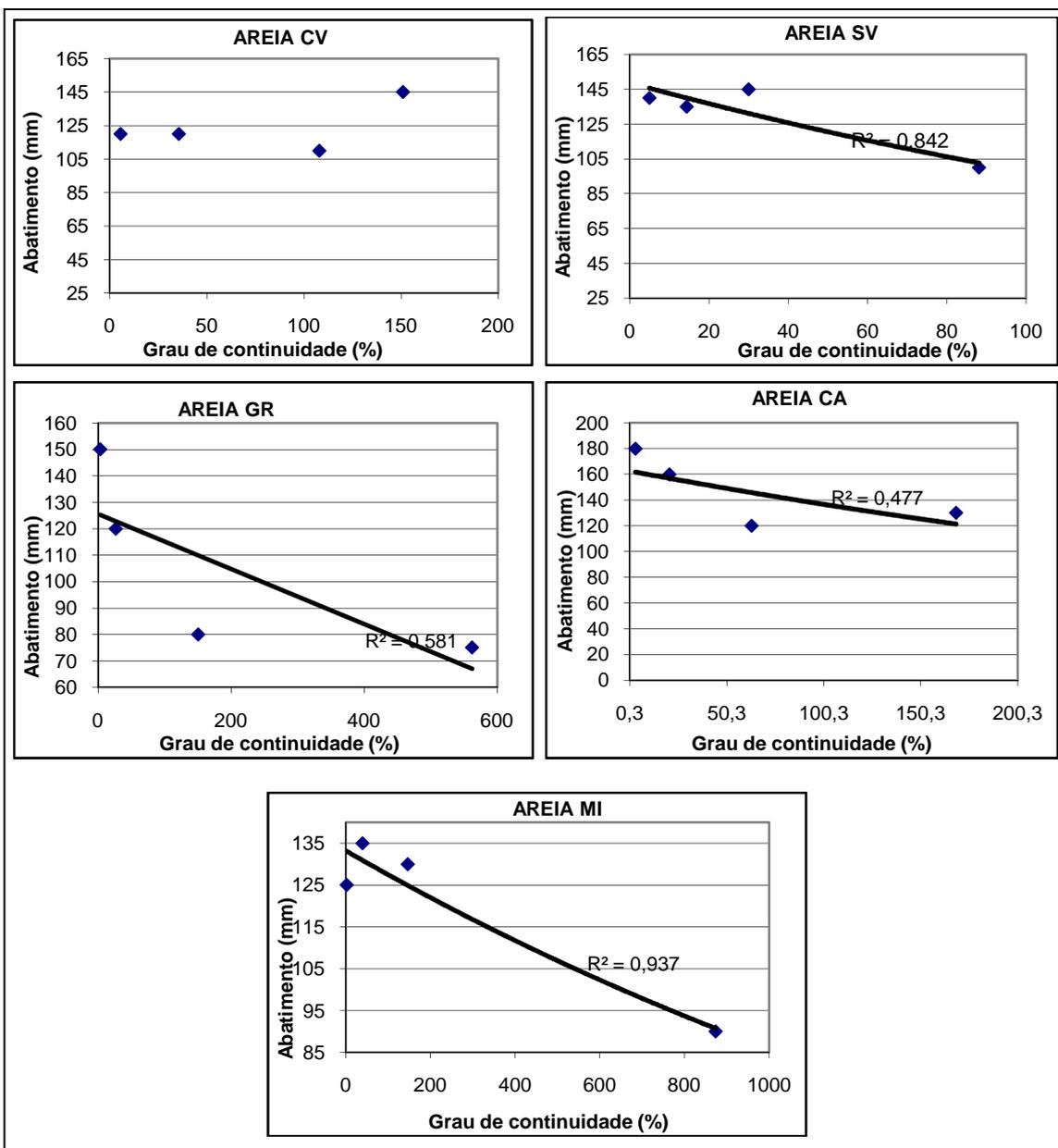
as únicas misturas que apresentaram correlação satisfatória foram aquelas produzidas com a areia CA, no qual percebe-se que quanto maior o teor destes grãos, maior o valor da viscosidade encontrada, enquanto que os resultados dos concretos com areia MI parecem ser resultado contraditórios se levado em consideração os trabalhos consultados da bibliografia publicados até o presente momento (quanto maior o teor de material passante na peneira 0,6 mm e retido na peneira 0,075 mm, maior os valores da viscosidade).

Pelo que foi exposto acerca da variável reológica viscosidade e de acordo com os resultados dos concretos, pode-se dividir os agregados em dois grupos distintos: o grupo das areias cuja maior continuidade resultou em menores valores de viscosidade e outro no qual a descontinuidade dos agregados miúdos resultou em decréscimo nos valores desta propriedade. Do primeiro grupo, podem ser incluídos os concretos produzidos com as areias SV e GR, já no segundo, estão incluídas as areias CV, CA e MI. Ao se estudar mais detalhadamente as curvas de continuidade e os resultados nos concretos, nota-se que a mistura mais contínua proporcionou um decréscimo na viscosidade das areias SV (SV 80-20) e GR (GR 80-20). Já em relação às areias CV e CA, as composições com maior nível de continuidade (CV 80-20) e (CA 70-30) resultaram nos maiores valores de viscosidade, enquanto que o agregado miúdo MI obteve menor viscosidade com uma das curvas mais descontínuas dentre as composições (MI 60-40). Ao se relacionar os menores resultados de viscosidade, percebe-se que estes foram alcançados ao se usar as composições CV 70-30 (30.63 Pa.s); SV 80-20 (33.57 Pa.s); GR 80-20 (29.03 PA.s); CA 80-20 (26.3 Pa.s) e MI 60-40 (19.69 Pa.s). Como já discutido no item 4.1.2.1, a areia MI possui grãos menos equidimensionais (com relação RE igual a 0.25) do que as areias CV (RE=5.67), SV (RE=0.63), GR (RE=1,31) e CA (RE=0.5). Com base nesse dados, na areia menos esférica, houve necessidade de material mais fino para amenizar o formato pouco favorável (caso do agregado miúdo MI), pois que provavelmente os grãos mais grossos são os principais responsáveis pela fricção interna. Assim, diminuindo-se o teor de grãos grossos e substituindo-se pelos mais finos, os mesmos possivelmente propiciaram um deslizamento entre as camadas de fluxo mais rápido da massa de concreto no ensaio de abatimento modificado, reduzindo o atrito interno entre os grãos grossos e entre este e a haste do ensaio, diminuindo assim a viscosidade de tais misturas. Já com relação aos demais agregados miúdos que são medianamente esféricos (areias SV, GR e CA), e a areia CV que se apresentou bastante

equidimensional, os resultados de viscosidade se mostraram baixos mesmo com as composições desses agregados contendo alto teor de grãos grossos.

#### 4.2.2.1.3 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm no abatimento de tronco de cone

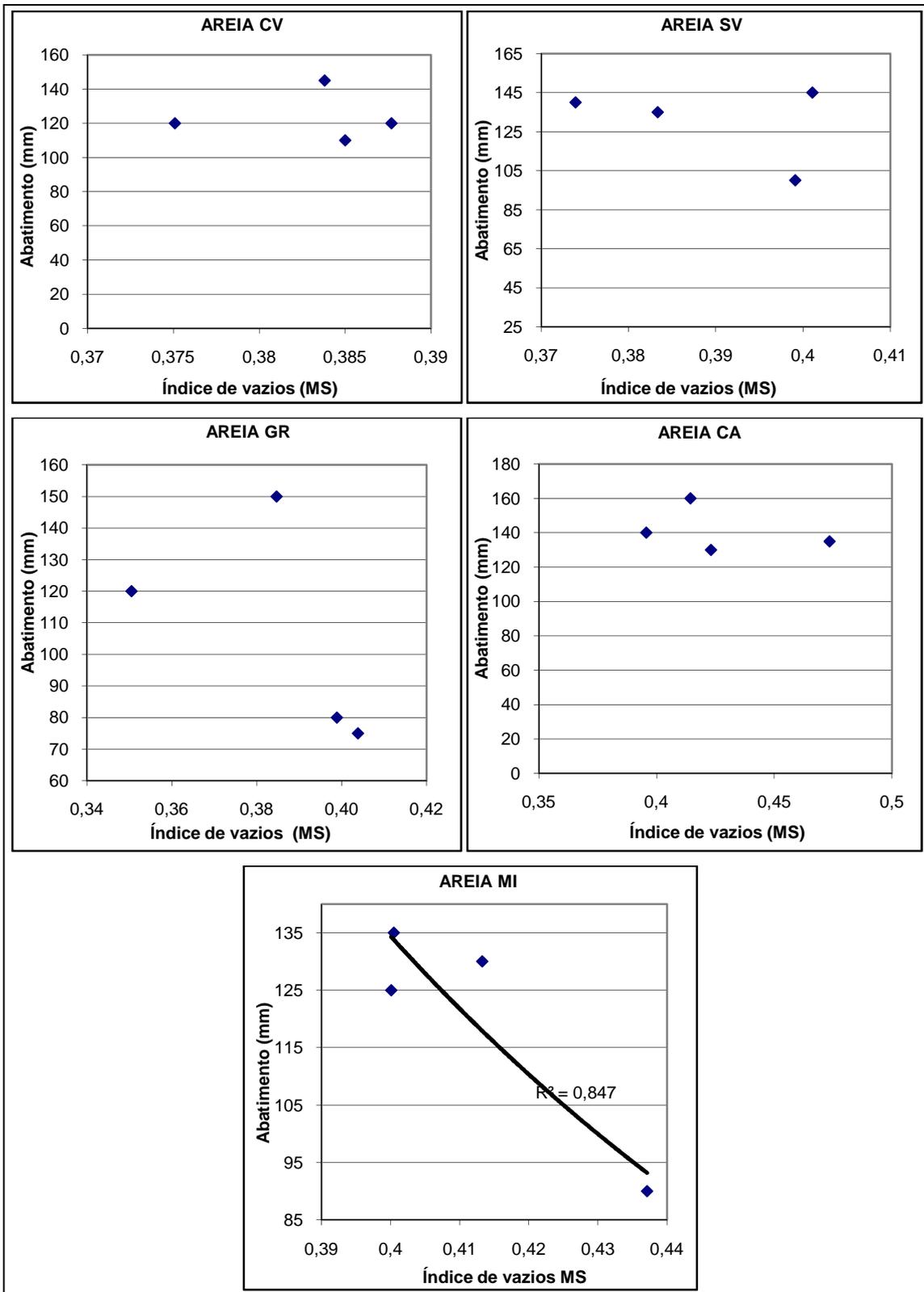
No presente item serão apresentadas as possíveis correlações entre as relações granulométricas realizadas a partir das composições e o ensaio de abatimento de tronco de cone. Estas correlações estão apresentadas da figura 4.52 a 4.54 expostas a seguir.



**Figura 4.52** – Correlação entre abatimento de tronco de cone e grau de continuidade, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.52 pode-se notar que houve correlação significativa entre abatimento e grau de continuidade em relação às areias MI e SV, razoável para a areia GR e não significativa para as areias CV e CA. Quando a correlação se mostrou significativa, houve uma tendência de aumento do abatimento de tronco de cone quanto maior a continuidade das composições. Este resultado condiz com o preconizado por Faury para o qual haveria uma otimização da consistência quanto mais contínua a curva de agregados. Já em relação às areias CV e CA, estas apresentaram altos valores de abatimento de tronco de cone mesmo em composições descontínuas, sendo o abatimento máximo da primeira alcançado com a composição CV 50-50 (145 mm) e em relação à segunda CA 80-20 (160 mm), fato estes também em concordância com resultados de alguns trabalhos científicos como os citados por DE LARRARD (1999) e QUIROGA E FOWLER (2005).

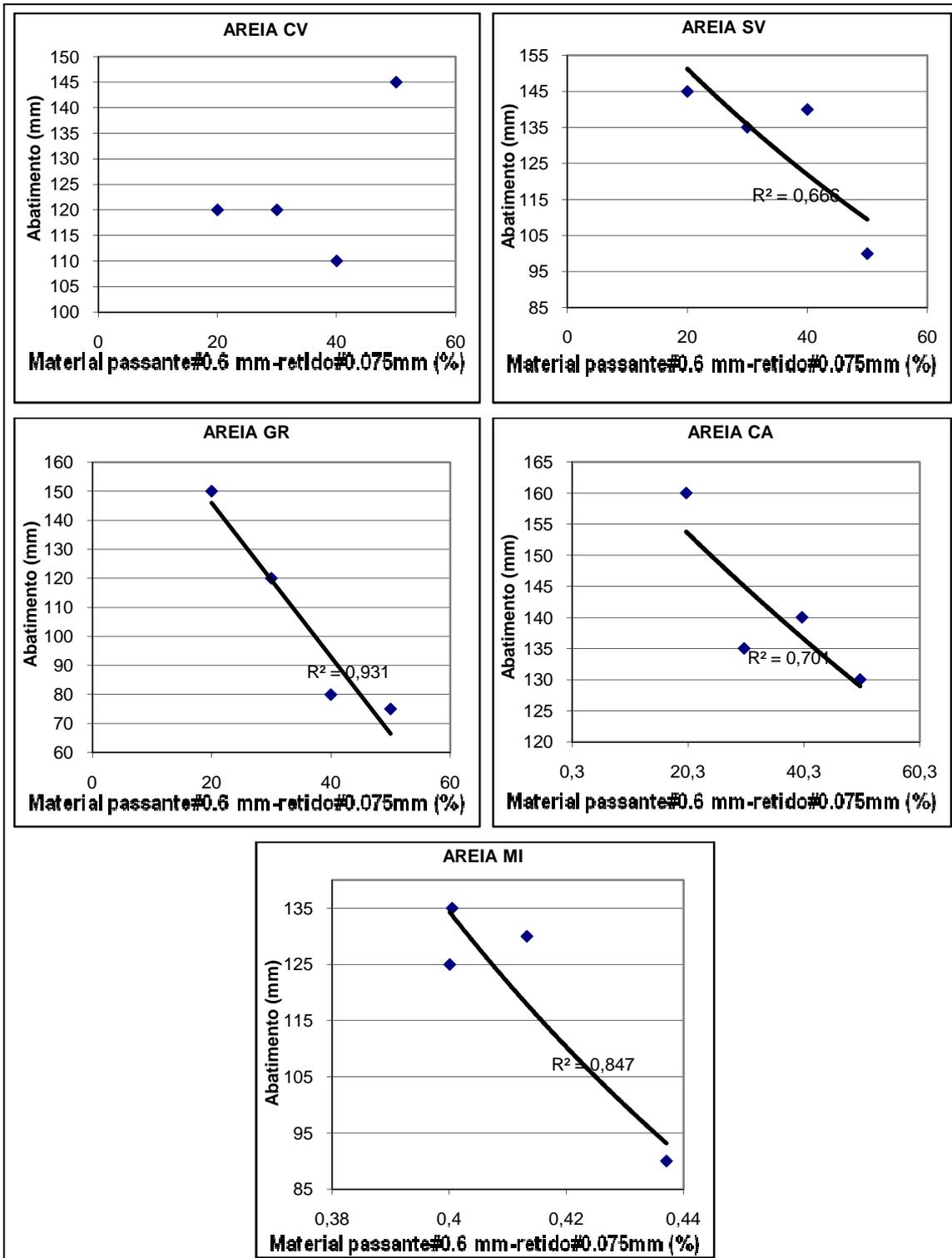
A figura 4.53 a seguir apresenta as possíveis correlações entre o ensaio de abatimento e índices de vazios MS.



**Figura 4.53** – Correlação entre abatimento de tronco de cone e índice de vazios MS considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.53 apresentada anteriormente, nota-se que a única areia que obteve composições com correlação satisfatória entre índice de vazios MS e abatimento foi a MI, sendo tanto maior o abatimento quanto menos vazios presentes nas composições. Em outras palavras, para a areia MI, quanto maior a compacidade dos agregados, mais fluidos os concretos. Apesar das correlações com baixa significância das areias SV, GR e CA, percebe-se que este fato aconteceu devido a um ponto discrepante na curva, e que sem este, as composições teriam a mesma tendência encontrada para a areia MI. Os pontos discrepantes, isto é, os pontos onde houve incremento no resultado de abatimento, mesmo sendo os valores de índice de vazios MS altos, foram encontrados nas composições GR 80-20, CA 80-20, SV 80-20 e CV 50-50. Nota-se, pelos resultados, que mesmo um alto teor de materiais médio-finos (passante peneira 0.6 mm e retido na peneira 0.075 mm) da areia CV (50%), não impediu a alta fluidez, com abatimento igual a 145 mm.

A figura 4.54 a seguir mostra as correlações entre os resultados de abatimento de tronco de cone e o teor de material passante na peneira 0.6 mm e retido na peneira 0.075 mm.



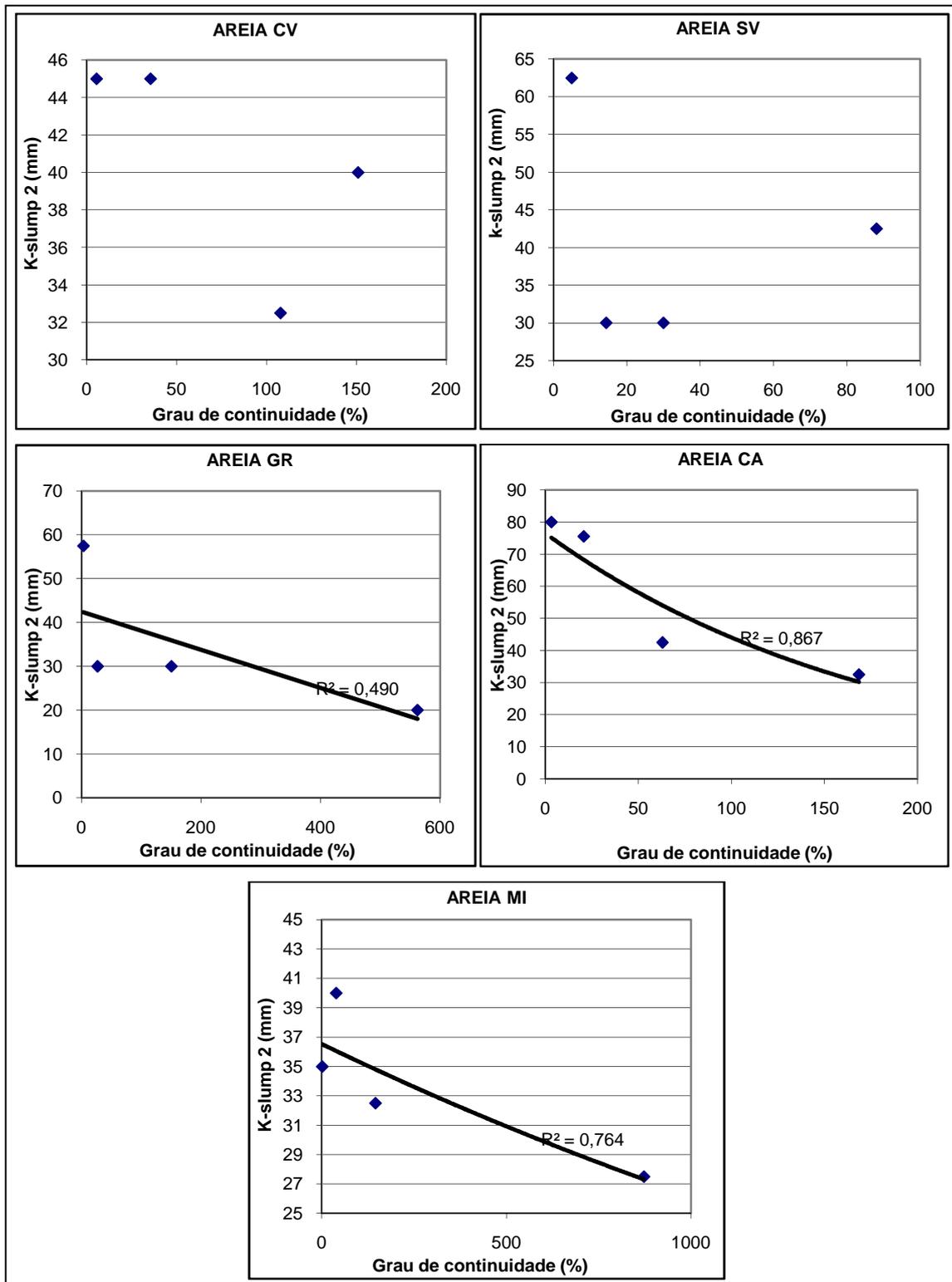
**Figura 4.54** – Correlação entre abatimento de tronco de cone e material passante peneira 0.6mm – retido peneira 0.075 mm considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Estão explicitadas na figura 4.54 as correlações entre o teor de material médio-fino e o abatimento de tronco de cone, sendo tanto mais consistente o concreto quanto maior o percentual de material médio-fino nas areias SV, GR, CA e MI. Este resultado está, de certa forma, em concordância com o publicado por MURDOCK citado por HUDSON (1999) onde tal autor afirma que a faixa de tamanhos de grãos que mais influencia em termos de consistência no concreto fresco está compreendida entre 1.2 mm a 0.15mm, sendo tanto mais consistentes os concretos quanto maiores os teores de grãos situados nesta faixa granulométrica. Não obstante a esse fato, os concretos produzidos com a areia CV não apresentaram correlação significativa.

4.2.2.1.4 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm na *k-slump 2*

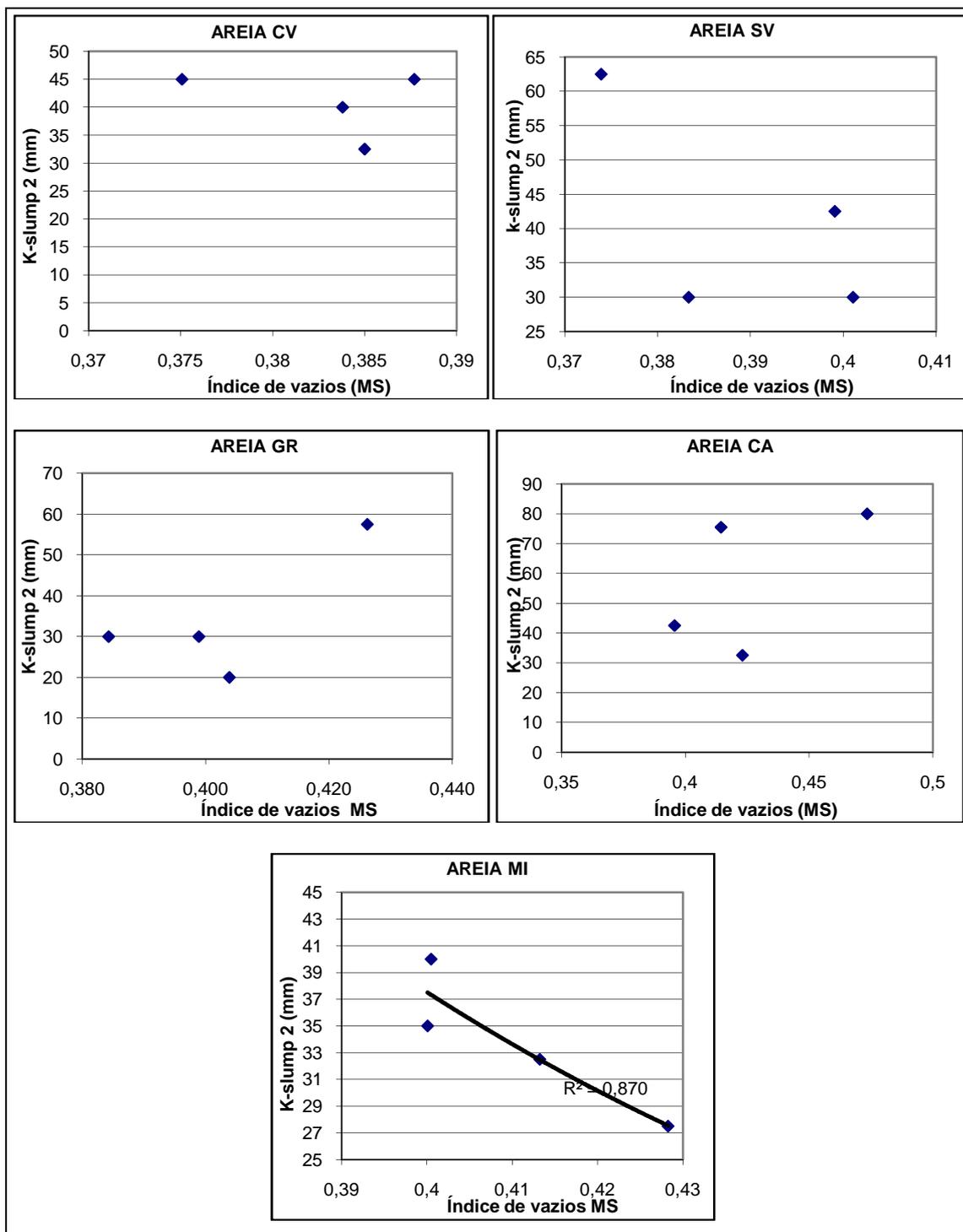
Nas figuras 4.55 a 4.57 a seguir estão expressas as correlações entre os valores do ensaio *k-slump 2* e as variáveis independentes consideradas neste programa experimental.

Pela figura 4.55 a seguir percebe-se que não houve correlação significativa entre grau de continuidade e *k-slump 2* para a maioria das composições das diversas areias, com exceção daquelas compostas com areia MI, onde quanto maior o grau de descontinuidade das areias, mais consistente resultaram os microconcretos.



