



DOSAGEM CIENTÍFICA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO (ARC)

Mayara Amario

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

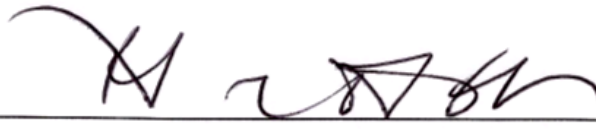
Junho de 2015

DOSAGEM CIENTÍFICA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO (ARC)

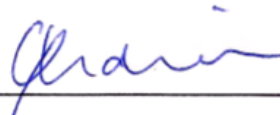
Mayara Amario

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.



Prof. Guilherme Chagas Cordeiro, D. Sc.



Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D. Sc.



Dr. Marco Pepe, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2015

Amario, Mayara

Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC) / Mayara Amario.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XXIX, 213 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 136-146.

1. RCD 2. ARC 3. Dosagem científica 4. MEC 5. Caracterização experimental I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais,

Magda e Mayer.

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é o decidir.”

Cora Coralina

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram para a realização desta importante etapa da minha vida. Foram mais de dois anos de convivência e apoio de pessoas muito especiais que me ajudaram, cada um a seu modo.

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo.

Ao meu professor e orientador Romildo, pela confiança, atenção, ajuda e incentivo concedidos durante todo o mestrado. Seu entusiasmo com o trabalho foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Magda e Mayer, por todo incentivo, amor, carinho e apoio irrestrito e incondicional durante toda a minha vida. Vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Amo muito vocês! Agradeço também a minha irmã Michelle, por todos estar presente em todos os momentos bons e ruins, sempre me ajudando a manter a calma e seguir em frente. À Kyara, Mia e Luna, por todos os momentos de alegria e carinho. Aos meus familiares, em especial à minha avó Íris, que sempre torceu por mim e esteve pronta para ajudar sempre que foi preciso. E àqueles que não estão mais entre nós.

Ao meu namorado João Moreno, pela compreensão, conselhos, apoio, paciência e carinho. Muito obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre me incentivando. Com certeza, você contribuiu muito para a conclusão deste trabalho. Agradeço também à Claudinha e ao Roberto, por se preocuparem e torcerem por mim.

Um agradecimento muito especial à minha querida amiga Carol, por estar presente em todas as etapas deste trabalho. Você foi muito importante para que tudo isso acontecesse. Jamais esquecerei os momentos que passamos juntas, seja peneirando, britando, moldando, brincando, conversando, reclamando ou apenas rindo de todas as situações que tivemos que enfrentar. Você foi realmente a minha dupla e a melhor companhia que eu poderia ter. Obrigada por tudo!

Ao Marco Pepe, por participar intensamente deste trabalho. Mesmo tão longe, você acompanhou diversas etapas deste estudo, sempre sugerindo novos ensaios, discutindo novas ideias e me ajudando a tomar decisões. Muito obrigada pela paciência e atenção.

Ao querido João Gabriel, que mesmo distante, não perdeu a importância. Agradeço também às minhas amigas de longa data, Gabi e Raisal, por estarem ao meu lado e compreenderem minha ausência nesses últimos meses. À Adriana, minha amiga-quase-mãe, por todo carinho e preocupação, você realmente faz a diferença para mim!

Aos amigos que fiz aqui desde o início desta jornada, Alfredo, Lívia, Thayane, Karyne, Dani, Tamara, Yassin, Mostafa, Raphael, Iolanda, Samantha, Otávio, Saulo, Fabrício, Tina, Camila, Thiago, Dimas, Marcão, Reila, Anne, Nathalia e Renata. Em especial, à Vivian por se preocupar e me ajudar, principalmente nas últimas etapas deste trabalho.

Agradeço a todos os técnicos do Laboratório de Estruturas, LabEST, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, àqueles que acompanharam todas as etapas deste estudo, Thales e Clodoaldo. Aos também sempre presentes, Adailton, Alessandro, Anderson, Hidekel, Jean, Júlio, Márcio, Renan e Rosângela.

Aos funcionários do NUMATS e LABEST, Sandra, Luzidelle, Carmen, Paulinho (*in memoriam*), Márcia, Flávio e Rogério. Agradeço também à Claudinha e ao Jô, por todo carinho e dedicação.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Civil, da COPPE/UFRJ, em especial à Márcia, por todo carinho e paciência demonstrados comigo ao longo deste trabalho. À Beth, por me ajudar em diversos momentos, sempre resolvendo questões que pareciam sem solução.

Aos técnicos do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM), da Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela ajuda na realização de alguns ensaios deste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DOSAGEM CIENTÍFICA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO (ARC)

Mayara Amario

Junho/2015

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

A reciclagem de resíduos de construção e demolição na forma de agregados para concreto apresenta duas vantagens principais: evita o consumo de materiais naturais e reduz os impactos ambientais provocados pela disposição irregular destes resíduos. A principal diferença do agregado reciclado, em comparação aos naturais, é a sua maior porosidade e, conseqüentemente, absorção de água, o que requer, na dosagem dos concretos, um acréscimo na água de amassamento para garantir adequada trabalhabilidade aos mesmos. Porém, não existe, na literatura técnica, um consenso sobre a forma mais adequada de compensar esta absorção adicional na dosagem. Assim, este estudo foi desenvolvido com objetivo de dosar cientificamente concretos de três classes de resistência (25 MPa, 45 MPa e 65 MPa), com diferentes teores de agregado de resíduo de concreto, através do modelo de empacotamento compressível (MEC) e caracterizá-los experimentalmente. Durante a dosagem, foi realizado um estudo da compensação de água de absorção dos agregados reciclados, através de ensaios de abatimento, resistência à compressão e elevação adiabática de temperatura, em concretos com diferentes taxas de compensação de água. O estudo mostrou que a quantidade ideal de água a ser compensada seria de 50% da absorção total do agregado. Uma vez definida essa importante variável, o quadro conceitual do MEC foi utilizado na dosagem de concretos reciclados de máxima compacidade granular contendo teores de agregado de resíduo de concreto. Os resultados mostraram que foi possível utilizar teores de agregados reciclados de até 60% em concretos de classes de resistência C25, C45 e C65 sem alterações significativas nas suas propriedades físico-químicas e mecânicas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MIX DESIGN OF STRUCTURAL CONCRETE WITH RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE (RCA)

Mayara Amario

June/2015

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

The recycling of construction and demolition waste in the form of aggregates for concrete has two main advantages: avoids the consumption of natural materials and reduces the environmental impacts caused by irregular disposal of this waste. The main difference between recycled and natural aggregates is related to its high porosity, and consequently, high capacity of water absorption, that requires a free water addition on the mix design of concretes to assure its workability. However, there isn't on previous literature, a common sense on the most appropriate form to compensate this absorption on the mix-design. So, this study aims to scientifically mix design concretes from three different strength classes classes (25 MPa, 45 MPa e 65 MPa), with three different levels of recycled concrete aggregate, following the Compressive Packing Model (CPM) of particles and define them by experiments. On the mix design phase, a study of water absorption compensation of recycled aggregates, slump test, compressive strength and adiabatic temperature rise, in concretes of different water compensation taxes. The results show that the optimal amount of water to be compensated would be equal to 50% of the absorption aggregates. Once this important variable is defined, the MEC's conceptual framework was used on the mix design for recycled concrete of maximum granular compactness with different levels of recycled concrete aggregate. The results shows that is possible to use different levels of recycled aggregates up to 60% on concretes from C25, C45 and C65 strength classes without significative changes on its physic-chemical and mechanical properties.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABELAS	XXV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XXVIII
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
CAPÍTULO 2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) . 7	
2.1. DEFINIÇÃO, ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	7
2.2. COMPOSIÇÃO DO RCD.....	8
2.3. IMPACTO AMBIENTAL PROVOCADO PELA DISPOSIÇÃO IRREGULAR DO RESÍDUO GERADO.....	11
2.4. BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	12
2.4.1. Usinas de reciclagem	12
2.4.2. Processo de beneficiamento do resíduo.....	13
2.4.3. Equipamentos utilizados para o beneficiamento do RCD	16
2.5. NORMAS E ESPECIFICAÇÕES PARA AGREGADOS RECICLADOS.....	18
2.6. UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD EM CONCRETOS	21
2.6.1. Propriedades do agregado reciclado.....	22
2.6.2. Dosagem de concretos reciclados.....	25
2.6.3. Propriedades do concreto reciclado.....	27

CAPÍTULO 3. DOSAGEM CIENTÍFICA – MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)	31
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. MODELO DE EMPACOTAMENTO VIRTUAL.....	31
3.2.1. <i>Definições</i>	31
3.2.2. <i>Misturas binárias</i>	34
3.2.3. <i>Misturas polidispersas</i>	39
3.3. MODELO DE EMPACOTAMENTO REAL	41
3.4. CORRELAÇÕES ENTRE O MEC E AS PROPRIEDADES DO CONCRETO NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO.....	44
3.4.1. <i>Aplicação do MEC ao concreto no estado fresco</i>	45
3.4.2. <i>Aplicação do MEC ao concreto no estado endurecido</i>	48
3.5. FERRAMENTA COMPUTACIONAL: <i>BETONLAB PRO 3</i>	51
3.5.1. <i>Introdução</i>	51
3.5.2. <i>Estrutura do programa</i>	51
CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS.....	56
4.1. PRODUÇÃO DO AGREGADO RECICLADO.....	56
4.1.1. <i>Propriedades do concreto de origem</i>	56
4.1.2. <i>Britagem, secagem e peneiramento do material</i>	58
4.1.3. <i>Homogeneização do agregado reciclado</i>	59
4.2. MÉTODOS DE ENSAIOS	61
4.2.1. <i>Composição granulométrica</i>	61
4.2.2. <i>Massa específica e absorção de água</i>	62
4.2.3. <i>Compacidade</i>	63
4.2.4. <i>Composição química</i>	67
4.2.5. <i>Compatibilidade e ponto de saturação</i>	68
4.2.6. <i>Calibração dos parâmetros “p” e “q”</i>	69

4.2.7. <i>Elevação adiabática de temperatura</i>	71
4.2.8. <i>Abatimento do tronco de cone</i>	72
4.2.9. <i>Resistência à compressão</i>	73
4.2.10. <i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	75
4.2.11. <i>Absorção total, índice de vazios e massa específica</i>	75
4.2.12. <i>Absorção de água por capilaridade</i>	77
4.2.13. <i>Permeabilidade a gás nitrogênio</i>	78
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	80
4.3.1. <i>Agregados</i>	80
4.3.2. <i>Cimento</i>	83
4.3.3. <i>Aditivo químico - Superplastificante</i>	85
4.3.4. <i>Água</i>	87
CAPÍTULO 5. DOSAGEM, PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CONCRETOS	88
5.1. DOSAGEM DOS CONCRETOS	88
5.1.1. <i>Estudo de compensação de água de absorção dos agregados reciclados</i>	88
5.1.2. <i>Critérios adotados para a dosagem dos concretos reciclados através do Betonlab Pro 3</i>	94
5.1.3. <i>Dosagens obtidas e escolha dos concretos a serem caracterizados experimentalmente</i>	96
5.1.4. <i>Comparação entre as dosagens do Betonlab Pro 3</i>	101
5.2. PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DOS CONCRETOS.....	103
5.3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	106
CAPÍTULO 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS ...	107
6.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS “P” E “Q”	107
6.2. ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE	109

6.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	112
6.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	120
6.5. ABSORÇÃO TOTAL, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS	122
6.6. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	125
6.7. PERMEABILIDADE À GÁS NITROGÊNIO.....	129
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES.....	132
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXO A: DOSAGEM DE CONCRETOS PELO PROGRAMA BETONLAB PRO 3	147
ANEXO B: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS “P” E “Q” NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	167
ANEXO C: COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS SOB ESFORÇOS DE COMPRESSÃO AXIAL	185
ANEXO D: ANÁLISE ESTATÍSTICA	193

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição inauguradas ao longo dos anos [MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009]	13
Figura 3.1 – Representação da compacidade virtual para sistemas constituídos de cubos (a) e esferas (b, c, d) [FORMAGINI, 2005]	32
Figura 3.2 – Misturas binárias sem interação: (a) Grãos de maior dimensão dominantes; (b) Grãos de menor dimensão dominantes [DE LARRARD, 1999].	33
Figura 3.3 – Mistura binária com interação: (a) mistura sem perturbação; (b) efeito de afastamento provocado pelos grãos menores (d_2) sobre os grãos maiores (d_1) [FORMAGINI, 2005].	33
Figura 3.4 – Mistura binária com interação: efeito de parede provocado pelos grãos maiores sobre os grãos menores [FORMAGINI, 2005].	34
Figura 3.5 – Desenvolvimento da compacidade virtual de uma mistura binária de esferas sem interação, onde as áreas representam: (1) Classe 1 dominante; (2) Classe 2 dominante.	36
Figura 3.6 – Comparação entre o desenvolvimento da compacidade virtual de três misturas binárias de esferas sem interação, com interação parcial e com interação total, onde as áreas representam: (1) Classe 1 dominante; (2) Classe 2 dominante.	38
Figura 3.7 – Comportamento da função $f(\phi)$ para uma mistura binária [FORMAGINI, 2005]	43
Figura 3.8 – Evolução da compacidade para uma mistura binária com diferentes valores de K [FORMAGINI, 2005]	44
Figura 3.9 – Banco dos materiais constituintes do concreto: (a) menu para acesso; (b) detalhe da janela inicial.	53
Figura 3.10 – Calibração dos parâmetros “p” e “q”: (a) menu para acesso; (b) detalhe da janela de calibração.	53
Figura 3.11 – (a) Seleção dos materiais constituintes do concreto a ser dosado; (b) janela de seleção das propriedades a serem estimadas pelo programa	54

Figura 3.12 – Janela com a lista de propriedades a serem otimizadas pelo programa <i>Betonlab Pro 3</i>	55
Figura 3.13 – Janela do programa <i>Betonlab Pro 3</i> com as simulações de dosagens para concreto	55
Figura 4.1 – Detalhe do resíduo antes do beneficiamento.....	58
Figura 4.2 - (a) Britador QUEIXADA 200; (b) Secagem do agregado reciclado antes do peneiramento	59
Figura 4.3 – Etapas do processo de homogeneização: (a) e (b) distribuição das camadas de agregado reciclado ao longo da pilha; (c) e (d) retirada do material localizado nas pontas da pilha para ser redistribuído; (e) aspecto final da pilha alongada.....	60
Figura 4.4 - Equipamento de granulometria à laser: Malvern Mastersizer	61
Figura 4.5 – Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração: (a) colocação do material no molde; (b) posição do pistão antes da vibração; (c) posição do pistão após a vibração; (d) leitura da posição do pistão, através do catetômetro.....	64
Figura 4.6 – Etapas do ensaio de demanda d’água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar	66
Figura 4.7 – Equipamento utilizado para determinação da composição química do cimento	67
Figura 4.8 – Ensaio de ponto de saturação: (a) misturador utilizado; (b) colocação da pasta no funil de Marsh; (c) detalhe da estrutura do ensaio; (d) detalhe do momento em que 1000 ml de pasta passam pelo funil.	68
Figura 4.9 – Calorímetros adiabáticos de temperatura	72
Figura 4.10 – Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	72
Figura 4.11 - Ensaio de resistência à compressão em corpo-de-prova cilíndrico: (a) 5x10 cm; (b) 10x20 cm.....	74
Figura 4.12 – Ensaio de absorção total: (a) etapa de imersão dos corpos-de-prova; (b) etapa de fervura	76
Figura 4.13 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	77

Figura 4.14 – Curva típica de absorção de água por capilaridade x raiz quadrada do tempo (BALTHAR, 2010).....	78
Figura 4.15 – Permeabilidade a gás: (a) Detalhe do corpo-de-prova posicionado dentro do anel de borracha; (b) posicionamento do conjunto dentro do permeâmetro; (c) permeâmetro em funcionamento; (d) bolha de ar dentro da pipeta.....	80
Figura 4.16 – Agregados naturais e reciclado: (a) Areia Natural; (b) Brita Natural; (c) Brita ARC.....	81
Figura 4.17 – Curva de absorção ao longo do tempo para a Brita ARC: (a) curva completa durante os 180 minutos de ensaio; (b) ampliação dos 30 minutos iniciais.....	82
Figura 4.18 – Curvas granulométricas dos agregados.....	83
Figura 4.19 – Cimento CPV-ARI: (a) na embalagem; (b) amostra do cimento.....	84
Figura 4.20 - Curva granulométrica do cimento CPV – ARI.....	85
Figura 4.21 – Superplastificante Glenium 51.....	85
Figura 4.22 – Ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI.....	86
Figura 5.1 - Elevação adiabática de temperatura na escala normal para as seis misturas.....	91
Figura 5.2 – Resistência à compressão teórica aos 28 dias versus consumo de cimento para todas as dosagens obtidas.....	101
Figura 5.3 – Etapas do processo de mistura dos concretos: (a) e (b) lançamento dos agregados no misturador; (c) aspecto da mistura dos agregados após um minuto; (d) adição da primeira metade da água total; (e) aspecto dos agregados após adição de água; (f) adição do cimento à mistura; (g) e (h) colocação do superplastificante e do restante da água total; (i) homogeneização manual do material retido nas paredes do misturador.....	104
Figura 5.4 – Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos: (a) colocação do material em três camadas; (b) aspecto da segunda camada após vibração.....	105
Figura 5.5 – Corpos-de-prova na câmara úmida.....	105

Figura 6.1 - Resistência à compressão estimada aos 28 dias em função do parâmetro “q”, para diferentes valores de “p”	108
Figura 6.2 - Correlação entre o abatimento obtido e o teor de Brita ARC (%) utilizado, separados por classe de resistência.....	110
Figura 6.3 - Correlação entre o abatimento obtido e a quantidade de água livre para todas as misturas.....	111
Figura 6.4 – Detalhe do abatimento do tronco de cone obtido para a mistura C25-6080	111
Figura 6.5 – Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial aos 28 dias para os concretos da classe de 25 MPa de resistência.....	113
Figura 6.6 – Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial aos 28 dias para os concretos da classe de 45 MPa de resistência.....	114
Figura 6.7 – Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial aos 28 dias para os concretos da classe de 65 MPa de resistência.....	114
Figura 6.8 – Comparação entre o comportamento das curvas tensão <i>versus</i> deformação axial aos 28 dias para os concretos de diferentes classes de resistência.....	115
Figura 6.9 – Modo de ruptura sob esforços de compressão axial dos concretos reciclados: (a) C25-6080; (b) C45-6080 e (c) C65-2040	116
Figura 6.10 - Correlação entre as resistências à compressão obtidas experimentalmente e as resistências teóricas previstas pelo programa <i>Betonlab</i>	117
Figura 6.11 - Resistência à compressão em função do fator a/c efetivo	118
Figura 6.12 - Curvas estimadas para os valores de módulo de elasticidade em função da resistência à compressão, de acordo com a NBR 6118 (2014), para diferentes tipos de agregados.....	119
Figura 6.13 – Relação entre os resultados de tração por compressão diametral e de compressão uniaxial aos 28 dias dos concretos reciclados produzidos.....	121
Figura 6.14 - Resistência à compressão aos 28 dias em função do índice de vazios dos concretos reciclados produzidos.....	124

Figura 6.15 - Massa específica dos concretos reciclados em função do consumo de cimento	124
Figura 6.16 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C25	126
Figura 6.17 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C45	127
Figura 6.18 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C65	128
Figura 6.19 - Ajustes lineares das curvas típicas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo para cada classe de resistência.....	129
Figura A.1 – Propriedades gerais da Areia Natural.....	147
Figura A.2 – Composição granulométrica da Areia Natural	148
Figura A.3 – Curva granulométrica da Areia Natural	148
Figura A.4 – Compacidade experimental da classe 1 da Areia Natural	149
Figura A.5 – Compacidade experimental da classe 2 da Areia Natural	149
Figura A.6 – Propriedades gerais da Brita Natural.....	150
Figura A.7 – Composição granulométrica da Brita Natural	150
Figura A.8 – Curva granulométrica da Brita Natural	151
Figura A.9 – Compacidade experimental da classe 1 da Brita Natural.....	151
Figura A.10 – Compacidade experimental da classe 2 da Brita Natural.....	152
Figura A.11 – Compacidade experimental da classe 3 da Brita Natural.....	152
Figura A.12 – Propriedades gerais da Brita ARC	153
Figura A.13 – Composição granulométrica da Brita ARC.....	153
Figura A.14 – Curva granulométrica da Brita ARC.....	154
Figura A.15 – Compacidade experimental da classe 1 da Brita ARC.....	154
Figura A.16 – Compacidade experimental da classe 2 da Brita ARC.....	155
Figura A.17 – Compacidade experimental da classe 3 da Brita ARC.....	155

Figura A.18 – Composição química do cimento CPV-ARI	156
Figura A.19 – Propriedades gerais do cimento CPV-ARI	156
Figura A.20 – Composição granulométrica do cimento CPV-ARI.....	157
Figura A.21 – Curva granulométrica do cimento CPV-ARI.....	157
Figura A.22 – Compacidade experimental do cimento CPV-ARI	158
Figura A.23 – Propriedades do superplastificante Glenium 51	158
Figura A.24 – Calibração dos grãos da mistura.....	159
Figura A.25 – Dados de entrada para calibração da Brita Natural	159
Figura A.26 – Valores de “p” e “q” obtidos para a Brita Natural	160
Figura A.27 – Dados de entrada para calibração da Brita ARC.....	160
Figura A.28 – Valores de “p” e “q” obtidos para a Brita ARC	161
Figura A.29 – Dados de entrada para calibração da Areia Natural	161
Figura A.30 – Valores de “p” e “q” obtidos para a Areia Natural	162
Figura A.31 – Seleção dos materiais constituintes do concreto a ser dosado	163
Figura A.32 – Escolha das propriedades a serem fornecidas pelo programa	163
Figura A.33 – Tela inicial para a simulação das dosagens	164
Figura A.34 – Escolha das propriedades a serem otimizadas pelo programa	164
Figura A.35 – Dosagens otimizadas para a classe C25	165
Figura A.36 – Dosagens otimizadas para a classe C45	165
Figura A.37 – Dosagens otimizadas para a classe C65	166
Figura B.1 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0$	167
Figura B.2 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,001$	167
Figura B.3 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,002$	168
Figura B.4 - Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,003$	168
Figura B.5 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,004$	169
Figura B.6 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,005$	169

Figura B.7 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0$	170
Figura B.8 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,001$	170
Figura B.9 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,002$	171
Figura B.10 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,003$	171
Figura B.11 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,004$	172
Figura B.12 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,005$	172
Figura B.13 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0$	173
Figura B.14 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,001$	173
Figura B.15 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,002$	174
Figura B.16 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,003$	174
Figura B.17 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,004$	175
Figura B.18 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,005$	175
Figura B.19 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0$	176
Figura B.20 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,001$	176
Figura B.21 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,002$	177
Figura B.22 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,003$	177
Figura B.23 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,004$	178
Figura B.24 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,005$	178
Figura B.25 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0$	179
Figura B.26 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,001$	179
Figura B.27 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,002$	180
Figura B.28 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,003$	180
Figura B.29 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,004$	181
Figura B.30 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,005$	181
Figura B.31 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0$	182
Figura B.32 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0,001$	182