**Figura 4.55** – Correlação entre *k-slump 2* de tronco de cone e grau de continuidade, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

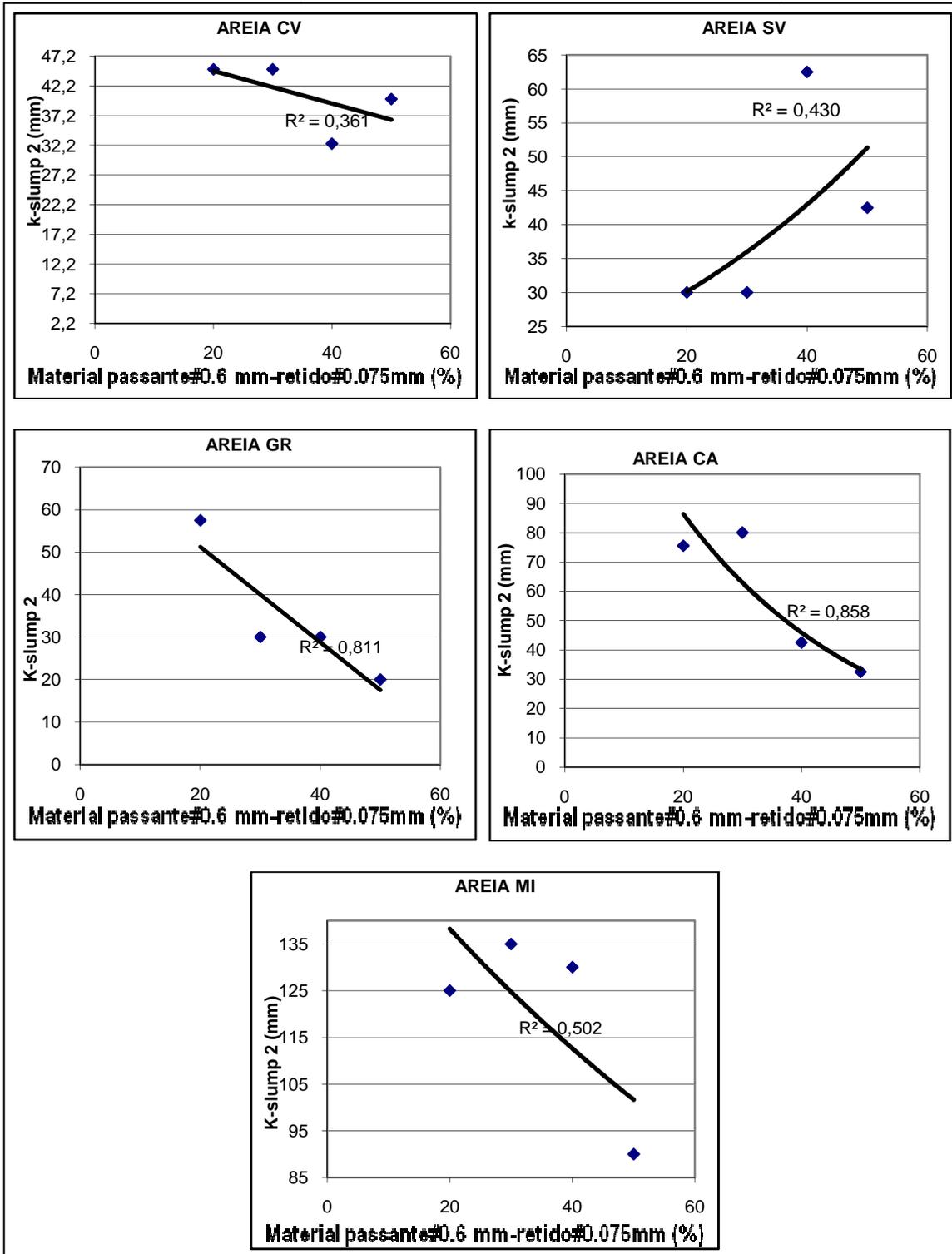
A figura 4.56 a seguir expressa as correlações entre índice de vazios das composições das areias britadas e a variável dependente consistência mensurada através do *k-slump 2*.



**Figura 4.56** – Correlação entre *k-slump 2* índices de vazios, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.56 percebe-se que, mais uma vez, a única areia que resultou em correlação entre os resultados de consistência do microconcreto pelo *k-slump 2* e o índice de vazios obtido com a massa unitária no estado solto foi a areia MI, sendo o microconcreto tanto mais fluido quanto maior a compactidade das composições (menor valor de índice de

vazios). Quanto às demais areias, este resultado pode indicar que outro fator esteja influenciando mais decisivamente na consistência dos microconcretos.



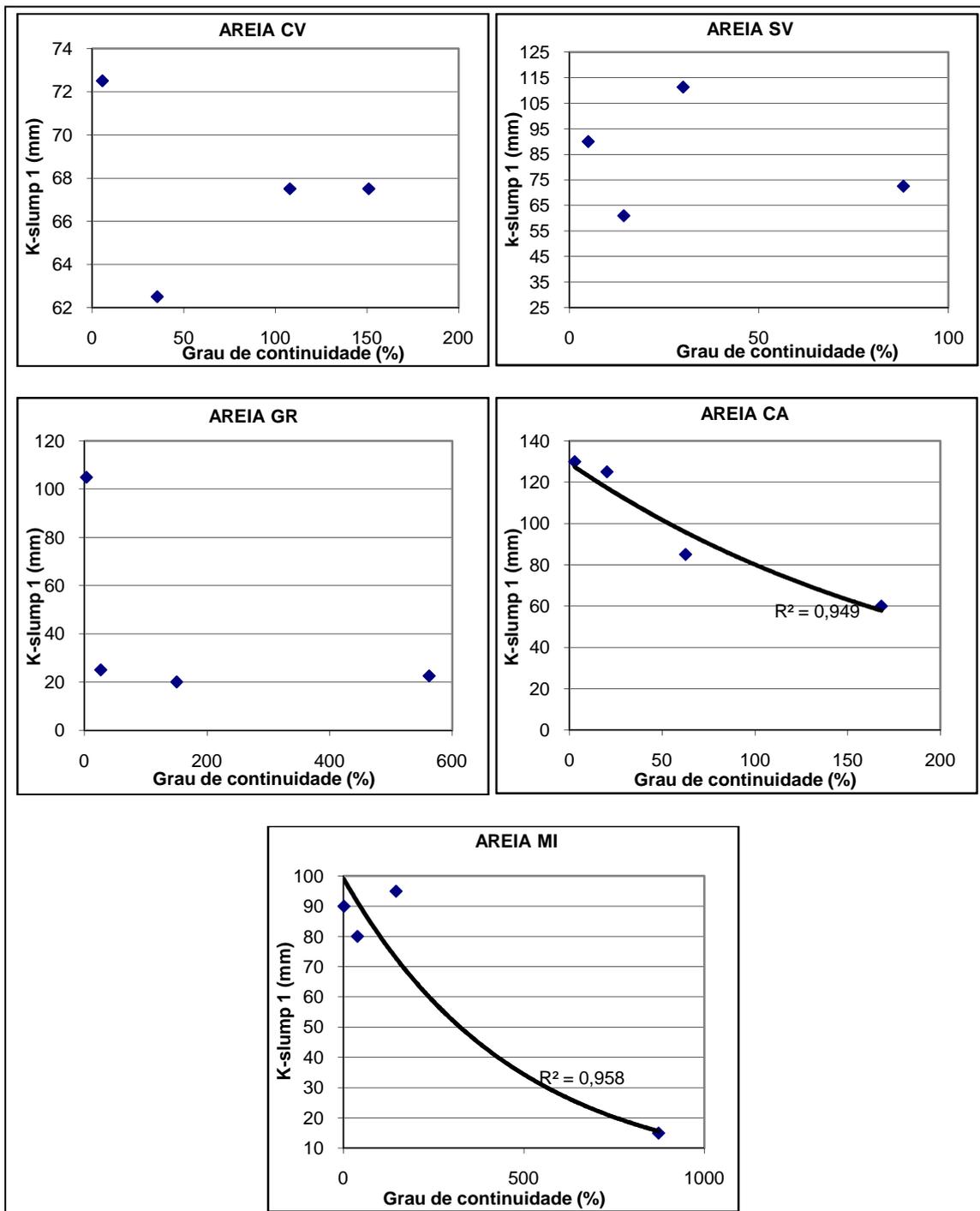
**Figura 4.57** – Correlação entre *k-slump 2* e material passando na peneira 0.6 mm – retido na peneira 0.075 mm, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.57 exposta anteriormente pode ser considerado que apenas duas areias apresentaram correlação significativa entre o material médio-fino de suas composições e o *k-slump* 2: as areias GR (melhor correlação) e a areia MI (correlação razoável). Por meio dessas correlações pode ser inferido que quanto maior o teor de grãos na faixa médio-fino, menos fluidos os microconcretos das duas areias resultaram. Pelo apresentado até o presente momento, nota-se que as relações granulométricas utilizadas neste trabalho foram pouco correlacionáveis com a consistência mensurada pelo *k-slump* 2. No entanto, considerando além das figuras anteriores as tabelas 4.10 a 4.14 e 4.15 a 4.16, percebe-se que as curvas granulométricas de maior continuidade resultaram no microconcreto mais fluido nas composições de três das cinco areias britadas consideradas neste estudo (areias CV, SV e GR).

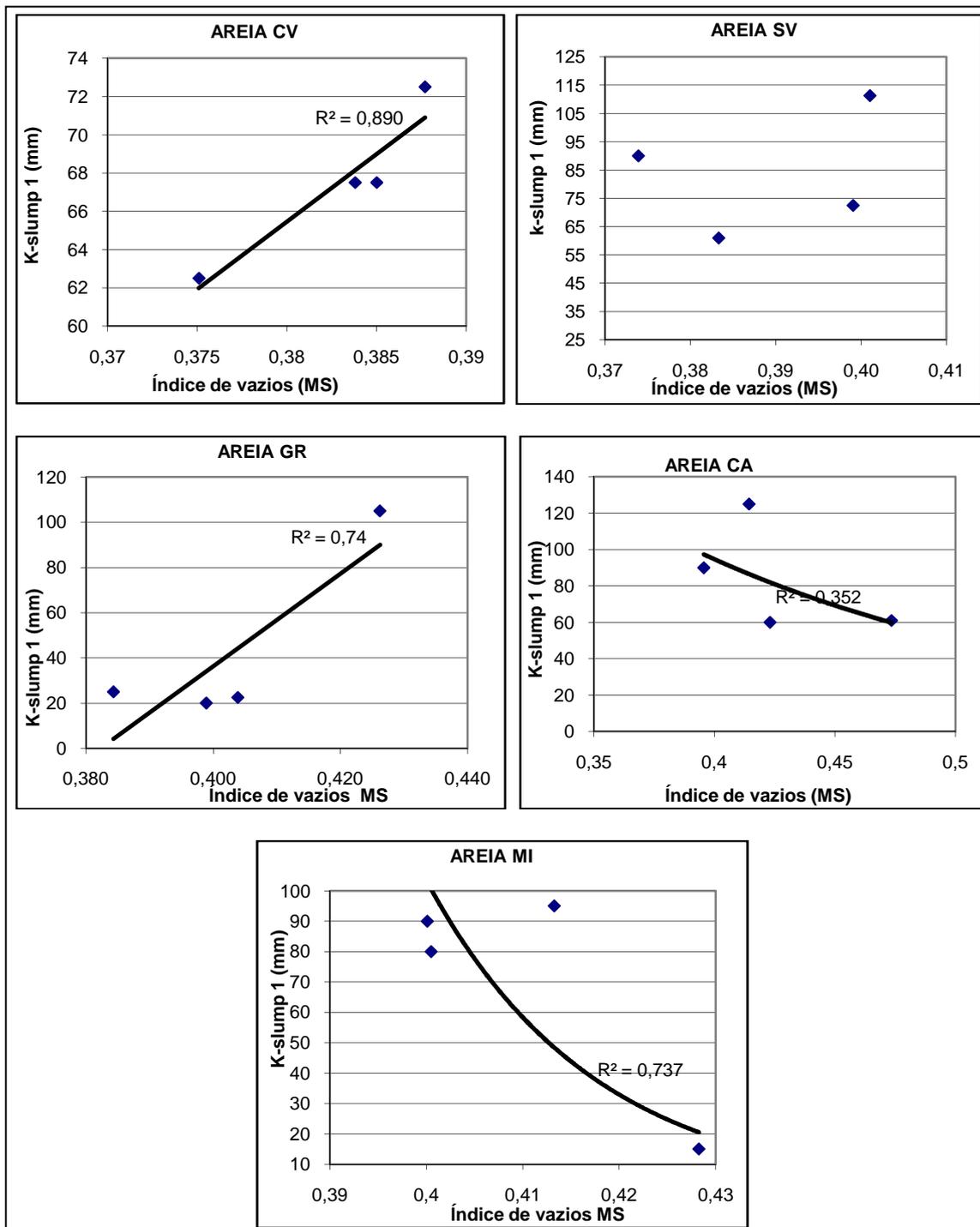
4.2.2.1.5 – Influência do grau de continuidade, índices de vazios e teor de material passante na peneira 0.6 mm no *k-slump* 1

Nas figuras 4.58 a 4.60 serão procedidas as tentativas de correlação entre a segregação mensurada pelo *k-slump* 1 e as relações granulométricas consideradas neste projeto experimental 2.

Pela figura 4.58 – correlações entre segregação (*k-slump* 1) e grau de continuidade das composições de agregados – percebe-se que, mais uma vez as composições da areia MI foram as únicas que apresentaram correlação significativa ( $R^2 = 0.958$ ) e, da figura, pode-se inferir que quanto mais descontínua a curva de agregados, menos segregável o concreto, pelo menos para tal areia.



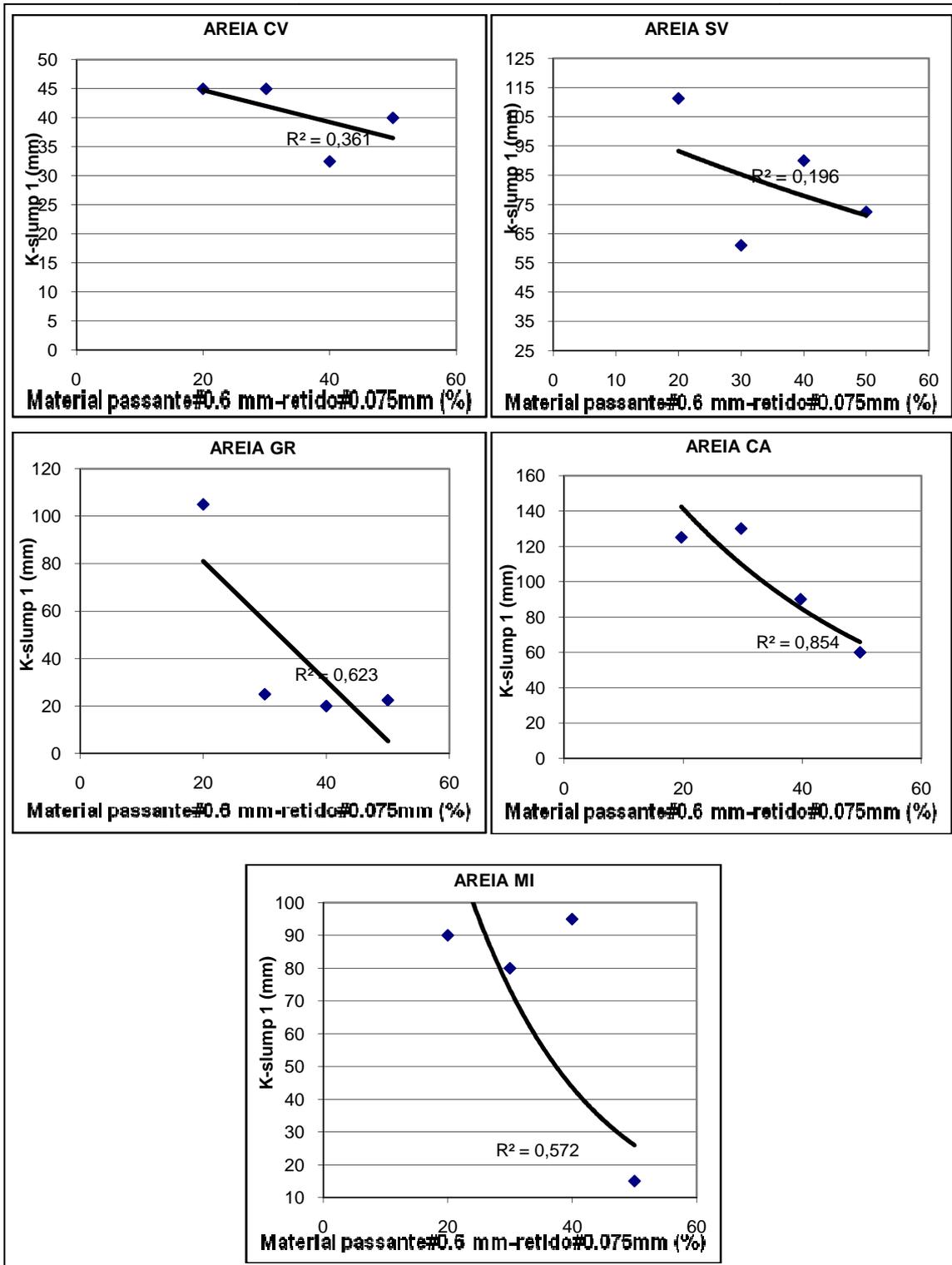
**Figura 4.58** – Correlação entre *k-slump 1* e grau de continuidade, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2



**Figura 4.59** – Correlação entre *k-slump 1* e índice de vazios MS, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Pela figura 4.59 pode-se inferir que o índice de vazios encontrado com a massa unitária no estado solto se correlaciona com a segregação nas areias CV e MI, sendo tanto mais segregável o concreto quanto maior o índice de vazios das areias para a primeira, e o contrário, considerando a segunda areia. O que se encontrou na bibliografia consultada

é justamente o contrário do apresentado pela areia MI, ou seja, quanto maior o volume de vazios, mais segregável as misturas se tornam.



**Figura 4.60** – Correlação entre *k-slump 1* e material passante peneira 0.6 mm – retido peneira 0.075 mm, considerando as diversas areias e composições – Projeto experimental 2

Ao se analisar a figura 4.60 anterior nota-se que as correlações entre o teor de material médio-fino e a segregação foram alcançadas nas composições de apenas duas areias (GR e MI) e estas correlações foram apenas razoáveis, mas mesmo assim pode-se inferir para as duas areias que quanto maior o teor de material médio-fino (passante na peneira 0.6 mm e retido na peneira 0.075 mm), menor a segregação dos concretos realizados com estas.

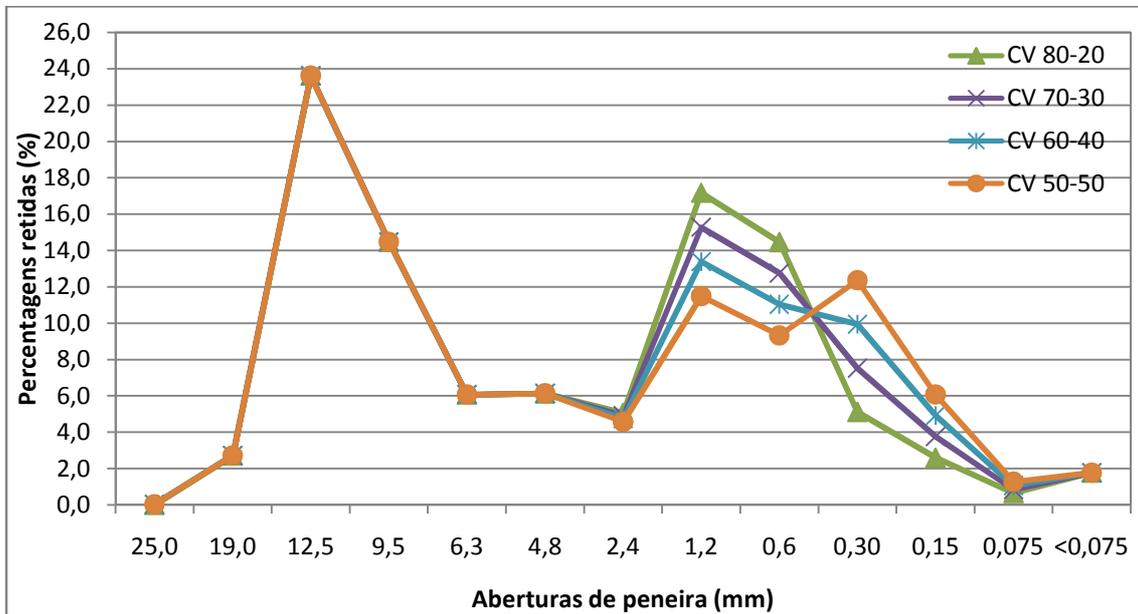
Apesar das poucas correlações entre segregação mensurada pelo *k-slump* 1 e as correlações e índices considerados neste projeto experimental 2, notou-se que os maiores valores de segregação foram encontrados para as composições 80-20 de todas as areias, menos a MI que resultou em maior segregação com a composição MI 60-40. Não obstante esta última areia, os resultados das demais se mostrou bastante lógico, já que, quanto maior o teor de material médio-fino se tem, maior a área específica e geralmente mais coeso o concreto, diminuindo-se assim a segregação das misturas.

#### 4.2.2.1.6 – Influência das faixas granulométricas no empacotamento granular nas propriedades reológicas

Pelas análises realizadas até o presente momento nota-se que apesar de algumas correlações satisfatórias os índices e relações adotados até o presente momento representaram apenas em parte o comportamento dos concretos realizados neste projeto experimental 2. Na tentativa de explicar melhor alguns desempenhos, neste item será procedida uma análise geral das propriedades estudadas com base em algumas das teorias sobre empacotamento granular exposta no trabalho de DE LARRARD (1999). De acordo com tal autor, ao explanar a teoria sobre compacidade e seus efeitos benéficos sobre as propriedades dos concretos no estado fresco, uma das formas de diminuir a compacidade de misturas granulares seria a presença de uma quantidade significativa de grãos intermediários que provocariam o efeito de afastamento entre os grãos mais grossos e, se a mistura granular não dispuser de grãos muito finos para preencher o espaço vazio causado por esse efeito de afastamento, o empacotamento granular resulta comprometido.

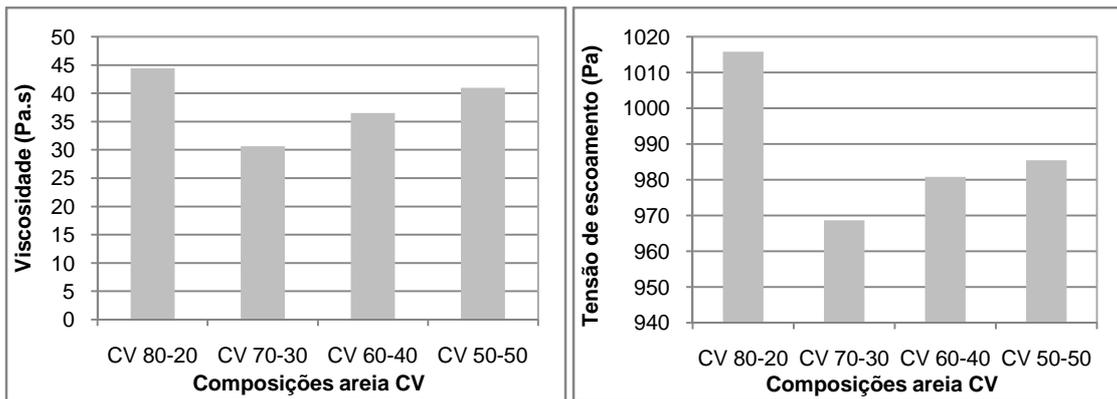
Ao se analisar as figuras 4.61 e 4.62 abaixo, onde estão representadas as percentagens retidas em cada peneira das curvas de agregados graúdos (brita1 e brita 0) e as

composições da areia CV, pode-se verificar que a curva CV 80-20 apresenta um pico no percentual da peneira de abertura de malha 1.2 mm, como também alto teor de material retido na peneira 0.6 mm o que pode ratificar a análise sugerida no item 4.2.2.1.1. Além disso, de acordo com De Larrard (1999), ao explicar a teoria sobre compactidade e seus efeitos benéficos sobre as propriedades no estado fresco dos concretos, uma das formas de diminuir a compactidade de misturas granulares seria a presença de uma quantidade significativa de grãos intermediários que provocariam o efeito de afastamento entre os grãos dominantes e, se a mistura granular não dispuser de grãos capazes de preencher o espaço vazio causado por tal efeito de afastamento, o empacotamento granular resulta comprometido.



**Figura 4.61** – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições areia CV

Pela figura 4.61 nota-se que as composições têm como fração dominante os grãos de diâmetro 12.5 mm e que pode-se então considerar como intermediários das faixas 12.5 mm a < 0.075 mm os grãos das frações 2.4, 1.2 mm e/ou 0.6 mm. Na figura 4.62 abaixo estão apresentados os resultados de viscosidade e tensão de escoamento destas composições.



**Figura 4.62** – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – areia CV

Nota-se que os resultados mais altos de tensão de escoamento e viscosidade foram obtidos com as composições que possuem os mais altos teores de grãos com 1.2 e 0.6 milímetros de diâmetro (composição CV 80-20), apesar desta se tratar da composição mais contínua. Ao se diminuir os teores destes grãos juntamente com um ligeiro aumento dos grãos menores ou iguais a 0.3 mm de diâmetro (CV 70-30), provavelmente foi minimizado o efeito dos grãos intermediários e também houve um maior preenchimento dos vazios ocasionados por estes últimos. Ao se diminuir ainda mais o teor de grãos das frações intermediárias (1.2mm e 0.6 mm), estas possivelmente deixaram de exercer efeitos negativos em relação às outras duas composições (CV 60-40 e CV 50-50), no entanto, o aumento dos grãos de outras frações tais como 0.3 mm, provavelmente tornou-os materiais de tal fração intermediária, potencializando seu efeito entre as frações 1.2mm a 0.15 mm, resultando no aumento da viscosidade e tensão de escoamento se comparados estes resultados com os obtidos pela composição CV 70-30.

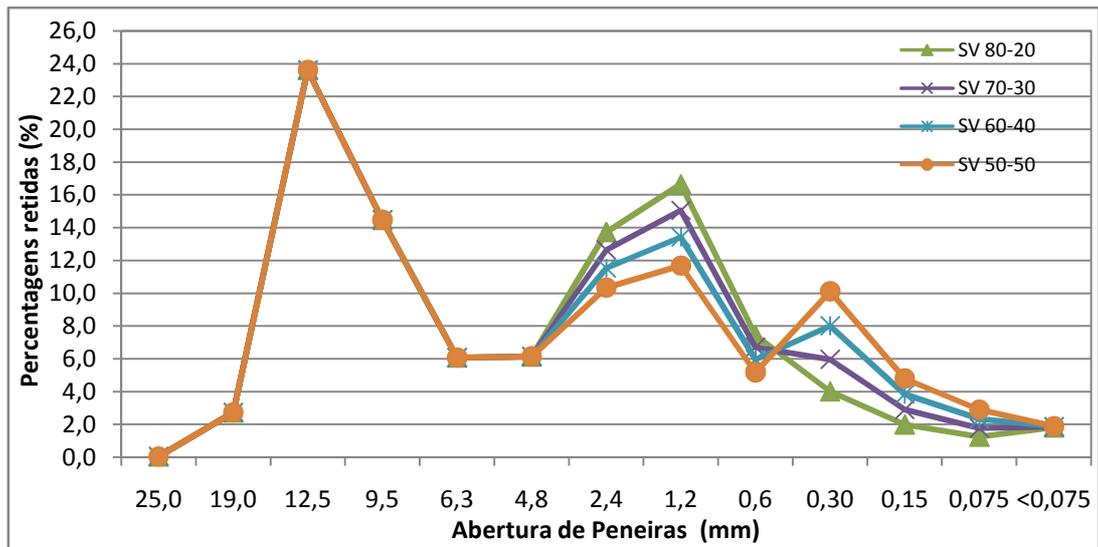


Figura 4.63 – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições areia SV

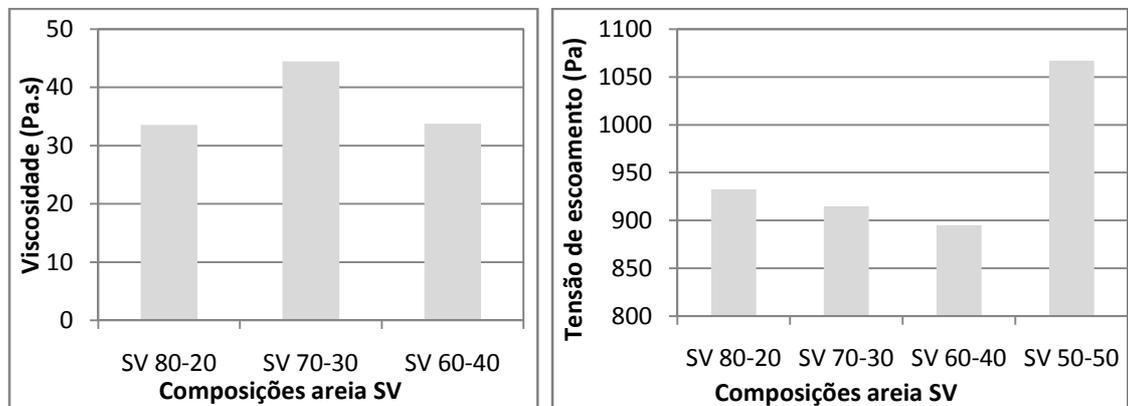


Figura 4.64 – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – areia SV

Pela figuras 4.63 e 4.64 percebe-se que os valores mais altos de tensão de escoamento e viscosidade foram obtidos nos concretos cujas composições de agregados se encontram o maior percentual de grãos com diâmetros intermediários. Ao se realizar uma análise mais amíúde sobre as curvas granulométricas, percebe-se que a composição SV 80-20 obteve percentuais altos de grãos nas faixas 2.4 mm e 1.2 mm, grãos estes que podem ser considerados intermediários e possui poucos grãos finos ou microfins os quais preencheriam os vazios que estes diâmetros intermediários provocam. Em relação à composição SV 70-30 (composição que apresentou maior continuidade segundo a curva de Faury), ocorreu situação similar, possuindo essa composição ainda altos teores de grãos intermediários e poucos grãos finos. A composição ótima da areia SV, em termos de resultados das propriedades reológicas (figura 4.64), foi a composição SV 60-40, que, apesar de possuir um aumento nos percentuais da fração 0.3 mm, em comparação às composições SV 80-20 e SV 70-30, parece que tal aumento não fez com que esta faixa específica propiciasse comportamento de grão intermediário entre as frações 1.2

mm e < 0.075 mm, e esta composição provavelmente foi beneficiada pela diminuição dos grãos de diâmetro intermediário (entre as frações 19mm a <0.075 mm), que seriam os diâmetros 2.4 mm e 1.2 mm, como também do ligeiro aumento de material fino. Já em relação à composição SV 50-50, com a diminuição nas quantidades de grãos intermediários da composição total (2.4 mm e 1.2 mm) e o aumento acentuado da fração 0.3 mm, parece que esta última se comportou como fração intermediária, ou seja, aumentou os vazios da composição granular entre os grãos 2.4 mm a 1.2 mm, e ao que parece culminou nos altos resultados de tensão de escoamento e viscosidade do concreto realizado com esta composição. Cabe salientar que não foi possível encontrar a viscosidade da composição CV 50-50 com o ensaio abatimento de tronco de cone modificado.

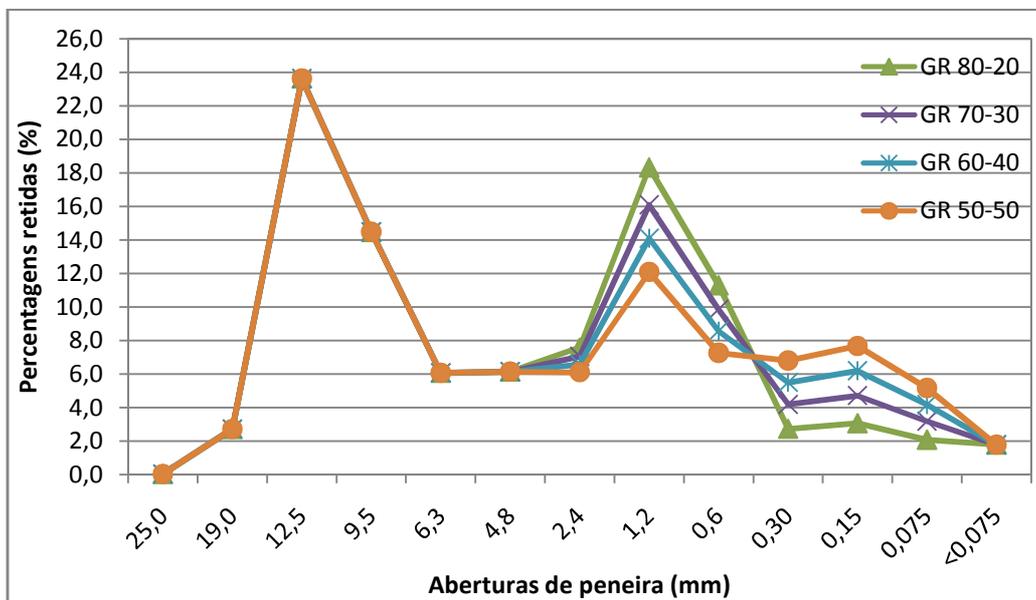


Figura 4.65 – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições areia GR

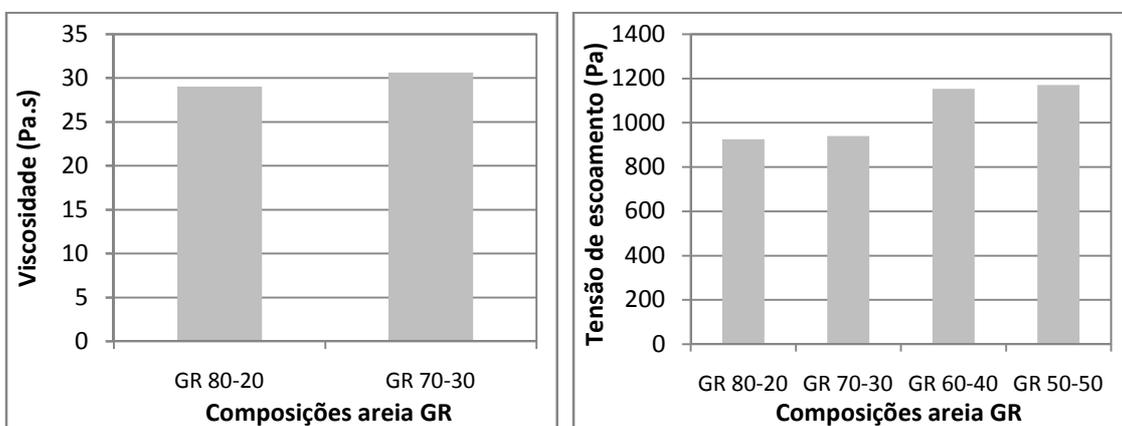
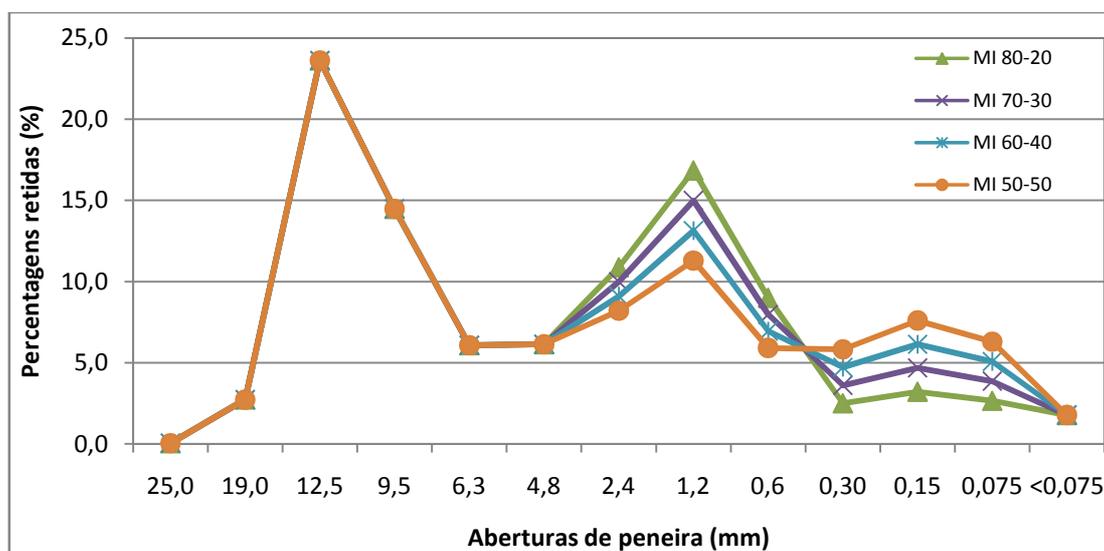


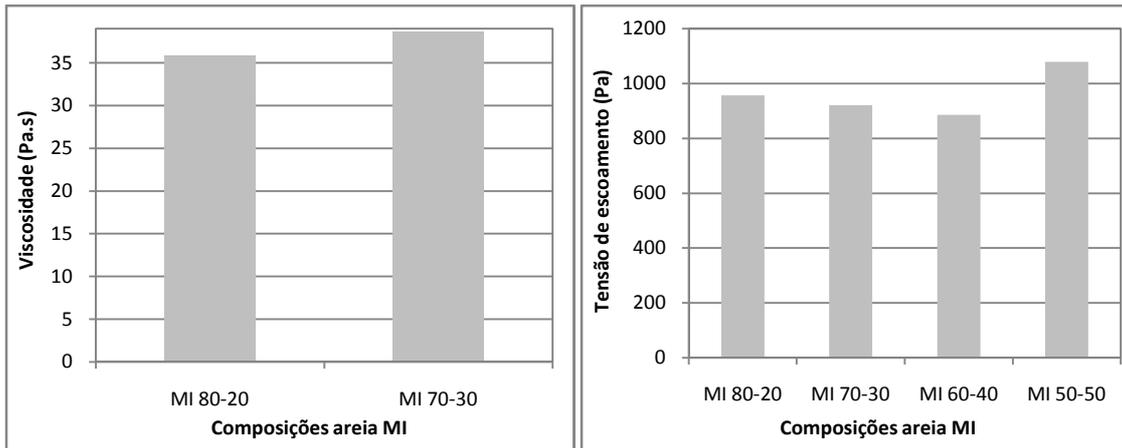
Figura 4.66 – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – areia GR

Pela figura 4.66 apresentada anteriormente nota-se que as composições GR 60-40 e GR 50-50 resultaram em comportamentos bastante parecidos entre si, cabendo aqui uma ressalva de que não foi possível obter os valores de viscosidade destas composições devido ao valor muito baixo de abatimento das mesmas (o mínimo seria em torno de 120 mm). Do mesmo modo, constata-se que os resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições GR 80-20 e GR 70-30 também foram similares.

Ao se comparar as distribuições granulométricas das quatro composições, pode-se verificar que os resultados mais baixos em termos de tensão de escoamento foram obtidos pelas composições possuidoras de altos teores de material com diâmetro inferior à peneira 0.6 mm (GR 60-40 e GR 50-50). As composições da areia GR, inclusive, dentre as analisadas até o presente momento são as que possuem os menores teores de grãos intermediários (grãos de diâmetros 2.4 mm, 1.2 mm e 0.6 mm) o que parece favorecer as composições GR 80-20 e GR 70-30, apesar do alto percentual da faixa 1.2 mm.

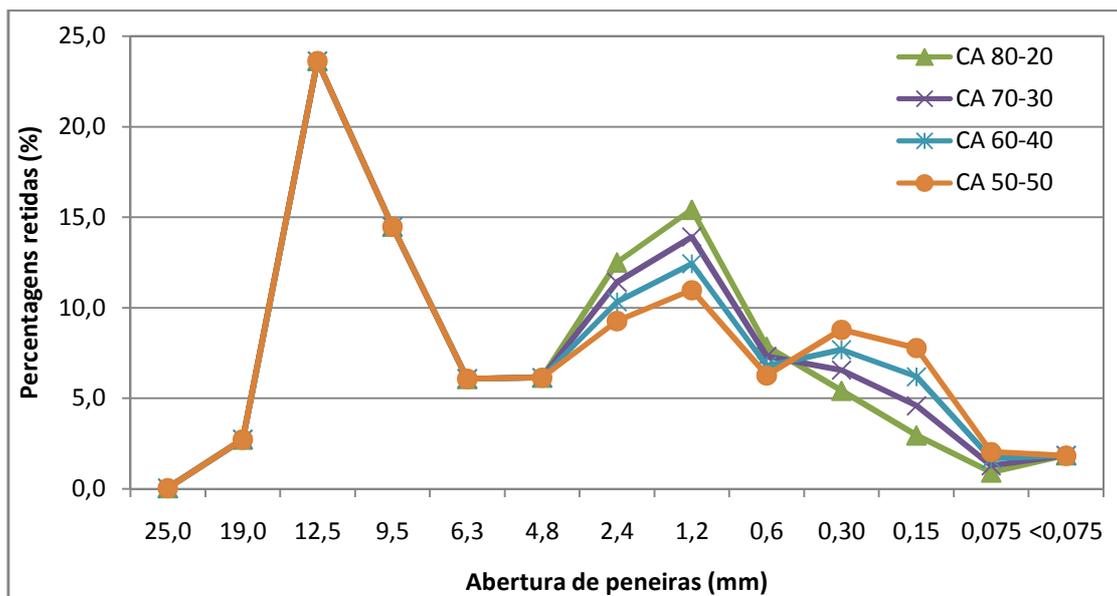


**Figura 4.67** – Percentagens retidas por peneiras agregados graúdos e composições – areia MI

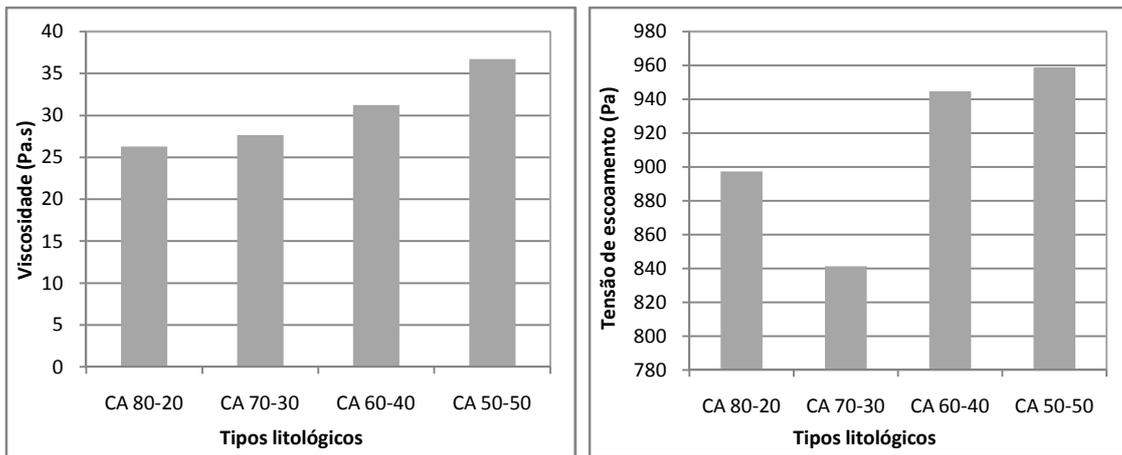


**Figura 4.68** – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – areia MI

Ao se analisar as figuras 4.67 e 4.68 expostas anteriormente, percebe-se que os resultados dos concretos confeccionados com as composições da areia MI apresentaram resultados um tanto similares ao da areia GR, tanto em relação à distribuição granulométrica de tais composições quanto nos resultados das variáveis reológicas. Ao se diminuir os percentuais de grãos das faixas intermediárias 2.4 mm, 1.2 mm e 0.6 mm houve também uma redução da tensão de escoamento das misturas, sendo esta apenas incrementada na mistura da composição MI 50-50, com o maior aumento da fração inferior a 0.3 mm. No entanto, a composição MI 70-30 resultou em valor de viscosidade um pouco superior ao da composição MI 80-20.



**Figura 4.69** – Percentagens retidas por peneiras agregados grãos e composições – areia CA



**Figura 4.70** – Resultados de viscosidade e tensão de escoamento das composições – areia CA

Com as figuras 4.69 e 4.70 apresentadas anteriormente percebe-se que houve uma tendência de diminuição da tensão de escoamento da composição CA 70-30 (composição com maior continuidade segundo a curva de Faury) em relação à composição CA 80-20, possuindo, esta última, maiores quantidades de grãos intermediários. Houve do mesmo modo que o apresentado pelas composições de outras areias, uma tendência de aumento da tensão de escoamento e viscosidade com o também aumento de grãos das frações menores do que 0.3 mm. Apesar disso, a viscosidade da composição CA 80-20 foi ligeiramente inferior à viscosidade da CA 70-30.

De acordo com as análises efetuadas neste item, ficou clara a influência das frações intermediárias como também a influência das partículas com tamanhos menores do que o diâmetro de 0.6 mm. Tal resultado foi também encontrado no trabalho de RODOLPHO (2007), no qual o teor de partículas com diâmetro igual a 1.2 mm exerceu influência significativa nos de viscosidade e tensão de escoamento. Esta influência foi observada de certa forma também por MURDOCK citado por HUDSON (1999), quando estabeleceu um índice empírico de influência das frações na consistência dos concretos – no que concerne à área superficial dos grãos – sendo, segundo tal autor, a influência da superfície dos grãos maior para os materiais da faixa de 0.6 mm, seguido pelos retidos nas peneiras 1.18mm e 0.3mm e com uma ligeira menor influência, mas, ainda assim expressiva, dos grãos retidos na peneira 0.15 mm.

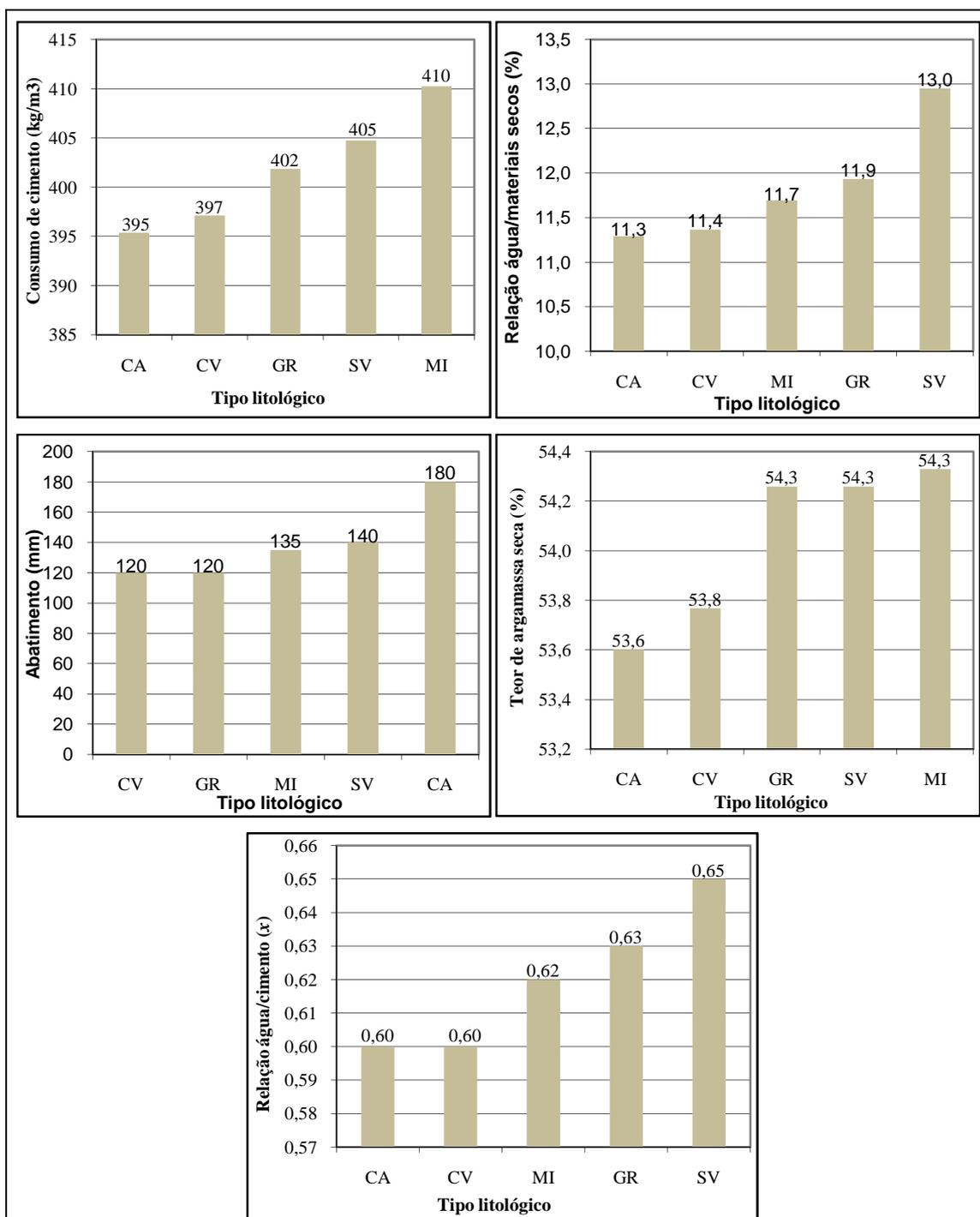
#### 4.2.2.2 – Análise das variáveis resposta – Parâmetros de mistura

Como explicado anteriormente no “capítulo 3 – Metodologia” deste trabalho, os resultados de consumo de cimento, relação água/materiais secos, teor de argamassa seca e relação água/cimento foram alcançados ao se definir a condição de abatimento de  $120 \pm 20$  (mm), sendo utilizado, para tanto, a composição 70-30 de todas as areias consideradas neste estudo. Ou seja, os parâmetros de mistura são, na realidade, respostas a tais condições, lembrando ainda que as proporções de areia e brita foram também fixadas. Portanto, neste item será realizada uma análise acerca dos parâmetros resposta quando fixadas a distribuição granulométrica em 70% do material retido na peneira 0,6 mm e 30% de material passante nesta peneira e retido na peneira 0,075 mm e o abatimento, como já mencionado.

A figura 4.71 a seguir apresenta os resultados de consumo de cimento, relação água/materiais secos, relação água/cimento, teor de argamassa seca e abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com as condições explicadas acima.