Figura B.33 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0,002$	183
Figura B.34 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0,003$	183
Figura B.35 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0,004$	184
Figura B.36 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0,005$	184
Figura C.1 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C25-01100	185
Figura C.2 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C25-0120	185
Figura C.3 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C25-6080	186
Figura C.4 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C45-01100	186
Figura C.5 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C45-0120	187
Figura C.6 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C45-6080	187
Figura C.7 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-01100	188
Figura C.8 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-2040	188
Figura C.9 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-4060	189
Figura C.10 – Curva tensão <i>versus</i> deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-6080	189
Figura C.11 – Corpos-de-prova da classe C25 ensaiados sob esforços de compressão axial, aos 28 dias: (a) C25-0120; (b) C25-01100 e (c) C25-6080	190
Figura C.12 - Corpos-de-prova da classe C45 ensaiados sob esforços de compressão axial, aos 28 dias: (a) C45-0120; (b) C45-01100 e (c) C45-6080	191

Figura C.13 - Corpos-de-prova da classe C65 ensaiados sob esforços de compressão axial, aos 28 dias: (a) C65-01100 e (b) C65-2040.....	192
Figura D.1 – Análise estatística da resistência à compressão do cimento.....	193
Figura D.2 – Análise estatística da resistência à compressão do traço pobre da argamassa natural	194
Figura D.3 – Análise estatística da resistência à compressão do traço rico da argamassa natural	194
Figura D.4 – Análise estatística da resistência à compressão do traço pobre do concreto natural	195
Figura D.5 – Análise estatística da resistência à compressão do traço rico do concreto natural	195
Figura D.6 – Análise estatística da resistência à compressão do traço pobre do concreto reciclado.....	196
Figura D.7 – Análise estatística da resistência à compressão do traço rico do concreto reciclado.....	196
Figura D.8 – Análise estatística da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos produzidos durante o estudo de compensação de água de absorção	197
Figura D.9 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da classe C25	197
Figura D.10 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da classe C45	198
Figura D.11 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da classe C65	198
Figura D.12 – Análise estatística da deformação de pico sob esforços de compressão axial dos concretos da classe C25.....	199
Figura D.13 – Análise estatística da deformação de pico sob esforços de compressão axial dos concretos da classe C45.....	199
Figura D.14 – Análise estatística da deformação de pico sob esforços de compressão axial dos concretos da classe C65.....	200

Figura D.15 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos concretos da classe C25	200
Figura D.16 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos concretos da classe C45	201
Figura D.17 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos concretos da classe C65	201
Figura D.18 – Análise estatística da resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C25	202
Figura D.19 – Análise estatística da resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C45	202
Figura D.20 – Análise estatística da resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C65	203
Figura D.21 – Análise estatística do ensaio de absorção total de água dos concretos da classe C25	203
Figura D.22 – Análise estatística do ensaio de absorção total de água dos concretos da classe C45	204
Figura D.23 – Análise estatística do ensaio de absorção total de água dos concretos da classe C65	204
Figura D.24 – Análise estatística dos resultados de índice de vazios dos concretos da classe C25	205
Figura D.25 – Análise estatística dos resultados de índice de vazios dos concretos da classe C45	205
Figura D.26 – Análise estatística dos resultados de índice de vazios dos concretos da classe C65	206
Figura D.27 – Análise estatística dos resultados de massa específica dos concretos da classe C25	206
Figura D.28 – Análise estatística dos resultados de massa específica dos concretos da classe C45	207

Figura D.29 – Análise estatística dos resultados de massa específica dos concretos da classe C65.....	207
Figura D.30 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 72 horas, dos concretos da classe C25.....	208
Figura D.31 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 72 horas, dos concretos da classe C45.....	208
Figura D.32 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 72 horas, dos concretos da classe C65.....	209
Figura D.33 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 28 dias, dos concretos da classe C25.....	209
Figura D.34 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 28 dias, dos concretos da classe C45.....	210
Figura D.35 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 28 dias, dos concretos da classe C65.....	210
Figura D.36 – Análise estatística dos resultados de permeabilidade intrínseca dos concretos da classe C25.....	211
Figura D.37 – Análise estatística dos resultados de permeabilidade intrínseca dos concretos da classe C45.....	211
Figura D.38 – Análise estatística dos resultados de permeabilidade intrínseca dos concretos da classe C65.....	212
Figura D.39 – Análise estatística dos resultados de coeficiente de permeabilidade dos concretos da classe C25.....	212
Figura D.40 – Análise estatística dos resultados de coeficiente de permeabilidade dos concretos da classe C45.....	213
Figura D.41 – Análise estatística dos resultados de coeficiente de permeabilidade dos concretos da classe C65.....	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição do RCD coletado em Passo Fundo (RS) [BERNARDES <i>et al.</i> , 2008].....	9
Tabela 2.2 – Composição do RCD em Brasília [ROCHA, 2006].....	10
Tabela 2.3 – Composição média do entulho de Salvador [CARNEIRO, 2001]	10
Tabela 2.4 - Normas técnicas relativas à reciclagem de resíduos da construção civil ...	19
Tabela 2.5 – Resumo das normas que regulamentam a utilização de agregados reciclados em concretos [PEPE, 2015 (adaptado)].....	21
Tabela 3.1 - Índices K para diferentes protocolos de empacotamento [DE LARRARD, 1999].....	42
Tabela 3.2 – Valores propostos para as constantes c_1 e c_2 por diferentes autores [SILVA, 2004].....	46
Tabela 3.3 – Propriedades necessárias para a formação do banco de dados do programa <i>Betonlab Pro 3</i>	52
Tabela 4.1 - Composição por m^3 do concreto de origem [VAZ, 2013].....	57
Tabela 4.2 - Propriedades do concreto da viga [VAZ, 2013].....	57
Tabela 4.3 - Propriedades do concreto do reforço [VAZ, 2013].....	57
Tabela 4.4 - Composição dos traços para calibração dos parâmetros "p" e "q"	69
Tabela 4.5 - Resistência à compressão das misturas utilizadas para a calibração dos parâmetros "p" e "q"	70
Tabela 4.6 – Valores obtidos para os parâmetros "p" e "q" fornecidos pelo programa <i>Betonlab Pro 3</i>	71
Tabela 4.7 – Propriedades físicas dos agregados	82
Tabela 4.8 – Propriedades granulométricas dos agregados	83
Tabela 4.9 – Composição química e propriedades físicas, mecânicas e granulométricas do cimento CPV - ARI	84

Tabela 4.10 – Propriedades do aditivo superplastificante (www.basf.com.br).....	86
Tabela 5.1 – Composição granular dos traços de concreto para estudo da compensação de água.....	89
Tabela 5.2 – Resumo detalhado da composição da água total das seis misturas	90
Tabela 5.3 – Resultados de abatimento e resistência à compressão aos 7 dias para cada mistura	92
Tabela 5.4 – Parâmetros adotados para a dosagem dos concretos reciclados	94
Tabela 5.5 – Descrição das simulações realizadas no programa BetonLab Pro 3.....	95
Tabela 5.6 – Dosagem otimizada de concretos para a classe de 25 MPa de resistência à compressão	96
Tabela 5.7 – Propriedades dos concretos dosados para a classe de 25 MPa	97
Tabela 5.8 - Dosagem otimizada de concretos para a classe de 45 MPa de resistência à compressão	98
Tabela 5.9 - Propriedades dos concretos dosados para a classe de 45 MPa.....	99
Tabela 5.10 - Dosagem otimizada de concretos para a classe de 65 MPa de resistência à compressão	100
Tabela 5.11 - Propriedades dos concretos dosados para a classe de 65 MPa.....	100
Tabela 6.1 – Dosagem dos concretos simulados para análise dos parâmetros “p” e “q”	107
Tabela 6.2 – Resultados de abatimento do tronco de cone para os concretos produzidos	109
Tabela 6.3 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)	112
Tabela 6.4 – Valores médios de resistência à tração por compressão diametral, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)	120
Tabela 6.5 – Valores médios de absorção total de água, índice de vazios e massa específica dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	123

Tabela 6.6 – Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)	125
Tabela 6.7 – Valores dos pontos de transição e absorvidade dos concretos produzidos	128
Tabela 6.8 – Permeabilidade intrínseca (m^2) e coeficiente de permeabilidade (m/s) dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

E_c	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
a_{12}	Coefficiente de efeito de afastamento
b_{21}	Coefficiente de efeito de parede
d_i	Diâmetro médio da classe i
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração do concreto por compressão diametral
p_k	Fração volumétrica do material k
y_i	Fração volumétrica da classe i
y_{kj}	Fração volumétrica da classe j dentro do material k
β_i	Compacidade virtual da classe i
β_{kj}	Compacidade virtual da classe j pertencente ao material k
$\gamma^{(i)}$	Compacidade virtual da mistura onde a classe i é a dominante
ϕ_i	Volume de sólidos ocupado pela classe i em um volume unitário da
μ	Viscosidade plástica
τ_0	Tensão inicial de escoamento
e	Índice de vazios
γ	Compacidade virtual da mistura
a/c	Fator água cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
ATT	Áreas de transbordo e triagem
C	Compacidade real da mistura
CCC	Cúbico de corpo centrado
CCR	Concreto compactado ao rolo
CFC	Cúbico de face centrada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

CS	Cúbico simples
DMS	Diferença mínima significativa
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	Coefficiente de empacotamento
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
M	Número de materiais de uma mistura polidispersa
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
MPT	Máxima espessura da pasta
N	Número de classes de uma mistura polidispersa
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
p	Parâmetro relacionado à interface pasta-agregado
q	Parâmetro relacionado à resistência intrínseca do agregado
RCD	Resíduo de construção e demolição
SSS	Saturado superfície seca

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

No Brasil, os resíduos de construção e demolição variam entre 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos (FERNANDEZ, 2011). Além disso, existe uma menor preocupação com os RCD por acreditar-se que o esse tipo de resíduo apresenta pouca toxicidade. Apesar da NBR 10004 (2004) considerar os resíduos da construção civil inertes, é possível encontrar materiais como plásticos, tintas, óleos, asfaltos e até mesmo metais pesados, que podem contaminar o solo devido à lixiviação ou solubilização de substâncias nocivas, colocando em risco a saúde das pessoas (LEITE, 2001).

De acordo com Capello (2006), a construção civil produz, aproximadamente, 65 milhões de toneladas de resíduos anualmente. Segundo estudo realizado pela ABRELPE (2013), o total de RCD coletado no Brasil em 2013 foi de 117.435 t/dia. Neste cálculo, são levados em consideração os resíduos coletados pelos municípios em obras sob sua responsabilidade e os lançados em logradouros públicos. Mesmo não representando o total de RCD gerado nos municípios, esta parcela é a única que possui registros confiáveis.

A reciclagem de resíduos na forma de agregados na produção de concreto apresenta-se como uma alternativa de grande potencial, já que os agregados ocupam cerca de 70 a 80% do volume total do concreto (SANTIAGO, 2008).

A RILEM (1994) não limita o teor de agregados reciclados que podem ser utilizados em concretos com resistência à compressão aos 28 dias de até 60 MPa, desde que o agregado seja proveniente de resíduos de concreto. Já a NBR 15116 (2004) é mais conservadora e só recomenda a utilização de agregados reciclados de resíduos de concreto em concretos com resistência mecânica de até 15 MPa e sem função estrutural, ou seja, deve ser aplicado em materiais destinados a usos como enchimentos, contrapiso, calçadas, blocos de vedação, meio-fio, sarjeta e canaletas.

As propriedades dos agregados reciclados podem ser bem diferentes quando comparadas as características dos agregados naturais.

A absorção de água é a propriedade em que os agregados reciclados mais diferem dos agregados naturais e que mais influencia nas propriedades do concreto. Segundo Lima (1999), por ser composto por materiais mais porosos como alvenaria, argamassas e concreto, o agregado reciclado apresenta taxas de absorção mais altas do que os naturais.

A trabalhabilidade é uma das propriedades do concreto mais afetadas pela utilização destes agregados devido, principalmente, a sua elevada absorção. Por isso, devem-se tomar medidas que compensem esta propriedade. Através da literatura, observa-se que não existe um consenso na forma de compensar a absorção e, portanto, a dosagem dos concretos reciclados é realizada de diversas maneiras. Uma característica comum na maioria dos estudos analisados é a dosagem de uma mistura de referência contendo apenas agregados naturais, onde é realizada a substituição volumétrica parcial (ou total) dos agregados naturais pelos reciclados e um acréscimo no teor de água total da mistura, de forma a compensar a maior absorção dos agregados reciclados. O teor de água adicionado pode ser uma fração ou todo aquele correspondente à saturação do agregado. A condição de umidade do agregado reciclado no momento da mistura também varia de estudo para estudo já que em alguns casos, o agregado é adicionado seco, pré-umedecido ou até mesmo saturado superfície seca. Leite (2001) realizou a pré-umidificação do material durante um intervalo de tempo de 10 minutos e a água adicional considerada foi igual a quantidade absorvida no ensaio de capacidade de absorção no intervalo de tempo de 10 minutos. Corinaldesi (2010) utilizou os agregados reciclados na condição saturado superfície seca, enquanto Casuccio *et al.* (2008) manteve os agregados graúdos reciclados imersos por um período de 24 horas e, em seguida, colocou-os ao ar por 1 hora.

O grande problema na dosagem de concretos reciclados é a inexistência de um método que leve em consideração as diferentes propriedades destes agregados. Em geral, utiliza-se um método convencional para a dosagem de um concreto com agregados naturais, chamado de referência, e a partir daí, substitui-se em volume parte do agregado natural por reciclado, compensando a absorção de água do agregado. Acredita-se que este método de substituição influencia negativamente nas propriedades do concreto

reciclado, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, pois considera apenas a massa específica e a absorção de água dos agregados.

Assim, no presente estudo, optou-se pela dosagem dos concretos reciclados utilizando-se os conceitos do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), método de dosagem científica desenvolvido por De Larrard e colaboradores do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. O MEC divide-se em dois módulos distintos: empacotamento virtual e empacotamento real. Eles se relacionam através de um índice de empacotamento (K) e permitem o cálculo da compacidade real de uma mistura granular. A partir dessa compacidade, é possível correlacionar as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido através de formulações matemáticas validadas experimentalmente. A principal vantagem deste método de dosagem é a possibilidade de considerar, individualmente, diferentes propriedades dos materiais constituintes e determinar as propriedades desejadas para o concreto. Assim, o uso de um método de dosagem científico, onde as características intrínsecas dos agregados fossem consideradas para a definição da composição do concreto foi a principal motivação do presente estudo. Um estudo adicional de dosagem foi realizado visando definir o teor de água de compensação ideal a ser utilizado no MEC. Para tanto, foram realizados ensaios de abatimento, resistência à compressão e elevação adiabática de temperatura, em concretos com diferentes taxas de compensação de água.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é realizar um estudo de dosagem de concretos contendo agregados reciclados de resíduos de concreto, aplicando os conceitos do modelo de empacotamento compressível (MEC) de partículas. O grande diferencial deste estudo é a inexistência de um “concreto de referência”, do qual substitui-se, em volume, uma determinada quantidade de agregado natural por reciclado. Como os agregados reciclados apresentam propriedades distintas dos agregados naturais, não se considera adequado apenas substituir os agregados em volume e compensar a água de absorção do agregado reciclado, pois apesar da absorção de água ser a propriedade que mais diferencia estes materiais, existem outras características que devem ser consideradas, como por exemplo, a composição granulométrica e a compacidade granular.

Para atingir o objetivo principal do trabalho, quatro objetivos específicos foram definidos. O primeiro consistia em estudar o efeito dos diferentes métodos de compensação de água do agregado reciclado na mistura. Para isso, inicialmente foi determinada a capacidade de absorção de água do agregado em função do tempo. Em seguida, foi realizado um estudo de elevação adiabática de temperatura, juntamente com ensaios de resistência à compressão aos 7 dias e abatimento de tronco de cone para concretos com diferentes quantidades de água para compensação da absorção.

Para o segundo objetivo específico foi realizado um estudo da influência dos parâmetros “p” e “q” dos agregados, utilizados para a previsão da resistência dos concretos, através da moldagem de argamassas (calibração da areia natural) e concretos (calibração dos agregados graúdos) e ensaios de compressão axial em diferentes idades.

O terceiro objetivo específico diz respeito à dosagem científica de concretos reciclados, com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*. Para isso foram definidas três classes de resistência (25, 45 e 65 MPa) e especificadas algumas propriedades desejadas para os concretos, tanto no estado fresco, como no estado endurecido.

Por fim, foram escolhidas algumas misturas para serem caracterizadas experimentalmente, através de ensaios de abatimento, resistência à compressão e tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e por capilaridade e permeabilidade a gás nitrogênio.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado está dividida em 7 capítulos.

Capítulo 1: Introdução – Nesse capítulo, é apresentada uma breve introdução sobre a importância da reciclagem de resíduos de construção e demolição e sua utilização como agregados para concretos, além da importância do uso do modelo de empacotamento compressível (MEC) para otimização granular da mistura seca. Define ainda os objetivos e a estrutura da pesquisa.

Capítulo 2: Resíduos de construção e demolição (RCD) – Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura sobre os resíduos de construção e demolição, abordando assuntos relativos à origem, composição dos resíduos, impactos gerados pela destinação inadequada, formas de beneficiamento do RCD, normas e especificações e

propriedades dos agregados e concretos reciclados. Também é apresentada uma revisão sobre os métodos de dosagem mais utilizados para concretos contendo agregados reciclados no cenário atual.

Capítulo 3: Dosagem Científica - Modelo de empacotamento compressível (MEC) -

Este capítulo apresenta, inicialmente, definições e desenvolvimento do primeiro módulo do MEC: o módulo de empacotamento virtual, tanto para misturas binárias quanto para misturas polidispersas. Em seguida, apresenta-se o módulo de empacotamento real e a correlação entre a compacidade virtual e a compacidade real, através do índice de empacotamento K. Também são apresentadas as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido que são influenciadas pelo modelo e uma breve explicação sobre a ferramenta computacional que será utilizada neste trabalho: o programa *Betonlab Pro 3*.

Capítulo 4: Materiais e métodos de ensaio – Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para a produção do agregado reciclado em laboratório, descrevendo etapas como britagem, secagem e peneiramento do resíduo, além da técnica utilizada para homogeneizar os agregados reciclados. Além disso, as propriedades da viga de concreto que originou o resíduo de demolição, utilizado nesse estudo, também são apresentadas neste capítulo. Em seguida, são descritos os procedimentos empregados para a caracterização das matérias primas a serem utilizadas para a produção dos concretos, assim como os ensaios realizados para avaliar as propriedades dos concretos reciclados. Por fim, são apresentados os materiais que serão utilizados na produção dos concretos reciclados e os resultados de sua caracterização.

Capítulo 5: Dosagem, produção, moldagem e cura dos concretos – Este capítulo apresenta os detalhes sobre a dosagem dos concretos, abordando inicialmente a avaliação do estudo de compensação de água de absorção do agregado reciclado através de ensaios de elevação adiabática de temperatura, resistência à compressão e abatimento do tronco de cone para a definição da quantidade de água que seria considerada para a dosagem dos concretos. Além disso, são apresentados assuntos relativos à otimização dos traços, teores de utilização de agregado reciclado e etapas de produção, moldagem e cura dos concretos reciclados. Por fim, é apresentada a metodologia de análise estatística utilizada para avaliação dos resultados experimentais.

Capítulo 6: Apresentação e análise dos resultados – Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados nos concretos tanto em seu estado fresco, como na forma endurecida, além da discussão e análise dos resultados obtidos.

Capítulo 7: Conclusões – Este capítulo engloba as conclusões do estudo realizado, avaliando se os objetivos foram atingidos e apontando sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentados, em anexo, detalhes sobre: dosagem de concretos pelo programa *Betonlab Pro 3* (Anexo A), análise da influência dos parâmetros “p” e “q” na resistência à compressão dos concretos (Anexo B), comportamento dos concretos sob esforços de compressão axial (Anexo C) e análise estatística (Anexo D).

Capítulo 2

Resíduos de construção e demolição (RCD)

2.1. Definição, origem e classificação do resíduo de construção e demolição

De acordo com a definição adotada pela Resolução CONAMA 307/2002, resíduo de construção e demolição é todo o resíduo produzido durante as atividades de construção, demolição, reparo e reforma de obras da construção civil e os produzidos durante a preparação e escavação de terrenos.

Esse resíduo é composto por restos e fragmentos de tijolos cerâmicos, madeira, concreto, vidro, gesso, aço, plástico, papel, entre outros materiais que fazem parte de um edifício ou restos de embalagens utilizadas durante a execução da obra.

O resíduo de construção e demolição pode ser classificado de diferentes formas. Uma das classificações mais utilizadas é quanto a origem do material, ou seja, o resíduo pode ser proveniente de construção, demolição ou de construção e demolição. Em geral, o RCD é um resíduo misto, porém o grau de heterogeneidade depende, principalmente, da sua origem (LLATAS, 2013).

A NBR 15114 (2004) adota a classificação estabelecida pela Resolução CONAMA n° 307/2002, onde os resíduos da construção civil são classificados da seguinte forma:

- Classe A: São os resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados. Alguns exemplos são componentes cerâmicos, argamassa, concreto, asfalto, solos de terraplanagem e peças pré-moldadas, como blocos e tubos;
- Classe B: São os resíduos que podem ser reciclados para outras destinações. Como exemplo, têm-se os plásticos, papeis, metais, vidros e madeiras;
- Classe C: São os resíduos que não apresentam aplicações economicamente viáveis para sua reciclagem. É o caso de produtos de gesso;
- Classe D: São os resíduos perigosos ou contaminados e que não podem ser reaproveitados. Tintas, solventes e óleos se enquadram nessa classificação.

De acordo com a classificação proposta pelo comitê RILEM 121-DRG (1994), os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição podem ser divididos nos seguintes grupos:

- Tipo I: Agregados provenientes de resíduos de materiais cerâmicos, como tijolos e telhas.
- Tipo II: Agregados provenientes de resíduos de concreto.
- Tipo III: Agregados provenientes da mistura de pelo menos 80% de agregados naturais com materiais dos outros dois grupos, sendo que a quantidade de material do Tipo I deve ser inferior a 10%.

Esta classificação é similar a utilizada em usinas de reciclagem onde, segundo Ricci (2007), o resíduo é separado pela cor predominante. Assim, o resíduo cinza é aquele que apresenta predominância de materiais cimentícios em sua composição, enquanto grande parte do resíduo vermelho é composto por materiais cerâmicos.

Outra classificação adotada para agregados reciclados de RCD é a apresentada pela NBR 15116 (2004). Nela, os agregados são divididos da seguinte forma:

- ARC – Agregado de resíduo de concreto: Agregado composto por, no mínimo, 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.
- ARM – Agregado de resíduo misto: Agregado composto por menos de 90% em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.

Como pode ser observado, existem diferentes classificações para os resíduos de construção e demolição. Porém ainda existe a necessidade de classificações mais restritivas, de forma que seja possível produzir materiais mais homogêneos e de maior qualidade (LEITE, 2001).

2.2. Composição do RCD

O resíduo da construção civil é um dos resíduos mais heterogêneos dentre os resíduos sólidos urbanos. Ele é composto por restos de diferentes materiais utilizados durante toda a etapa construtiva, como por exemplo, argamassas, concretos, tijolos, madeiras, plásticos e restos de embalagens.