O ajuste do traço foi iniciado com o consumo cimento em torno de  $360 \text{ kg/m}^3$  e relação água/cimento 0.58. O ajuste de cimento foi realizado de forma bastante gradativa, sendo adicionado a cada vez cerca de 1% da quantidade final obtida nos concretos de e a água era corrigida de forma a manter a relação a/c com valores entre 0.58 e o máximo de 0.65. Ocorreu um fato interessante nos concretos das areias CA, SV e MI que, muitas vezes quando se encontravam com certo teor de cimento e água, não se conseguia alcançar o abatimento de referência, e, ao se aumentar em apenas 1 ou 2% a quantidade de cimento e mudar a relação água cimento de 0.63 para 0.65, por exemplo, de repente as misturas produzidas com tais areias se encontravam bastante fluidas. Tal fato pode estar ligado às quantidades ótimas de finos e água necessárias para vencer o atrito interno dos grãos destas areias, pois, de acordo com as análises efetuadas no item 4.1.2.1, tais agregados miúdos não possuem formatos de grãos equidimensionais. Na realidade, o ajuste de tais areias seguia três fases distintas. A primeira fase dizia respeito à quantidade baixa de cimento (em consequência, o teor de argamassa seca) à qual não se conseguia vencer a fricção interna entre os grãos devido à carência de argamassa, resultando em um valor de abatimento também baixo. Com o acréscimo de aumento nos teores de cimento e também água, percebia-se uma mistura bem

argamassada, mas muito coesa, que resultava na maioria das vezes em abatimentos da ordem de 95 a 110 mm. A partir desse ponto, ao se proceder a um ligeiro acréscimo nos teores de cimento e água, provavelmente se conseguia os teores ótimos capazes de transformar o sistema de muito coeso a coeso e fluido, e, no caso das misturas com a presença das areias SV, CA e MI (principalmente a CA) esse teores lubrificavam excessivamente, levando a um resultado de abatimento bastante alto. Como pode-se constatar pela figura 4.71 a seguir, percebe-se que os consumos de cimento considerando os concretos de todas as areias abordadas neste trabalho, foram bastante altos (mesmo considerando as areias mais esféricas CV e GR). Isto provavelmente está ligado ao fato de que as areias compostas neste projeto experimental possuíam cerca de 2.9 % de partículas microfinas (material passante da peneira 0.075 mm) e para suprir a carência de finos das misturas se tornou necessário o aumento do consumo de cimento dos concretos.



**Figura 4.71** – Respostas parâmetros de mistura e consistência pelo abatimento de tronco de cone – Projeto experimental 2

Pela figura 4.71, nota-se que os concretos com areia CA, apesar do menor valor de consumo de cimento ( $395 \text{ kg/m}^3$ ), menor resultado da relação água/materiais secos (11,3%) e, conseqüentemente, menor valor da relação água/cimento (0.60) obteve o mais alto valor de abatimento com a composição granulométrica de referência (70-30). Este fato pode possivelmente ser explicado devido ao alto teor de calcita desta areia

britada, como já discutido anteriormente, já que essa areia não possui grãos com formato especialmente esféricos, ou cantos e arestas arredondados ou ainda textura lisa.

Os resultados de consumo de cimento, relação água/materiais secos e argamassa seca do concreto realizado com a composição 70-30 da areia CV foram praticamente iguais aos da areia CA, mas, apesar disso, a o concreto de areia CA obteve abatimento (180 mm) muito superior ao alcançado quando da utilização do agregado miúdo CV (120 mm).

As areias GR e MI obtiveram valores iguais de teor de argamassa seca (54,3%) e similares de relação água/materiais secos (11,9% e 11,7%, respectivamente). No entanto, o abatimento da mistura com MI foi superior ao da mistura de GR (135 mm e 120 mm, respectivamente), resultado este talvez devido ao consumo de cimento do concreto MI ( $410 \text{ kg/m}^3$ ) ser um tanto superior ao da areia GR ( $402 \text{ kg/m}^3$ ).

A areia SV necessitou de um consumo de cimento igual a  $405 \text{ kg/m}^3$ , teor de argamassa seca e relação água/materiais secos de 54,3% e 13%, respectivamente para alcançar uma abatimento de tronco de cone igual a 140 mm. Cabe salientar que esta areia resultou na mais alta relação água/cimento dentre as areias estudadas.

Após analisados os resultados encontrados para as cinco areias, pode-se inferir que o comportamento dos concretos realizados com as areias MI, GR, CV e SV foi bastante similar, ou seja, os consumos de cimento, teores de argamassa seca e relações água/materiais secos resultaram bastante próximos, apesar do consumo de cimento maior em relação à mistura com MI e do alto valor da relação água/materiais secos da mistura usando areia SV, se levados em consideração para tal análise, o resultado de abatimento, como também, apesar dos parâmetros de mistura do concreto de CV decorrerem em valores inferiores, o resultado de abatimento de tronco de cone alcançado foi também abaixo dos outros. Apesar disso, pode-se supor que, diferentemente dos demais, o consumo de cimento e relação água/materiais secos requeridos para o concreto de areia CV e GR foram necessários mais especificamente para suprir a ausência de finos da mistura do que para neutralizar o efeito adverso dos aspectos de forma (em especial, esfericidade) da areia, uma vez que não foi observado em tais misturas o “salto” de abatimento descrito anteriormente acontecido nos concretos de SV, MI e CA.

O concreto de CA, especialmente, obteve comportamento de consistência completamente diferenciado em comparação aos demais. Provavelmente a característica do alto teor de calcita desta areia tenha influenciado preponderantemente no referido resultado de abatimento.

Muito provavelmente o objetivo de analisar a influência de diversas composições granulométricas minimizando ao máximo o efeito dos aspectos de forma dos concretos realizados neste programa experimental 2 foi atingido, pois, segundo RODOLPHO (2007), as características de forma dos grãos só influenciam nos resultados de viscosidade e tensão de escoamento dos concretos quando os consumos de cimento se encontram abaixo de  $397 \text{ kg/m}^3$ , sendo que, acima deste valor de consumo, os parâmetros reológicos são governados com maior preponderância pelas propriedades da pasta de cimento.

### **4.3 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – PROJETO EXPERIMENTAL 3 e 4**

Neste item serão apresentados e analisados os resultados encontrados com as variáveis dos projetos experimentais 3 e 4: índices de vazios com massa unitária no estado solto e compactado, variáveis dependentes viscosidade ou velocidade de fluxo (quando não houve possibilidade de determinação da viscosidade), tensão de escoamento, consistência pelo abatimento de tronco de cone e *k-slump* 2, segregação, mensurada pelo *k-slump* 1, exsudação e teor de ar incorporado, de acordo com o capítulo 3 – Programa experimental.

#### **4.3.1- Apresentação dos resultados – Projetos experimentais 3 e 4**

Os resultados alcançados a partir das variáveis definidas nos projetos experimentais 3 e 4 serão apresentados neste item, ao passo que a análise das mesmas será realizada no item subsequente a este. Os resultados serão apresentados preponderantemente em forma de tabelas.

#### 4.3.1.1 – Apresentação dos resultados nos agregados miúdos

Os índices de vazios das massas unitários nos estados solto e compactado serão apresentados neste item. Na tabela 4.20 estão apresentados os resultados alcançados no projeto experimental 3, ao passo que na tabela 4.21 constam os resultados obtidos com o programa experimental 4. Já a tabela 4.22 contém os resultados do ensaio de potencial zeta realizados no material microfino, ou seja, material passante da peneira 0.075 mm das areias estudadas, como também do cimento utilizado neste trabalho.

**Tabela 4.20 – Resultados dos índices de vazios MS e MC – Projeto experimental 3**

Composição	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC
CV 80-20-7	0.377	0.289
CV 80-20-12	0.376	0.276
CV 80-20-18	0.383	0.265
SV 70-30-7	0.381	0.266
SV 70-30-12	0.374	0.268
SV 70-30-18	0.381	0.266
GR 80-20-7	0.389	0.319
GR 80-20-12	0.385	0.312
GR 80-20-18	0.385	0.305
MI 80-20-7	0.391	0.308
MI 80-20-12	0.400	0.304
MI 80-20-18	0.399	0.300
CA 70-30-7	0.436	0.363
CA 70-30-12	0.423	0.357
CA 70-30-18	0.420	0.357

Pela tabela 4.20 percebe-se que os resultados de índices de vazios MS foram similares se comparadas as quatro areias. Já em relação aos índices de vazios MC, os valores das areias CV e SV apresentam semelhança entre si, ao passo que os índices alcançados pelas areias GR e MI resultaram mais parecidos.

**Tabela 4.21 – Resultados dos índices de vazios MS e MC – Projeto experimental 4**

Composição	Índice de Vazios MS	Índice de Vazios MC
CV 84.3-12.9-7	0.378	0.245
CV 84.3-12.9-12	0.362	0.249
CV 84.3-12.9-18	0.350	0.238
SV 84.3-12.9-7	0.408	0.263
SV 84.3-12.9-12	0.384	0.272
SV 84.3-12.9-18	0.384	0.263
GR 84.3-12.9-7	0.414	0.346
GR 84.3-12.9-12	0.391	0.323
GR 84.3-12.9-18	0.389	0.296
MI 84.3-12.9-7	0.391	0.326
MI 84.3-12.9-12	0.400	0.318
MI 84.3-12.9-18	0.399	0.304
CA 84.3-12.9-7	0.405	0.305
CA 84.3-12.9-12	0.372	0.307
CA 84.3-12.9-18	0.364	0.291

Pela tabela 4.21 verifica-se que os resultados dos índices de vazios MS foram também similares, enquanto em relação ao índices de vazios MC, nota-se que os mesmos apresentaram menores valores para a areia SV e os maiores foram obtidos com a areia GR.

**Tabela 4.22 – Resultados de potencial zeta – Projeto experimental 3 e 4**

Amostra	pH original	Potencial Zeta (mv) – pH original	pH corrigido (NaOH – 0,1M)	Potencial Zeta (mv) – pH corrigido
<b>Cimento</b>	12.4	<b>2.99</b>	12.0	<b>4.07</b>
<b>Areia MI</b>	9.9	<b>-20.43</b>	12.0	<b>-10.33</b>
<b>Areia CA</b>	10.2	<b>-3.64</b>	12.0	<b>-28.15</b>
<b>Areia GR</b>	8.6	<b>-17.29</b>	12.0	<b>-42.82</b>
<b>Areia CV</b>	9.4	<b>-16.6</b>	12.0	<b>-43.71</b>
<b>Areia SV</b>	9.9	<b>-12.14</b>	12.0	<b>-31.89</b>

Pela tabela 4.22 acima podem ser verificados os resultados de potencial zeta do cimento usado nesta pesquisa (CPII-Z32) além dos valores de energia superficial das microfinas dos agregados miúdos MI, CA, GR, CV e SV, nos pH's original e corrigido. O pH original é o pH diz respeito ao pH natural da amostra, sem correção. A correção do pH foi necessária a fim de obter o mesmo pH médio do concreto, que foi determinado em torno de 12. Nota-se que os valores de potencial zeta, no pH original, são baixos para o cimento e a areia CV, e que, ao se corrigir o pH para o valor 12, o cimento obteve resultado ainda baixo, enquanto que os valores das areias se mostrou alto, excetuando-se a areia MI, com valor igual a -10.33.

#### 4.3.1.2 – Apresentação dos resultados nos concretos – Projeto experimental 3

Os resultados das variáveis dependentes do projeto experimental 3 estão constantes da tabela 4.23 a seguir. Cabe salientar que na maioria das misturas não foi possível determinar a viscosidade pelo método do abatimento modificado. Então para se ter uma noção da viscosidade de cada mistura, foi também determinada a *velocidade de fluxo*, sendo esta calculada pelo quociente do abatimento final (determinado com o ensaio de abatimento modificado) pelo tempo decorrido para se obter tal abatimento. Os resultados desta variável, juntamente com a tensão de escoamento, abatimento de tronco de cone, k-slump 1 e 2, teor de água exsudada e segregação estão apresentados na tabela a seguir. Cabe salientar que os concretos produzidos no projeto experimental 3 foram confeccionados com os mesmos parâmetros de mistura, ou seja, consumos de cimento, relações a/c, relações água/materiais secos e teores de argamassa seca definidos no projeto experimental 2. Cabe frisar ainda que para a confecção dos concretos deste projeto experimental foram usadas as composições de grãos (material retido na peneira 0.6mm – passante na mesma peneira e retido na 0.075 mm) mais contínuas definidas pelos graus de continuidade apresentados e analisados em item anterior.

**Tabela 4.23 – Resultados variáveis dependentes – Projeto experimental 3**

Composição	Velocidade de fluxo (mm/s)	Tensão de escoamento (Pa)	Água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	k-slump 2(mm)
CV 80-20-7	86.61	1004.03	2.82	75.0	100	2.5	45.0
CV 80-20-12	64.52	1126.68	1.88	50.0	90	2.4	27.5
CV 80-20-18	53.84	1177.13	0.26	15.0	80	2.05	37.5
SV 70-30-7	137.68	1060.57	0.55	28.5	105	2.1	16.0
SV 70-30-12	212.96	976.22	0.72	105.0	110	2.0	42.5
SV 70-30-18	98.68	1141.20	0.58	20.0	85	2.1	25.0
GR 80-20-7	214.29	1013.84	3.53	70.0	115	2.45	30.0
GR 80-20-12	181.82	1034.81	1.92	40.0	110	2.6	35.0
GR 80-20-18	149.12	1096.13	4.00	50.0	85	2.2	35.0
MI 80-20-7	160.49	922.25	3.32	52.5	130	2.4	42.5
MI 80-20-12	109.75	1089.13	7.90	25.0	95	1.80	27.5
MI 80-20-18	82.19	1217.72	2.08	67.5	50	1.85	32.5
CA 70-30-7	176.95	915.54	3.72	100.0	135	2.3	65.0
CA 70-30-12	163.52	1047.83	2.56	72.5	110	1.8	54
CA 70-30-18	138.72	1133.67	1.52	50	90	1.8	35

A tabela 4.24 a seguir contém os resultados no concreto das variáveis dependentes do projeto experimental 4.

**Tabela 4.24 – Resultados das variáveis dependentes – projeto experimental 4**

Composição	Viscosidade de (Pa.s)	Velocidade de fluxo (mm/s)	Tensão de escoamento (Pa)	Teor água Exsudada (%)	k-slump 1 (mm)	k-slump 2 (mm)	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)
CV 84.3-12.9-7	28.3	95.72	1003.5	1.57	70.0	40.0	120	2.7
CV 84.3-12.9-12	26.8	101.26	989.4	2.54	55.0	42.5	125	2.4
CV 84.3-12.9-18	27.2	98.74	995.6	2.03	35.0	45.0	120	1.9
SV 84.3-12.9-7	21.5	183.33	998.6	1.82	45.0	35.0	115	1.6
SV 84.3-12.9-12	17.1	333.33	787.3	3.41	110.0	47.5	165	2.0
SV 84.3-12.9-18	23.4	153.85	1040.7	0.60	15.0	30.0	120	1.8
GR 84.3-12.9-7	20.0	205.36	973.2	9.25	45.0	35.0	120	3.0
GR 84.3-12.9-12	16.1	217.78	1045.6	2.19	55.0	37.5	110	2.6
GR 84.3-12.9-18	22.5	174.60	995.1	6.03	27.5	25.0	120	2.2
MI 84.3-12.9-7	13.2	337.84	930.4	6.99	87.5	42.5	140	3.4
MI 84.3-12.9-12	27.6	144.74	1007.0	5.44	97.5	40.0	135	2.3
MI 84.3-12.9-18	13.1	291.67	1032.8	8.21	87.5	47.5	120	2.2
CA 84.3-12.9-7	21.3	250.72	976.5	1.03	92.5	41.5	145	3.0
CA 84.3-12.9-12	23.6	234.65	1012.3	0.98	90.0	40.5	130	2.6
CA 84.3-12.9-18	25.9	210.97	1028.7	0.7	87.5	35.0	120	2.0

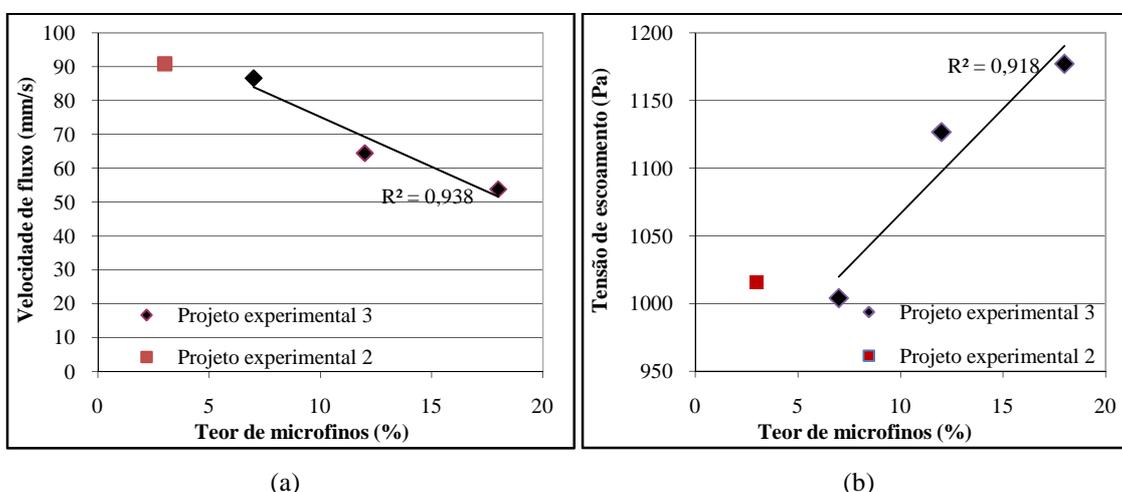
Ao se observar a tabela, percebe-se que houve uma tendência de melhores desempenhos de viscosidade, velocidade de fluxo, tensão de escoamento e consistência dos concretos do projeto experimental 4 se comparados com os resultados do projeto experimental 3.

### 4.3.2 – Análise dos Resultados – Projeto Experimental 3

A análise dos resultados dos ensaios realizados no projeto experimental 3 será realizada, neste item, por tipo litológico. O enfoque maior desta análise será a influência que o teor de microfinos exerce nas propriedades dos concretos no estado fresco.

#### 4.3.2.1 – Análises dos resultados da areia CV – projeto experimental 3

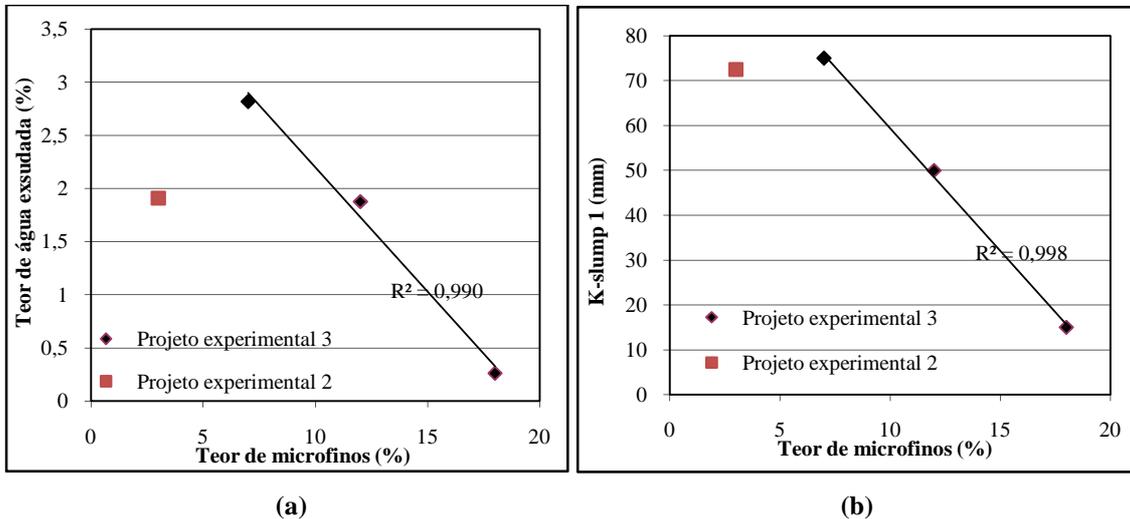
Na figura 4.72 estão expressas as correlações entre a velocidade de fluxo e tensão de escoamento em função do teor de microfinos das composições. Para efeito de comparação, os resultados obtidos no projeto experimental 2 também estão representados nos gráficos.



**Figura 4.72** – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.72 a) e tensão de escoamento (figura 4.72 b) versus teor de microfinos da areia CV– projeto experimental 3

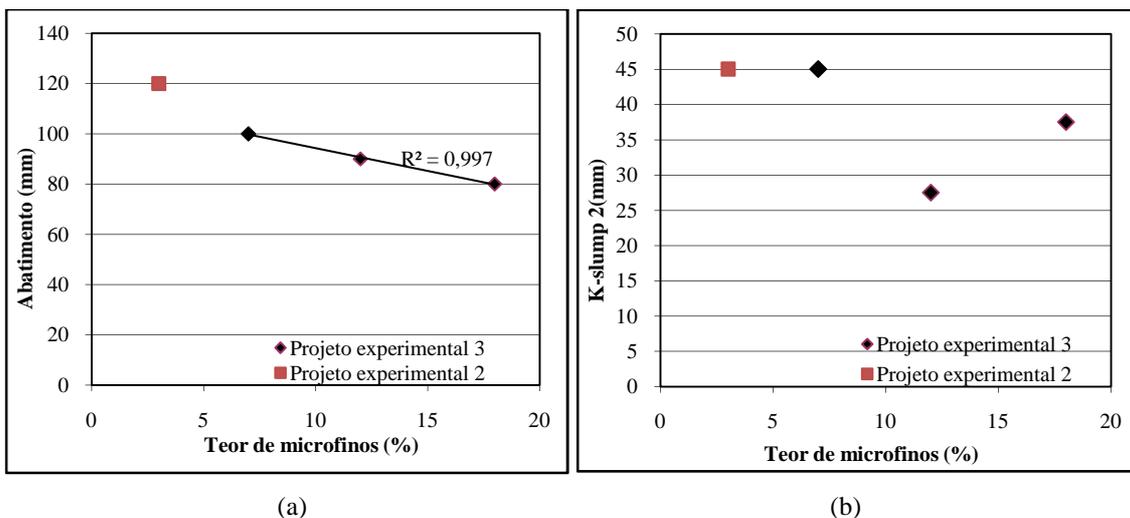
Ao se analisar a figura 4.72 nota-se uma diminuição da velocidade de fluxo e um aumento na tensão de escoamento com o aumento do teor de microfinos. A velocidade de fluxo, como já comentado anteriormente, dá uma idéia da viscosidade dos concretos, sendo esta tanto maior, quanto menores os valores de velocidade. Assim, os concretos realizados com a areia CV se apresentaram mais viscosos quanto maiores os teores de

microfinos presentes. Tal fato provavelmente aconteceu devido à alta coesão proporcionada à mistura com a adição dos microfinos. O mesmo sucedeu à tensão de escoamento dos concretos, sendo esta tanto maior quanto maiores os teores de microfinos, indicando que o aumento de coesão também determinou o aumento da tensão de escoamento dos concretos.



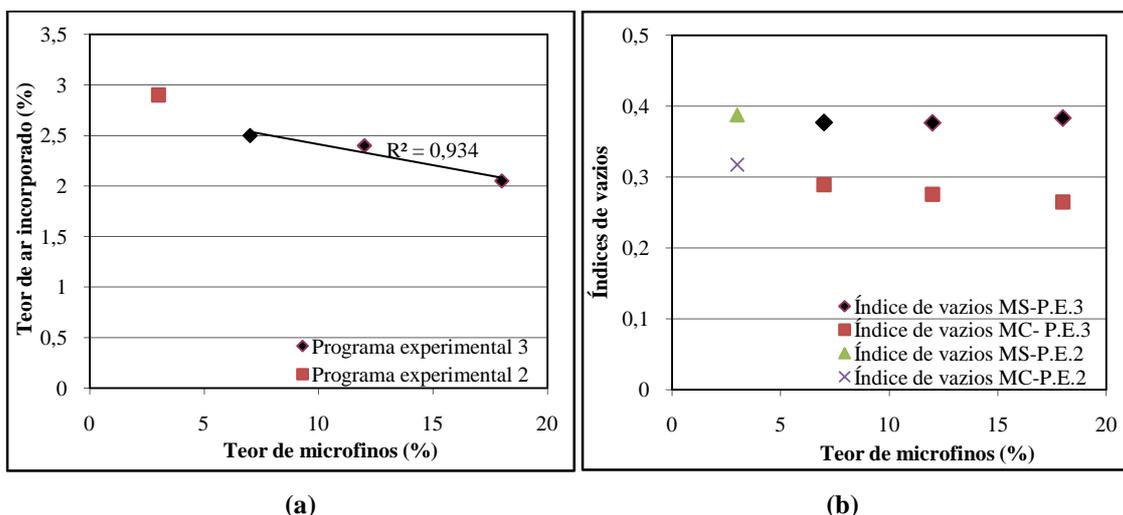
**Figura 4.73** – Resultados de teor de água exsudada (figura 4.73 a) e *k-slump 1* (figura 4.73 b) versus teor de microfinos da areia CV– projeto experimental 3

Ao se observar a figura 4.73 nota-se que houve uma tendência de diminuição do teor de água exsudada e da segregação com o aumento do teor de microfinos. Pode-se inferir destes resultados que ao se incrementar o teor de microfinos das composições, houve também um aumento da influência da superfície específica destes materiais, pelo menos considerando os concretos de areia CV.



**Figura 4.74** – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.74 a) e *k-slump 2* (figura 4.74 b) versus teor de microfinos da areia CV– projeto experimental 3

De acordo com a figura 4.74 (a), verifica-se que houve também uma tendência de diminuição da consistência com o aumento do teor de microfinos. No entanto, no ensaio feito com o microconcreto (*k-slump* 2) notou-se que a consistência do mesmo foi menor para um teor de microfinos igual a 12%, menor inclusive do que a mistura executada com 18% de microfinos.