A sua composição varia de acordo com diferentes fatores como: a tipologia construtiva utilizada, as técnicas construtivas e os materiais disponíveis em determinado local

(LEITE, 2001). Além disso, devem-se considerar os tipos de materiais que apresentam maior índice de perdas na construção e se o resíduo é proveniente de construção ou de demolição.

Os estudos sobre a composição do RCD no Brasil são muito escassos e desatualizados. Além disso, a composição do resíduo varia de acordo com cada região e com a técnica empregada em construção, tornando a quantificação dos materiais presentes no entulho mais complexa.

No estudo realizado por Bernardes *et al.* (2008) foi analisada a composição do resíduo coletado por quatro empresas licenciadas no município de Passo Fundo (RS), onde 42,5% da carga coletada era proveniente de demolições e reformas, enquanto que 11,1% foi gerada por prédios em construção. O restante foi produzido em limpezas de terreno, escavações e reparos residenciais. A Tabela 2.1 apresenta o resultado dessa pesquisa.

Tabela 2.1 – Composição do RCD coletado em Passo Fundo (RS) [BERNARDES *et al.*, 2008]

Resíduos	Massa em kg	%	Classificação
Argamassa	13.930,8	29,7	A
Cerâmica	1.327,1	2,8	A
Concreto	6.489,6	13,8	A
Finos de argamassa	3.617,8	7,7	A
Finos de tijolos	891,0	1,9	A
Gesso	1.141,7	2,4	C
Madeira	974,0	2,1	B
Matéria orgânica, galhos	45,8	0,1	B
Material retido (argamassa + tijolos)	5.925,1	12,6	A
Metal	143,5	0,3	B
Papel, plásticos, tecido, isopor, PVC	273,4	0,6	B
Pedras	499,7	1,1	A
Terra bruta	350,5	0,7	A
Tijolo	11.323,5	24,1	A
Totais	46.933,4	100,0	

Observa-se que os resíduos de argamassa, concreto e tijolos somados representam aproximadamente 76% do material coletado. Esses resíduos são classificados como Classe A pela Resolução CONAMA n° 307/2002, assim sendo apresentam grande potencial para serem reciclados como agregados para construção civil.

Rocha (2006) avaliou a composição do resíduo de construção e demolição em Brasília. Os dados obtidos nesse estudo são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição do RCD em Brasília [ROCHA, 2006]

Componentes do resíduo	%
Concreto/ Bloco de concreto	10,22
Finos	43,11
Gesso	0,24
Material argamassado	27,39
Material cerâmico	11,99
Outros	0,61
Rochas e pedras naturais	6,42

É possível observar que mais de 90% do material presente no resíduo avaliado é considerado inerte, podendo ser reaproveitado como agregados.

Em estudos apresentados por Carneiro (2001), foram determinadas as composições do RCD na cidade de Salvador (BA). Esses dados são apresentados na Tabela 2.3. Nota-se que a quantidade de concreto, argamassa, cerâmica vermelha e branca e rochas naturais somados correspondem a 72% do material estudado. Esses materiais, após processos de beneficiamento, podem produzir agregados com alto potencial de utilização na construção civil.

Tabela 2.3 – Composição média do entulho de Salvador [CARNEIRO, 2001]

Componentes do resíduo	%
Concreto e argamassa	53
Cerâmica branca	5
Cerâmica vermelha	9
Solo e areia	22
Rochas naturais	5
Plásticos	4
Outros	2

Comparando os três estudos apresentados anteriormente, é possível observar que a composição do resíduo da construção civil exhibe uma grande variabilidade em relação à região coletada e ao ano de estudo. Por exemplo, no município de Passo Fundo, o teor de tijolos presente no entulho corresponde a 24,1%, enquanto em Salvador essa fração corresponde a apenas 9%. Entretanto, ambos os estudos comprovam o alto potencial de reutilização do entulho, indicando que a melhor destinação deste material é a reciclagem na forma de agregados para concreto.

Porém, um dos maiores limitadores para este uso é justamente a heterogeneidade do material, que pode conter elevados teores de finos e quantidades consideráveis de materiais cerâmicos. Como consequência, um extensivo programa de ensaios, análises químicas e petrográficas são fundamentais para a sua utilização.

2.3. Impacto ambiental provocado pela disposição irregular do resíduo gerado

A geração de resíduos de construção e demolição corresponde ao dobro da produção de lixo domiciliar (FAGURY; GRANDE, 2007). Este fato mostra a necessidade de desenvolver políticas públicas voltadas para o gerenciamento dos resíduos da construção civil.

De acordo com a ABRELPE (2013), a gestão destes resíduos é obrigação dos seus geradores, porém, por falta de fiscalização e controle adequados, um grande volume desses resíduos acabam sendo descartados ou abandonados em vias públicas.

Na maioria dos municípios, o RCD é disposto de forma inadequada. Eles são lançados em bota-foras clandestinos, nas margens de rios e córregos, em terrenos baldios, nas encostas, em passeios e outras áreas públicas e em áreas protegidas por lei. As consequências dessa destinação irregular são impactos ambientais e sociais, tais como poluição visual, assoreamento e entupimento de cursos d'água, associados às constantes enchentes, além de promover o desenvolvimento de vetores nocivos à saúde pública.

Talvez uma das melhores políticas públicas para gerenciamento do resíduo seja a reciclagem. Ela conduz a redução da utilização de aterros, de deposições irregulares, do consumo de recursos naturais não renováveis e os impactos ambientais das atividades de mineração (ÂNGULO, 2005).

2.4. Beneficiamento do resíduo de construção e demolição

De acordo com a resolução nº 307/2002 do CONAMA, agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

O processo de beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolve etapas como: coleta, transporte, separação, britagem, peneiramento e estocagem. Estudos afirmam que o beneficiamento do RCD é similar ao tratamento dado à produção de agregados naturais, sendo possível a utilização de praticamente os mesmos equipamentos (LEITE, 2001).

2.4.1. Usinas de reciclagem

Para a instalação de uma usina de reciclagem em determinado local, deve-se levar em consideração uma série de fatores como: volume de geração de resíduo de construção e demolição possível de ser reciclado, o tipo de material e a aplicação que se dará ao mesmo e o local de instalação desta usina (BRITO FILHO, 1999). Segundo Lima (1999), o ideal é que as usinas estejam localizadas o mais próximo possível das fontes geradoras e dos locais de uso do material reciclado.

De acordo com o estudo realizado por Miranda, Ângulo e Careli (2009), até o ano de 2002, o Brasil contava com apenas 16 usinas de reciclagem, apresentando uma taxa de crescimento de até três usinas inauguradas por ano. Após a publicação da resolução CONAMA 307/2002, essa taxa de crescimento aumentou de três a nove usinas instaladas por ano. E até o ano de 2008, já podem ser mencionadas pelo menos 47 usinas de reciclagem, sendo 24 públicas e 23 privadas. Destas, são 36 usinas que estão em operação ou em instalação, sendo 15 públicas e 21 privadas. A Figura 2.1 apresenta a evolução da construção de usinas de reciclagem no Brasil, do ano de 1991 ao ano de 2008.

O modelo adotado para usinas de reciclagem foi baseado em usinas de mineração. Apesar de apresentarem diversas semelhanças, deve-se ter cuidado para as seguintes diferenças (MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009):

- o resíduo de construção civil geralmente contem materiais contaminantes, como papel, plástico, madeira e gesso, que devem ser removidos do RCD através da etapa de triagem manual ou mecanizada;
- o teor de cerâmica, argamassa e concreto varia de resíduo para resíduo, afetando a sua qualidade e desempenho. Procedimentos para a diminuição da variabilidade dos agregados reciclados devem ser adotados.
- o tipo de equipamento utilizado e a origem do RCD podem influenciar nas propriedades do agregado, como lamelaridade e teor de finos. Deve-se utilizar um circuito correto de reciclagem, considerando-se essas propriedades.

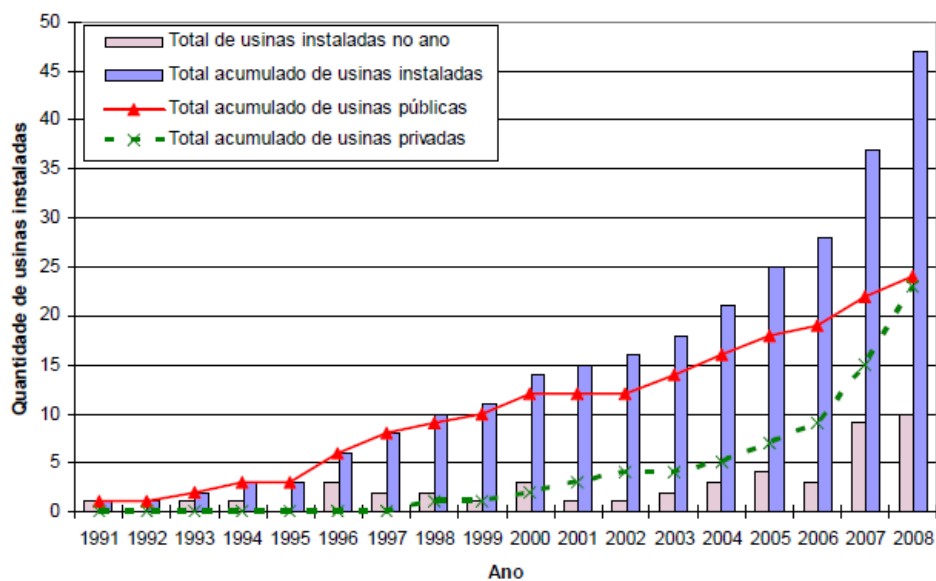


Figura 2.1 – Usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição inauguradas ao longo dos anos [MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009]

2.4.2. Processo de beneficiamento do resíduo

O processamento dos resíduos de construção e demolição é semelhante ao utilizado para agregados naturais. As etapas desse processo são basicamente formadas por cominuição, separação por granulometria e concentração. Essas etapas serão descritas a seguir.

2.4.2.1. *Cominuição*

A cominuição, também conhecida como fragmentação, é obtida através de mecanismos físicos de compressão ou esmagamento, impacto, atrito, cisalhamento ou combinação entre eles (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; FIGUEIRA *et al.*, 2004 *apud* TENÓRIO, 2007).

Esta etapa pode ser realizada através de britagem ou moagem. Quando se deseja obter grãos maiores, para serem utilizados como agregado graúdo para concreto utiliza-se os equipamentos de britagem. Já a moagem é utilizada para produzir grãos mais finos quando se pretende utiliza-los como agregados miúdos para argamassas.

Pode ser necessário submeter o RCD a mais uma etapa de cominuição, utilizando-se o mesmo equipamento de fragmentação ou até mesmo outro disponível na usina. Por isso, são usados termos como britagem primária e britagem secundária.

2.4.2.2. *Separação por granulometria*

Esta etapa tem como objetivo separar os grãos pelo seu tamanho, através de peneiradores ou classificadores.

O peneiramento é o método de separação por granulometria mais utilizado nas usinas de reciclagem e geralmente é realizado a seco, podendo também ser feito por via úmida (TENÓRIO, 2007).

Na maioria das usinas, o peneiramento é utilizado para separar os agregados em duas frações: (1) agregado miúdo ($d < 4,75$ mm) e (2) agregado graúdo ($d > 4,75$ mm). O peneiramento a úmido é utilizado para facilitar a passagem dos finos do material através das peneiras.

Segundo Tenório (2007), os classificadores são utilizados mais para remover as impurezas do agregado reciclado do que para separar por tamanhos. Essas impurezas tendem a se concentrar nas frações mais finas e geralmente são compostas por materiais mais leves. Eles também são usados para remover parte da fração mais fina aderida aos grãos maiores.

2.4.2.3. Concentração

As operações de concentração são usadas quando existem diversas classes minerais presentes no material e têm como objetivo aumentar o teor de mineral útil, removendo outros minerais ou contaminantes. Elas podem ser baseadas na cor, densidade, forma, propriedades magnéticas, entre outras características (RICCI, 2007).

A classificação quanto à composição consiste em separar o resíduo em classes que contenham materiais com a mesma característica. Geralmente, essa separação é feita por análise visual.

Outra operação de concentração é a catação, que costuma acontecer de forma manual e tem como objetivo remover as impurezas presentes no RCD. Essas impurezas podem ser materiais que prejudiquem a qualidade do agregado reciclado ou que não façam parte de uma fase específica a qual se quer reciclar separadamente (TENÓRIO, 2007). Segundo o autor, esta operação pode ser realizada antes ou depois da cominuição, sendo mais difícil de ser realizada no segundo caso, pois as impurezas podem se apresentar em fragmentos difíceis de serem identificados.

Já a separação magnética tem como objetivo remover os materiais indesejáveis que sejam de origem metálica e pode ser realizado antes ou depois da cominuição, através da utilização de imãs.

Outro processo utilizado em usinas de reciclagem é a concentração gravítica que tem por objetivo separar as partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas por ação da força da gravidade ou por forças centrífugas (LINS, 2004). Ela é realizada através do equipamento conhecido como jig. De acordo com Leite (2001), este sistema funciona através de fluxos de agitação de água que passam pelas camadas do material, rearranjando as partículas em função da sua densidade.

A separação em meio denso é outro método utilizado para a separação gravítica. Nesse processo, o material é imerso em solução densa onde a densidade do meio deve ser intermediária entre as dos materiais que se deseja separar, de forma que os que possuem densidade inferior flutuem e aqueles com densidade superior afundem (CAMPOS *et al.*, 2004).

2.4.3. Equipamentos utilizados para o beneficiamento do RCD

Conforme visto anteriormente, o tipo de equipamento utilizado em cada processo de beneficiamento do resíduo de construção e demolição interfere nas propriedades dos agregados reciclados produzidos. Nessa seção, serão apresentados os equipamentos mais utilizados nas usinas de reciclagem para cada etapa do beneficiamento.

2.4.3.1. Equipamentos para cominuição

Os equipamentos mais utilizados para a fragmentação dos RCD são o britador de impacto e o britador de mandíbulas. Outros equipamentos utilizados em menor escala e que não serão descritos a seguir são: britador giratório, britador de rolos, moinho de bolas, de barras, de martelos e vibratório.

(a) Britador de impacto

Neste equipamento, o resíduo é britado em uma câmara de impacto, pelo choque com martelos maciços fixados a um rotor e pelo choque com placas de impacto fixas. Existem diferentes tipos de britadores de impacto, com capacidades variadas, podendo ser utilizados como britador primário ou secundário (LIMA, 1999).

De acordo com Tenório (2007), equipamentos deste tipo apresentam vantagens como: grande redução das dimensões do material britado, produção de grãos de tamanho e forma semelhantes e considerável quantidade de finos, dispensando muitas vezes a britagem secundária. Além disso, estes equipamentos produzem agregados mais resistentes, já que as partículas se dividem nas linhas naturais de ruptura.

(b) Britador de mandíbulas

Este tipo de equipamento promove a fragmentação do resíduo por compressão ou esmagamento. Eles geralmente são utilizados como britadores primários, pois não reduzem muito as dimensões dos grãos, produzindo grande quantidade de agregados graúdos (LIMA, 1999).

O britador de mandíbulas pode ser de dois tipos: eixo único ou eixo duplo. No britador de eixo único, a mandíbula executa tanto uma ação de esmagamento quanto uma de fricção no material, enquanto que no britador de eixo duplo, a mandíbula executa apenas o esmagamento. Segundo Tenório (2007), isso pode interferir na forma dos grãos produzidos.

2.4.3.2. *Equipamentos para separação*

Conforme visto anteriormente, o processo de separação pode ocorrer por peneiramento ou classificação. Existem diferentes tipos de peneiradores e classificadores, como: peneirador rotativo e mecânico e classificadores horizontais, verticais, espiral e ciclones. O tipo de peneirador mais usado nas usinas brasileiras é o peneirador vibratório e será tratado a seguir, assim como o classificador vertical.

(a) Peneirador mecânico

Neste equipamento, o material é separado através de uma ou mais peneiras, geralmente, por via seca, apresentando sempre uma pequena fração fina aderida aos grãos maiores. O peneiramento a úmido pode ser utilizado para uma separação mais eficiente dessas frações.

É possível realizar o peneiramento antes da cominuição para eliminar a parte fina do RCD, que pode conter impurezas como matéria orgânica. Assim, o peneiramento também pode ser considerado um processo de concentração.

(b) Classificador vertical

Os classificadores pneumáticos verticais geram uma corrente de ar ascendente e separam partículas leves de papel, plástico, madeiras, etc. dos agregados reciclados (ÂNGULO, 2005).

Esse equipamento é utilizado após a cominuição ou após o peneiramento dos agregados.

2.4.3.3. *Equipamentos para concentração*

O principal equipamento utilizado para o processo de concentração é o jigge, que separa os materiais de diferentes densidades. Esse equipamento será detalhado a seguir.

(a) Jigge

Conforme explicado no item 3.4.2.3., este equipamento separa os materiais através de fluxos de agitação de água que passam pelas camadas do material, rearranjando as partículas de acordo com a sua densidade.

O movimento da água depende do tipo de componente presente no resíduo, assim como o tamanho dos grãos. Como desvantagens, têm-se o grande volume de água utilizado e

o manuseio e secagem do material úmido após o processo (JUNGMANN E QUINDT, 1998).

As vantagens desse equipamento são: a separação de materiais leves como papéis e plásticos; limpeza dos agregados, removendo a fração de material pulverulento aderido aos grãos; além da redução do teor de finos.

2.5. Normas e especificações para agregados reciclados

De acordo com John e Ângulo (2003), deve-se evitar utilizar as normas e especificações de agregados naturais para agregados reciclados. Elas podem servir como base, mas revelam-se restritivas e limitantes. Com isso, torna-se necessário a publicação de recomendações normativas específicas para os resíduos de construção e demolição.

A recomendação da RILEM (1994) foi a primeira especificação a prever a produção de concretos com resistência mecânica acima de 20 MPa. Para isso, só poderiam ser utilizados resíduos provenientes de concreto, com dimensões maiores que 4 mm, em concretos com até 60 MPa de resistência, sem especificação do teor de substituição. Para resíduos provenientes de materiais cerâmicos, só é recomendado a utilização em concretos de até 20 MPa, sem restrição quanto ao teor de substituição. Além disso, a RILEM permite a produção de concretos sem limite de resistência, desde que os agregados reciclados sejam compostos por, pelo menos 80% de agregado natural e contenham no máximo 10% de agregados de resíduos cerâmicos.

Em 1998, foi publicado pelo comitê alemão para concretos reforçados, o DAfStb (1998) que especifica as propriedades mecânicas exigidas para concretos reciclados e suas aplicações. Para esta norma, só é permitido a utilização, em volume, de 35% de agregado graúdo reciclado para concretos com até 25 MPa de resistência e até 25% de substituição para concretos de até 35 MPa.

Em 2002, foi publicada a primeira resolução brasileira, a CONAMA nº 307/2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Nesta resolução, são adotadas algumas definições e os resíduos são classificados em quatro classes, apresentadas no item 3.1.. Essa classificação orienta para a correta destinação dos resíduos, sendo que os pertencentes a classe A devem ser reutilizados ou reciclados como agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil para futura reutilização. Além disso, ela determina que os resíduos da

construção civil não podem ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em encostas, corpos d'água, lotes vagos e áreas protegidas por lei. Ainda de acordo com esta resolução, os municípios devem elaborar o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil em consonância com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

No ano de 2004, foram publicadas cinco normas específicas para resíduos da construção civil, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Essas normas são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Normas técnicas relativas à reciclagem de resíduos da construção civil

Norma	Nome
NBR 15112:2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15113:2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15114:2004	Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15115:2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos
NBR 15116:2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos

As NBR 15112 (2004), NBR 15113 (2004) e NBR 15114 (2004) determinam os requisitos necessários para a implantação e operação de áreas de transbordo e triagem (ATT), aterros e áreas de reciclagem, respectivamente.

Já as NBR 15115 (2004) e NBR 15116 (2004) regulamentam a utilização dos resíduos da construção civil como agregados reciclados, sendo que somente a segunda aborda sobre a utilização desses agregados em concreto.

A NBR 15116 (2004) é mais conservadora em relação as recomendações da RILEM (1994), já que só recomenda a utilização de agregados reciclados de RCD em concretos com resistência mecânica de até 15 MPa. Segundo a norma, o concreto produzido com agregados reciclados somente deverá ser utilizado sem função estrutural, ou seja, deve

ser aplicado em materiais destinados a usos como enchimentos, contrapiso, calçadas, blocos de vedação, meio-fio, sarjeta e canaletas. Ainda de acordo com esta norma, o agregado reciclado classe A pode substituir parcial ou totalmente os agregados convencionais.

Em 2004, o Departamento de Construção Civil de Hong Kong, HKBD (2004), sugeriu que a substituição total do agregado gráudo natural por reciclado devesse ocorrer somente em concretos sem aplicações estruturais com até 20 MPa de resistência. Para concretos estruturais, só é permitida a substituição de até 20% dos agregados em concreto com até 30 MPa. Também são definidas as exigências que o agregado reciclado deve atender, como massa específica mínima de 2000 kg/m³, máxima absorção de água de 10% e teor máximo de finos de 4%.

A norma inglesa BS 8500-2 (2006) permite a substituição de apenas 20% do agregado gráudo para concretos de resistência entre 20 e 40 MPa, para usos internos ou externos sem exposição a cloretos. Estes concretos não podem ser utilizados em pavimentos ou fundações.

A especificação americana ACI E-701 (2007) permite a utilização tanto de agregado gráudo como de agregado miúdo reciclados. Porém limita a utilização do miúdo em 20%, enquanto que o agregado gráudo pode ser usado integralmente. Esta norma não relaciona o teor de substituição com a classe de resistência do concreto.

A recomendação australiana CCAA (2008) restringe a utilização de agregados gráudos reciclados de concreto até 30% de substituição em concretos de até 40 MPa, sendo permitido utilizar até 100% deste agregado em concreto de até 25 MPa. Para concretos estruturais, só é permitida a utilização de até 30% de agregado reciclado.

Por fim, a recomendação italiana NTC (2008) permite a substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em concretos não estruturais. Para concretos estruturais, é permitida a utilização de resíduos de demolição em geral, resíduos de demolição de estruturas de concreto ou de concreto armado e resíduos de concreto de alta resistência. Para os resíduos de demolição em geral, é permitida a utilização de até 100% de agregado reciclado, desde que a resistência máxima seja 10 MPa. Para os resíduos de demolição de estruturas de concretos e de concreto armado, pode-se utilizar até 30% de agregado reciclado em concretos de classe C30/37 e até 60% em concretos de resistência até 25 MPa. Já para

os resíduos de concreto de alta resistência (maior que 55 MPa), é permitida a utilização de até 15% em concretos de resistência até 55 MPa.

O resumo destas normas é apresentado na Tabela 2.5. Nota-se que nenhuma destas regulamentações prevê a utilização de agregados reciclados em concretos com resistência à compressão aos 28 dias maior que 50 MPa.