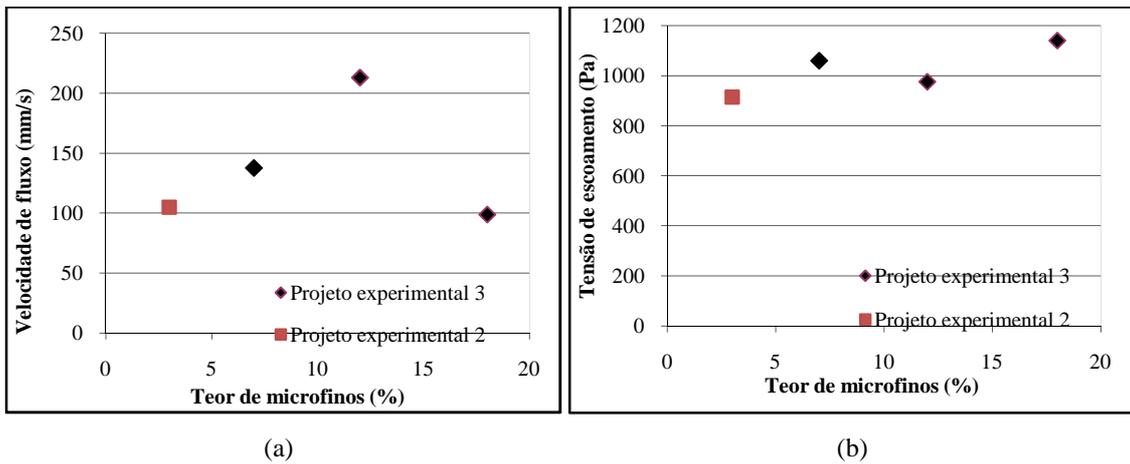
**Figura 4.75** – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.75 – a) e índices de vazios (figura 4.75 – b) e teor de microfinos da areia CV– **projeto experimental 3**

Pela figura 4.75 (a) nota-se que houve tendência de diminuição do teor de ar incorporado dos concretos com o aumento do teor de microfinos nas composições. Tal fato demonstra que provavelmente a fase pasta se tornou mais compacta com o aumento do material microfino, diminuindo assim o teor de ar incorporado. Já em relação aos índices de vazios, percebe-se que houve uma tendência de diminuição do índice MC com o incremento de filler das misturas, enquanto que o índice MS manteve-se praticamente constante com um leve aumento quando o teor de microfinos se manteve igual a 18%. Foi observado também que os índices de vazios da composição CV80-20-3 (programa experimental 2) obtiveram valores ligeiramente superiores aos das composições do projeto experimental 3, tanto o índice de vazios MS quanto o MC.

#### 4.3.2.2 – Análises dos resultados da areia SV – projeto experimental 3

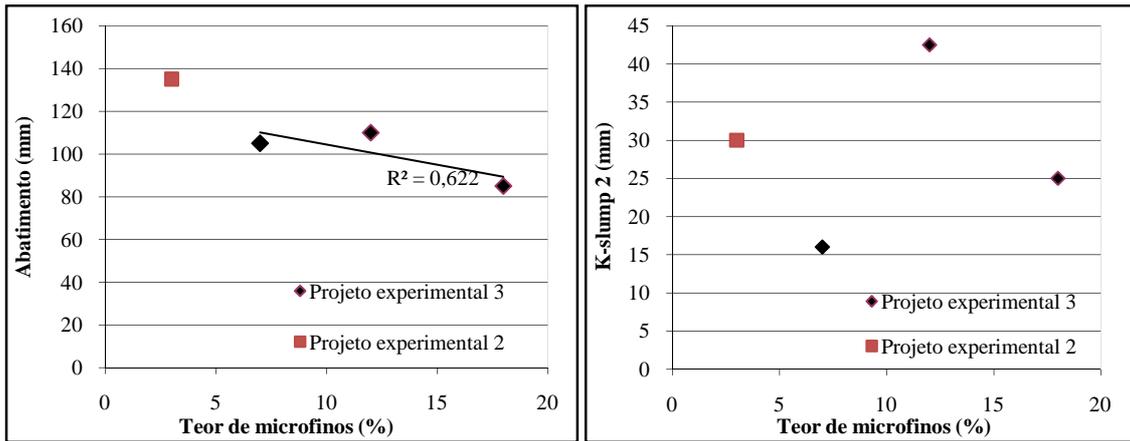
A figura 4.76 a seguir está constante as correlações entre velocidade de fluxo e tensão de escoamento com o teor de microfinos das composições da areia SV.

Pela figura nota-se que não houveram boas correlações entre o teor de materiais microfinos adicionados devido principalmente à composição SV 70-30-12, que apesar do maior teor de *filler* em relação à SV 70-30-7 e SV 70-30-3 (composição do projeto experimental 2) resultou em maior valor de velocidade de fluxo e menor tensão de escoamento.



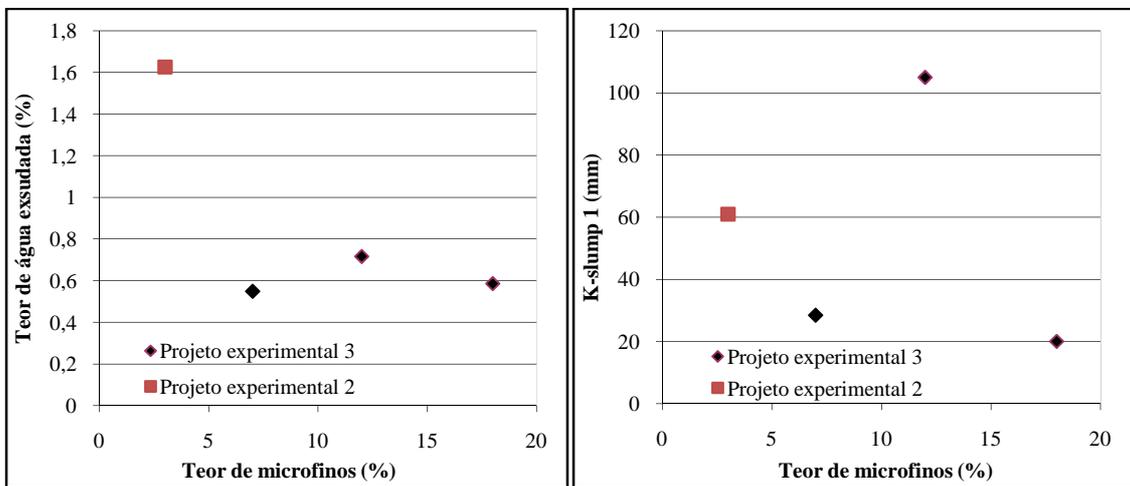
**Figura 4.76** – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.76 a) e tensão de escoamento (figura 4.76 b) versus teor de microfinos da areia SV– **projeto experimental 3**

Provavelmente o teor ótimo de microfinos para a composição SV 70-30 se deu ao se adicionar 12% de microfinos, o que propiciou menor viscosidade (representada qualitativamente pela velocidade de fluxo) e pela tensão de escoamento. Com tal teor de *filler*, possivelmente o efeito negativo do formato dos grãos grossos foi minorado, exercendo assim os microfinos nesse sentido, um efeito de lubrificação. É interessante notar que o aumento de partículas microfinas não resultou necessariamente no acréscimo linear da viscosidade, já que as composições SV 70-30-7 e SV 70-30-18, apesar de possuírem altos teores de partículas muito finas, obtiveram velocidades maiores ou praticamente iguais às misturas produzidas com SV 70-30-3.



(a) (b)  
**Figura 4.77** – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.77 a) e k-slump 2 (figura 4.77 b) versus teor de microfinos da areia SV – **projeto experimental 3**

Pela figura 4.77 nota-se que a composição 70-30-12 proporcionou a menor consistência mensurada através do abatimento de tronco de cone, apesar de que o abatimento resultou maior no concreto realizado no projeto experimental 2 (70-30-3) que possui menor teor de partículas microfinas. Em compensação, a maior fluidez do microconcreto mensurada pelo k-slump 2 foi a maior dentre as demais, corroborando assim a explicação feita anteriormente.

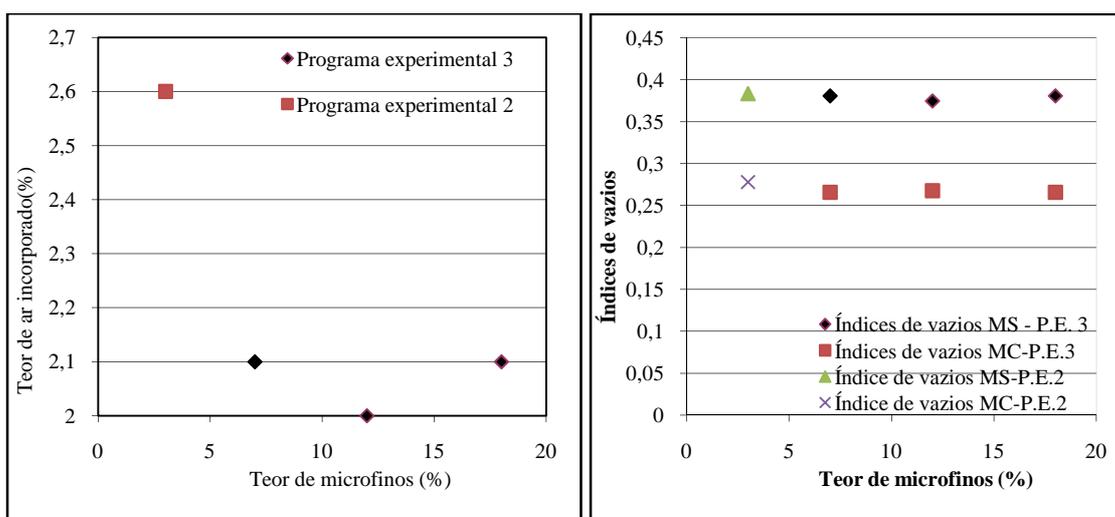


(a) (b)  
**Figura 4.78** – Resultados de teor de água exsudada (figura 4.78 a) e k-slump 2 (figura 4.78 b) versus teor de microfinos da areia SV – **projeto experimental 3**

Nota-se que não houve correlação entre teor de água exsudada e teor de *filler* das composições do projeto experimental 3. Verifica-se ainda que a composição que contém 12% de partículas microfinas obteve também o maior teor de água exsudada. Provavelmente a composição SV 70-30-12, como explicado anteriormente, se constitui

na composição que apresentou o esqueleto sólido mais compacto (que pode ser verificado com o índice de vazios da massa unitária no estado solto, tabela 4.21), sendo assim, com menor necessidade para preencher os vazios granulares, a água livre ascenderia à superfície, ocasionando maior exsudação da mistura. Apesar da levemente superior exsudação do concreto com a composição SV 70-30-12, percebe-se que as misturas produzidas no projeto experimental 3 (com 7, 12 e 18 % de teores de microfinos) resultaram em menores valores de água exsudada do que o concreto SV70-30 do projeto experimental 2 (com 3% de microfinos), ou seja, o aumento no teor de *filler*, no geral, diminuiu a quantidade de água exsudada pela mistura.

Já em relação ao ensaio k-slump 1, quanto mais fluido o concreto, maior quantidade de microconcreto adentra a câmara do aparelho *k-slump* e, portanto, mais segregável a mistura. Tal fato ocorreu com o concreto SV 70-30-12, sendo a mistura menos segregável a SV 70-30-18.



**Figura 4.79** – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.79 – a) e índices de vazios (figura 4.79 – b) e teor de microfinos da areia SV – **projeto experimental 3**

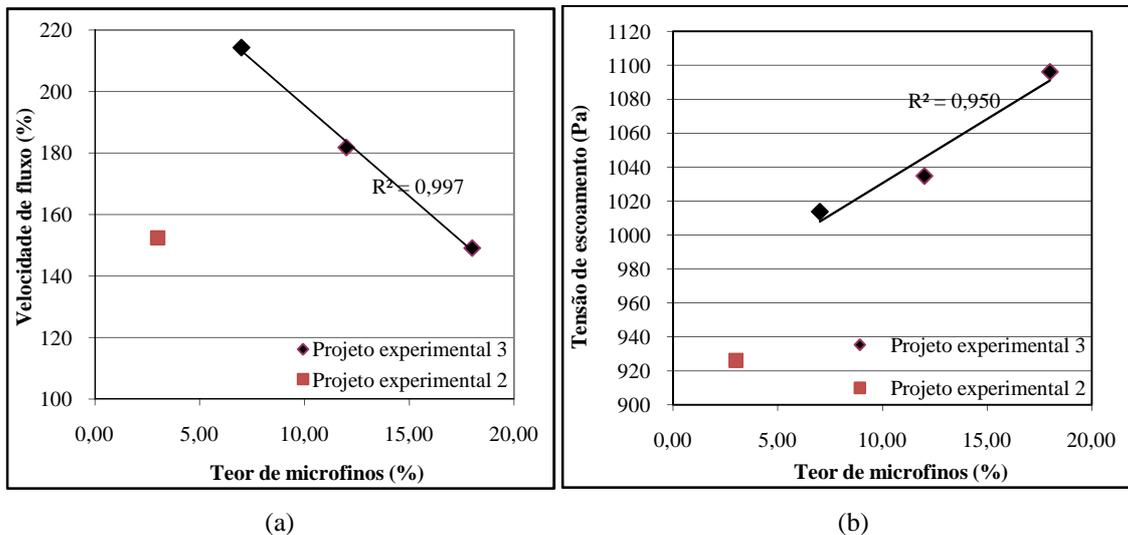
Pela figura 4.79 percebe-se que não houve correlação significativa entre o teor de ar incorporado e o teor de microfinos das composições SV 70-30, sendo este praticamente constante levando-se em consideração os três teores de fillers adicionados (7, 12 e 18%). No entanto, notou-se resultado de ar incorporado ligeiramente inferior para a composição SV 70-30-12, enquanto que a composição realizada no projeto experimental 2 (SV 70-30-3) apresentou valor mais altos que os demais, indicando que para altos teores de microfinos, alcança-se baixos teores de ar incorporado. Em relação

aos índices de vazios, estes resultaram em valores similares com um pequeno acréscimo no valor dos índices de vazios MS das composições SV-70-30-3 e SV-70-30-18 e tomando-se agora os índices MC, a composição SV-70-30-3 obteve um valor ligeiramente maior que os demais, sendo que os valores destes foi praticamente constante.

#### 4.3.2.3 – Análises dos resultados da areia GR – projeto experimental 3

A figura 4.80 a seguir apresenta as correlações entre as propriedades no estado fresco do concreto analisadas neste trabalho e o teor de microfinos das misturas com as composições da areia GR.

Notas-e que o comportamento apresentado pelas composições da areia GR foi similar ao da areia CV, ou seja, com o aumento do teor de filler, houve um aumento da viscosidade das misturas, indicada pela diminuição na velocidade de fluxo e aumento na tensão de escoamento destas.

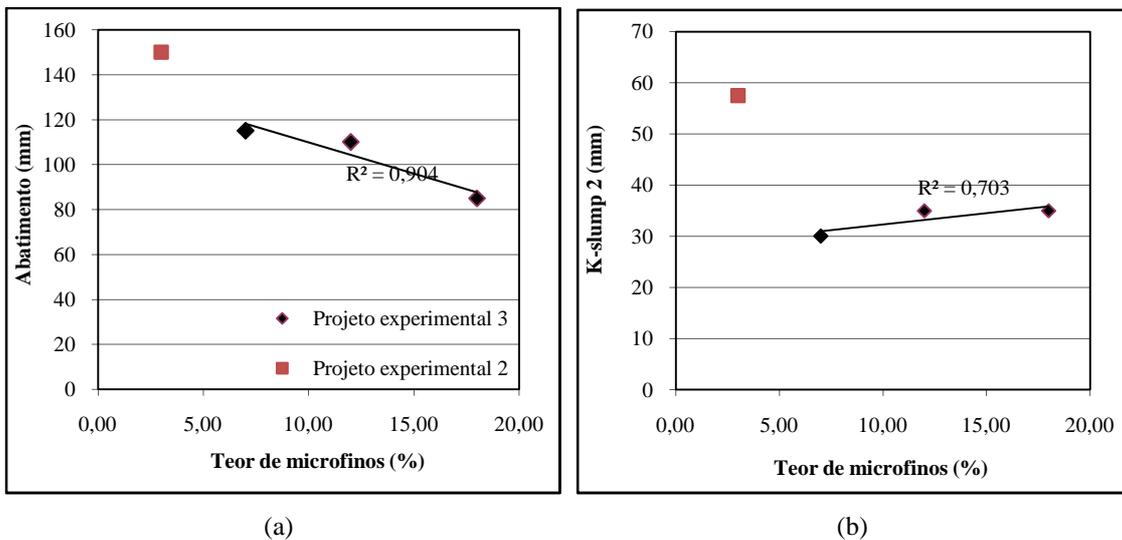


**Figura 4.80** – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.80 a) e tensão de escoamento (figura 4.80 b) versus teor de microfinos da areia GR – projeto experimental 3

Do mesmo modo, parece haver aumento na coesão do sistema ocasionado pelo também aumento no teor de microfinos de GR, resultando no incremento de viscosidade e tensão de escoamento. Entretanto, nota-se que apesar de possuir maior quantidade de *filler*, a composição GR80-20-7 resultou em menor velocidade de escoamento do que a composição GR80-20-3, indicando que o aumento da velocidade possa estar ligado a uma lubrificação, ou seja, o aumento do teor de pasta do sistema pelos finos diminuindo

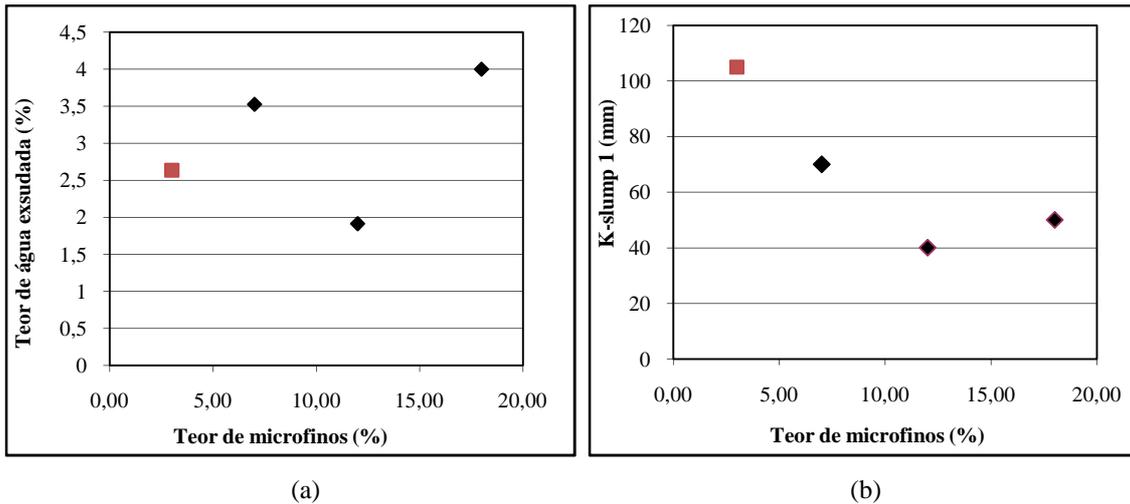
o atrito interno entre grãos mais grossos e entre estes e a haste do ensaio de abatimento modificado, sendo provavelmente o teor de 7% de microfinos, para a composição 80-20 da areia GR, o teor ótimo de *filler*. Ao se aumentar ainda mais a quantidade de microfinos, provavelmente o efeito de lubrificação cessou devido ao aumento de coesão do sistema, o que leva a um incremento também da viscosidade, como já comentado anteriormente.

A figura 4.81 mostra as correlações entre abatimento de tronco de cone e k-slump 2, com os teores de microfinos.



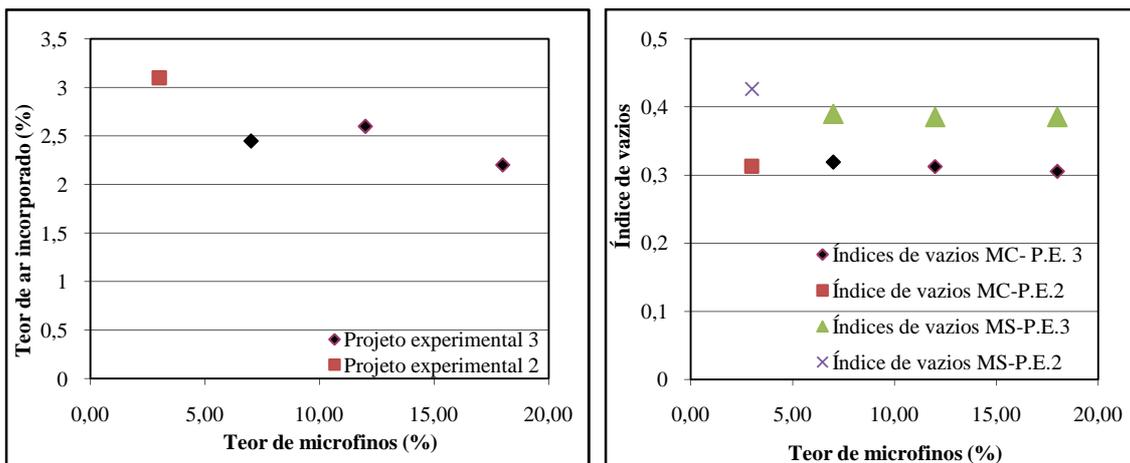
**Figura 4.81** – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.81 a) e k-slump 2 (figura 4.81 b) versus teor de microfinos da areia GR – **projeto experimental 3**

Pela figura nota-se uma tendência de diminuição no abatimento de tronco de cone com o aumento nos teores de microfinos e uma ligeira tendência de aumento nos resultados de *k-slump 2* dos microconcretos, o que denota um aumento da fluidez destes, apesar dos valores bastante semelhantes.



**Figura 4.82** – Resultados de teor de água exsudada (figura 4.82 a) e k-slump 2 (figura 4.82 b) versus teor de microfinos da areia GR – **projeto experimental 3**

A figura 4.82 mostra que não houve correlação significativa entre o teor de *filler* das composições de GR e teor de água exsudada, nem também com o *k-slump 1*. Apesar disso, nota-se que a mistura que obteve maior exsudação foi a GR 80-20-18, enquanto a maior segregação foi apresentada pela mistura da composição realizada no projeto experimental 2 GR-80-20-3. Além disso, observa-se que a mistura menos segregável e exsudável foi alcançada com o concreto da composição GR-80-20-12, o que pode indicar que essa composição apresenta um esqueleto sólido menos compacto que os demais, necessitando de mais água para preencher os vazios, inibindo assim a exsudação.

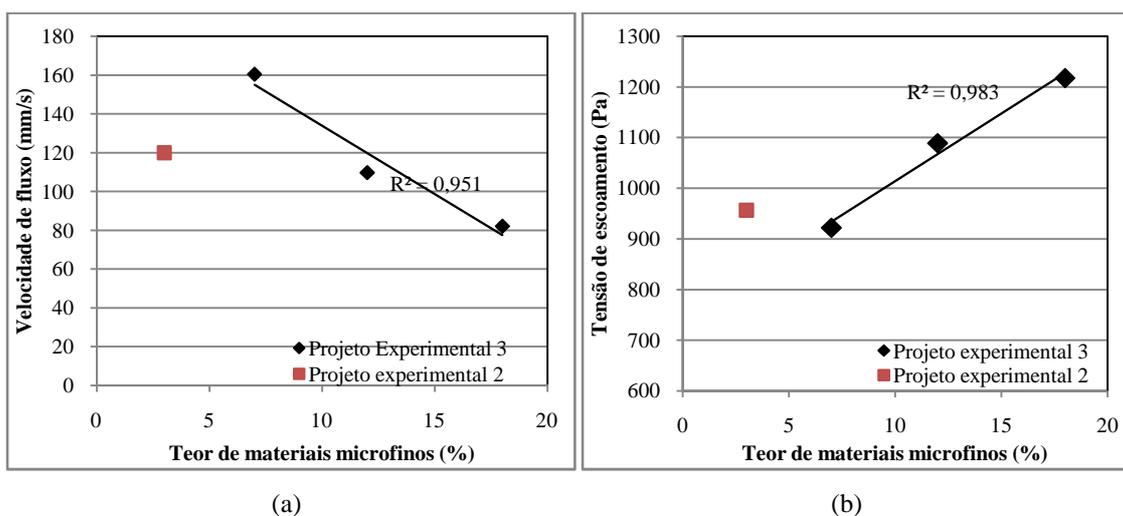


**Figura 4.83** – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.83 – a) e índices de vazios (figura 4.83 – b) e teor de microfinos da areia GR – **projeto experimental 3**

Nota-se pela figura 4.83 que o maior teor de ar incorporado dentre as misturas do projeto experimental 3 foi alcançado com a mistura GR80-20-12. Apesar disso, percebe-se que em relação ao concreto do projeto experimental 2, as misturas produzidas no projeto experimental 3 apresentaram menor valor de teor de ar, o que indica que a pasta aglomerante se tornou mais compacta com o acréscimo de microfinos. Em relação aos índices de vazios, percebe-se que o índice MS da composição GR 80-20-3 (projeto experimental 2) foi superior ao das composições realizadas no projeto experimental 3, enquanto que os índices MC resultaram em valores bastante semelhante, com um leve aumento para a composição GR 80-20-7.

#### 4.3.2.4 – Análises dos resultados da areia MI – projeto experimental 3

Com a figura 4.84 verifica-se que houve uma tendência de diminuição da velocidade de fluxo e aumento da tensão de escoamento dos concretos de areia MI (projeto experimental 3). No entanto, percebe-se que apesar da composição MI 80-20-7 apresentar maior quantidade de partículas microfinas em relação à MI 80-20-3 (projeto experimental 2), a primeira resultou em velocidade maior, o que implica em menor viscosidade da mistura. Como já explicado anteriormente, provavelmente com este teor de *filler* o teor de pasta se torne ótimo, favorecendo a lubrificação do sistema pela diminuição do atrito interno entre os grãos.



**Figura 4.84** – Resultados de velocidade de fluxo (figura 4.84-a) e tensão de escoamento (figura 4.84-b) versus teor de microfinos da areia MI – projeto experimental 3

No caso específico da areia MI, parece que tal lubrificação propiciou também uma ligeira diminuição da tensão de escoamento da composição MI 80-20-7 em relação à GR80-20-3, o que não havia acontecido no caso das areias SV e GR.

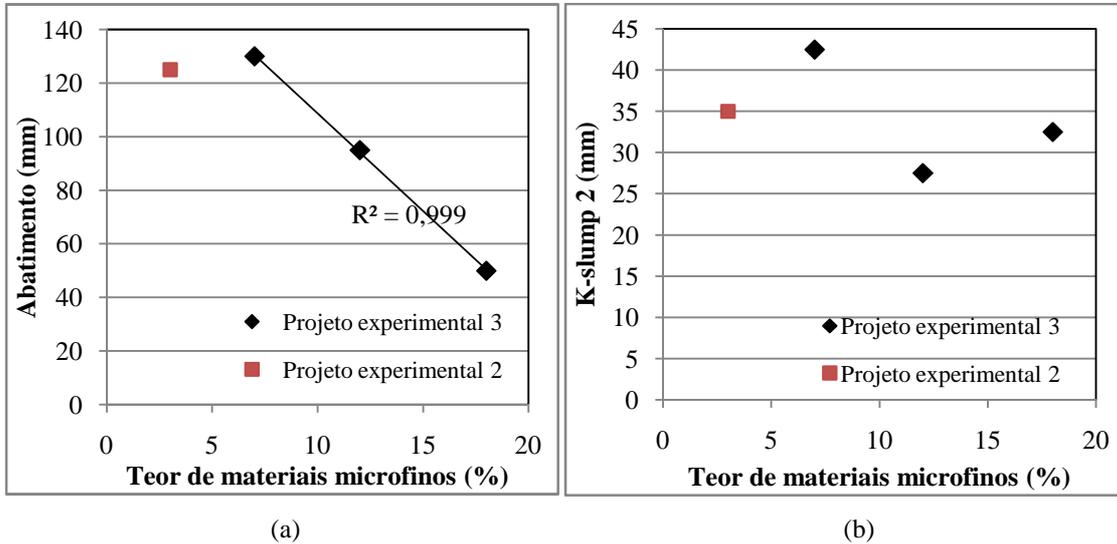


Figura 4.85 – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.85 a) e k-slump 2 (figura 4.85 b) versus teor de microfinos da areia MI – projeto experimental 3

Os resultados de abatimento de tronco de cone e *k-slump 2* (figura 4.85) mostram que a composição MI80-20-7 apresentou maior fluidez do que a MI80-20-3, do projeto experimental 2, pois que os resultados de abatimento e *k-slump 2* foram maiores para a primeira, ainda que a diferença nos valores de abatimento seja pouca. No entanto, a mistura se apresentou mais coesa com o aumento de 12% e 18% nos teores destas partículas muito finas, resultando inclusive em um abatimento muito baixo ao se adicionar o maior teor.

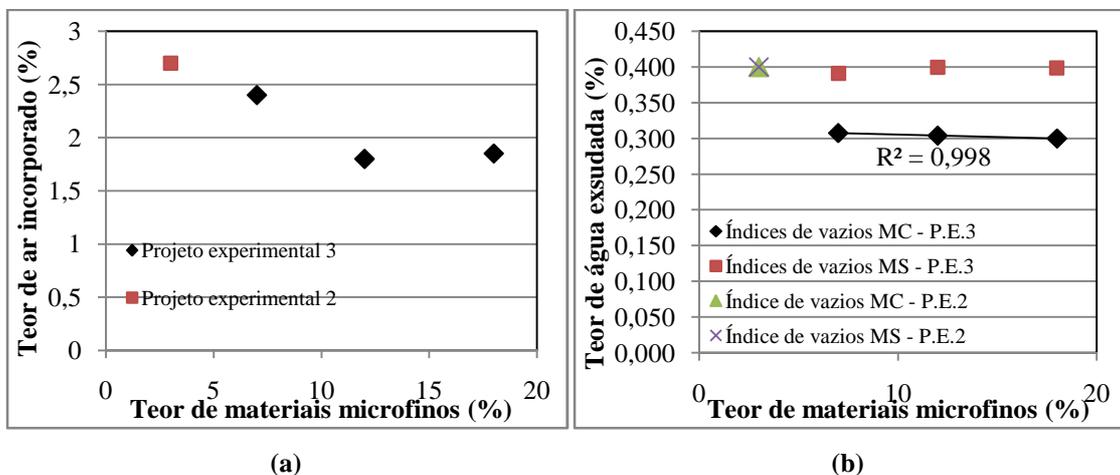
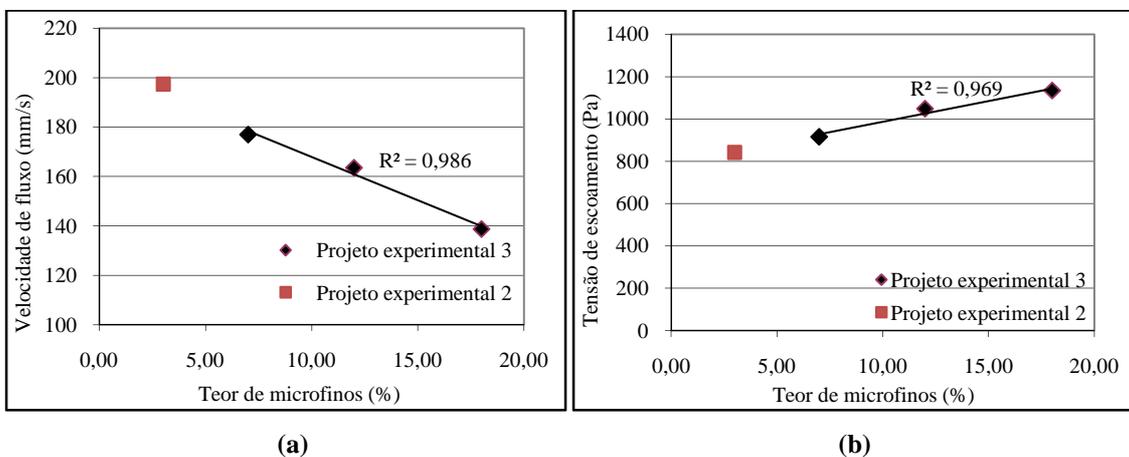


Figura 4.86 – Correlação entre teor de ar incorporado (figura 4.86 – a) e índices de vazios (figura 4.86 – b) e teor de microfinos da areia MI – projeto experimental 3

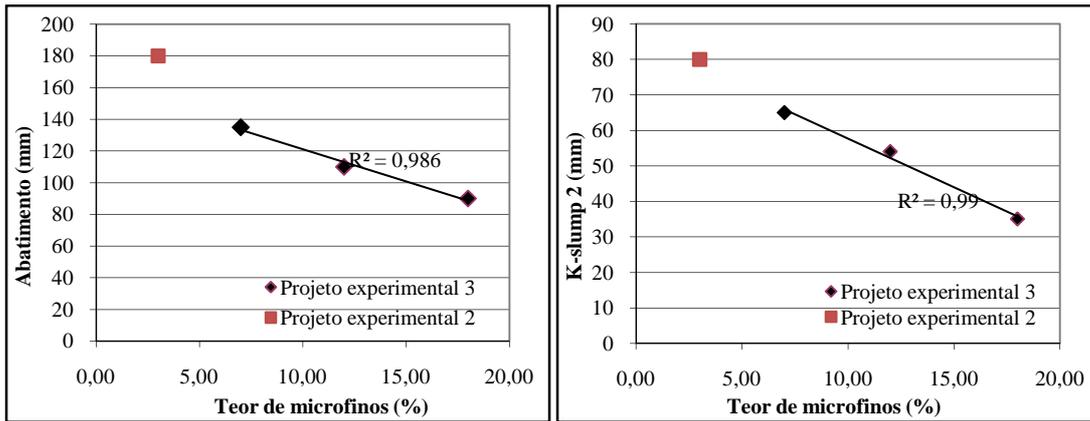
Pela figura 4.86 percebe-se que houve uma tendência de diminuição do teor de ar incorporado com o aumento de partículas microfinas nas misturas, o que possivelmente indica uma maior compactidade da fase pasta. Já em relação aos índices de vazios, percebe-se que houve uma diminuição significativa dos índices de vazios encontrados com a massa unitária no estado compactado em relação aos índices com a massa unitária no estado solto. No entanto, se comparados entre os índices de vazios considerados, nota-se que praticamente não houve variação nos valores destes.

#### 4.3.2.5 – Análises dos resultados da areia CA – projeto experimental 3

Pela figura 4.87 a seguir verifica-se que houve um decréscimo da velocidade de fluxo com o aumento do teor de microfinos (figura 4.87-a) e um acréscimo da tensão de escoamento com o aumento destas partículas. Como já explicado anteriormente, provavelmente os resultados refletem uma tendência de aumento da coesão do sistema, refletindo no aumento de tensão de escoamento e velocidade de fluxo ao se elevar os teores de filler nas composições.

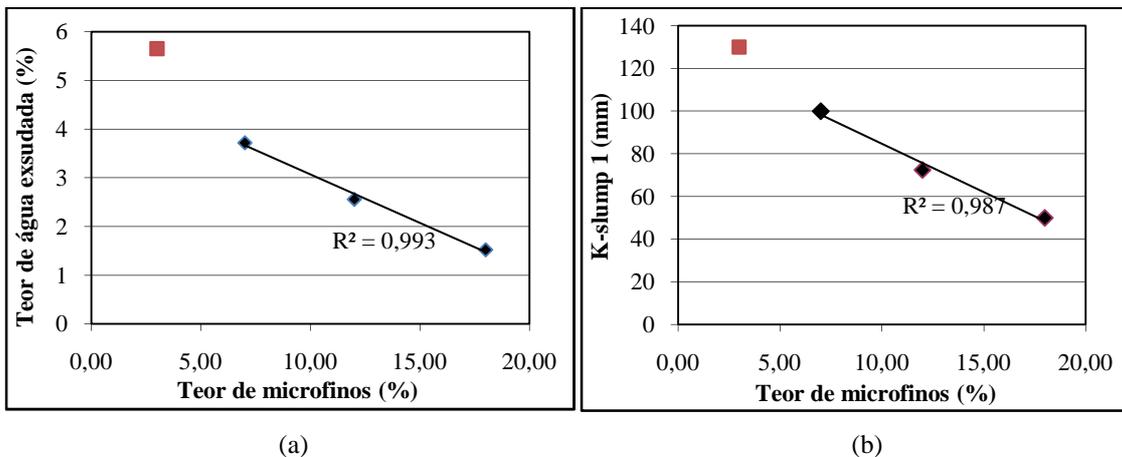


**Figura 4.87** – Correlação entre velocidade de fluxo (figura 4.87 – a) e tensão de escoamento (figura 4.87– b) e teor de microfinos da areia CA – **projeto experimental 3**



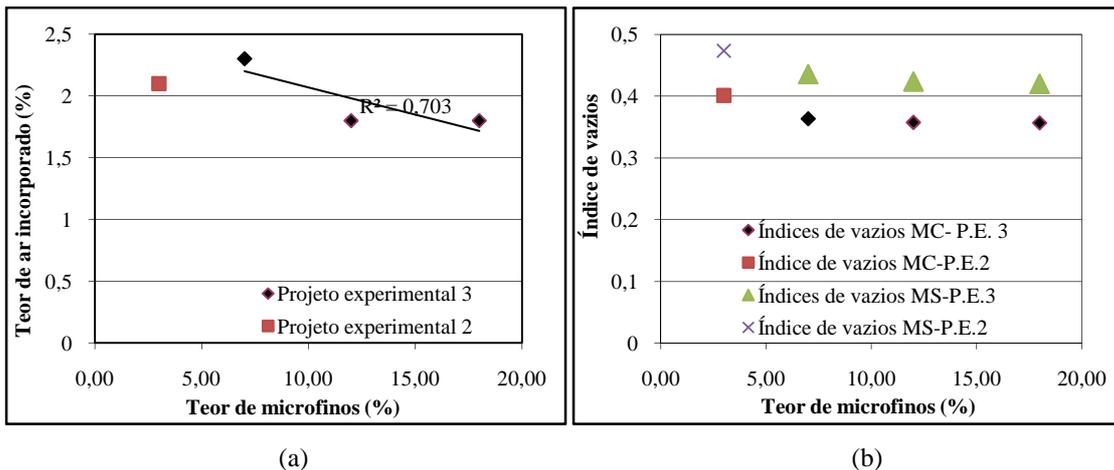
(a) (b)  
**Figura 4.88** – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.88 a) e k-slump 2 (figura 4.88 b) versus teor de microfinos da areia MI – **projeto experimental 3**

Ao se analisar a figura 4.88 nota-se que houve um decréscimo acentuado nos resultados de consistência mensurados pelos métodos abatimento e *k-slump 2*, se comparados os valores alcançados no projeto experimental 2, o que pode ratificar a análise realizada anteriormente.



(a) (b)  
**Figura 4.89** – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.89 a) e k-slump 2 (figura 4.89 b) versus teor de microfinos da areia CA – **projeto experimental 3**

Com o aumento de partículas muito finas houve um decréscimo no teor de água exsudada e segregação mensurada pelo *k-slump 1* (figuras 4.89 – a e 4.89 – b), denotando-se provavelmente um incremento de compactidade do esqueleto sólido dos grãos, o que resultou na diminuição dessas variáveis.



**Figura 4.90** – Resultados de abatimento de tronco de cone (figura 4.90 a) e k-slump 2 (figura 4.90 b) versus teor de microfinos da areia CA – projeto experimental 3

Pela figura 4.90 (a) percebe-se uma ligeira tendência de diminuição do teor de ar incorporado com o aumento da quantidade de microfinos na mistura. Já em relação aos índices de vazios, nota-se uma diminuição desses se comparados aos resultados do projeto experimental 2, o que pode comprovar a maior compactidade do esqueleto sólido com o incremento de fíler da areia CA. No entanto, se comparados entre si os valores das duas grandezas avaliadas, nota-se que os mesmos resultaram praticamente constantes.

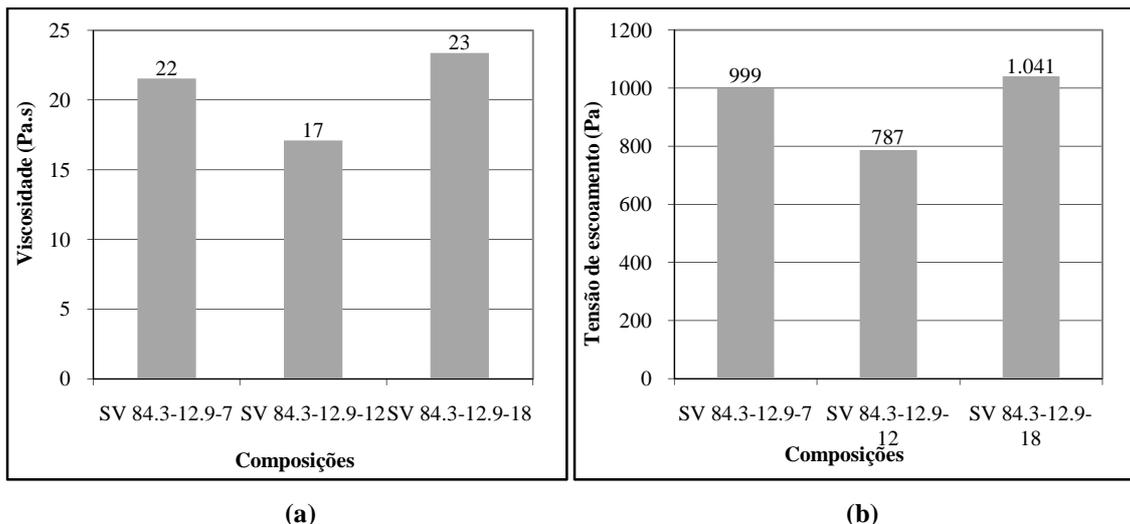
Como pôde-se perceber, o aumento no teor de partículas microfinas ocasionou invariavelmente uma elevação nos valores de viscosidade (relacionada à velocidade de fluxo), tensão de escoamento e consistência, independente dos resultados de potencial zeta apresentados anteriormente na tabela 4.22. Ou seja, diferentemente do observado no estudo piloto (capítulo 3) não houve influência da energia superficial dos microfinos nas propriedades reológicas e de consistência dos concretos, motivo pelo qual não foram realizadas correlações entre potencial zeta e tais propriedades.

#### 4.3.3 – Análises dos resultados – projeto experimental 4

Neste item serão analisados os resultados das variáveis consideradas no projeto experimental 4. Cabe salientar que o projeto experimental 4 foi concebido após a análise dos projetos experimentais 2 e 3 no que concerne à influência dos grãos médio-finos (passante na peneira 0.6 mm e retidos na peneira 200) e microfinos na consistência dos concretos.

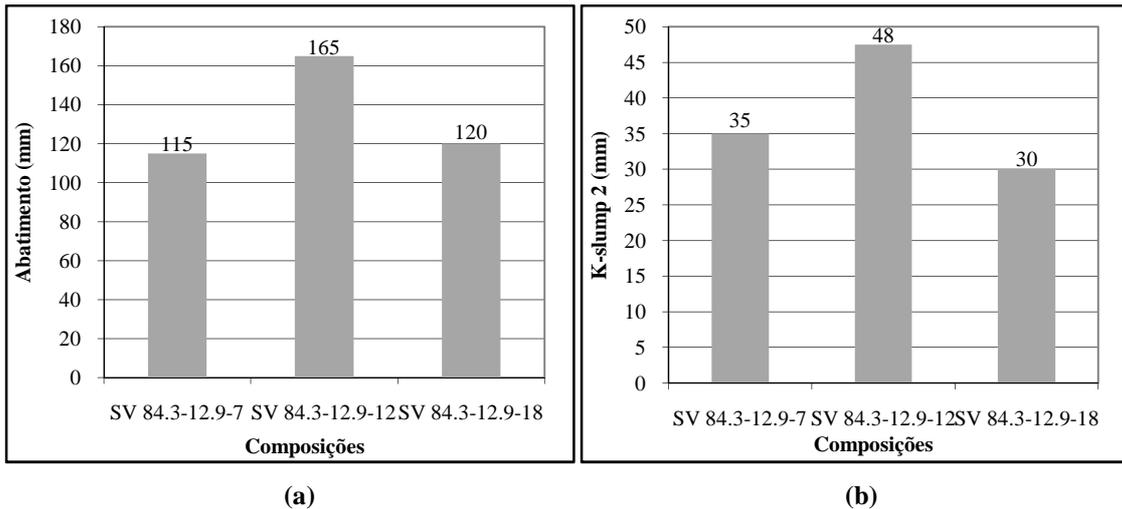
#### 4.3.3.1 – Análise dos resultados – Areia SV

Na figura 4.91 a seguir estão apresentados os resultados de viscosidade e tensão de escoamento dos concretos produzidos.



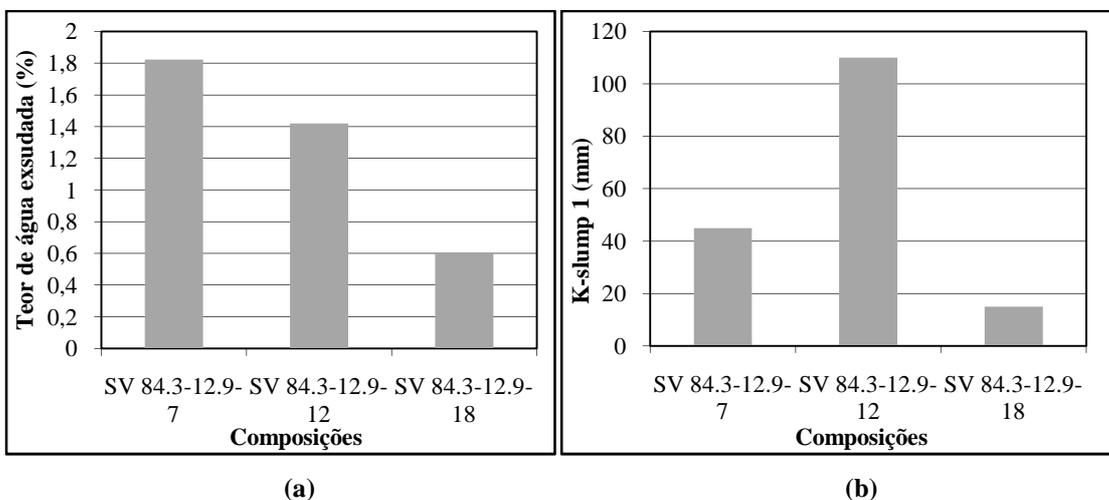
**Figura 4.91** – Correlação entre viscosidade (figura 4.91 – a) e tensão de escoamento (figura 4.91 – b) e teor de microfinos da areia SV – projeto experimental 4

Nota-se que os valores de viscosidade e tensão de escoamento das misturas com 7% e 18% de partículas microfinas resultou praticamente os mesmos, ou seja, a adição de altos teores de fíler de areia SV não resultou no aumento de viscosidade e tensão de escoamento, havendo inclusive um decréscimo significativo dessas propriedades quando adicionados 12% de microfinos, o que corrobora as conclusões de alguns trabalhos pesquisados, tais como os de BASTOS (2006) e de certa forma o de RODOLPHO (2007).



**Figura 4.92** – Correlação entre abatimento de tronco de cone (figura 4.92 – a) e *k-slump* 2 (figura 4.92 – b) e teor de microfinos da areia SV – **projeto experimental 4**

Pela figura 4.92 nota-se que o concreto mais fluido foi aquele contendo 12% de microfinos, considerando tanto o abatimento quanto o *k-slump* 2. Cabe salientar ainda que, de acordo com o ensaio de abatimento, a mistura com 18% de partículas microfinas se apresentou mais fluida do que aquela com 7% de microfinos, o que significa dizer que os concretos não se apresentaram mais consistentes com o acréscimo de microfinos, como presenciado nas misturas do projeto experimental 3. Já o ensaio *k-slump* 2 indica que os concretos mais fluidos, do menos ao mais consistente, são os que contêm 12%, 7% e 18% de microfinos, sendo que esses dois últimos resultaram em valores bastante similares. Considerando a areia SV, ao se adicionar 12% de microfinos obteve-se o volume ótimo de pasta lubrificante, o que provavelmente propiciou redução na consistência desse concreto.

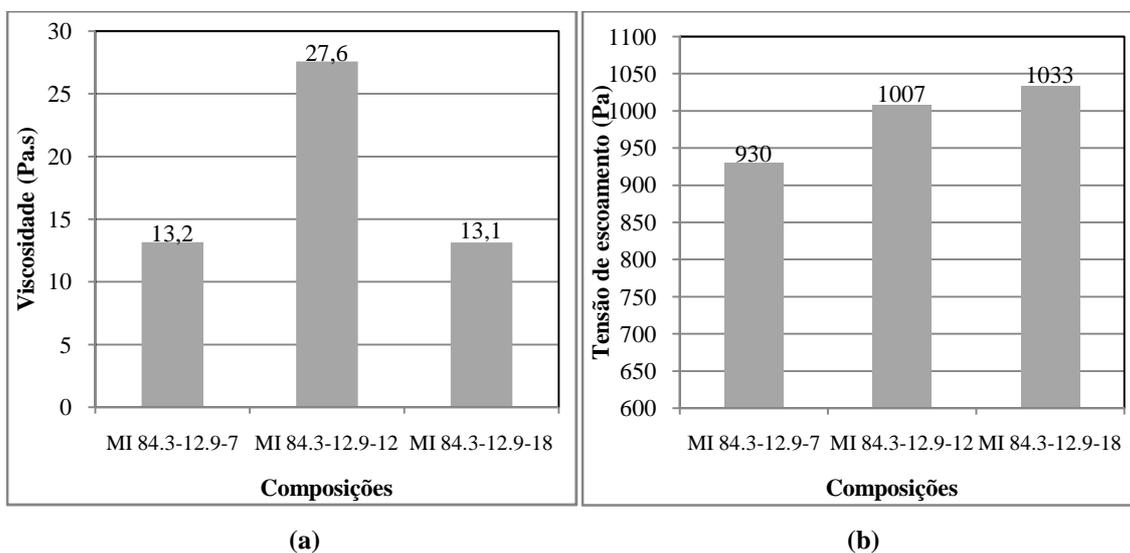


**Figura 4.93** – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.93 – a) e *k-slump* 1 (figura 4.93 – b) e teor de microfinos da areia SV – **projeto experimental 4**

De acordo com a figura 4.93 verifica-se um menor teor de água exsudada com o aumento do percentual de microfinos das misturas e uma tendência de maior segregação para o concreto com 12% de fíler. Esses resultados podem demonstrar que a matriz se tornou mais coesa ao se adicionar altos teores de partículas microfinas.