Tabela 2.5 – Resumo das normas que regulamentam a utilização de agregados reciclados em concretos [PEPE, 2015 (adaptado)]

Norma / Especificação	Aplicação	Fração do agregado	Máximo teor de substituição	Máxima resistência à compressão (28 dias)
RILEM (1994a)	Não especificado	Graúdo	Não especificado	60 MPa
DAfStB (1998)	Estrutural	Graúdo	35%	25 MPa
			25%	35 MPa
NBR 15116 (2004)	Não estrutural	Graúdo e miúdo	100%	15 MPa
HKBD (2004)	Não estrutural	Graúdo	100%	20 MPa
	Estrutural	Graúdo	20%	25-30 MPa
BS 8500-2 (2006)	Não especificado	Graúdo	20%	20-40 MPa
ACI E-701 (2007)	Não especificado	Graúdo e miúdo	100% 20%	Não especificado
CCAA (2008)	Classe 2	Graúdo	100%	25 MPa
	Classe 1		30%	40 MPa
NTC (2008)	Não estrutural	Graúdo	100%	10 MPa
	Estrutural	Graúdo	30%	37 MPa
			60%	25 MPa

2.6. Utilização de agregados reciclados de RCD em concretos

As características mais importantes a serem avaliadas para a utilização de agregados em concretos são a composição granulométrica, a absorção de água, a forma e a textura, a

resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias prejudiciais presentes nos agregados (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Leite (2001), quando se estuda a viabilidade técnica da utilização de novos materiais, como é o caso do agregado reciclado, devem-se avaliar todas essas propriedades para analisar o comportamento desses materiais na estrutura do concreto.

2.6.1. Propriedades do agregado reciclado

2.6.1.1. Composição granulométrica

A composição granulométrica é uma característica importante para a determinação de propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água e permeabilidade. A granulometria dos agregados reciclados varia de acordo com o tipo de resíduo beneficiado, os equipamentos utilizados, a granulometria do material antes da cominuição, entre outros fatores (LIMA, 1999).

De modo geral, a composição granulométrica dos agregados reciclados costuma ser um pouco mais grossa que dos agregados naturais, isso tanto para agregados graúdos quanto para miúdos.

De acordo com Leite (2001), é importante estudar a composição granulométrica dos agregados reciclados para que seja possível produzir concretos trabalháveis e com compactidade satisfatória, conduzindo a um melhor comportamento mecânico.

2.6.1.2. Absorção de água

Essa é uma das propriedades em que os agregados reciclados mais diferem dos agregados naturais. Segundo Padmini *et al.* (2009), por ser composto por materiais cerâmicos e apresentar argamassa aderida aos grãos, o agregado reciclado apresenta taxas de absorção significativas.

A absorção total de agregados reciclados após 24 horas de ensaio pode variar significativamente, dependendo da composição do agregado e de sua granulometria. É simples deduzir que quanto mais porosos forem os materiais de origem do resíduo, mais o agregado reciclado absorverá água. Assim, os agregados reciclados de cerâmica apresentam taxas de absorção maiores que os reciclados de concreto. No caso de agregados graúdos, a absorção de água pode variar de 1,21% (Ângulo *et al.*, 2004) a

15,62% (Becerral Cabral *et al.* 2010). Para os agregados miúdos, esta absorção varia entre 2,0% (Miranda e Selmo, 2006) e 30,9% (Poon e Chan, 2007).

A capacidade de absorção de água dos agregados reciclados é maior que a dos agregados naturais, de forma que os primeiros podem chegar à saturação em poucos minutos (TENÓRIO, 2007).

É importante avaliar a capacidade de absorção do agregado reciclado nos minutos iniciais porque o concreto no estado fresco pode ter grande parte da água da mistura absorvida, diminuindo sua trabalhabilidade.

Devido à maior absorção dos reciclados, vários autores recomendam seu uso na condição saturada, para evitar que o agregado retire água da pasta, necessária para a hidratação e ganho de resistência (HANSEN, 1992; SCHULZ & HENDRICKS, 1992; ANDRADE, 1998; FONSECA, 1998; I&T, 1995; CUR, 1984 *apud* LIMA, 1999).

2.6.1.3. *Massa específica e massa unitária*

Devido à composição do resíduo de construção e demolição ser composta por materiais mais porosos, tanto a sua massa específica quanto sua massa unitária tendem a ser menores que as apresentadas por agregados naturais.

Assim como no caso da absorção, a maior porosidade dos agregados reciclados de cerâmica implica em valores de massa específica menores que os apresentados por agregados reciclados de concreto. Em comparação com os agregados naturais, geralmente tanto os reciclados de concreto quanto os reciclados de alvenaria apresentam valores de massa específica menores.

Para agregados graúdos reciclados, a massa específica pode variar entre 1860 kg/m³ (Becerra Cabral *et al.*, 2010) e 2890 kg/m³ (Bairagi *et al.*, 1993). Já para os agregados miúdos, ela pode variar entre 1850 kg/m³ (Muller, 2004) e 2680 kg/m³ (Miranda e Selmo, 2006).

É importante que se conheça tanto a massa específica quanto a massa unitária antes do cálculo da dosagem dos concretos. Devido a diferença dessas duas propriedades quando comparados agregados convencionais com agregados reciclados, é necessário realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizado no concreto quando for utilizado como base o traço em massa do concreto convencional.

2.6.1.4. *Forma e textura dos grãos*

A forma e a textura dos grãos dos agregados reciclados dependem do tipo de resíduo beneficiado e dos equipamentos utilizados. Geralmente, eles apresentam forma mais lamelar e textura mais áspera que os agregados naturais. Por estas características, pode ser necessário utilizar um maior teor de água e aglomerantes, para garantir a trabalhabilidade da mistura. Isso pode ser prejudicial às propriedades mecânicas do concreto, já que pode aumentar a relação a/c (LIMA, 1999).

Em compensação, a rugosidade e a angulosidade do agregado reciclado contribuem com a melhoria da aderência entre pasta e agregado. Além disso, essas propriedades promovem maior absorção da pasta cimentícia pelos poros superficiais do agregado reciclado, quando comparado ao agregado natural (LEITE, 2001).

2.6.1.5. *Resistência à compressão e módulo de elasticidade*

Segundo Neville (1997), a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de agregados não são propriedades comumente analisadas, em função da dificuldade de ensaiar partículas isoladamente e são muito influenciadas pela porosidade.

De acordo com o autor, a resistência à compressão do agregado graúdo pode ser determinada indiretamente através da avaliação da resistência à compressão do concreto. Basta substituir os agregados graúdos de um concreto com resistência conhecida pelos agregados graúdos reciclados. Se a resistência do concreto reciclado for menor e se muitos grãos se romperem durante a ruptura do corpo de prova, deduz-se que a resistência do agregado é inferior à resistência à compressão desse concreto.

Utilizando este método, Carrijo (2005) verificou a baixa resistência à compressão de agregados reciclados.

O módulo de elasticidade também pode ser obtido da mesma forma, pois o módulo de elasticidade do concreto é tanto maior quanto maior for o módulo de elasticidade do agregado. Carrijo (2005) constatou que o módulo dos concretos diminuiu à medida que a massa específica dos agregados reciclados também diminuiu, concluindo que os agregados menos densos apresentam menor módulo de elasticidade.

2.6.2. Dosagem de concretos reciclados

O desenvolvimento de concretos com as propriedades especificadas depende fundamentalmente da dosagem, ou seja, processo de obtenção da combinação ideal dos materiais constituintes.

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais afetadas pela utilização de agregados reciclados devido, principalmente, a sua elevada absorção de água. Por isso, deve-se tomar medidas que controlem e/ou compensem a absorção do agregado.

Leite (2001) realizou a dosagem dos concretos reciclados em estudo através do método do IPT. Este método consiste no ajuste do teor ideal de argamassa para um traço intermediário, fixando-se um valor de abatimento. Em seguida, são produzidos mais dois traços, sendo um pobre e outro rico em cimento, para serem ensaiados a compressão e com os resultados, é elaborado o diagrama de dosagem. Além disso, foi feita a compensação de parte da absorção de água do agregado reciclado antes da mistura dos materiais na betoneira, através da pré-umidificação do material durante um intervalo de tempo de 10 minutos. A água adicional considerada foi igual a quantidade absorvida no ensaio de capacidade de absorção no intervalo de tempo de 10 minutos. Para o autor, esta pré-umidificação do agregado reciclado contribuiu para a redução da perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados e concluiu-se que esta compensação foi satisfatória, já que não foram observados problemas com o adensamento e resistência à compressão das misturas.

Ângulo (2005) e Cabral (2007) também realizaram a dosagem dos concretos de referência através do método do IPT e substituíram, em volume, a fração de agregados reciclados. A compensação de água foi feita através da imersão dos agregados durante 10 minutos numa quantidade de água equivalente a 70 a 80% da absorção total de água em 24 horas. De acordo com Cabral (2007), este valor corresponde a quantidade de água absorvida no intervalo de 120 minutos, estando relacionado ao tempo de fim de pega do cimento.

Evangelista e de Brito (2007) utilizaram dois métodos para a compensação de água do agregado reciclado. No primeiro, tanto o agregado miúdo natural quanto o reciclado eram imersos em quantidade de água correspondente a $2/3$ da água de mistura mais a água calculada para absorção e mantidos nesta condição por um período de 10 minutos. No segundo, o tempo de imersão era aumentado para 20 minutos. No segundo método,

a resistência à compressão obtida aos 28 dias foi inferior que a resistência encontrada para o primeiro método. Segundo os autores, isto pode ter ocorrido devido a maior saturação imposta aos agregados no segundo método, tornando a interface pasta/agregado mais fraca, provocando uma diminuição na resistência dos concretos.

Casuccio *et al* (2008) manteve os agregados graúdos reciclados imersos por um período de 24 horas e, em seguida, colocou-os ao ar por 1 hora. Segundo o autor, o uso do agregado saturado na mistura imediatamente após a imersão gera um excesso de água no concreto fresco, contribuindo negativamente para a resistência do concreto.

Reis (2009) utilizou o modelo de empacotamento compressível (MEC) para a dosagem dos concretos de referência do seu estudo. Para isso, utilizou o programa *Betonlab Pro 2*, fixando valores de resistência à compressão aos 28 dias e abatimento de tronco de cone na faixa de 100 ± 20 mm. Para a definição dos traços de concretos reciclados, foi realizada a substituição volumétrica dos agregados miúdos naturais pelo agregado de RCD. A compensação da absorção de água ocorreu com a adição de 75% da absorção total após 24 horas, que corresponde à água absorvida em 10 minutos de ensaio, acrescentada junto com a água da mistura. Como resultados, Reis (2009) obteve redução nas propriedades mecânicas dos concretos à medida que se acrescentava mais RCD.

Moreira (2010) compensou a absorção de água experimentalmente, de forma que se obtivesse o abatimento do tronco de cone estabelecido e o método de dosagem utilizado foi semelhante ao adotado por Cabral (2007).

Corinaldesi (2010) utilizou os agregados reciclados na condição saturado superfície seca e concluiu que foi possível produzir concretos estruturais com até 30% de substituição sem mudanças significativas nas propriedades mecânicas.

De forma a manter a mesma quantidade de água livre para a mistura, Lima *et al* (2013) adicionaram uma quantidade extra de água que dependia da capacidade de absorção de água dos agregados utilizados. Esta água adicional foi estimada assumindo-se que os agregados estavam na condição seca. Como resultados, os autores obtiveram uma redução significativa na trabalhabilidade, uma redução progressiva das resistências à compressão e à tração à medida que se aumentava a substituição de agregados naturais por reciclados na mistura. Além disso, também foi observado um aumento na permeabilidade e, conseqüentemente, uma diminuição na resistência à penetração de íons cloretos.

Andreu e Miren (2014) realizaram a dosagem dos concretos através de substituição em volume. A compensação de água foi feita no dia anterior ao processo de mistura através da umidificação dos agregados com um sistema de borrifamento e estes foram cobertos com uma manta plástica até o momento da mistura.

Carneiro *et al* (2014) estudou o comportamento mecânico de concretos reciclados reforçados com fibras de aço. A dosagem dos concretos reciclados foi realizada através da substituição em volume dos agregados e não houve compensação de água, apenas a correção do abatimento com a utilização de aditivo superplastificante, de forma que o relação a/c fosse mantido constante.

Pepe (2015) sugeriu um novo método para a dosagem de concretos reciclados. Com base nos resultados experimentais obtidos para os agregados reciclados, foram propostas fórmulas analíticas para a determinação de propriedades físicas, relacionando o teor de argamassa aderida aos grãos com propriedades como porosidade, capacidade de absorção e massa específica das partículas. Além disso, é possível estimar a resistência à compressão dos concretos, através da correlação com o grau de hidratação do cimento, com base nos resultados experimentais obtidos pelo autor. Assim, pelo processo inverso, fornecendo-se as propriedades dos materiais constituintes, calibra-se o modelo e define-se uma resistência esperada, gerando, a partir daí, a composição do concreto.

Através da literatura, observa-se que não existe um consenso na forma de compensar a elevada absorção do agregado reciclado e como considerar esta propriedade na dosagem dos concretos. Sabendo-se que os agregados reciclados apresentam propriedades bem distintas em relação aos agregados convencionais, seria esperado que um método de dosagem específico fosse utilizado, onde as características dos agregados fossem consideradas para a composição do concreto.

2.6.3. Propriedades do concreto reciclado

2.6.3.1. Massa específica

Assim como ocorre no agregado reciclado, a massa específica do concreto produzido com agregado de RCD é menor que a do concreto convencional. Isso pode ser explicado pela menor massa específica apresentada pelo agregado e pela maior quantidade de

vazios incorporada ao concreto. Latterza e Machado (1999) afirmam que, por estes motivos, o concreto reciclado apresenta valores de massa específica no limite entre o concreto leve e o convencional.

No caso da massa específica do concreto na condição saturado de superfície seca essa diferença tende a diminuir, pois a absorção do concreto com agregado reciclado é maior que a do concreto convencional.

2.6.3.2. *Trabalhabilidade*

Concretos com reciclados apresentam trabalhabilidade menor que os concretos convencionais de mesmo traço. Este fato está relacionado com a maior porosidade e angularidade que o material reciclado apresenta, ocasionando um aumento na absorção de água e diminuição da água da pasta cimentícia, sendo necessária uma maior quantidade de água livre para se obter a mesma trabalhabilidade.

Tenório (2007) afirma que a maior presença de grãos mais finos, a forma mais lamelar ou angular dos grãos, a textura rugosa e a maior porosidade prejudicam a trabalhabilidade dos concretos reciclados.

De acordo com Hansen (1992), a utilização de agregados miúdos reciclados reduz ainda mais a trabalhabilidade do concreto. Com isso, pode ser necessário o uso de aditivos superplastificantes para que se obtenha a consistência desejada.

2.6.3.3. *Resistência à compressão*

Em relação à resistência à compressão, o maior limitante é o próprio agregado reciclado, por ele ser o principal responsável pelo aumento da porosidade no sistema (TENÓRIO, 2007).

Poon e Chan (2007) concluíram que a resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados reciclados diminui conforme se reduz a massa específica. Ainda de acordo com os autores, esta redução da massa específica é obtida com o aumento da absorção dos concretos reciclados.

Segundo Lima (1999), concretos com reciclado apresentam resistência igual ou menor às de concretos convencionais. Em apenas alguns casos específicos, a resistência pode ser maior. A perda de resistência de concretos com agregado reciclado de concreto pode

chegar a 30 %, enquanto que para concretos com reciclado de alvenaria pode chegar a 50 %, dependendo da composição e do consumo de cimento.

De acordo com Rao *et al.* (2007), além da relação *a/c*, a resistência à compressão dos concretos reciclados é influenciada pela composição do resíduo utilizado para produzir o agregado de RCD, pela taxa de substituição, e ainda pela condição de utilização do agregado reciclado (saturado ou não saturado).

2.6.3.4. Resistência à tração

A resistência à tração é considerada uma propriedade mecânica secundária para concretos, já que o concreto apresenta pequena capacidade de resistir aos esforços de tração. Porém, quando se estuda a utilização de novos materiais, como é o caso dos agregados reciclados, essa propriedade não deve ser desconsiderada (LEITE, 2001).

De acordo com estudo realizado por Rahal (2007), onde os concretos estudados apresentavam 100% de agregados de RCD, a resistência à tração foi apenas 10% menor em relação ao concreto de referência. Além disso, o autor afirma que as propriedades mecânicas reduziram com o aumento da relação *a/c*. Isso indica que os concretos com agregados reciclados seguem comportamento semelhante a Lei de Abrams.

Machado Jr. *et al.* (1998) e Bazuco (1999) afirmam que não há influência da utilização de agregado graúdo reciclado na resistência à tração de concretos. Os autores mencionam ainda que concretos com material reciclado obedecem às mesmas relações teóricas entre resistência à tração e resistência à compressão que concretos convencionais de mesma classe. Porém, Bazuco (1999) ressalta que quando se utiliza também o agregado miúdo reciclado, tal propriedade apresenta uma redução da ordem de 10 a 20%.

Segundo Leite (2001), avaliando as propriedades do material reciclado, pode-se afirmar que este tipo de material oferece vantagens em relação às propriedades de aderência. Assim, o comportamento esperado seria uma melhoria da resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados.

2.6.3.5. Durabilidade

A durabilidade de concretos é uma propriedade ligada capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

Segundo Tenório (2007), apesar de diversos fatores influenciarem na durabilidade do concreto, essa propriedade depende da facilidade com que fluidos podem percorrer em seu interior. Dessa forma, a durabilidade é muito mais dependente da permeabilidade e capacidade de absorção do concreto do que de propriedade mecânicas.

Quebaud *et al.* (1999) *apud* Leite (2001) realizaram estudos em concretos com agregados reciclados e agregados naturais, substituindo 100% dos agregados miúdos e graúdos, e substituindo apenas parte das frações e mediram a permeabilidade dos concretos à água e ao ar. Concluíram que os concretos com agregados naturais apresentam uma permeabilidade à água que é 2 a 3 vezes inferior à permeabilidade de concretos reciclados. De acordo com os autores, isto se deve ao uso de agregados naturais pouco porosos e que levam a menor porosidade da matriz de concreto e ao uso de relações água/cimento menores. A permeabilidade ao ar foi 2 a 5 vezes inferior para os concretos convencionais. Ainda segundo este estudo, quanto maior a proporção de areia reciclada mais permeável é o concreto.

Capítulo 3

Dosagem científica – Modelo de empacotamento compressível (MEC)

3.1. Introdução

O modelo de empacotamento compressível, desenvolvido por De Larrard e colaboradores do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC, Paris), consiste de um modelo que determina o empacotamento de misturas secas para todos os materiais utilizados em dosagem de concretos.

Este modelo é dividido em dois módulos: no primeiro, é calculado o empacotamento virtual, que é o maior empacotamento possível para uma determinada mistura; no segundo, é obtido experimentalmente o empacotamento real, baseado na compacidade dos grãos, e são estabelecidas correlações entre a compacidade virtual e a compacidade real, através do coeficiente de empacotamento (K).

Nos itens a seguir apresenta-se uma revisão da literatura sobre os principais conceitos do modelo de empacotamento compressível de partículas granulares.

3.2. Modelo de empacotamento virtual

3.2.1. Definições

Para melhor compreensão do MEC é importante entender o conceito de compacidade virtual (β), definida como a máxima compacidade que uma mistura granular monodispersa (partículas de aproximadamente mesmo tamanho) pode atingir empilhando-se os grãos um a um, sem alterar sua forma original, em um volume infinito.

No caso de partículas cúbicas idênticas, a compacidade virtual de empacotamento seria a máxima possível para misturas granulares considerando empilhamento dos grãos um a

um, ou seja, $\beta = 1$. No caso de partículas esféricas idênticas, a compacidade virtual depende do tipo de arranjo. Para o arranjo CFC (cúbico de face centrada), a compacidade virtual é $\beta = 0,74$, que é o maior valor de empacotamento para esferas. Porém, se as partículas apresentarem um arranjo CCC (cúbico de corpo centrado) ou CS (cúbico simples), a compacidade real será 0,68 e 0,52, respectivamente. Essas configurações são apresentadas na Figura 3.1 (FORMAGINI, 2005).

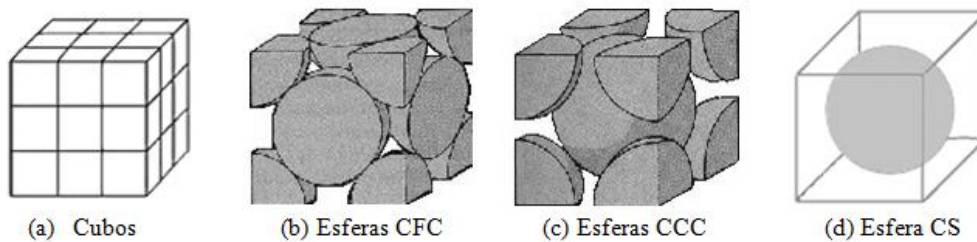


Figura 3.1 – Representação da compacidade virtual para sistemas constituídos de cubos (a) e esferas (b, c, d) [FORMAGINI, 2005]

Outra definição importante para a utilização do MEC é o de classe de grãos dominante. Essa classe é responsável por garantir a continuidade sólida da mistura, caso contrário, ela seria constituída por uma suspensão e não haveria empacotamento. Em misturas binárias, ou seja, mistura composta por duas classes de grãos de dimensões diferentes, quando os grãos de maior dimensão são dominantes, as partículas menores preenchem os vazios deixados pelas partículas maiores, sem interferir na acomodação destas. Isso pode ser observado na Figura 3.2a. O empacotamento máximo ocorre quando os grãos menores preenchem completamente os vazios deixados entre os grãos de maiores dimensões.

Porém, quando os grãos da classe de menor dimensão pertencem a classe dominante, eles estão empacotados na porosidade das partículas de maior dimensão, conforme é ilustrado na Figura 3.2b (MIRANDA, 2008).

Uma mistura binária é dita sem interação quando o diâmetro de uma classe é muito maior que o diâmetro dos grãos da outra classe ($d_1 \gg d_2$). Quando os diâmetros das classes são relativamente próximos, a mistura é dita com interação e dois efeitos podem surgir. Esses efeitos, conhecidos como efeito de afastamento e efeito de parede, tendem a diminuir o empacotamento da mistura.

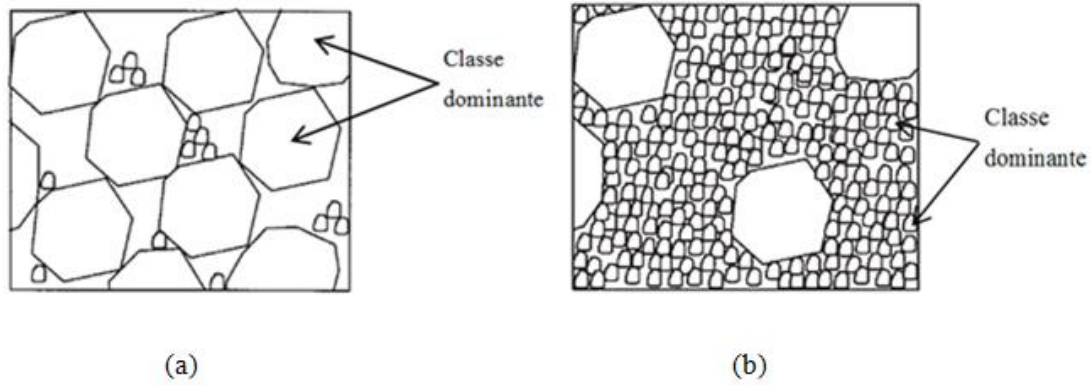


Figura 3.2 – Misturas binárias sem interação: (a) Grãos de maior dimensão dominantes; (b) Grãos de menor dimensão dominantes [DE LARRARD, 1999].