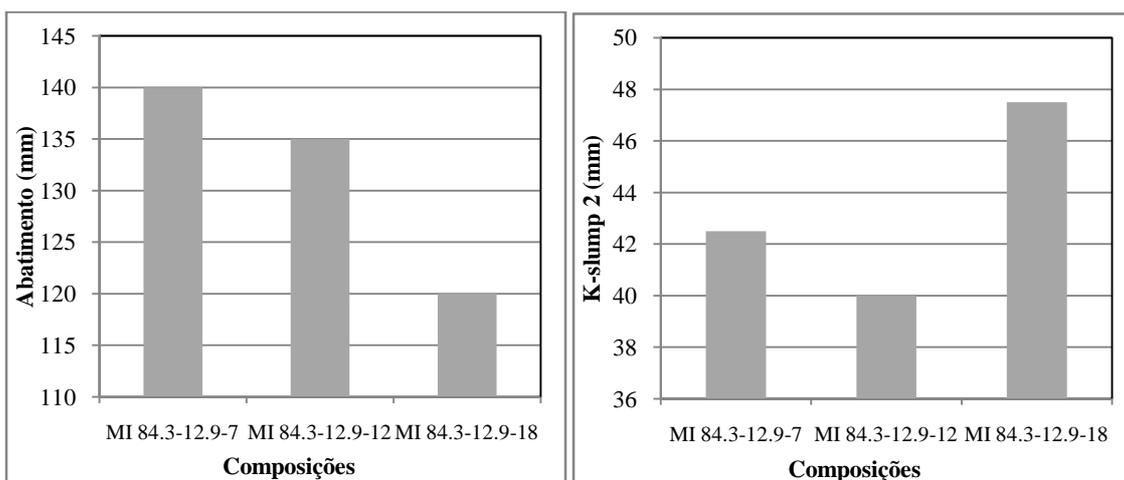
#### 4.3.3.2 – Análise dos resultados – Areia MI

Pelos resultados expostos na figura 4.94 a seguir percebe-se que ao se colocar 18% de



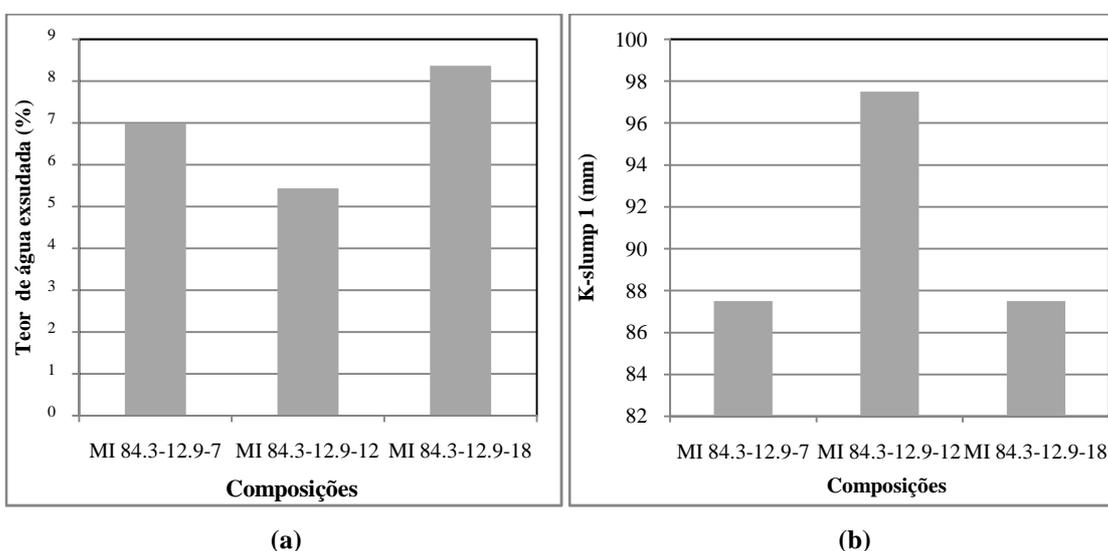
**Figura 4.94** – Correlação entre viscosidade (figura 4.94 – a) e tensão de escoamento (figura 4.94 – b) e teor de microfinos da areia MI – projeto experimental 4

partículas microfinas houve um acréscimo de lubrificação do sistema, principalmente se comparados os resultados de viscosidade de tal mistura com o concreto contendo 12% de fíler. Já em relação à tensão de escoamento, nota-se que tal propriedade resultou em valores similares para os teores de microfinos 12 e 18%, e um pouco inferior se considerada a composição com 7% de fíler. Ou seja, para a areia MI parece haver um aumento da tensão requerida para se iniciar o fluxo da mistura (tensão de escoamento), portanto, um aumento da consistência dos concretos. Entretanto, a resistência ao escoamento (viscosidade) resultou diminuída ao se adicionar um maior teor de partículas muito finas (18%), o que significa dizer, que apesar do pequeno incremento na consistência das misturas, houve um efeito benéfico no que concerne ao deslizamento entre camadas do fluido (do concreto), resultando em um decréscimo nos valores de viscosidade.



(a) (b)  
**Figura 4.95** – Correlação entre abatimento (figura 4.95 – a) e k-slump 2 (figura 4.95 – b) e teor de microfinos da areia MI – **projeto experimental 4**

Pela figura 4.95 apresentada anteriormente percebe-se pelo ensaio de abatimento de tronco de cone uma maior fluidez do concreto realizado com 7% de fíler (MI 84.3-12.9-7) e maior consistência daquele contendo 18% de microfinos (MI 84.3-12.9-18). Já em relação ao ensaio de *k-slump* 2, a maior fluidez foi encontrada no concreto com 18% de microfinos e a menor, com o concreto contendo 12% dessas partículas.



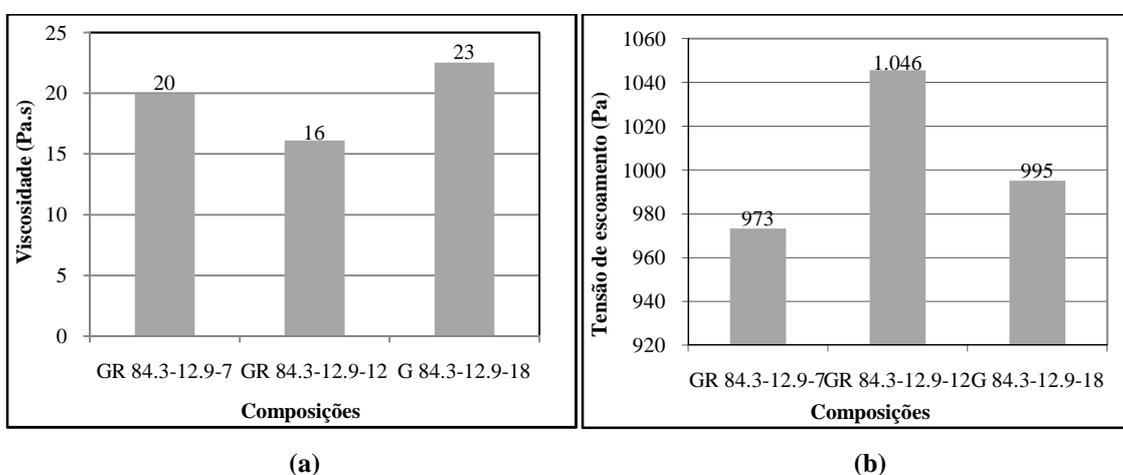
(a) (b)  
**Figura 4.96** – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.96 – a) e k-slump 2 (figura 4.96 – b) e teor de microfinos da areia MI – **projeto experimental 4**

Pela figura 4.96 (a) nota-se que as misturas produzidas com a areia MI resultaram em altos teores de água exsudada, principalmente em se tratando da mistura com 18% de

microfinos. Já em relação ao potencial de segregação, percebe-se que o concreto se mais segregável foi aquele com teor de microfinos igual a 12%.

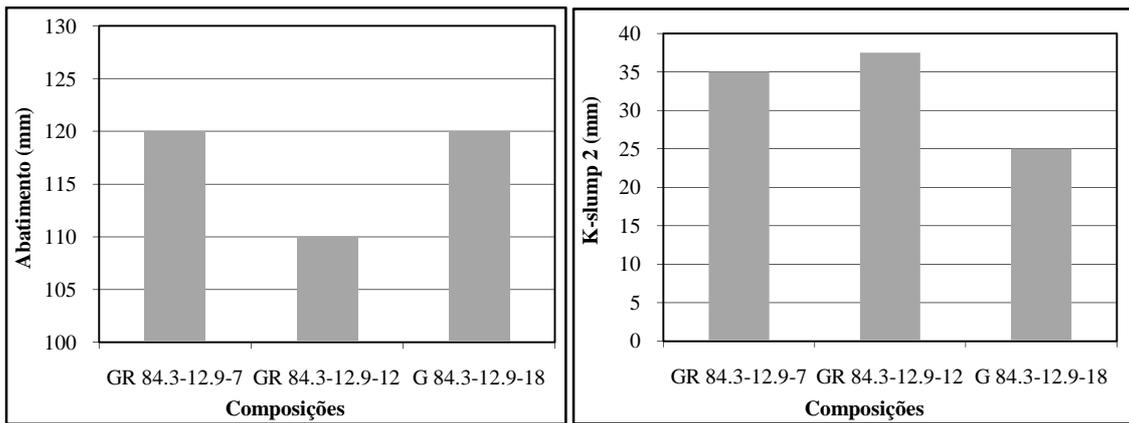
#### 4.3.3.3 – Análise dos resultados – Areia GR

Pela figura 4.97 verifica-se que houve um decréscimo de viscosidade ao se adicionar 12 % de partículas microfinas em comparação com os demais teores. Nota-se também, que houve um pequeno acréscimo tanto de viscosidade quanto tensão de escoamento ao se utilizar areia com 18% de filler.



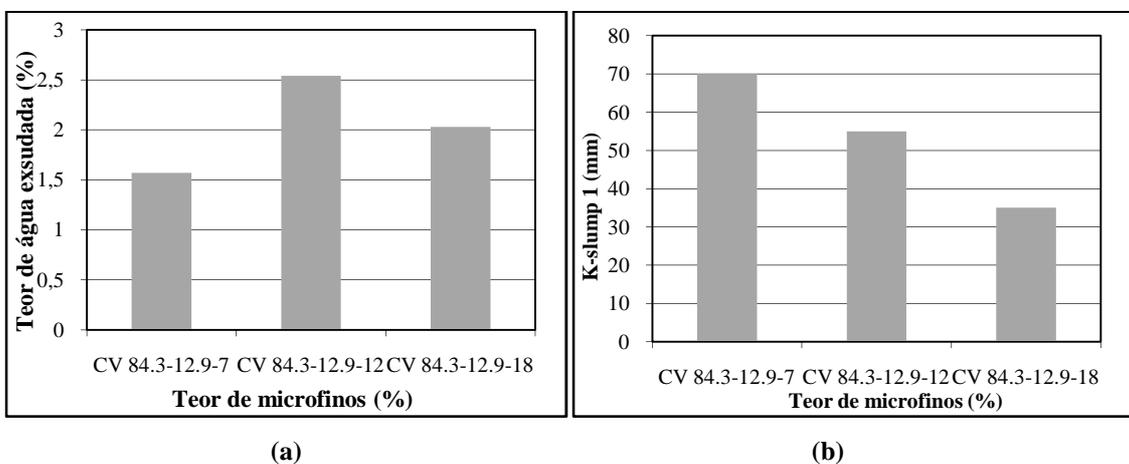
**Figura 4.97** – Correlação entre viscosidade (figura 4.97 – a) e tensão de escoamento (figura 4.97 – b) e teor de microfinos da areia GR – **projeto experimental 4**

Cabe salientar que apesar do teor igual a 12% proporcionar uma redução no valor de viscosidade, ao se mensurar a tensão de escoamento desta mistura, constatou-se que a mesma apresentou o maior resultado dessa propriedade em relação aos demais concretos.



(a) (b)  
**Figura 4.98** – Correlação entre abatimento (figura 4.98 – a) e k-slump 2 (figura 4.98 – b) e teor de microfinos da areia GR – **projeto experimental 4**

Pela figura 4.98 (a) nota-se que a consistência dos concretos foi praticamente constante, com um valor de abatimento um pouco menor para o teor de microfinos igual a 12%. Já pelo *k-slump 2* percebe-se que os resultados desse ensaio estão em concordância com os resultados de viscosidade observados na figura 4.98 anterior, já que os concretos produzidos com as composições com 12%, 7% e 18% de microfinos se apresentaram, em ordem do mais fluido e menos viscoso ao menos fluido e mais viscoso, a mesma em relação a ambos os ensaios.

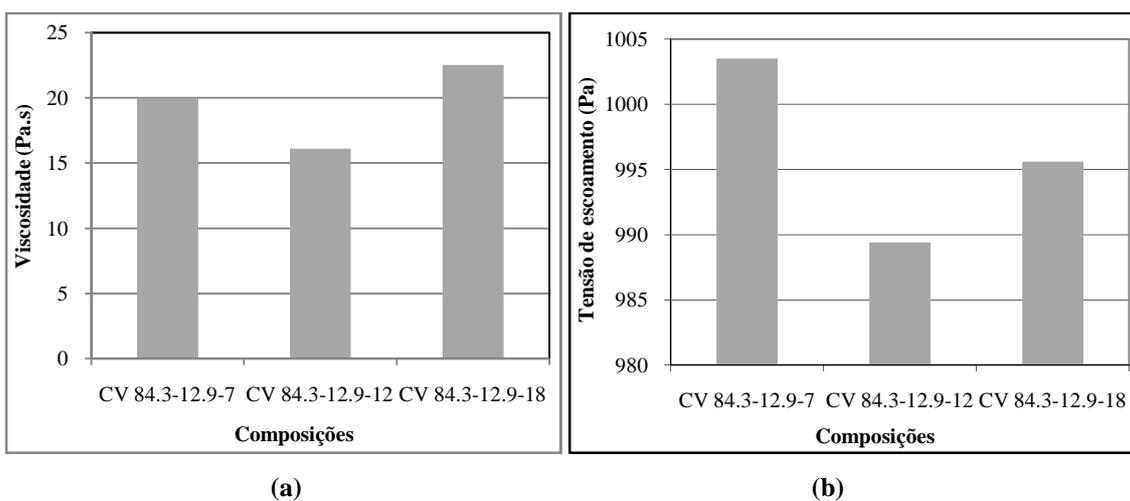


(a) (b)  
**Figura 4.99** – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.99 – a) e k-slump 1 (figura 4.99 – b) e teor de microfinos da areia GR – **projeto experimental 4**

Pela figura 4.99 (a) apresentada anteriormente nota-se que a composição que proporcionou o concreto mais exsudável foi aquela com 7% de partículas microfinas, enquanto que a composição com 12% de microfinos resultou na mistura mais segregável. Com esses resultados, nota-se que para a areia GR não houve uma diminuição do teor de água exsudada ou segregação dos concretos com o aumento do teor de partículas microfinas.

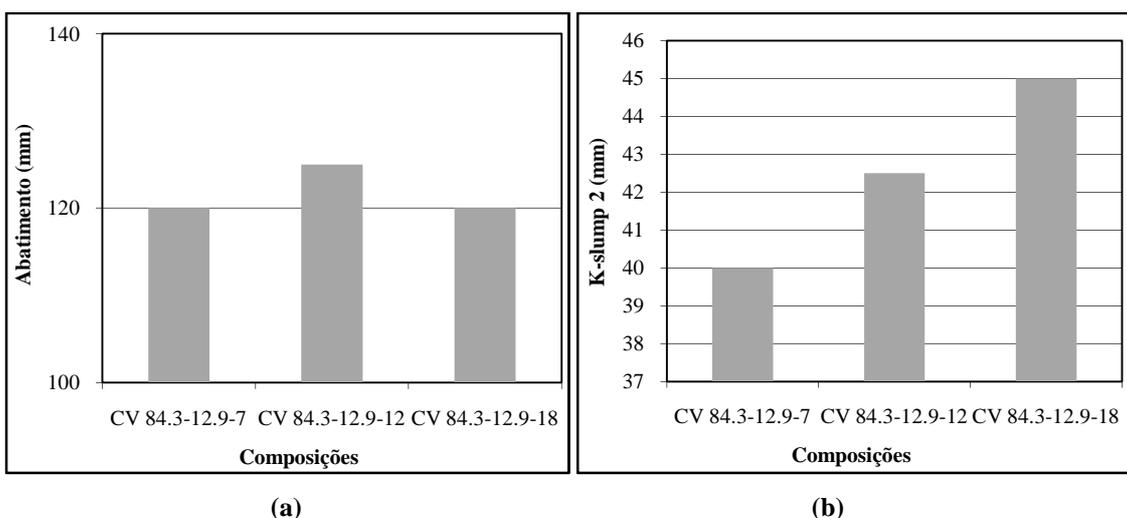
#### 4.3.3.4 – Análise dos resultados – Areia CV

Pela figura 4.100, verifica-se que os valores de viscosidade e tensão de escoamento foram inferiores ao se adicionar 12% de microfinos (figura 4.100). Provavelmente para essas duas areias esse percentual de fíler resultou no teor ótimo de forma que ao se usar um teor de microfinos abaixo ou acima deste valor, tais partículas proporcionam acréscimo de coesão, portanto, incremento das propriedades reológicas.



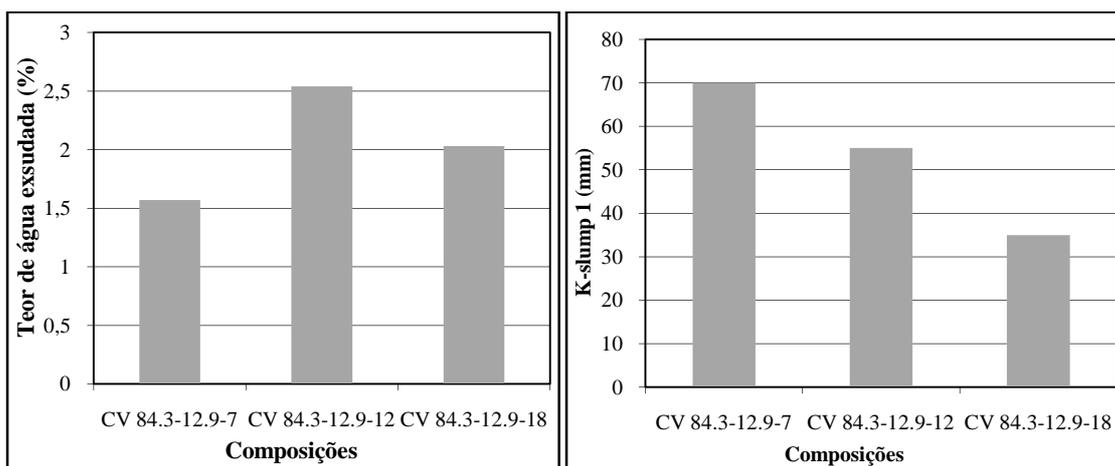
**Figura 4.100** – Correlação entre viscosidade (figura 4.100 – a) e  $k$ -slump 1 (figura 4.100 – b) e teor de microfinos da areia CV – projeto experimental 4

Na figura 4.101 a seguir estão apresentados os resultados de abatimento de tronco de cone e  $k$ -slump 2 dos concretos.



**Figura 4.101** – Correlação entre abatimento (figura 4.101 – a) e  $k$ -slump 2 (figura 4.101 – b) e teor de microfinos da areia CV – projeto experimental 4

Nota-se pela figura 4.101 que o concreto mais fluido mensurado pelo abatimento foi aquele cuja composição de agregado miúdo resultou em 12% de partículas microfinas. No entanto, pelo ensaio *k-slump* 2 a mistura mais fluida foi a obtida com 18% de fíler. Provavelmente a lubrificação do mais alto teor de partículas microfinas foi mais efetiva, na areia CV, no microconcreto já que tal ensaio mensura a fluidez real da argamassa do concreto.

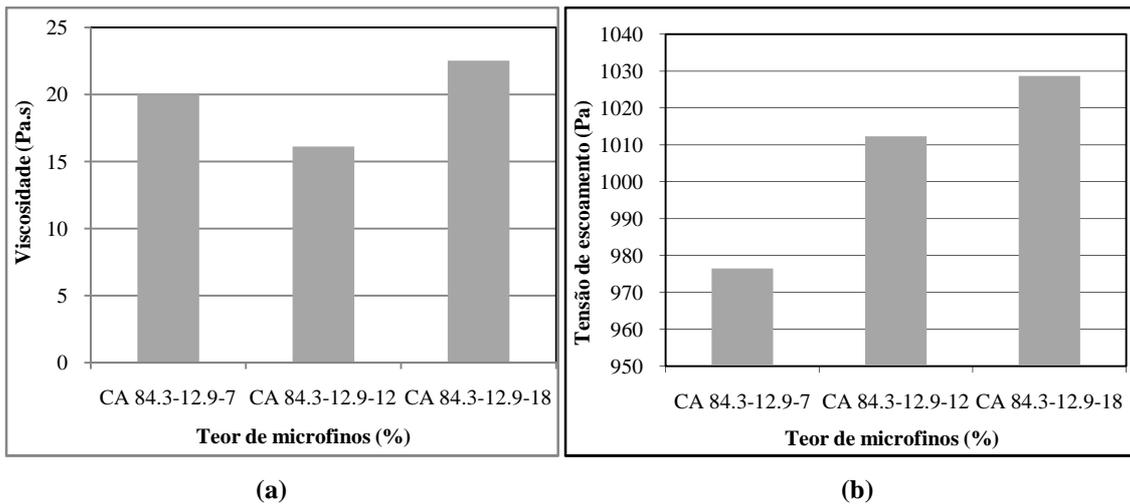


**Figura 4.102** – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.102 – a) e *k-slump* 1 (figura 4.102 – b) e teor de microfinos da areia CV – projeto experimental 4

De acordo com a figura 4.102, o concreto que apresentou maior exsudação foi aquele com 12% de microfinos, sendo mais segregável a mistura com o menor teor de fíler e a menos segregável, o concreto produzido com a composição com 18% de microfinos. Provavelmente tais resultados comprovam a maior coesão favorecida pelo acréscimo de microfinos, ainda que os resultados de viscosidade e tensão de escoamento foram similares.

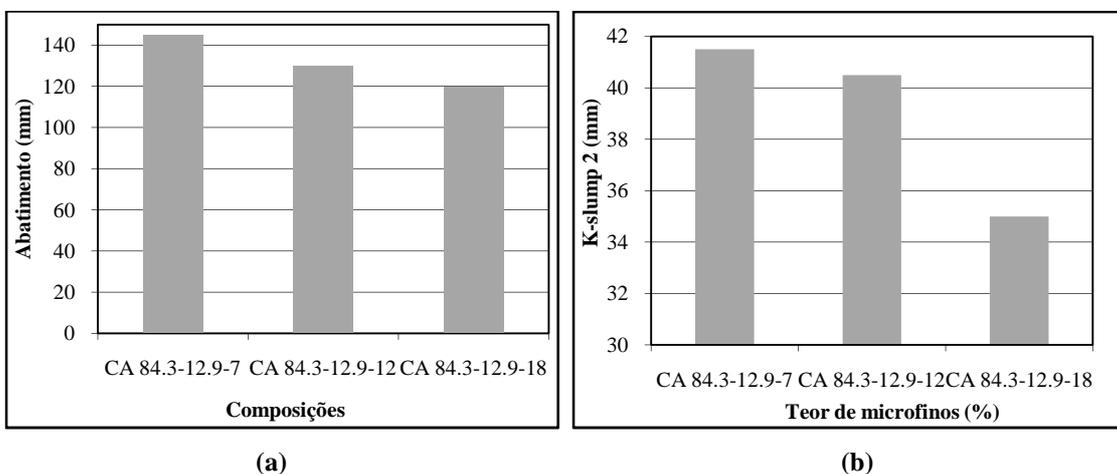
#### 4.3.3.5 – Análise dos resultados – Areia CA

Pela figura 4.100 verifica-se que o menor resultado de viscosidade do concreto foi encontrado com a composição que possui 12% de partículas microfinas, enquanto que o menor valor de tensão de escoamento foi configurado com 7% de fíler.



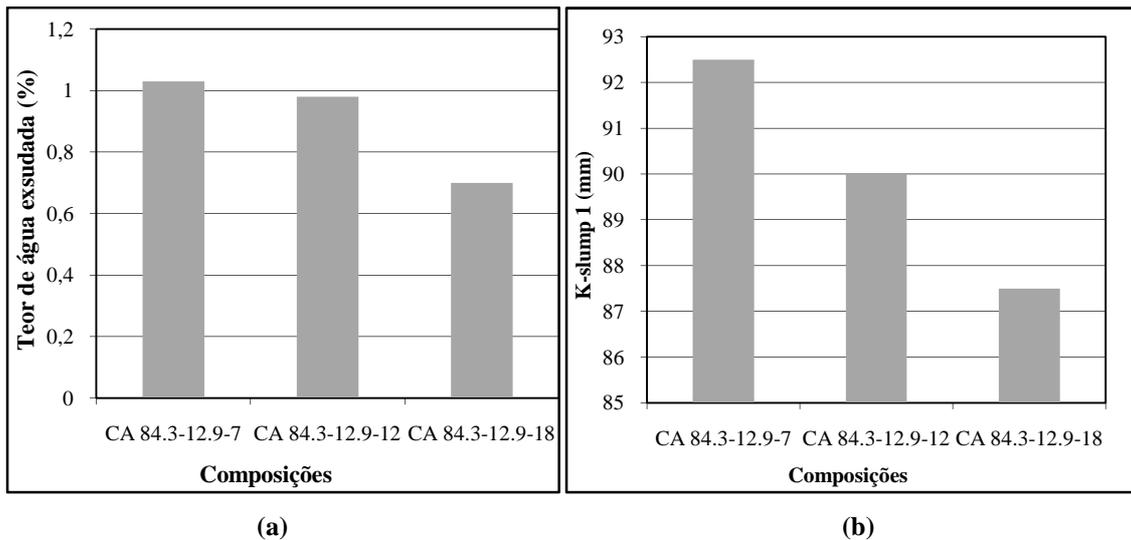
**Figura 4.103** – Correlação entre viscosidade (figura 4.103 – a) e tensão de escoamento (figura 4.103 – b) e teor de microfinos da areia CA – projeto experimental 4

Parece que o aumento de partículas microfinas de areia CA, incrementou a coesão da mistura, refletindo num aumento gradativo da tensão de escoamento, apesar deste ser praticamente insignificante. Mais uma vez, percebe-se que o aumento do teor de microfinos ocasionou um maior deslizamento entre as camadas de fluxo do concreto, diminuindo a viscosidade, principalmente com 12% de fíler. No entanto, tal aumento reflete na também elevação da tensão de escoamento do material, ainda que pequena.