O efeito de afastamento, que surge quando a classe dos grãos maiores é a dominante, ocorre quando o tamanho dos vazios deixados pelas partículas maiores é menor que a dimensão das partículas menores. Assim, os grãos menores provocam um afastamento dos grãos maiores. Isso pode ser observado na Figura 3.3.

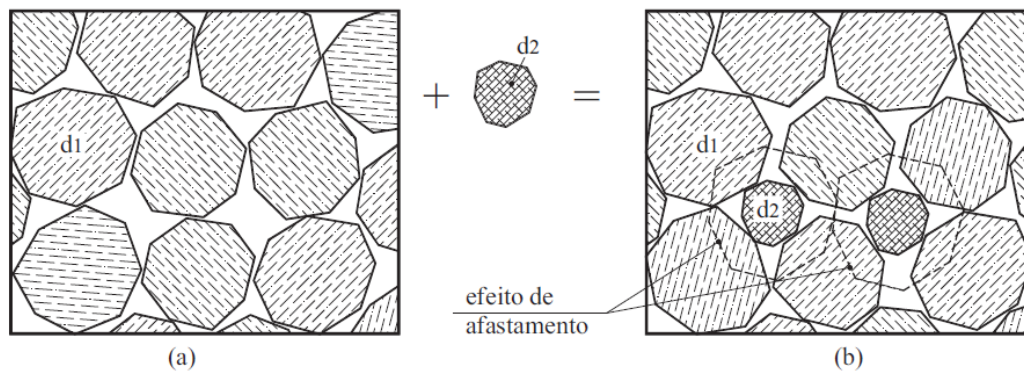


Figura 3.3 – Mistura binária com interação: (a) mistura sem perturbação; (b) efeito de afastamento provocado pelos grãos menores (d_2) sobre os grãos maiores (d_1) [FORMAGINI, 2005].

O efeito de parede ocorre em misturas onde a classe dos grãos menores é a dominante. Neste caso, surgirá certa quantidade de vazios na superfície de contato entre as duas classes, provocada pela diferença significativa de tamanho entre as partículas, de forma que a superfície de contato do grão maior é praticamente plana. A Figura 3.4 mostra esse efeito.

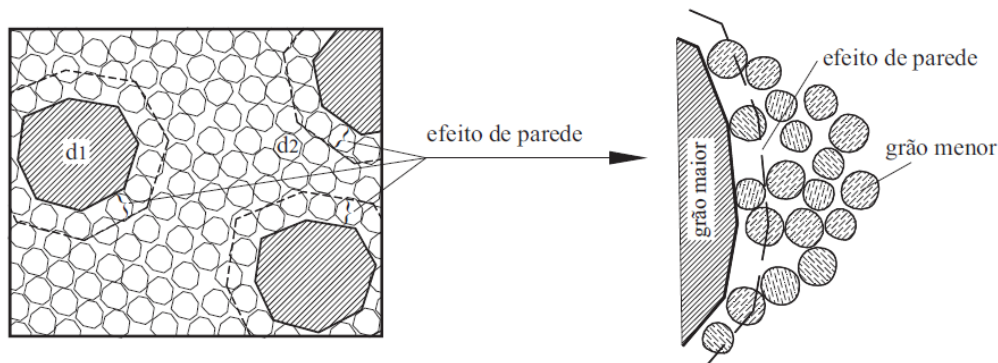


Figura 3.4 – Mistura binária com interação: efeito de parede provocado pelos grãos maiores sobre os grãos menores [FORMAGINI, 2005].

3.2.2. Misturas binárias

A mistura binária é constituída por duas classes granulares de diâmetro, d_1 e d_2 . Neste caso, convencionalmente adota-se a notação classe 1 para as partículas de diâmetro maior (d_1), enquanto a classe 2 é composta por partículas do menor diâmetro (d_2) entre as duas classes. Assim, o diâmetro d_1 é sempre maior que o diâmetro d_2 ($d_1 > d_2$).

Inicialmente, é importante conhecer as frações volumétricas ocupadas por cada classe da mistura, denotadas por y_1 e y_2 , definidas pela Equação (3.1).

$$y_i = \frac{\phi_i}{\phi_1 + \phi_2} \quad (3.1)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 são denominados volumes parciais e correspondem aos volumes de sólidos ocupados pela classe 1 e 2, respectivamente, em um volume unitário da mistura. Isto significa que uma mistura binária granular é composta por ϕ_1 , ϕ_2 e mais um determinado volume de vazios, totalizando um volume unitário. Além disso, por definição:

$$y_1 + y_2 = 1 \quad (3.2)$$

Então, a compacidade virtual de uma mistura binária, denotada por γ , é dada por:

$$\gamma = \phi_1 + \phi_2 \quad (3.3)$$

3.2.2.1. Mistura binária sem interação

Conforme visto anteriormente, quando uma mistura binária apresenta classes com $d_1 \gg d_2$, ela é dita sem interação. Isto significa que os grãos da classe dominante não sofrem perturbação provocada pela outra classe da mistura. Considerando que tanto a classe 1 quanto a classe 2 podem ser as dominantes, então dois casos podem ocorrer.

No primeiro caso, com a classe 1 dominante, seus grãos preenchem o volume disponível como se nenhum grão da classe 2 estivesse presente. Assim, o volume parcial da classe 1 é constante e igual a β_1 , ou seja, $\phi_1 = \beta_1$. Já o volume da classe 2 pode variar entre zero e um valor no qual a classe 1 deixa de ser dominante. Então, a compacidade virtual da mistura pode ser dada por $\gamma = \gamma^{(1)} = \beta_1 + \phi_2$, onde o sobrescrito (1) indica que a classe 1 é a dominante. Sabendo-se que $y_2 = \phi_2/(\phi_1 + \phi_2)$ e que $\gamma^{(1)} = \phi_1 + \phi_2$, pode-se deduzir que:

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) só possui validade enquanto os grãos da classe 2 preenchem os vazios deixados pelos grãos da classe 1, até ocupá-los por completo. A partir desse momento, qualquer grão menor que seja adicionado a mistura provoca um afastamento dos grãos maiores, ou seja, a classe 2 passa a ser a classe dominante. Neste segundo caso, o volume parcial da classe 2 é $\phi_2 = \beta_2(1 - \phi_1)$, pois os grãos da classe 2 ocupam completamente o espaço deixado pelos grãos maiores. Assim, sabendo-se que $y_1 = \phi_1/(\phi_1 + \phi_2)$ e que $\gamma^{(2)} = \phi_1 + \phi_2$, pode-se deduzir que:

$$\gamma = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)y_1} \quad (3.5)$$

A Figura 3.5 mostra o comportamento da compacidade virtual de um sistema composto por dois tipos de esferas com tamanhos muito diferentes, ou seja, $\beta_1 = \beta_2 = 0,74$ e $d_1 \gg d_2$. O eixo horizontal principal representa a fração de grãos menores (y_2), enquanto o eixo horizontal secundário representa a fração dos grãos da classe 1 (y_1) que, conforme visto na Equação (3.2), é dado por $y_1 = 1 - y_2$. Além disso, a área 1 representa o trecho em que a classe dos grãos maiores é a dominante, sendo utilizada a

Equação (3.4) para o traçado do gráfico, enquanto na área 2 os grãos mais finos são os dominantes e a Equação (3.5) é válida. Assim, pode-se concluir que:

$$\gamma = \min(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) \quad (3.6)$$

Ainda de acordo com a Figura 3.5, a compacidade virtual máxima ocorre na transição entre a dominância das classes, ou seja, quando todos os vazios da classe 1 são preenchidos por grãos da classe 2. Este ponto é conhecido como ponto de empacotamento máximo da mistura e, neste caso, acontece quando $y_2 = 0,205$.

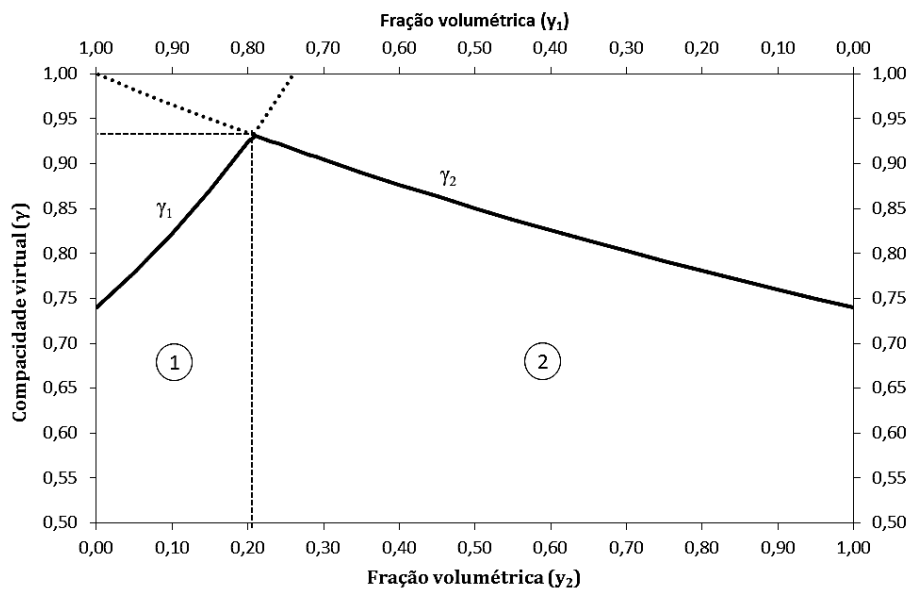


Figura 3.5 – Desenvolvimento da compacidade virtual de uma mistura binária de esferas sem interação, onde as áreas representam: (1) Classe 1 dominante; (2) Classe 2 dominante.

3.2.2.2. Mistura binária com interação total

Uma mistura binária é dita com interação total quando $d_1 = d_2$, ou seja, quando o diâmetro médio dos grãos são iguais. Neste caso, as compacidades virtuais $\gamma^{(1)}$ e $\gamma^{(2)}$ são iguais e não se alteram conforme as frações das classes são variadas. Assim, a compacidade virtual é calculada pela Equação (3.7).

$$\gamma = \gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - y_2 \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2}\right)} = \gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - y_1 \left(1 - \frac{\beta_2}{\beta_1}\right)} \quad (3.7)$$

3.2.2.3. Mistura binária com interação parcial – Efeitos de afastamento e de parede

Uma mistura binária é dita com interação parcial quando $d_1 > d_2$, porém os grãos da classe 2 não são mais tão pequenos em relação aos grãos da classe 1. Neste caso, surgem os efeitos de afastamento e de parede, já explicados no item 3.2.1.

Em misturas binárias com interação parcial onde a classe 1 é dominante, surge o efeito de afastamento e o cálculo da compacidade virtual é dado pela Equação (3.8).

$$\gamma^{(1)} = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12}\beta_1/\beta_2)y_2} \quad (3.8)$$

O parâmetro a_{12} é denominado coeficiente de efeito de afastamento, que é provocado pelos grãos da classe 2 sobre os grãos da classe 1. Este coeficiente pode variar entre zero e um. Assim, quando a mistura é dita sem interação ($d_1 \gg d_2$), esse coeficiente é igual a zero ($a_{12} = 0$) e a Equação (3.8) se torna idêntica a Equação (3.4). Quando ocorre a chamada interação total ($d_1 = d_2$), o coeficiente a_{12} é igual a um ($a_{12} = 1$) e a Equação (3.8) passa a ser igual a Equação (3.7) para o cálculo de $\gamma^{(1)}$.

No caso de misturas binárias com interação parcial onde a classe 2 é dominante, surge o efeito conhecido como efeito de parede e a compacidade da mistura pode ser calculada através da Equação (3.9).

$$\gamma^{(2)} = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2(1 - 1/\beta_1)]y_1} \quad (3.9)$$

O parâmetro b_{21} é conhecido como coeficiente de efeito de parede, que é provocado pelos grãos da classe 1 sobre os grãos da classe 2. Este coeficiente pode variar entre zero e um. Então, em misturas binárias sem interação ($d_1 \gg d_2$), este coeficiente é igual a zero ($b_{21} = 0$) e a Equação (3.9) se torna igual à Equação (3.5). No caso de misturas binárias com interação total ($d_1 = d_2$), o coeficiente b_{21} é igual a um ($b_{21} = 1$) e a Equação (3.9) passa a ser análoga a Equação (3.7).

Assim como apresentado para misturas binárias sem interação, a compacidade da mistura pode ser calculada através da Equação (3.10).

$$\gamma = \text{MIN}(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) \quad (3.10)$$

A Figura 3.6 ilustra o comportamento de três misturas binárias formadas por dois tipos de esferas ($\beta_1 = \beta_2 = 0,74$), sendo a primeira sem interação entre as classes, a segunda com interação parcial e a terceira com interação total. É possível observar que, no ponto de compacidade máxima da mistura com interação parcial, o efeito de afastamento é igual ao efeito de parede. Além disso, nota-se que o surgimento dos efeitos de interação, tanto para misturas com interação parcial quanto para misturas com interação total, diminuem a compacidade virtual da mistura.

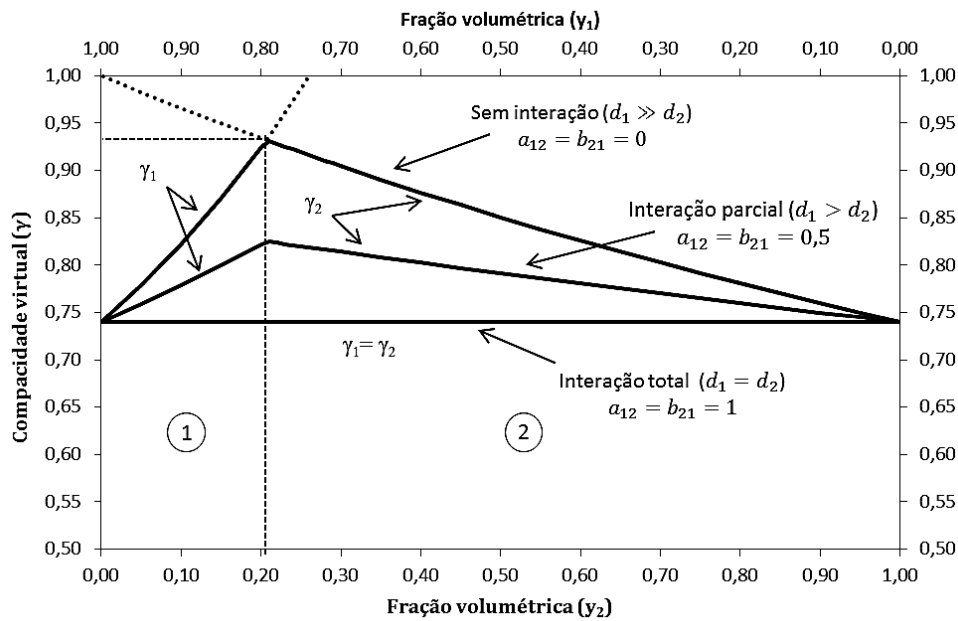


Figura 3.6 – Comparação entre o desenvolvimento da compacidade virtual de três misturas binárias de esferas sem interação, com interação parcial e com interação total, onde as áreas representam: (1) Classe 1 dominante; (2) Classe 2 dominante.

Pela Figura 3.6, nota-se que os efeitos de afastamento e de parede estão relacionados à inclinação da função da compacidade virtual ($\gamma(y_2)$), nos pontos $y_2 = 0$ e $y_2 = 1$, respectivamente. Os parâmetros a_{12} e b_{21} podem ser deduzidos através da Equação (3.11) e Equação (3.12), respectivamente, considerando a função índice de vazios como $e(y_2) = 1 - \phi(y_2)$.

$$a_{12} = \beta_2 \left[\left. \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} + \frac{1}{\beta_1} \right] \quad (3.11)$$

$$b_{21} = \frac{\frac{1}{\beta_2} - 1 - \left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=1}}{\frac{1}{\beta_1} - 1} \quad (3.12)$$

Esses parâmetros também podem ser obtidos através de uma aproximação, em função dos diâmetros dos grãos, apresentada nas Equações (3.13) e (3.14).

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (3.13)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1,50} \quad (3.14)$$

3.2.3. Misturas polidispersas

Uma mistura é dita polidispersa quando é composta por mais de duas classes granulares. Nesta seção serão apresentadas as formulações para compacidade virtual para misturas polidispersas compostas por N classes monodispersas e para misturas polidispersas compostas por M materiais, sendo cada material correspondente a uma mistura polidispersa de N classes.

3.2.3.1. Mistura polidispersa composta por N classes monodispersas

Para o caso de misturas polidispersas formadas por N classes granulares, considera-se, como caso geral, a existência de interações entre as classes. Assim, assumindo-se que $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_i \geq d_{i+1} \geq \dots \geq d_N$, sendo a classe i dominante, esta classe sofre o efeito de parede das classes de tamanho maiores e o efeito de afastamento das classes de tamanhos menores.

Então, a compacidade virtual de misturas polidispersas compostas por N classes monodispersas, para uma classe i dominante, pode ser calculada através da Equação (3.15).

$$\gamma^{(i)} = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i(1 - 1/\beta_j)]y_j - \sum_{j=1+i}^N [1 - a_{ij}\beta_i/\beta_j]y_j} \quad (3.15)$$

A compacidade virtual da mistura é obtida de forma similar a apresentada para misturas binárias e é apresentada pela Equação (3.16).

$$\gamma = \min_{1 \leq i \leq N} (\gamma^{(i)}) \quad (3.16)$$

3.2.3.2. Mistura polidispersa composta por M materiais, cada um com N classes

Para o cálculo da compacidade virtual de uma mistura de M materiais, considera-se que cada material é composto por uma mistura polidispersa formada por N classes. Neste caso, o teor de cada classe não pode variar dentro do material ao qual ela compõe, variando somente quando o teor do material for variado. Assim, os materiais devem formados pelas mesmas classes granulares (mesmos intervalos granulométricos), mesmo que algumas classes tenham fração volumétrica zero em alguns materiais (SILVA, 2004).

Definindo-se p_k como a fração volumétrica do material k e y_{kj} como a fração volumétrica da classe j dentro do material k , a relação apresentada na Equação (3.17) deve ser respeitada.

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N p_k y_{kj} = 1 \quad (3.17)$$

Assim, a compacidade virtual da mistura polidispersa composta por M materiais, sendo cada material formado por N classes, para a classe i considerada dominante, é dada pela Equação (3.18).

$$\gamma^{(i)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^M p_k \delta_{ki}} \quad (3.18)$$

O termo δ_{ki} é calculado pela Equação (3.19), onde β_{kj} é a compacidade virtual da classe j pertencente ao material k .

$$\delta_{ki} = \sum_{j=1}^i \left[1 - b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_{kj}} \right) \right] y_{kj} + \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij} y_{kj}}{\beta_{kj}} \quad (3.19)$$

A compacidade virtual da mistura também é dada pela Equação (3.16).

3.3. Modelo de empacotamento real

O empacotamento de misturas obtidas experimentalmente não pode ser considerado igual à compacidade γ calculada pelo modelo de empacotamento virtual. No empacotamento virtual, considera-se como compacidade virtual (γ), o maior empacotamento possível de se obter para uma mistura granular. Este empacotamento ocorre de forma teórica, como se os grãos fossem organizados, um a um, de forma a se obter o melhor arranjo possível.

O empacotamento real (ϕ) de uma mistura granular depende, além da distribuição granulométrica e da heurística das partículas, do tipo de protocolo experimental de empacotamento utilizado. Assim, é possível correlacionar a compacidade virtual à compacidade real através de um parâmetro conhecido como índice de compactação K. Esse índice leva em consideração a energia associada ao procedimento experimental de empacotamento, de forma que quanto maior for esse índice, mais próxima a compacidade real será da virtual. Assim, o empacotamento virtual corresponde a um índice $K = \infty$.

A Equação (3.20) apresenta a expressão final para o cálculo do índice K para misturas polidispersas.

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{1/\phi - 1/\gamma^{(i)}} \quad (3.20)$$

Para o empacotamento de misturas monodispersas, a Equação (3.20) se reduz a Equação (3.21).

$$K = \frac{1}{\beta/\phi - 1} \quad (3.21)$$

Os valores do índice de empacotamento K para os diferentes protocolos de empacotamento foram obtidos por de Larrard (1999) e são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Índices K para diferentes protocolos de empacotamento [DE LARRARD, 1999]

Protocolo de empacotamento	Índice de empacotamento K
Lançamento simples	4,1
Lançamento + golpes com bastão	4,5
Vibração	4,75
Demanda d'água	6,7
Vibração + compactação	9
CCR	12
Empacotamento Virtual	∞

A compacidade virtual β de uma determinada classe granular pode ser obtida experimentalmente através de um ensaio para a determinação da compacidade real ϕ da classe com certo protocolo de empacotamento (índice K conhecido). Invertendo-se a Equação (3.21), obtém-se a Equação (3.22) para o cálculo da compacidade virtual β .

$$\beta = \frac{1 + K}{K} \phi \quad (3.22)$$

O cálculo da compacidade real (ϕ) de uma mistura granular dispersa é realizado através da resolução da Equação (3.20) implícita em ϕ , onde os valores de y_i , β_i e K são conhecidos e $\gamma^{(i)}$ é função de y_i e β_i .

No caso de misturas binárias, a solução da Equação (3.20) pode ser reescrita considerando $f(\phi) = 0$ e passando o K para o lado direito da expressão. A Equação (3.23) apresenta esta solução.

$$f(\phi) = \frac{y_1/\beta_1}{1/\phi - 1/\gamma^{(1)}} + \frac{y_2/\beta_2}{1/\phi - 1/\gamma^{(2)}} - K = 0 \quad (3.23)$$

Como $\gamma^{(i)} = f(y_i, \beta_i, j = 1, n)$ e a compacidade real ϕ está compreendida entre 0 e 1, é possível traçar a função $f(\phi)$ para valores arbitrários de y_i , β_i e K . A Figura 3.7 apresenta o gráfico da função $f(\phi)$ para uma mistura binária de esferas com $y_1 = 0,8$, $y_2 = 0,2$, $d_1 = 10$, $d_2 = 1$, $\beta_1 = \beta_2 = 0,74$ e $K = 9$.

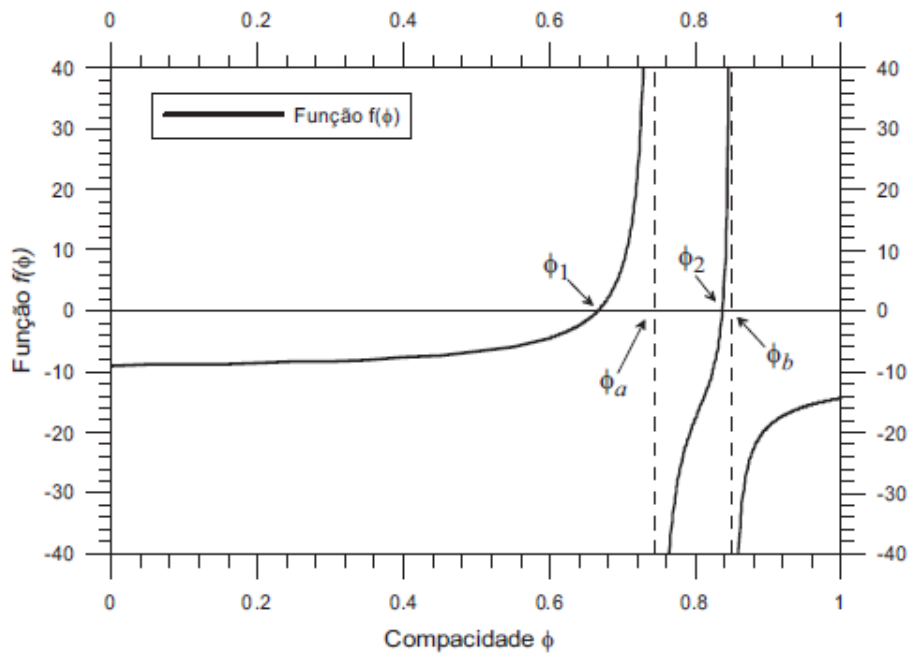


Figura 3.7 – Comportamento da função $f(\phi)$ para uma mistura binária [FORMAGINI, 2005]

O objetivo é determinar o valor de ϕ que torna a função igual a zero. Observa-se na Figura 3.7 que existem dois valores (ϕ_1 e ϕ_2) que são raízes da função. Existem também outros dois valores (ϕ_a e ϕ_b) que correspondem à descontinuidades de $f(\phi)$, já que esta função é indefinida para a condição a seguir.

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\gamma^{(1)}} \quad \text{e} \quad \frac{1}{\phi} = \frac{1}{\gamma^{(2)}}$$

Portanto, $\phi_a = \gamma^{(1)}$ e $\phi_b = \gamma^{(2)}$.

Como a compacidade real ϕ é sempre menor do que a compacidade virtual γ e como a compacidade virtual é sempre o menor valor entre os valores de compacidade virtual de cada classe, deduz-se a Equação (3.24).

$$\phi < \gamma < \left\{ \begin{matrix} \gamma^{(1)} \\ \gamma^{(2)} \end{matrix} \right\} \quad (3.24)$$

Assim, como a Equação (3.23) deve ser resolvida por algum método iterativo, pode-se limitar o seu domínio de busca a $0 < \phi < \gamma$, o que fornecerá como solução apenas uma raiz igual a ϕ_1 , ilustrada na Figura 3.7.

Resolvendo a Equação (3.23) para cinco diferentes valores de K (4,1; 6,7; 9; 50 e ∞), com $\beta_1=0,66$, $\beta_2=0,702$, $a_{12}=0,101$ e $b_{21}=0,015$, obtêm-se as curvas apresentadas na Figura 3.8. Nota-se que as inclinações das curvas em $y_2=0$ e $y_2=1$ são muito próximas entre si, não variando com o valor de K . Assim, é possível determinar os valores de a_{12} e b_{21} experimentalmente, através de um protocolo de índice K conhecido e utilizando-se as Equações (3.10) e (3.11), considerando que o valor de K escolhido corresponde à compacidade virtual ($K = \infty$).

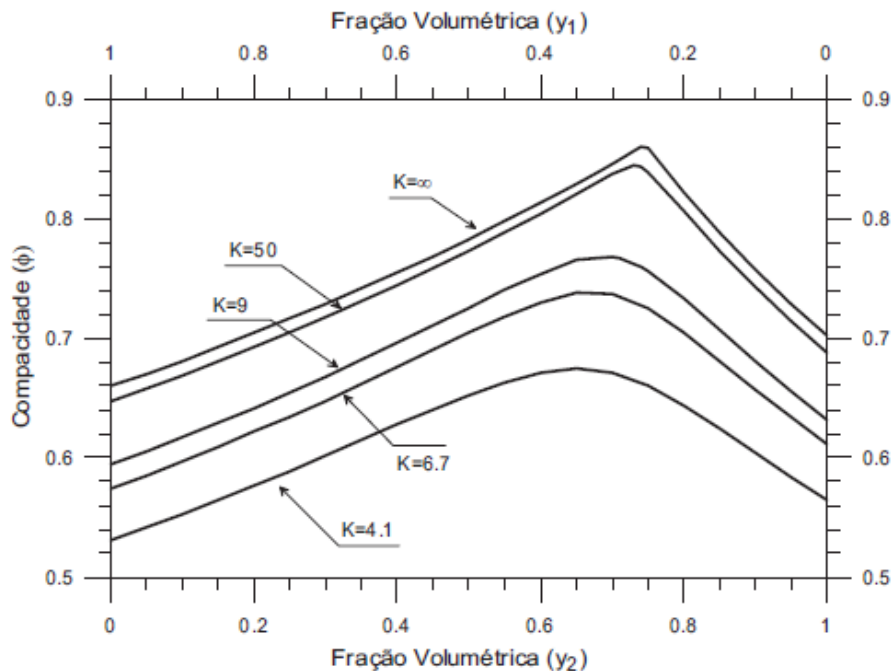


Figura 3.8 – Evolução da compacidade para uma mistura binária com diferentes valores de K [FORMAGINI. 2005]

3.4. Correlações entre o MEC e as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido

Neste item, as características de empacotamento das misturas são correlacionadas com as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Apesar do MEC correlacionar propriedades reológicas como viscosidade plástica, tensão de cisalhamento, colocabilidade, ar aprisionado e estabilidade, nesse estudo somente será avaliado o abatimento do tronco de cone. Os conceitos de viscosidade plástica e tensão de cisalhamento serão especificados apenas para uma breve introdução aos fundamentos

da reologia. No estado endurecido, avaliam-se as resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e permeabilidade à gás.

3.4.1. Aplicação do MEC ao concreto no estado fresco

3.4.1.1. Fundamentos de reologia

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de um fluido, quando submetido ou não a influencia de uma tensão externa. Seu estudo é considerado adequado a materiais que não se enquadram numa simples classificação de sólidos, líquido ou gás (TATTERSALL,1976). O comportamento reológico do concreto é descrito através de relações matemáticas entre a tensão cisalhante aplicada (τ) e sua respectiva deformação (γ), além de variações em função do tempo.

O concreto no estado fresco é considerado um material intermediário entre um fluido e partículas úmidas empacotadas. Para que o concreto possa ser estudado pela ciência da reologia, ele não deve segregar durante o escoamento, deve ser incompressível e apresentar abatimento maior que 100 mm.

O modelo mais utilizado para reproduzir o comportamento reológico do concreto é o modelo do Bingham, que é uma particularização do modelo de Herschel-Bulkley. O fluido de Bingham é caracterizado por dois parâmetros físicos: tensão inicial de escoamento (τ_0) e viscosidade plástica (μ), podendo ser descrito pela Equação (3.25).

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (3.25)$$

A determinação destes dois parâmetros é realizada aplicando-se gradativamente ao concreto uma tensão de cisalhamento e medindo-se a taxa de deformação cisalhante. A tensão inicial de escoamento (τ_0) é alcançada no instante em que o concreto inicia o seu escoamento. Essa tensão resulta da combinação entre o atrito e a coesão existente entre os contatos dos grãos para o material entrar em movimento. Após o início do escoamento, a viscosidade plástica pode ser definida como a inclinação da reta ajustada sobre os pontos experimentais no espaço $\tau \times \gamma$.

3.4.1.2. Viscosidade plástica

Para simular o comportamento reológico do concreto fresco, considerado como uma mistura granular suspensa em água, define-se o volume mínimo de água como o volume necessário para preencher os vazios da mistura granular sólida no estado seco. Quando estes vazios são preenchidos pela água, o empacotamento do material é dito denso e não tem trabalhabilidade. À medida que se incrementa a quantidade de água, gera-se um afastamento entre os grãos, o que permite o deslizamento entre os mesmos, e ao se aplicar uma tensão de cisalhamento sobre o concreto, uma deformação irá ocorrer superando as forças de fricção e de coesão entre os grãos. Assim, o concreto passa a ter trabalhabilidade, que é dependente do afastamento entre os grãos, ou seja, quanto mais próximos eles estiverem menor será sua trabalhabilidade.

A viscosidade plástica do concreto no estado fresco pode ser associada a concentração normalizada de sólidos, ou seja, a relação entre o volume de sólido da mistura em um volume unitário (ϕ) e a máxima concentração real de sólidos que a mistura poderia alcançar (ϕ^*). Esta máxima concentração real de sólidos é a compacidade obtida com o protocolo de empacotamento correspondente ao índice $K=9$. Assim, a viscosidade plástica (em Pa.s) pode ser obtida em função da concentração normalizada de sólidos, através da Equação

$$\mu = \exp \left[c_1 \left(\frac{\phi}{\phi^*} - c_2 \right) \right] \quad (3.26)$$

Os valores sugeridos para as constantes c_1 e c_2 são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores propostos para as constantes c_1 e c_2 por diferentes autores [SILVA, 2004]

Modelo	c_1	c_2
FERRARIS E DE LARRARD (1998)	26,75	0,7448
DE LARRARD (1999)	38,38	0,8385
SEDRAN (1999)	45,88	0,8512

3.4.1.3. Tensão de cisalhamento

Como a tensão de cisalhamento é originada pela coesão e atrito entre os grãos, a utilização de aditivos químicos provoca grande influência nesta propriedade. Em misturas dispersas, os grãos permanecem individualizados, diminuindo assim o número de colisões entre eles. Assim, o valor de τ_0 é menor nas misturas dispersas, em comparação com as misturas que não utilizam aditivos químicos.

3.4.1.3.1. Tensão de cisalhamento sem aditivos químicos

A tensão de cisalhamento pode ser vista como o resultado da fricção entre as diferentes frações granulares. Considerando duas classes de grãos de mesma geometria, mas de tamanhos diferentes, quanto menor for a dimensão de uma delas, maior será a tensão de cisalhamento. Assim, a tensão de cisalhamento pode ser obtida através da Equação (3.27), proposta por de Larrard, em 1999.

$$\tau_0 = \exp\left(c_0 + \sum_{i=1}^N a_i K_i\right) \quad (3.27)$$

O valor da constante c_0 pode ser adotado como 2,537 e K_i é a contribuição da fração i para o índice de compactação da mistura (Equação (3.28)).

$$K_i = \frac{\phi_i / \phi_i^*}{1 - \phi_i / \phi_i^*} \quad (3.28)$$

Os termos a_i são coeficientes relacionados com a dimensão dos grãos, onde d_i corresponde ao valor médio acumulado de 50%. Esta correlação é apresentada na Equação (3.29).

$$a_i = 0,736 - 0,216 \log(d_i) \quad (3.29)$$

3.4.1.3.2. Tensão de cisalhamento com aditivos químicos

A formulação que correlaciona a tensão de cisalhamento com o modelo de empacotamento compressível, considerando a presença de aditivos químicos, é apresentada pela Equação (3.30).

$$\tau_0 = \exp\left(c_0 + b_i K_c + \sum_{i=2}^N a_i K_i\right) \quad (3.30)$$

O valor da constante c_0 pode ser adotado como 2,537 e K_c é a contribuição da fração do cimento para o índice de compactação da mistura. O coeficiente b_i é dado pela Equação (3.31).

$$b_i = c_1 + c_2 \left(1 - \frac{S_p}{S_p^*}\right) \quad (3.31)$$

Onde, S_p e S_p^* correspondem a dosagem de aditivos químicos e o valor do ponto de saturação da mistura, respectivamente. Os valores adotados para as constantes são $c_1 = 0,224$ e $c_2 = 0,910$.

3.4.1.4. *Abatimento do tronco de cone de Abrams*

O abatimento do tronco de cone de Abrams é um parâmetro muito utilizado para caracterizar a consistência do concreto no estado fresco. Em 1988, após a validação experimental de modelos antigos, Ferraris e de Larrard propuseram uma correlação entre o abatimento do tronco de cone (mm) e a tensão cisalhante (Pa), apresentada pela Equação (3.32).

$$SL = 300 - 0,347 \frac{(\tau_0 - 212)}{\rho} \quad (3.32)$$

Onde ρ é a densidade específica do concreto fresco (adimensional).

3.4.2. **Aplicação do MEC ao concreto no estado endurecido**

3.4.2.1. *Resistência à compressão*

As resistências da matriz e dos agregados inertes apresentam grande influência na resistência à compressão do concreto. A correlação entre a resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, e o modelo de empacotamento compressível é apresentada pela Equação (3.33).

$$f_{cp} = 11,40R_{c28} \left(\frac{v_c}{v_c + v_w + v_a} \right)^{2,85} \quad (3.33)$$

Onde,

R_{c28} é a resistência à compressão do cimento aos 28 dias, em MPa;

v_c é o volume de cimento em um volume unitário;

v_w é o volume de água em um volume unitário;

v_a é o volume de ar em um volume unitário.

Considerando-se que o volume e a dimensão máxima dos agregados também influenciam na resistência à compressão do concreto, é necessário definir um parâmetro que mensure estes dois efeitos. Este parâmetro é chamado de Máxima Espessura da Pasta, cuja sigla em inglês é MPT, e corresponde a distância média entre os agregados imersos na matriz. O valor deste parâmetro é fornecido pela Equação (3.34).

$$MPT = D \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad (3.34)$$

Onde,

D é o valor da máxima dimensão do agregado, em mm;

g é o volume dos agregados em um volume unitário de concreto;

g^* é a compacidade dos agregados através do protocolo de empacotamento correspondente a K=9.

Assim, o modelo para o cálculo da resistência à compressão do concreto aos 28 dias, considerando a resistência à compressão do cimento, a concentração de cimento da pasta no estado fresco, os efeitos da MPT, a aderência entre a pasta e o agregado e a resistência do agregado, é dado pelas Equações (3.35) e (3.36).

$$f_{cm} = 13,40R_{c28} \left(\frac{v_c}{v_c + v_w + v_a} \right)^{2,85} \cdot MPT^{-0,13} \quad (3.35)$$

$$f_c = \frac{p \cdot f_{cm}}{q \cdot f_{cm} + 1} \quad (3.36)$$

Onde,

f_{cm} é a resistência da matriz, em MPa;

f_c é a resistência do concreto, em MPa;

p é o parâmetro que trata da interface pasta-agregado, adimensional;

q é o parâmetro relacionado à resistência intrínseca do agregado, em MPa^{-1} .

Os parâmetros “p” e “q” podem ser calculados através das Equações (3.37) e (3.38).

$$p = \frac{1}{f_{cm} \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 f_{c_g}} \right)} \quad (3.37)$$

$$q = \frac{p}{2,14 f_{c_g}} \quad (3.38)$$

Onde, f_{c_g} é a resistência à compressão do agregado. Os parâmetros “p” e “q”, também podem ser determinados indiretamente através do ensaio de resistência à compressão de dois tipos de concretos: um com baixa resistência e outro com alta resistência.

3.4.2.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto depende diretamente dos módulos de elasticidade dos agregados e da matriz. O módulo de elasticidade tangente do concreto (E), em GPa, pode ser calculado através da Equação (3.39).

$$E = \left[1 + 2g \frac{E_g^2 - E_m^2}{(g^* - g)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_g E_m + (g^* + g)E_m^2} \right] E_m \quad (3.39)$$

Onde,

E_g é o módulo de elasticidade do agregado, em GPa;

E_m é o módulo de elasticidade da matriz, em GPa, dado pela Equação (3.40).

$$E_m = 226f_c \quad (3.40)$$

3.4.2.3. Resistência à tração

O modelo empírico para estimar a resistência à tração direta do concreto é dado em função da resistência à compressão. A Equação (3.41) apresenta a formulação sugerida para concretos de alto desempenho, curados em água.

$$f_t = k_t f_c^{0,57} \quad (3.41)$$

O valor de k_t pode ser determinado experimentalmente e varia para cada tipo de agregado. De acordo com de Larrard (1988), k_t pode ser considerado igual a 0,468.

3.5. Ferramenta computacional: *Betonlab Pro 3*

3.5.1. Introdução

As dosagens de concretos baseadas no modelo de empacotamento compressível podem ser realizadas com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*. Neste programa, é possível otimizar traços de concretos e estimar algumas propriedades da mistura nos estados fresco e endurecido, a partir de um banco de dados das matérias primas, produzido pelo próprio usuário. Neste item, será apresentada a estrutura, bem como as etapas a serem seguidas, para a utilização do programa.

3.5.2. Estrutura do programa

A primeira etapa para a utilização do programa *Betonlab Pro 3* é caracterizada pela determinação experimental das propriedades de todos os materiais a serem utilizados para a produção do concreto. Essas propriedades, bem como os procedimentos de ensaio adotados, são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades necessárias para a formação do banco de dados do programa *Betonlab Pro 3*

Propriedades	Agregado graúdo	Agregado miúdo	Cimento	Aditivo químico
Massa específica	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 52 (2009)	NBR NM 23 (2001)	Fornecido pelo fabricante
Absorção de água	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 30 (2000)	-	-
Granulometria	Peneiramento	Peneiramento	Granulometria à laser	-
Compacidade experimental	Compressão + Vibração	Compressão + Vibração	Demanda d'água	-
Ponto de saturação	-	-	-	Funil de Marsh
Concentração de sólidos	-	-	-	Fornecido pelo fabricante
Resistência à compressão	-	-	NBR 7215 (1996)	-
Composição química	-	-	Análise química	-
Parâmetros “p” e “q”	Concreto – Traço rico e traço pobre	Argamassa – Traço rico e traço pobre	-	-

Após a etapa de caracterização experimental dos materiais, é possível iniciar o estudo de dosagem no programa *Betonlab Pro 3*. O primeiro passo é a criação do banco de constituintes, no qual são cadastrados todos os materiais a serem utilizados para a dosagem do concreto (Figura 3.9-a e Figura 3.9-b).

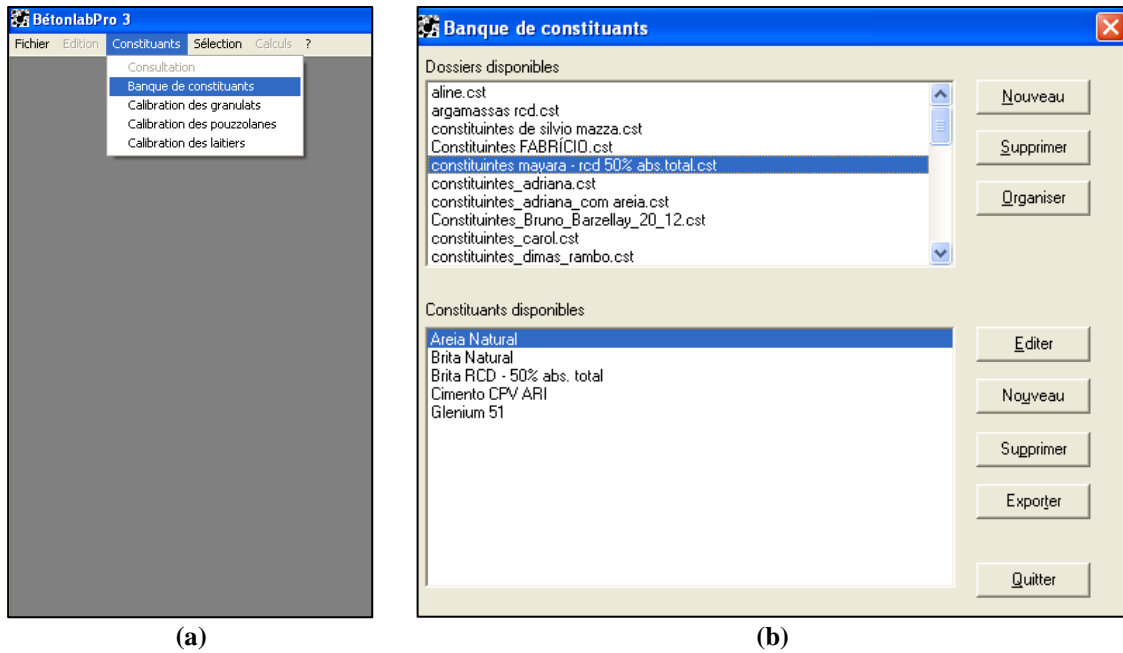


Figura 3.9 – Banco dos materiais constituintes do concreto: (a) menu para acesso; (b) detalhe da janela inicial.

Em seguida, os parâmetros “p” e “q” dos agregados podem ser calibrados através dos dados das dosagens de dois tipos de concretos – um traço de alta resistência e outro traço de baixa resistência, para o agregado graúdo – e dois tipos de argamassas – também de alta resistência e outra de baixa resistência, para o agregado miúdo. Esta etapa é ilustrada pela Figura 3.10-a e Figura 3.10-b.

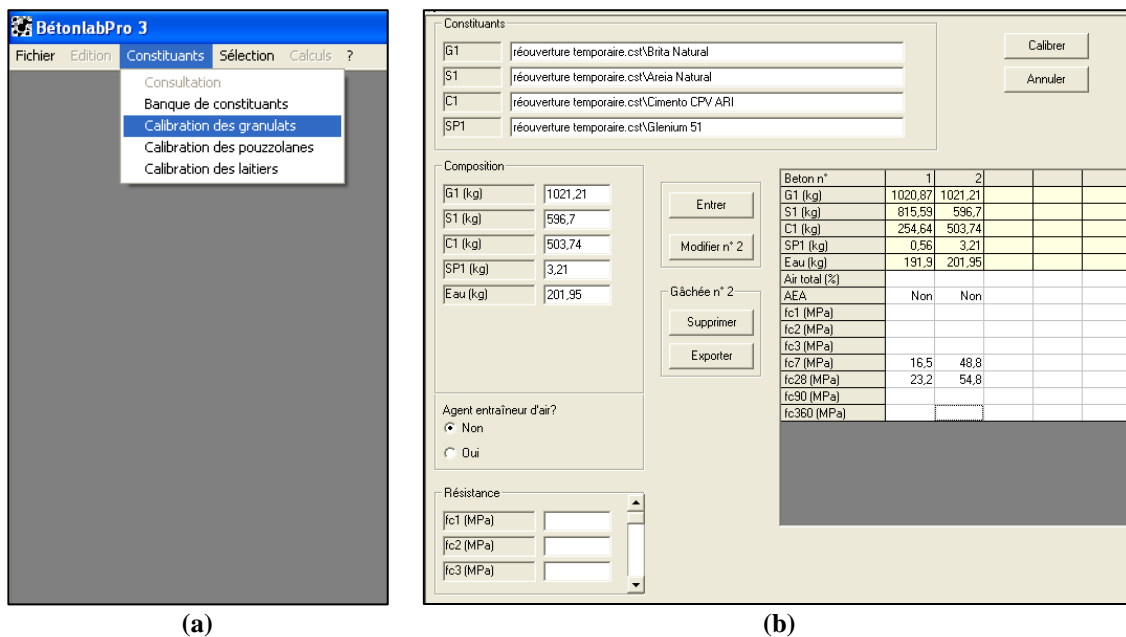


Figura 3.10 – Calibração dos parâmetros “p” e “q”: (a) menu para acesso; (b) detalhe da janela de calibração.

Concluída a etapa de calibração dos parâmetros “p” e “q”, é possível iniciar as simulações das dosagens. Para isso, é necessário selecionar os materiais que estarão presentes na composição do concreto (Figura 3.11-a) e, em seguida, definir as propriedades que deverão ser estimadas pelo programa (Figura 3.11-b).