**Figura 4.104** – Correlação entre abatimento (figura 4.104 – a) e *k-slump 2* (figura 4.104 – b) e teor de microfinos da areia CA – projeto experimental 4

A consistência das misturas (figura 4.104) se apresentou tanto maior quanto maiores os teores de microfinos adicionados às composições, apesar da pequena diferença entre o abatimento de 12% para 18% de microfinos. Já no ensaio de *k-slump 2* o aumento da consistência se mostrou mais acentuado.



**Figura 4.105** – Correlação entre teor de água exsudada (figura 4.105 – a) e *k-slump 1* (figura 4.105 – b) e teor de microfins da areia CA – **projeto experimental 4**

Pela figura 4.105, percebe-se as misturas se apresentaram menos exsudáveis e segregáveis com o aumento no teor de partículas microfinas.

Nota-se que as misturas produzidas no projeto experimental 4 obtiveram fluidez necessária à realização do ensaio de abatimento modificado, com o qual determinou-se as viscosidades das mesmas. Ou seja, ao se reduzir o material médio-fino (passante da peneira 0.6mm - retido na peneira 200) para 12.9%, houve um acréscimo de fluidez e diminuição da viscosidade, mesmo para as misturas com altos teores de partículas microfinas, denotando que provavelmente os grãos médio-finos ocasionam um aumento da área superficial de molhagem. Nota-se ainda que os valores de viscosidade e tensão de escoamento no geral apresentaram pequenos acréscimos entre si, evidenciando assim que os microfins são lubrificantes por muitas vezes propiciarem um maior deslizamento entre camadas de fluido, ou pelo menos não impedirem efetivamente a fluidificação do sistema, o que corrobora conclusões de alguns trabalhos pesquisados, tais como os de BASTOS (2006) e de certa forma o de RODOLPHO (2007).

Houve uma tentativa de identificar estatisticamente qual(is) da(s) variável(is) estaria influenciando significativamente em cada projeto experimental com o uso da ferramenta estatística ANOVA – Análise de Variância. No entanto, tal feito não foi possível já que não há maneira de separar as variáveis independentes (aspectos de forma e textura superficial, natureza petrográfica e até mesmo distribuição granulométrica) de forma a proceder à associação direta entre as diversas variáveis dependentes deste trabalho.

Nesse sentido, a solução encontrada para identificar comportamentos foi agrupar, como observado até o presente momento, os concretos produzidos com areias cujas características se apresentaram similares, em relação aos aspectos de forma e textura superficial projeto experimental 1, e a análise isolada por natureza petrográfica, como observado nas análises dos demais projetos experimentais.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO**

Com base nas análises dos resultados, considerando-se os materiais e procedimentos utilizados, obteve-se as seguintes conclusões:

### **5.1 – Influência dos parâmetros de forma, texturais e da natureza petrográfica nas propriedades dos concretos no estado fresco – Projeto experimental 1**

Considerando as areias usadas neste trabalho, pode-se inferir que o aspecto de forma mais relevante em termos de influência nas propriedades consistência, segregação e teor de água exsudada dos concretos foi a esfericidade. Cabe salientar ainda que possivelmente a natureza petrográfica dos agregados miúdos também exerce influência significativa, já que as correlações só foram possíveis ao se agrupar os concretos por grupos de natureza petrográfica semelhantes. Provavelmente a calcita exerça algum efeito dispersivo nas misturas, pois, quanto maior o teor de tal mineral nas areias britadas, mais fluidos, mais segregáveis ou pouco coesos e mais exsudáveis os concretos se apresentaram. Esse comportamento diferente das misturas que contêm calcita pode ser devido ao fato da calcita ser um mineral que possui menor dureza em relação aos demais, ou então devido às ligações epitaxiais entre os cristais do mineral e os cristais de cimento. Em relação à textura superficial, não houve influência significativa entre este parâmetro e as propriedades do concreto, o que significa dizer que, para as areias usadas neste trabalho, a obtenção de propriedades satisfatórias no estado fresco está atrelada à esfericidade/eqüidimensionalidade dos grãos, ou seja, a areia pode apresentar alta angulosidade de cantos e arestas, e textura superficial rugosa, desde que o formato da partícula seja esférico/eqüidimensional.

### **5.2 – Influência do grau de continuidade da curva granulométrica dos agregados nas propriedades do estado fresco – Projeto experimental 2**

Ao se compor as areias com 80%-20%, 70%-30%, 60%-40% e 50%-50% (percentual de material retido – material passante na peneira 0.6 mm dessa última e retido na peneira 0.075 mm), pôde-se concluir que houve correlação entre o grau de continuidade das composições e a tensão de escoamento dos concretos, sendo esta tanto maior quanto mais descontínua a curva das composições e agregados graúdos, para a maioria das areias (excetuando-se os concretos produzidos com a areia calcária dolomítica sem tratamento de forma – CV). Acredita-se que tal fato se deve à redução do atrito interno entre os grãos grossos em função do melhor preenchimento da estrutura sólida.

Já em relação à viscosidade, não foi observada correlação evidente com o grau de continuidade para a maioria das areias. Entretanto, percebeu-se que quando a areia possui formato menos esférico (ou equidimensional) a viscosidade se apresentou reduzida quando usado um maior teor de material médio-fino (passante na peneira 0.6mm – retido na peneira 0.075 mm), já que este material minimizaria o atrito interno dos grãos grossos com formato pouco esférico.

A consistência mensurada através do abatimento de tronco de cone se mostrou mais correlacionada ao teor de material médio-fino, sendo a fluidez tanto maior, quanto menores os percentuais deste material. Apesar das correlações menos claras em relação à continuidade, se comparadas às correlações obtidas com a tensão de escoamento, notou-se uma tendência de redução no valor de abatimento, quanto maior a descontinuidade das curvas.

No geral, parece haver uma relação efetiva entre o percentual de grãos intermediários (considerando a curva total de agregados) e o percentual de partículas finas (entre 0,3 mm e 0,075 mm) e as propriedades reológicas dos concretos, sendo os valores de tensão de escoamento e viscosidade, quanto mais elevados esses percentuais de grãos finos (geralmente quando estes percentuais ultrapassam 30% da massa total de areia) e intermediários.

### **5.3 – Influência do aumento do teor de microfinos nas curvas granulométricas mais contínuas – Projeto experimental 3**

O aumento nos teores de partículas microfinas, ao se utilizar as curvas com maior grau de continuidade encontradas no projeto experimental 2, resultou no acréscimo de coesão e portanto de viscosidade, tensão de escoamento e consistência, independente da energia superficial (potencial zeta) destas partículas. Entretanto, também houve, para a maioria das areias, uma redução do teor de água exsudada e segregação das misturas.

### **5.4 – Influência da redução do material médio-fino nas propriedades do concreto – Projeto experimental 4**

Para as areias usadas neste trabalho, houve um decréscimo nos valores de viscosidade, tensão de escoamento e consistência ao se reduzir o percentual de grãos médio-finos, mesmo ao serem adicionados elevados teores de partículas microfinas. No entanto, a redução deste material médio-fino (passante na peneira 0,6mm – retido na peneira 0,075mm) ocasionou também misturas mais exsudáveis e segregáveis. Portanto, conclui-se pelos resultados encontrados neste trabalho, que a presença de altos percentuais de grãos médio-finos aumentam a consistência, tensão de escoamento e viscosidade das misturas ao passo que os microfinos não

propiciam incremento significativo em tais propriedades, podendo sim, inclusive, serem considerados lubrificantes, já que provavelmente permitem um maior deslizamento entre as camadas do fluido.

### **5.5 – Adequação dos ensaios aos objetivos propostos**

Notou-se que o ensaio de abatimento modificado é um método útil e prático que permite a determinação das propriedades reológicas do concreto, desde que o mesmo atinja uma fluidez mínima (no caso, o abatimento considerado ideal para concretos bombeáveis, da ordem de 120 mm). Este método pode ser usado como referência para estudos de dosagem, a fim de obter maior precisão, principalmente se levados em consideração concretos com areias britadas, pois se verificou, que por possuírem características distintas da areia natural – tais como formato de partículas e alto percentual de microfios – em alguns casos, os concretos produzidos com estes resíduos não foram perfeitamente caracterizados apenas com o ensaio de abatimento de tronco de cone normal.

Os ensaios de *k-slump 1 e 2* e exsudação necessitam de uma maior investigação com maior número de dados para validar sua utilização, mas é importante salientar em algumas misturas, o ensaio *k-slump 2* se mostrou mais apropriado para mensurar consistência quando comparado com o método do abatimento.

### **5.6 – Aspectos gerais**

Conclui-se, portanto, que é perfeitamente realizável a substituição total da areia natural pela areia britada artificialmente, se tomados os seguintes cuidados:

- Usar preferencialmente areias com formato equidimensional/esférico, mesmo que os grãos não possuam cantos e arestas arredondadas e textura superficial mais lisa, a fim de proporcionar misturas com menores consumos de cimento e água;
- Quando o tipo de obra e lançamento permitir um concreto mais consistente, utilizar areias com altos percentuais de grãos médio-finos aliado ao uso de elevados percentuais de partículas microfinas, o que provavelmente permite uma estrutura sólida mais compacta, favorecendo a durabilidade;
- Para a obtenção de concretos mais fluidos, as pedreiras devem reduzir os teores de materiais médio-finos e as empresas produtoras de concreto precisariam realizar um estudo de dosagem, de forma a reduzir o teor de água dos traços por meio de aditivos, reduzindo-se assim a exsudação das misturas compostas por areias com reduzida área superficial de molhagem;

- A curva de agregado total – agregado miúdo mais agregado(s) graúdo(s) – deve levar em consideração a influência dos grãos intermediários na compacidade e propriedades reológicas dos concretos;
- A utilização de agregado miúdo com altos teores de calcita deve ser feita atrelada com um estudo criterioso de dosagem, pois, pode ser inferido com os resultados deste trabalho que este mineral fluidifica excessivamente os concretos.

### **5.7 – Sugestão para trabalhos futuros**

A fim de proporcionar o prosseguimento e complementação da presente pesquisa, as sugere-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Análise dos parâmetros texturais e de forma através da análise de imagens e desenvolvimento de índices analíticos, como forma de obter maior precisão dos resultados;
- Investigação da cinética de hidratação do cimento com a presença do mineral calcita;
- Testar altos teores de partículas microfinas com curvas granulométricas de agregados descontínuas;
- Analisar os resultados de areias com tratamento e sem tratamento de forma, com naturezas petrográficas completamente similares ou até mesmo iguais;
- Proceder à tentativa de redução do consumo de cimento e relação água/cimento com o uso de aditivos;
- Avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos desenvolvidos no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, I.R. Concretos dosados em central, com 100% de areia artificial. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem.** São Paulo-SP, 2005.
- ALMEIDA, S.L.M.de; SILVA, V. da S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem.** São Paulo-SP, 2005.
- ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassa de revestimento.** Brasília, 2002. 175 f.
- ANDRIOLO, F.R. Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem.** São Paulo-SP, 2005.
- ANGELIM, R. R. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimento.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiânia, Goiânia(GO), 199. 146p.
- ANH, N.-S. **An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate micro fines in Portland cement concrete.** Tese de doutorado, Universidade do Texas, Austin, Estados Unidos da América, 2000.
- ARAÚJO, G. S. **Estudo de parâmetros texturais das areias para argamassas de revestimento através da análise de imagens.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2001. 104p.
- ARAÚJO JUNIOR, J.M. Contribuição ao estudo das propriedades físico-mecânicas das argamassas de revestimento. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2004. 175p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389:** Apreciação petrográfica de materiais naturais para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra em campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregados graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251;** Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810;** Agregado em estado compactado a seco: determinação da massa unitária - Especificação. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47:** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressiométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 102:** Concreto – Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 102:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Cimento portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Cimento portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Cimento portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Cimento portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J. & GOODIER, C. I. The rheological performance of wet-process sprayed mortars. **Magazine of Concrete Research**, vol. 51, no. 5, October, 1999, pág. 341-352.

- BANFILL, P. F. G.; et al. The rheology of fresh cement and concrete – A review. **11<sup>th</sup> International Cement Chemistry Congress**, Durban, maio, 2003. 13 p.
- BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar. **Magazine of Concrete Research**, vol. 43, no. 154, 1991, pág. 13-21.
- BARNES, H. A. & NGUYEN, Q. D. Rotating vane rheometry – a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, no. 98, 2001, pág. 1-14.
- BASTOS, S.R.B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Santa Catarina/SC, 2002, 118 p.
- BASTOS, S.R.B. Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção de concretos convencionais. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.
- BOUSO, J.L. Aproveitamento das areias finas produzidas em plantas de tratamento de pedras e areias e sua importância no impacto ambiente. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.
- BRETAS, R.E.S. e D'ÁVILA, M.A. *Reologia de Polímeros Fundidos*. Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2000.
- BUEST, G.T.; SILVA, N.G.; CAMPITELI, V.C. Dosagem de finos com agregados miúdos e graúdos britados. 47º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, vol. V – Inovações tecnológicas do concreto, Recife/PE, 2005, pgs. V.597 a II.612.
- CHAVES, A.P. Estado da arte da produção de areia de britagem. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.
- COSTA, D.W.da; CARANJO, D.; BASTOS, S.R.B.; SOUZA, W.A. de. Influência da granulometria do agregado miúdo na produção de concretos convencionais. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.
- COUTINHO, J.S. Apostila sobre NP EM 12350 – Ensaio do Betão Fresco. Apostila MC02 PráticasB2004, 2003, Portugal.
- CUCHIERATO, G. **Caracterização dos resíduos de mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2000. 201p.
- CUCHIERATO, G.; SBRIGHI NETO, C.; QUITETE, E.B. A Revisão das normas de agregados: NBR 7211 e NBR 9935 – Quais as alterações nas terminologias e especificações para os finos de pedra. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.

CUCHIERATO, G. A Sustentabilidade na indústria da pedra britada através da otimização de resíduos. Resumo. VI Seminário “Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil”, 2003.

CUNHA, E.R.; TAVARES, L.M.M.; GONÇALVES, J.P.; TOLEDO FILHO, R.D.; ALMEIDA, S.L.M. Produção de areia manufaturada em usina piloto. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.

D’AGOSTINHO, L.Z.; SOARES, L. Uso de finos de pedreira de rocha granítica e basáltica no preparo de argamassas. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.

DE LARRARD, F.; HU, C.; SEDRAN, T.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M., CLAUX, F. & DERKX, F. A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete. **ACI Materials Journal**, no. 94-M27, May-June, 1997, pág. 234-243.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning – a scientific approach**. E & FN SPON, New York, 1999. 421p.

DE LARRARD, F. & SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 2118, 2002, pag. 1-6.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Editado pela ABES- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro/RJ, 1993, 481p.

DONZA, H.; CABRERA, O; IRASSAR, E.F. High-strength concrete with different fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, 2003, p.1755-1761

CABRERA, O; DONZA, H. High-strength concrete with crushed fine aggregate. **XXVIII Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**, São Carlos, Brasil, v. 5,1997, p.2099-2107.

ÇELIC, T.; MARAR, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete research**, vol. 26, no. 7, 1996, pág. 1121-1130.

ERDOĞAN,S.T.; MARTYS,N.S.; FERRARIS, C.F.; FOWLER, D.W. **Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension**. *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, 2008, Pages 393-402

FARIA, R.J.B.; CRUZ, R.P. **Maximização do teor de areia industrial como agregado miúdo na produção de concretos**. Projeto final de curso, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2003, 98p.

FERRARIS, C. F.; GAIDIS, J. M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement past. **ACI Materials Journal**, July/August, 1992, pág. 388-393.

- FERRARIS, C.; DE LARRARD, F. Testing and modelling of fresh concrete rheology. **NISTIR 6094**, U.S. Dept. of Commerce, February, 1998. 71p.
- FERRARIS, C.; DE LARRARD, F. Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, vol. 20, nº 2, dezembro, 1998. p. 241-247.
- FERRARIS, C. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**. Vol. 104, no. 5, September-October, 1999, pág. 461-478.
- FERRARIS, C; DE LARRARD, F.; MARTYS, N. Fresh Concrete Rheology: Recent Developments. **NIST, reimpresso de Materials science of concrete VI**, 2001. pág.215-241.
- FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2005, 259p.
- GLAVIND, M.; PEDERSEN, E.J. Packing calculations applied for concrete mix design. Proceedings creating with concrete, Universidade de Dundee, maio de 1999. 10p.
- GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2005, 273p.
- HU, C. & DE LARRARD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete research**, vol. 26, no. 2, 1995, pág. 283-294.
- HUDSON, B. Aggregate shape affects concrete cost. Publicação ICAR – artigo técnico, 1998, 4 p.
- HUDSON, B. Concrete workability with high fines. Publicação ICAR – artigo técnico, 1999, 5 p.
- HUDSON, B. Specifications allowing high fines content. Publicação ICAR – artigo técnico, 1999, 5 p.
- HUNTER, R. J. Zeta potential in colloid science: Principles and applications. Ed. Academic Press, Londres, 1981, 386 p.
- JASTRZEBSKI, Z. D. **The nature and properties of engineering materials**. Second edition, Jhon Wiley & Sons, New York, 1976.633p.
- LANG, C.L. **Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento portland**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, Santa Catarina/SC, 2006, 143 p.

LIDUÁRIO, A.S.; FARIAS, L dos A., MUNIZ, F.C. Estudo do comportamento do agregado pulverizado nas propriedades do concreto convencional e do concreto compactado com rolo. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, vol. II –Construções em concreto, Florianópolis, 2004, pgs II.920 a II.932.

LODI, V.H.; PRUDÊNCIO JUNIOR, L.R. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento portland na região de Chapecó-SC.** Workshop – Desempenho de Sistemas Construtivos, Chapecó/SC, 2006.

MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de fluidos –Ênfase na Indústria de Petróleo. **Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2002.**

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, 1ª Edição, São Paulo, Ed. Pini, 1994. 573p.

MENOSSEI, R.T.; CAMACHO, J.S. Utilização do pó de pedra de rocha basáltica em concreto. **Anais do I SUFIBB-** Utilização adequada da fração fina. São Paulo-SP, 2003.

MENOSSEI, R.T. **Utilização de pó-de-pedra basáltica em substituição a areia natural do concreto.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Ilha Solteira, Ilha Solteira-SP, 2004, 96p.

MENOSSEI, R.T.; CAMACHO, J.S., SALLES, F.M; MELGES, J.L.P. A influência do uso de pó de pedra nas características do concreto. IBRACON, vol. II –Construções em concreto, Florianópolis, 2004, pgs II.48 a II.61.

MONTENEGRO FILHO, F.S.L.de; MACHADO, T.S. **Avaliação da influência da composição granulométrica e do tipo litológico da areia artificial em algumas propriedades do concreto.** Projeto final de curso, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2003, 89p.

NAVARRO, R. F. **Fundamentos de reologia de polímeros.** Editora EDUCS, 1º ed., Caxias do Sul, 1997.

NEHDI, M.; MINDESS, S. & AITCIN, C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete research**, vol. 28, no. 5, 1998, pág. 687-697.

NORONHA, R. T. T. **Otimização da reologia dos componentes de uma matriz e seus efeitos nas propriedades de um concreto refratário.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos(SP), 1995. 92p.

NGUYEN, N. Q. & BOGER, D. V. Direct yield stress measurement with the vane method. **Journal of Rheology**, vol. 29, no. 3, 1985, pág. 335-347.

- PAPINI, C.J.; YOSHITO, W.K.; GOUVÊA, D.; LEAL NETO, R.M. **A influência do potencial zeta na determinação da distribuição de tamanho de partículas.** Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Natal/RN, 2002.
- PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001, 197p.
- POPOVICS, S. **Fundamentals of Portland Cement Concrete: A Quantitative Approach.** Vol 1 Fresh Concrete. Jhon Wiley & Sons, New York, 1982. 477p.
- POPPE, A.-M.; SCHUTTER, G. De. Hydration modeling of filler self-compacting concrete. First International Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, China, 2005.
- PRUDÊNCIO JR., L.R.; COELHO, A.H.; GUTSTEIN, D. Metodologia para obtenção de agregado miúdo artificial a partir do processamento do pó de pedra. Encontro Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído, Rio de Janeiro-RJ, 1995. 5p.
- QUIROGA, P.N.; FOWLER, D.W. The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete. **Artigo de pesquisa 104-1F ICAR- International Center for Aggregate Research**, Austin-Texas, 2003. 382p.
- RAGO, F. **Características Reológicas de Pastas de Cales Hidratadas Normalizadas e de Cimento.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1999.
- REIS, R.J.P. **Influência do beneficiamento, por peneiramento, de areias de rio e artificiais, nas características mecânicas do concreto de cimento portland.** Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem. São Paulo-SP, 2005.
- RIXON, R. MAILVAGANAM, N. Chemical admixtures for concrete, London: E&FN SPON, 1999. 437 p.
- RODOLPHO, P.M. **Comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2007.
- ROSHAVELOV, T.T. New viscometer for measuring flow properties of fluid concrete. **ACI Material Journal**, v. 102, n°6, novembro-dezembro, 2005, p397-404.
- SALLES, F. M.; CARVALHO, P. A. de; PEREIRA, P. N. Características e desempenho de concretos confeccionados com areia artificial para as obras do complexo Canoas. **Congresso Brasileiro do Concreto**, 40°, 1998, Rio de Janeiro.
- SANTOS, C. C. N. **Critérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2003.

SBRIGHI NETO, C.; **A influência da areia britada e de seus finos em algumas propriedades do betão.** Mestrado em Engenharia Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Portugal, 1975.

SILVA, E.F. da; FARIA, R.J.B.; CRUZ, R.P.da. Maximização do uso de areia industrial para a produção de concretos sem o uso de areia lavada de rio. Congresso Brasileiro do Concreto, v. 2, 2004, p.1245-1260.

SILVA, T. S. S. da. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e esgoto.** Dissertação de Mestrado. Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública; 1999. 88 p.

SOBRAL, H. S. **Reologia e trabalhabilidade do concreto.** Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Estudo Técnico, no. 62, 2 ed. São Paulo, 1990, 84 p.

SOUSA, J.G.G. de. **Contribuição ao estudo das propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco.** Tese (doutorado) - Universidade de Brasília. 2005. 233 f.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica.**

Ed.Edgard Blücher Ltda, São Paulo–SP,1980.

TIECHER, F.; ANDREETTA, G.; SILVEIRA, A. R.; PANDOLFO, L. M. **Dosagem experimental de concreto com areia artificial.** XVII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e III Feira de Protótipos, Passo Fundo, 2002. Artigo técnico.5p

VASCONCELLOS, R. da F. Dosagem de Concreto pelo Método de Faury. Boletim Técnico, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 1976.

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B.; SILFWERBRAND,J.; FORSSBERG, E. **Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars** Cement and Concrete Composites, Volume 30, 2008, Páginas 274-282.



# ANEXOS

## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

A resistência à compressão foi realizada em corpos de prova cilíndricos com dimensões 10x20. As tabelas a seguir apresentam os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos dos projetos experimentais 1, 2 e 3 respectivamente.

TABELA A.1 – Resistência à compressão dos concretos – projeto experimental 1

<b>PROJETO EXPERIMENTAL 1</b>			
AREIA	CP 1	CP2	MÉDIA
CV	17,89	17,90	17,90
SV	17,68	17,34	17,51
NA	17,25	17,94	17,59
MI	17,21	16,98	17,10
GR	16,77	16,05	16,41
CA	16,03	15,89	15,96

TABELA A.2 – Resistência à compressão dos concretos – projeto experimental 2

<b>PROJETO EXPERIMENTAL 2</b>			
COMPOSIÇÕES	CP1	CP2	MÉDIA
CV 80-20	20,34	21,08	20,71
CV 70-30	21,14	21,78	21,46
CV 60-40	18,43	18,39	18,41
CV 50-50	18,30	18,75	18,53
SV 80-20	21,52	20,50	21,01
SV 70-30	21,14	20,08	20,61
SV 60-40	21,96	22,13	22,05
SV 50-50	19,77	20,12	19,95
MI 80-20	19,54	19,22	19,38
MI 70-30	21,78	21,91	21,84
MI 60-40	18,58	19,86	19,22
MI 50-50	17,62	16,66	17,14
GR 80-20	21,46	20,63	21,04
GR 70-30	20,82	20,50	20,66
GR 60-40	18,90	17,94	18,42
GR 50-50	17,62	16,66	17,14
CA 80-20	22,74	23,06	22,90
CA 70-30	22,42	22,42	22,42
CA 60-40	18,90	17,94	18,42
CA 50-50	17,62	19,22	18,42

TABELA A.3 – Resistência à compressão dos concretos – projeto experimental 3

<b>PROJETO EXPERIMENTAL 3</b>			
<b>COMPOSIÇÕES</b>	<b>CP 1</b>	<b>CP2</b>	<b>MÉDIA</b>
CV 80-20-7	19,54	19,28	19,41
CV 80-20-12	22,74	21,78	22,26
CV 80-20-18	22,74	21,91	22,33
SV 70-30-7	18,30	18,75	18,53
SV 70-30-12	21,52	20,50	21,01
SV 70-30-18	20,27	20,63	20,45
GR 80-20-7	20,82	20,50	20,66
GR 80-20-12	21,72	21,78	21,75
GR 80-20-18	20,44	20,50	20,47
MI 80-20-7	21,52	21,14	21,33
MI 80-20-12	21,40	21,52	21,46
MI 80-20-18	20,50	20,63	20,56
CA 70-30-7	21,90	21,91	21,90
CA 70-30-12	22,10	21,91	22,01
CA 70-30-18	21,91	21,97	21,94