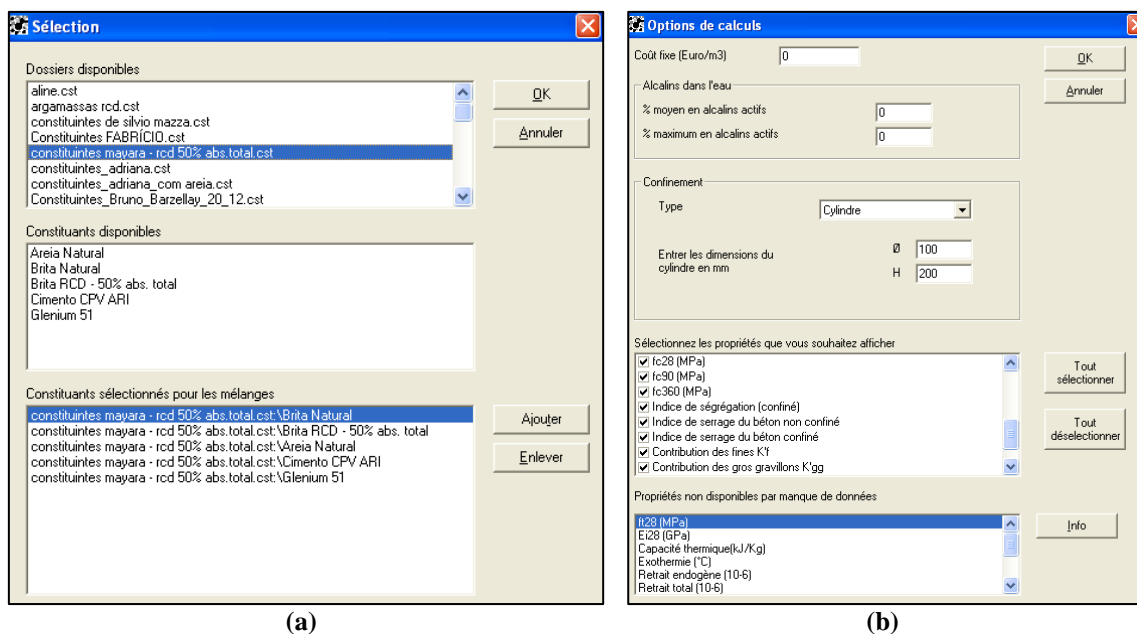


Figura 3.11 – (a) Seleção dos materiais constituintes do concreto a ser dosado; (b) janela de seleção das propriedades a serem estimadas pelo programa

O programa faz simulações a partir de um traço inicial, definido pelo usuário. Assim, após a determinação da composição inicial, o *Betonlab Pro 3* realiza otimizações automáticas, de acordo com os ajustes definidos pelo usuário. Deste modo, é possível restringir a faixa de abatimento do tronco de cone, definir uma resistência esperada aos 28 dias, determinar a quantidade mínima desejada para um dado material, entre outras especificações desejadas. Além disso, o usuário precisa escolher qual propriedade deve ser maximizada ou minimizada, como por exemplo, a compacidade da estrutura granular, a resistência mecânica em uma determinada idade ou, até mesmo, o consumo de cimento. A Figura 3.12 ilustra a janela do programa com as propriedades a serem otimizadas.

As dosagens calculadas são apresentadas uma ao lado da outra, em uma janela do programa, conforme apresentado na Figura 3.13. Assim, o usuário pode avaliar e escolher a dosagem de concreto mais adequada para as propriedades estimadas desejadas.

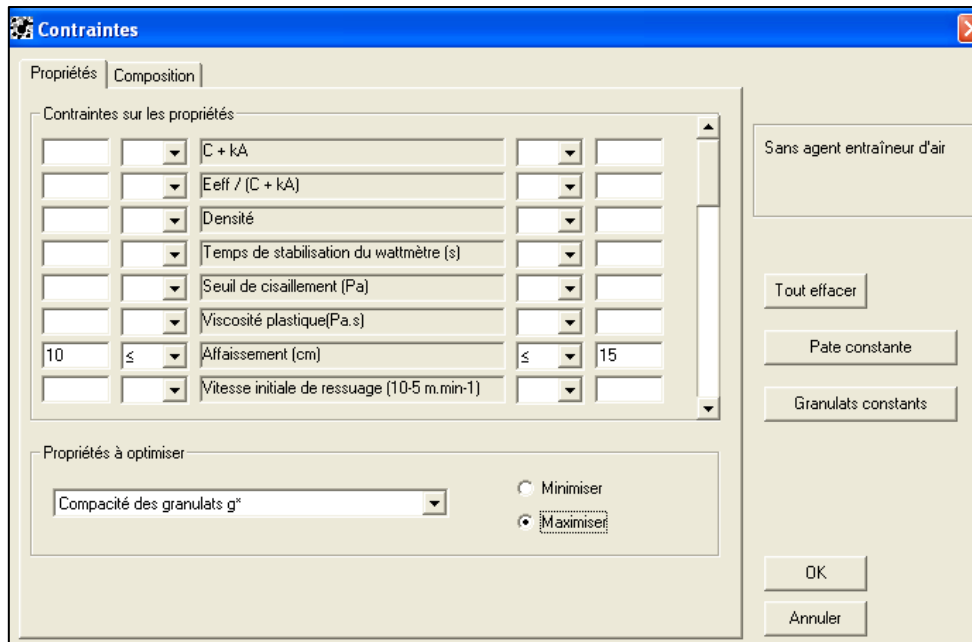


Figura 3.12 – Janela com a lista de propriedades a serem otimizadas pelo programa *Bétonlab Pro 3*

	1	2
Gâchée n°		
G1 (kg/m3)	463,3	1010
G2 (kg/m3)	451,3	0
S1 (kg/m3)	844,3	846
C1 (kg/m3)	300	295,3
SP1 (kg/m3)	3	2,95
Eau (kg/m3)	213,7	170,2
G1 (%)	25	52,11
G2 (%)	25	0
S1 (%)	50	47,89
Taux de saturation (%)	0,31	0,31
Taux de superplastifiant (%)	0,3	0,3
Eau eff	190	156,3
Air total (%)	1,3	1,5
AEA	Non	Non
Rapport G/S	1,083	1,194
Eeff/C	0,633	0,529
Environnement	>0	>0
C + kA	300	295
Eeff / (C + kA)	0,633	0,529
Densité	2,276	2,324
Temps de stabilisation du wattmètre (s)	117	144
Seuil de cisaillement (Pa)	662	1236
Viscosité plastique (Pa.s)	153	340
Affaissement (cm)	22,2	15
Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)	0,87	0,18
fc1 (MPa)	7,7	13,7
fc2 (MPa)	12	19,9
fc3 (MPa)	14,7	23,5
fc7 (MPa)	19,9	29,4
fc28 (MPa)	24,8	34,3
fc90 (MPa)	28,8	38,3
fc360 (MPa)	33,4	43
Indice de ségrégation (confiné)	0,965	0,957
Indice de serrage du béton non confiné	6,627	7,674
Indice de serrage du béton confiné	7,094	8,157
Contribution des fines Kf	1,686	2,228
Contribution des gros gravillons K'gg	2,284	2,114
Compacité du squelette non confiné Ø*	0,8461	0,8986
Compacité des granulats g*	0,8059	0,8266

Figura 3.13 – Janela do programa *Bétonlab Pro 3* com as simulações de dosagens para concreto

Capítulo 4

Materiais e métodos de ensaios

4.1. Produção do agregado reciclado

O agregado reciclado foi produzido no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST), da COPPE/UFRJ. O resíduo foi proveniente da demolição de seis vigas de concreto desenvolvidas no mesmo laboratório, em estudo realizado por Vaz (2013).

O beneficiamento do resíduo foi composto por quatro etapas: britagem, secagem, peneiramento e homogeneização do material. As propriedades das vigas de concreto e as etapas de beneficiamento são apresentadas a seguir.

4.1.1. Propriedades do concreto de origem

O resíduo utilizado para a produção dos agregados reciclados foi proveniente da demolição de seis vigas de concreto armado reforçadas à flexão pela adição de concreto e barras de aço, confeccionadas no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LabEST), da COPPE/UFRJ. Essas vigas foram moldadas por Vaz (2013) para a avaliação do comportamento das mesmas, quando submetidas a carregamento cíclico.

Para a composição do concreto, Vaz (2013) utilizou areia natural (agregado miúdo) e gnaisse britado (agregado graúdo), com dimensão máxima de 19 mm (brita 1) para o concreto das vigas e 9,5 mm (brita 0) para o concreto do reforço.

O traço em massa do concreto de origem foi de 1: 2,71: 3,58, a relação água/cimento 0,60 e o abatimento do tronco de cone foi (50 ± 10) mm (VAZ, 2013). A composição do m³ de concreto da viga e do reforço é apresentada na Tabela 4.1. Esta composição visava obter resistência média à compressão de cerca de 30 MPa.

Tabela 4.1 - Composição por m³ do concreto de origem [VAZ, 2013]

Viga		Reforço	
Material	Consumo	Material	Consumo
Cimento CPV-ARI	300 kg	Cimento CPV-ARI	300 kg
Brita (d _{máx} = 19	1074 kg	Brita (d _{máx} = 9,5	1074 kg
Areia	814 kg	Areia	814 kg
Água	180 litros	Água	180 litros

As propriedades do concreto da viga e do reforço que, após os ensaios, levaram à ruptura da viga reforçada são apresentadas na Tabela 4.2 e na

Tabela 4.3, respectivamente.

Tabela 4.2 - Propriedades do concreto da viga [VAZ, 2013]

Concreto da viga						
Vigas	V1R	V2R	V3R	V4R	V5R	V6R
f_c (MPa)	33,9	34,1	33,5	33,4	36,1	36,2
$f_{ct,sp}$ (MPa)	3,61	3,49	3,56	3,68	3,64	3,65
E_c (GPa)	25,2	25,8	25,1	24,8	27,4	27,6
Idade (dias)	677	295	123	183	192	208

Tabela 4.3 - Propriedades do concreto do reforço [VAZ, 2013]

Concreto do reforço						
	V1R	V2R	V3R	V4R	V5R	V6R
f_c (MPa)	33,1	34,0	33,3	33,2	34,1	34,3
$f_{ct,sp}$	3,54	3,59	3,58	3,65	3,54	3,56
Idade	543	135	75	135	116	132

Para a produção do agregado reciclado, foram separadas todas as barras de aço presentes no concreto de origem.

4.1.2. Britagem, secagem e peneiramento do material

Inicialmente, as vigas de concreto foram fragmentadas por uma britadeira e armazenadas no próprio laboratório, em local apropriado. A Figura 4.1 ilustra o resíduo após a fragmentação e antes do beneficiamento.



Figura 4.1 – Detalhe do resíduo antes do beneficiamento

Para a britagem do resíduo, foi utilizado o britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200 (Figura 4.2-a), que fratura o material por compressão (esmagamento). Este britador possui três saídas: uma para a fração grossa e duas para os finos, sendo o primeiro produzido em maior quantidade. Por isso, foi realizada a britagem secundária de toda fração graúda que passava pelo britador. Após essa etapa, o material britado foi espalhado sobre uma lona em área aberta para a secagem ao ar (Figura 4.2-b).

Terminada a secagem, o material foi peneirado em peneirador mecânico. Posteriormente, o material retido na peneira 9,5 mm foi separado para uma nova britagem, o material passante na 9,5 mm e retido na peneira de 4,75 mm foi classificado como agregado graúdo, o material passante na 4,75 mm e retido na peneira 0,150 mm foi classificado como agregado miúdo e o material passante na peneira 0,150 mm foi classificado como filler. Neste estudo, foi utilizado somente o material classificado como agregado graúdo; o agregado miúdo e o filler foram armazenados em local apropriado para o desenvolvimento de trabalhos futuros.



(a)



(b)

Figura 4.2 - (a) Britador QUEIXADA 200; (b) Secagem do agregado reciclado antes do peneiramento

4.1.3. Homogeneização do agregado reciclado

Após a produção completa dos agregados reciclados, foi realizada a homogeneização do agregado graúdo reciclado através do método conhecido como pilha alongada. Para isso, o agregado foi espalhado ao longo da pilha, sempre na mesma quantidade, alternando os sentidos de lançamento (Figura 4.3-a e Figura 4.3-b). Após a distribuição de todo o material em diversas camadas, o material disposto nas pontas da pilha foi separado e distribuído novamente (Figura 4.3-c e Figura 4.3-d). O aspecto da pilha ao final da homogeneização pode ser visualizado na Figura 4.3-e.

Após a homogeneização, o material foi distribuído em bombonas de plástico para ficarem armazenadas ao longo da pesquisa.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3 – Etapas do processo de homogeneização: (a) e (b) distribuição das camadas de agregado reciclado ao longo da pilha; (c) e (d) retirada do material localizado nas pontas da pilha para ser redistribuído; (e) aspecto final da pilha alongada

4.2. Métodos de ensaios

4.2.1. Composição granulométrica

Duas técnicas foram utilizadas para obtenção da composição granulométrica dos materiais granulares usados no presente estudo: peneiramento mecânico a seco e análise a laser.

O peneiramento mecânico a seco foi utilizado para a determinação da granulometria dos agregados, baseado na norma NBR NM 248 (2003). As amostras previamente secas em estufa, à temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, foram colocadas em um conjunto de peneiras, com aberturas entre $150\ \mu\text{m}$ e $12,5\ \text{mm}$, acopladas a um agitador mecânico. Os peneiramentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ.

De acordo com procedimento adotado por Cordeiro (2006), o cimento foi caracterizado através de análise a laser no equipamento conhecido como Malvern Mastersizer, onde os ensaios foram realizados com lente 100 ($0,5 - 180\ \mu\text{m}$), álcool etílico absoluto P.A. e ultra-som, durante 60 segundos. A quantidade de material a ser utilizado foi determinada de forma que a obscuração medida pelo equipamento apresentasse valor entre 20% e 25% . As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ e o equipamento é ilustrado pela Figura 4.4.



Figura 4.4 - Equipamento de granulometria à laser: Malvern Mastersizer

A partir da curva de distribuição granulométrica dos agregados, foram determinados os parâmetros D_{10} , D_{50} , D_{80} e $D_{\text{máx}}$ que representam, respectivamente, o tamanho de partícula abaixo do qual se encontram 10% , 50% , 80% e 95% da massa total do

material. Outro parâmetro importante é o módulo de finura, que consiste da soma dos percentuais acumulados em todas as peneiras da série normal, dividida por 100. Quanto maior o módulo de finura, mais grosso será o material.

4.2.2. Massa específica e absorção de água

Para a determinação da massa específica do cimento Portland foi utilizado um picnômetro a gás (hélio), modelo Accupyc da Micromeritics. Este procedimento consiste na determinação do volume de uma massa conhecida de amostra através da variação de pressão do gás em um volume calibrado. Foram utilizadas duas amostras previamente secas em estufa à temperatura de $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 horas. As análises foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

Para os agregados graúdos, natural e reciclado, foram adotadas as especificações da NBR NM 53 (2009) para a determinação da massa específica e absorção total. As amostras foram previamente secas em estufa à temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 horas. A massa específica é dada pela Equação (4.1), enquanto a absorção total é obtida através da Equação (4.2).

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (4.1)$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

d é a massa específica do material seco, em gramas por centímetros cúbicos;

m é a massa ao ar do material seco em estufa, em gramas;

m_a é a massa do material imerso em água, através de leitura hidrostática, em gramas;

A é a absorção de água do material, em porcentagem;

m_s é a massa ao ar do material saturado com superfície seca, em gramas.

Para a determinação da massa específica e da absorção total do agregado miúdo, foram utilizadas as prescrições das NBR NM 52 (2009) e NBR NM 30 (2001), respectivamente, utilizando-se um frasco de vidro calibrado, com volume de 500 ± 5 cm^3 . Ao final do ensaio, as amostras foram secas em estufa à temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm$

5°C, até constância de massa. De acordo com a NBR NM 52 (2009), a massa específica do agregado miúdo pode ser determinada através da Equação (4.3). Já para a absorção total, a NBR NM 30 (2001) determina o cálculo através da Equação (4.4).

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (4.3)$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (4.4)$$

Onde:

d_1 é a massa específica do material seco, em gramas por centímetros cúbicos;

m é a massa ao ar do material seco em estufa, em gramas;

V é o volume do frasco de vidro, em centímetros cúbicos;

V_a é o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos;

A é a absorção de água do material, em porcentagem;

m_s é a massa ao ar do material saturado com superfície seca, em gramas.

Para o agregado reciclado, além da massa específica e da absorção total, foi determinada a capacidade de absorção do material ao longo do tempo. Para isso, foram utilizadas cinco amostras de material previamente seco em estufa à temperatura de $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, até constância de massa. O procedimento adotado consistia em submergir uma amostra de massa pré-determinada por um intervalo de tempo e, posteriormente, secá-lo superficialmente com um pano absorvente. O material era recolocado na água por mais um intervalo desejado e repetia-se o procedimento. Os intervalos adotados foram: a cada 2 minutos durante os 10 primeiros minutos, a cada 5 minutos até completar 30 minutos de ensaio. Após esse tempo, o processo de absorção apresentou grande estabilidade e as leituras foram mais espaçadas, sem interferir no resultado do ensaio.

4.2.3. Compacidade

Para a aplicação do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), cuja base teórica foi apresentada no Capítulo 2, é imprescindível a realização de dois procedimentos experimentais desenvolvidos por De Larrard (1999) para a determinação da

compacidade dos materiais utilizados. Esses procedimentos são descritos nos itens a seguir.

4.2.3.1. *Ensaio de compactação mecânica e vibração*

O ensaio de compactação mecânica e vibração é utilizado para determinar a compacidade experimental de partículas maiores que 100 μm . Neste ensaio, utiliza-se um volume padrão de material em um cilindro metálico, de dimensões iguais a 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, preso a uma mesa vibratória e aplica-se uma pressão de 10 kPa, através de um pistão maciço de peso equivalente a 200 N. Após a colocação do pistão, registra-se a altura deste, através de um equipamento conhecido como catetômetro. Em seguida, aciona-se a mesa vibratória com frequência igual a 68 Hz, por um período de 2 minutos. Após a vibração, a altura do material compactado é determinada, anotando-se a altura final do pistão. Para os agregados graúdos, foram utilizados 6,5 kg de material, enquanto que para os agregados miúdos, utilizou-se 3,0 kg de material. As etapas deste ensaio são ilustradas pelas Figura 4.5-a a Figura 4.5-d.

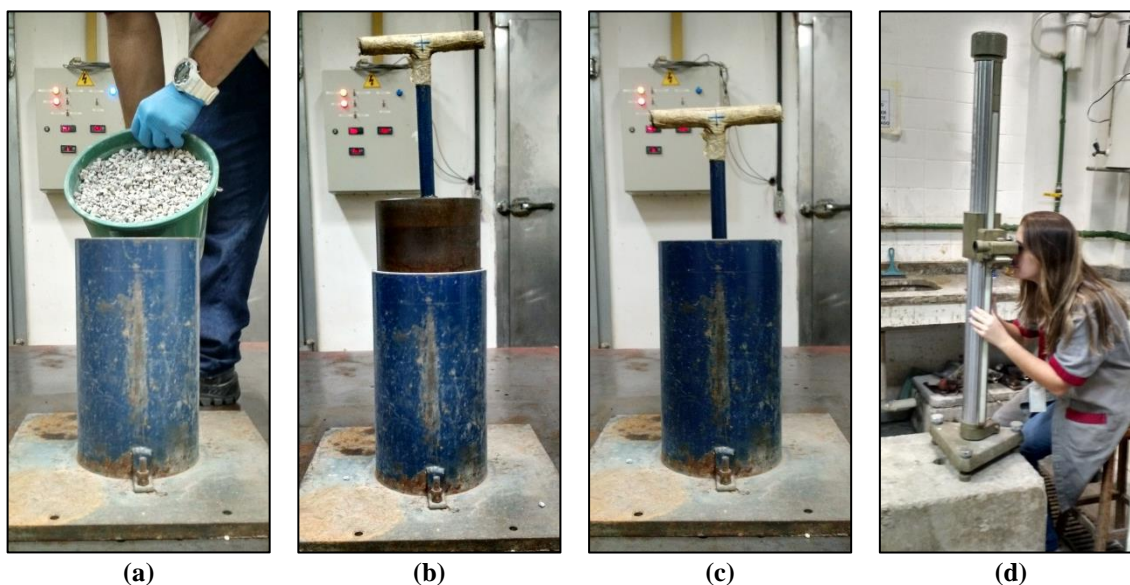


Figura 4.5 – Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração: (a) colocação do material no molde; (b) posição do pistão antes da vibração; (c) posição do pistão após a vibração; (d) leitura da posição do pistão, através do catetômetro.

Visando a obtenção de um resultado mais preciso, os agregados foram separados em 3 diferentes classes de tamanhos. Para os agregados graúdos, a classe 1 correspondia aos grãos maiores que 7,93 mm, a classe 2 correspondia aos grãos entre 6,30 e 7,93 mm, enquanto que a classe 3 correspondia as partículas menores que 6,30 mm. Para o agregado miúdo, a classe 1 representava os grãos maiores que 2,36 mm, a classe 2

representava os grãos de dimensões entre 1,18 e 2,36 mm e a classe 3, as partículas menores que 1,18 mm. Foram realizadas três determinações para cada classe de cada agregado.

Assim, a compacidade experimental pode ser calculada através da Equação (4.5).

$$C = \frac{4 M_s}{\pi \cdot D_c^2 \cdot h \cdot \delta} \quad (4.5)$$

Onde:

C é a compacidade experimental;

M_s é a massa de material seco;

D_c é o diâmetro interno do cilindro;

h é a altura da camada de material compactada ao final do ensaio;

δ é a massa específica do material.

4.2.3.2. *Ensaio de demanda d'água*

O ensaio de demanda d'água foi utilizado para determinar a compacidade experimental do cimento Portland. Este ensaio consiste em adicionar progressivamente uma quantidade de água ao material até que seja observada quatro diferentes fases: estado seco (Figura 4.6-a); estado pendular (Figura 4.6-b); estado funicular (Figura 4.6-c) e estado capilar (Figura 4.6-d). Esta última fase é onde a pasta de cimento apresenta o máximo empacotamento de partículas. A partir deste ponto, qualquer adição de água à mistura provocará o afastamento das partículas, reduzindo a compacidade e aumentando a fluidez.

Para a realização deste ensaio, é necessário um misturador planetário de 2 litros de capacidade. Inicialmente, adiciona-se uma pequena quantidade de água à 350 g de material, com o misturador na velocidade baixa por 1 minuto. Posteriormente, novas adições sucessivas de água são feitas e mantidas por 1 minuto em velocidade alta, até que se observe o estado capilar, caracterizado por uma pasta homogênea e sem umidade na parede do misturador. O tempo médio de ensaio foi de 10 minutos e foram realizadas quatro determinações para o cálculo da média de água necessária para o ponto de demanda d'água.

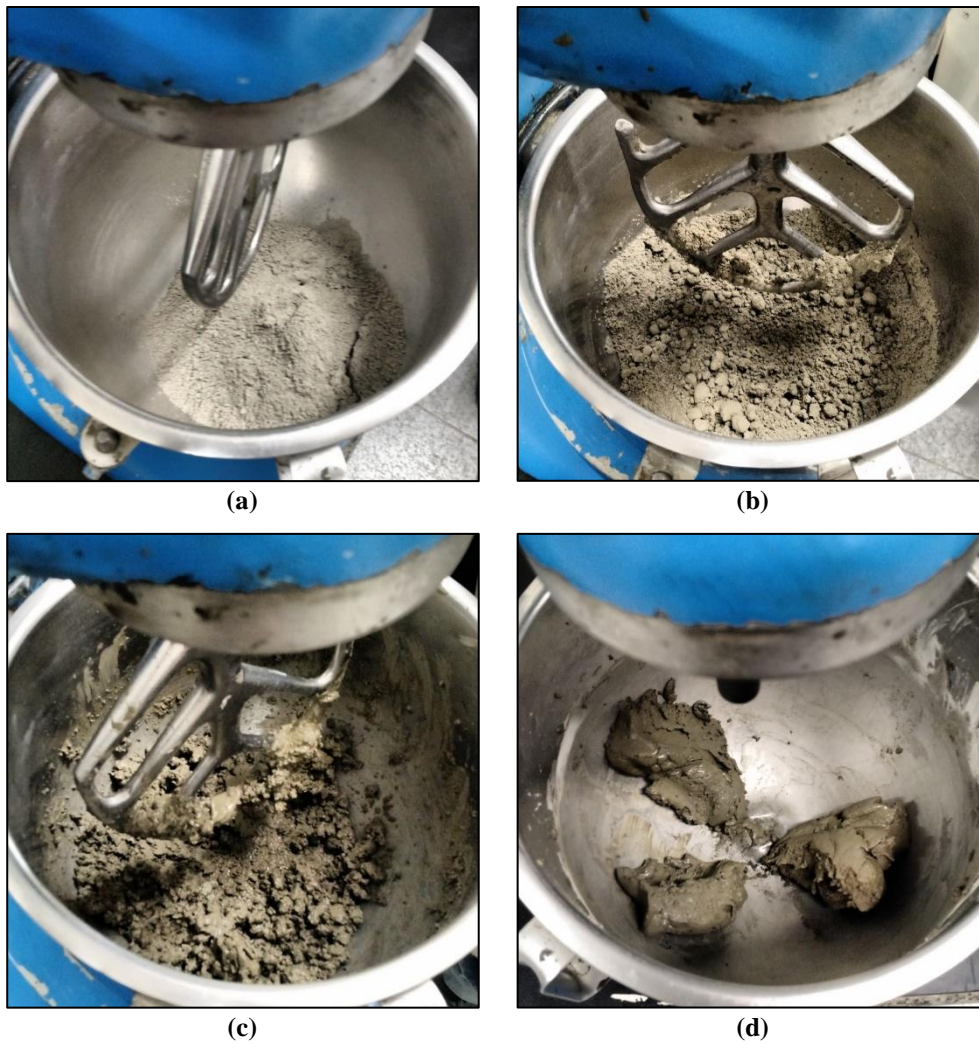


Figura 4.6 – Etapas do ensaio de demanda d’água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar

Conhecendo-se o ponto de demanda d’água, é possível calcular a compacidade experimental através da Equação (4.6).

$$C = \frac{1}{1 + \delta \cdot \frac{m_a}{m}} \quad (4.6)$$

Onde:

C é a compacidade experimental;

δ é a massa específica do material;

m_a é a massa de água;

m é a massa de material.

Este ensaio também foi realizado em pastas produzidas com aditivo superplastificante, onde a dosagem de superplastificante utilizada foi determinada através do ensaio de ponto de saturação.

4.2.4. Composição química

Para determinar a composição química do cimento Portland, foi utilizada a análise por espectrometria de fluorescência de raios X, em equipamento Shimadzu, modelo EDX-720. As amostras foram secas em estufa à temperatura de $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por um período de 24 horas, e prensadas com ácido bórico para a formação de um disco. Os resultados são apresentados na forma percentual dos seguintes óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , MgO , BaO e P_2O_5 . Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ e o equipamento utilizado é apresentado na Figura 4.7.

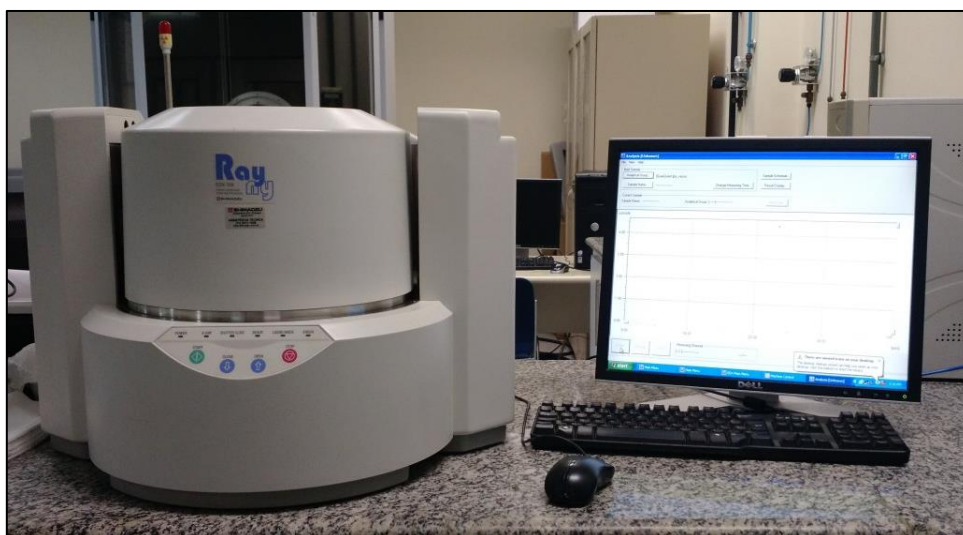


Figura 4.7 – Equipamento utilizado para determinação da composição química do cimento

Também foi realizado o ensaio de perda ao fogo para o cimento Portland, de acordo com os procedimentos prescritos na NBR NM 18 (2012). O ensaio consiste em queimar uma amostra em forno tipo mufla à temperatura de $950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, por 15 minutos, com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. O valor de perda ao fogo foi obtido através de média aritmética de três determinações.

4.2.5. Compatibilidade e ponto de saturação

Para avaliar a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento Portland e determinar a dosagem de saturação, foram realizados ensaios de escoamento de pastas em cone de Marsh. As pastas foram produzidas com relação água/cimento de 0,35 e teores de superplastificante variando entre 0% e 1% de sólidos em relação à massa de cimento. O ensaio consiste em medir, aos 5 minutos, 30 minutos e 60 minutos após a mistura, o tempo de escoamento de 1000 ml de pasta por um cone com abertura de 5 mm de diâmetro. As etapas deste ensaio são apresentadas nas Figura 4.8-a, Figura 4.8-b, Figura 4.8-c e Figura 4.8-d.



Figura 4.8 – Ensaio de ponto de saturação: (a) misturador utilizado; (b) colocação da pasta no funil de Marsh; (c) detalhe da estrutura do ensaio; (d) detalhe do momento em que 1000 ml de pasta passam pelo funil.

A dosagem de saturação corresponde ao máximo grau de dispersão das partículas de cimento, provocado pelo superplastificante. A partir deste ponto, qualquer aumento no teor de aditivo químico não influenciará significativamente sobre a dispersão das partículas. O valor da dosagem de saturação é expresso como o percentual da fração sólida do aditivo químico em relação à massa total de cimento.

4.2.6. Calibração dos parâmetros “p” e “q”

Conforme estudado no Capítulo 2, para a utilização da ferramenta computacional *Betonlab Pro 3*, é necessário calibrar dois parâmetros de resistência à compressão relacionados aos agregados. O parâmetro “p” trata da interface pasta-agregado, enquanto o parâmetro “q” está relacionado à resistência intrínseca do agregado.

Sabendo-se que a calibração leva em consideração os grãos de maior dimensão da mistura, foram produzidas argamassas para calibração dos parâmetros da areia natural e concretos para a calibração dos agregados graúdos.

Para a calibração dos agregados graúdos, foram definidos dois traços de concreto para cada uma das britas, sendo um de alta resistência (Traço Rico - TR) e outro de baixa resistência (Traço Pobre - TP). Para o agregado miúdo, foram escolhidas e produzidas duas argamassas, sendo também uma de alta e outra de baixa resistência. A composição de cada traço utilizado está apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Composição dos traços para calibração dos parâmetros "p" e "q"

Misturas		Materiais (kg/m ³)					
		Brita natural	Brita ARC	Areia Natural	Cimento	SP	Água
Argamassa Natural	TP	-	-	1558,00	342,00	3,42	248,41
	TR	-	-	1359,00	600,00	6,00	247,34
Concreto Natural	TP	1020,87	-	815,59	254,64	0,56	191,90
	TR	1021,21	-	596,70	503,74	3,21	201,95
Concreto Reciclado	TP	-	1012,75	809,27	252,69	2,64	198,49
	TR	-	1003,98	583,19	501,99	6,20	214,08

Para os concretos produzidos, foram moldados 4 corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e foram ensaiados à compressão em prensa servo-controlada aos 7, 14 e 28 dias de idade. Já para as argamassas, foram moldados 4 corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, que também foram ensaiados à compressão na mesma prensa utilizada para os concretos. As argamassas foram ensaiadas para as idades de 1, 7 e 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão para cada mistura são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resistência à compressão das misturas utilizadas para a calibração dos parâmetros "p" e "q"

Misturas		Resistência à compressão (MPa) – CV (%)			
		1 dia	7 dias	14 dias	28 dias
Argamassa Natural	TP	5,4 (± 4,6%)	19,4 (± 6,9%)	-	22,2 (± 0,9%)
	TR	23,0 (± 4,8%)	53,7 (± 3,1%)	-	55,5 (± 6,3%)
Concreto Natural	TP	-	18,1 (± 2,9%)	21,3 (± 4,2%)	23,2 (± 3,0%)
	TR	-	48,8 (± 2,5%)	52,9 (± 4,1%)	54,8 (± 2,8%)
Concreto Reciclado	TP	-	22,3 (± 5,6%)	26,4 (± 1,4%)	27,9 (± 1,6%)
	TR	-	52,5 (± 1,6%)	52,8 (± 6,5%)	54,9 (± 6,3%)

Com esses resultados foi possível calibrar os parâmetros “p” e “q” para os três tipos de agregados utilizados nesse estudo, através do programa *Betonlab Pro 3*. Os valores obtidos para esses parâmetros são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores obtidos para os parâmetros "p" e "q" fornecidos pelo programa Betonlab Pro 3

Materiais	Parâmetros de resistência	
	p (adimensional)	q (MPa ⁻¹)
Areia Natural	0,8092	0,00000
Brita Natural	0,9885	0,00466
Brita ARC	0,9665	0,00666

Nota-se que o maior valor de "p" obtido foi o da Brita natural. Isso significa que a interface pasta-agregado é melhor para este agregado e proporciona uma resistência maior para este tipo de agregado. Apesar disto, o valor de "p" encontrado para a Brita ARC foi próximo ao valor da Brita natural, sendo assim, é possível esperar um comportamento semelhante entre esses dois agregados. Já para o valor de "q", observa-se que o valor obtido para a Areia Natural é igual a zero. Isto significa que este agregado apresenta a maior resistência intrínseca dentre os agregados estudados, pois este parâmetro é inversamente proporcional à resistência.

4.2.7. Elevação adiabática de temperatura

O ensaio de elevação adiabática de temperatura foi realizado no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, utilizando os calorímetros adiabáticos apresentados na Figura 4.9.

Na medida em que o corpo-de-prova aumenta de temperatura devido às reações de hidratação, o sistema eletrônico de controle de temperatura do calorímetro ativa a resistência elétrica de forma que a temperatura do banho sempre acompanhe a temperatura do corpo-de-prova, de maneira que ambas sejam mantidas iguais durante todo o ensaio. Os calorímetros possuem agitadores que garantem a homogeneidade da temperatura do banho. O volume do corpo-de-prova utilizado foi de, aproximadamente, 1,6 litros e o ensaio foi realizado até que a temperatura do corpo-de-prova se mantivesse constante.



Figura 4.9 – Calorímetros adiabáticos de temperatura

A temperatura inicial de todos os ensaios foi de $23,0 \pm 1,0$ °C, que era a temperatura da sala onde eram moldados os corpos-de-prova.

4.2.8. Abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams foi realizado de acordo com as prescrições da NBR NM 67 (1998) e consiste em compactar três camadas, com 25 golpes distribuídos uniformemente em cada um, utilizando uma haste de socamento. O molde é retirado cuidadosamente na direção vertical e é medido o abatimento do concreto (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Ensaio de abatimento do tronco de cone

4.2.9. Resistência à compressão

4.2.9.1. Resistência à compressão do cimento Portland

O ensaio de resistência à compressão do cimento Portland foi realizado em prensa servo-controlada *Shimadzu, modelo UH-F1000kN*, com base nas prescrições da NBR 7215 (1997). Os corpos-de-prova são produzidos com argamassa composta, em massa, por uma parte de cimento, três de areia normalizada e fator água/cimento de 0,48. Para o ensaio de resistência à compressão, são moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para cada idade em estudo. Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e mantidos imersos em solução saturada de cal até a realização do ensaio. No dia do ensaio, as extremidades dos corpos-de-prova foram regularizadas e paralelizadas com o auxílio de um torno mecânico, com objetivo de evitar a concentração de tensões nas faces do corpo-de-prova. Foram avaliadas as resistências à compressão para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ (Figura 4.11).

4.2.9.2. Resistência à compressão dos concretos

A resistência à compressão dos concretos foi avaliada através da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) em prensa servo-controlada *Shimadzu, modelo UH-F1000kN*, de acordo com as determinações da NBR 5739 (2007). Os corpos-de-prova tiveram suas extremidades regularizadas através de capeamento com uma mistura de enxofre e escória, com proporção de 2 porções de enxofre para cada porção de escória. A regularização era feita 24 horas antes da realização do ensaio e os corpos-de-prova eram mantidos em cura úmida até o ensaio.

Para os concretos e argamassas produzidos para a calibração dos parâmetros “p” e “q”, do programa *Betonlab*, os ensaios foram realizados após 3, 7 e 28 dias de cura, com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min.

Para os concretos produzidos durante o estudo de compensação de água de absorção dos agregados reciclados, os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7 dias, com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min.

Para os concretos produzidos para a validação dos traços obtidos através do programa *Betonlab Pro 3*, além da carga de ruptura, o comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com o emprego de transdutores elétricos (LVDT) para a medição dos deslocamentos longitudinais, conectados à região central dos corpos-de-prova (Figura 4.11). Os ensaios foram realizados aos 28 dias, com velocidade de carregamento de 0,025 mm/min. Os sinais de força e deslocamento foram registrados pelo sistema de aquisição de dados “ADS 2000”, de 16 bits, da marca Lynx, com o auxílio do software AQdados. Através da curva tensão *versus* deformação é possível calcular o módulo de elasticidade (Equação (4.7)), de acordo com a NBR 8522 (2003).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.7)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade;

σ_2 é a tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

σ_1 é a tensão de compressão correspondente à deformação axial, ε_1 , de 5.10^{-5} ;

ε_2 é a deformação axial produzida pela σ_2 ;

ε_1 é a deformação axial igual a 5.10^{-5} .



(a)



(b)

Figura 4.11 - Ensaio de resistência à compressão em corpo-de-prova cilíndrico: (a) 5x10 cm; (b) 10x20 cm

4.2.10. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral, proposto pelo pesquisador brasileiro Lobo Carneiro, é uma alternativa ao ensaio de tração direta pela sua facilidade de execução. O ensaio consiste na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico (estado plano de deformação). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o ensaio de compressão diametral, quando comparado com o ensaio de tração direta, superestima a resistência à tração do concreto de 10% a 15%.

Este ensaio foi realizado em prensa servo-controlada *Shimadzu, modelo UH-F1000kN*, de acordo com as prescrições da NBR 7222 (2010). A resistência à tração aos 28 dias dos concretos foi determinada em quatro corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura, cortados de cilindros com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A velocidade de carregamento adotada foi de 0,3 mm/min.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação (4.8).

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F_r}{D \cdot L \cdot \pi} \quad (4.8)$$

Onde,

σ_t é a resistência à tração por compressão diametral;

F_r é a carga de ruptura;

D é o diâmetro do corpo-de-prova;

L é a espessura do corpo-de-prova.

4.2.11. Absorção total, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 9778 (2005). Foram ensaiados três corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) para cada mistura, com idade de 28 dias. A Figura 4.12 ilustra duas etapas desse ensaio.

Os corpos-de-prova foram secos em estufa mantida em temperatura constante e igual a $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ até atingirem constância de massa.

A absorção total, o índice de vazios e a massa específica podem ser calculados pelas Equações (4.9), (4.10) e (4.11).

Vale ressaltar que o índice de vazios está associado ao volume total de poros acessíveis à água e não demonstra a facilidade com a qual a água pode penetrar no concreto (permeabilidade).

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.9)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (4.10)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (4.11)$$

Onde,

A é a absorção total de água, em porcentagem;

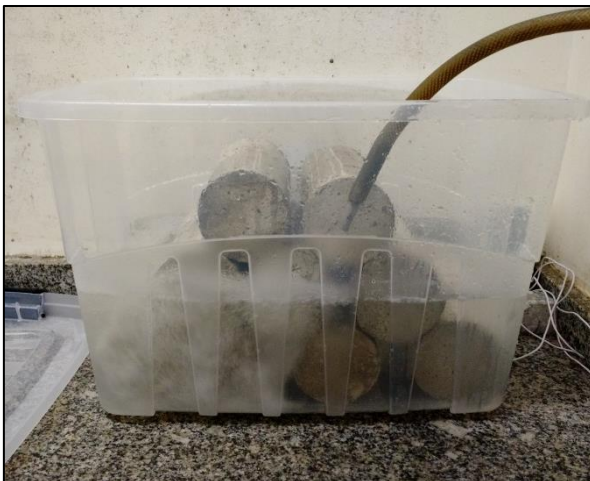
m_{sat} é a massa, em gramas, do corpo-de-prova saturado em água com superfície seca;

m_s é a massa, em gramas, do corpo-de-prova seco em estufa;

I_v é o índice de vazios, em porcentagem;

m_i é a massa, em gramas, do corpo-de-prova, saturado e imerso em água

ρ_s é a massa específica seca, em g/cm³.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Ensaio de absorção total: (a) etapa de imersão dos corpos-de-prova; (b) etapa de fervura

4.2.12. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado seguindo as prescrições da NBR 9779 (2012). Foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada mistura, com idade de 28 dias e foram secos em estufa à temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até constância de massa.

Em seguida, os corpos-de-prova tiveram a face lateral selada com filme plástico e fita impermeável de alumínio, a fim de evitar a evaporação de água por esta face. Os corpos-de-prova foram posicionados sobre suportes em um recipiente onde o nível de água era mantido constante e igual a 5 mm acima da base da amostra (Figura 4.13). A absorção de água foi monitorada pelo ganho de massa no tempo. Assim, foram realizadas leituras até 28 dias após o início do ensaio.



Figura 4.13 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade pode ser calculada através da Equação

$$A_c = \frac{M - M_s}{S} \quad (4.12)$$

Onde:

A_c é a absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

M é a massa do corpo-de-prova quando mantido em contato com a água (g);

M_s é a massa do corpo-de-prova seco em estufa (g).

As absorptividades dos concretos foram calculadas em dois estágios, representados pelas inclinações das duas retas apresentadas na Figura 4.14. No primeiro estágio, chamado de S1, o ganho de massa no tempo ocorre de forma linear, nos poros capilares maiores. Já no segundo estágio, chamado de S2 ou período de saturação, o fluxo de água ocorre nos poros capilares menores. O ponto de mudança dos dois estágios é denominado como ponto de transição (P_T).

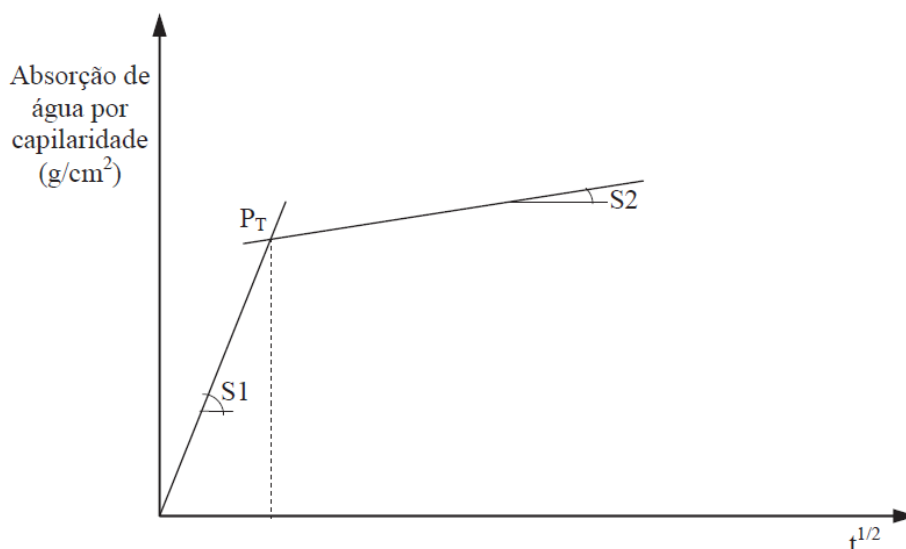


Figura 4.14 – Curva típica de absorção de água por capilaridade x raiz quadrada do tempo (BALTHAR, 2010)

4.2.13. Permeabilidade a gás nitrogênio

Para a medição da permeabilidade dos concretos reciclados, foi utilizado um método simples baseado na aplicação de um diferencial de pressão usando um fluido, a partir do modelo da Lei de Darcy. O fluido utilizado foi o gás nitrogênio.

Este ensaio foi realizado em um permeâmetro a gás do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Como este ensaio não apresenta norma específica, foram adotados os procedimentos estabelecidos por Grube e Lawrence (1988), utilizando-se corpos-de-prova com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Estes corpos-de-prova foram obtidos através do corte de corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com idade de 28 dias.

A expressão utilizada para calcular a permeabilidade a gás é dada pela Equação (4.13) e o coeficiente de permeabilidade é calculado pela Equação (4.14).

$$K = \frac{2P_2QL\eta}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (4.13)$$

$$k = \frac{K\rho g}{\eta} \quad (4.14)$$

Onde,

K é a permeabilidade intrínseca (m²);

P_1 é a pressão superior (MPa);

P_2 é a pressão inferior (MPa);

Q é o fluxo de gás (m³/s);

L é a espessura do corpo-de-prova (cm);

η é a viscosidade do gás (Ns/m²);

A é a área da seção transversal (m²);

k é o coeficiente de permeabilidade (m/s);

ρ é a densidade do nitrogênio;

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Para garantir a estanqueidade na lateral dos corpos-de-prova, de forma a permitir que o fluxo vertical fosse unidirecional e passasse apenas pela amostra, o corpo-de-prova era posicionado em um anel de borracha de silicone (Figura 4.15-a), moldado especialmente para este ensaio. Depois disso, a borracha, junto com o corpo-de-prova, era posicionada no compartimento de ensaio (Figura 4.15-b) e o sistema vedado com uma tampa de aço, presa por alguns parafusos. Em seguida, o fluxo de gás nitrogênio foi empregado com o auxílio de manômetros, onde a pressão foi controlada até atingir 2 Bar, a qual foi mantida por 15 minutos para estabilização do fluxo (Figura 4.15-c). Após esse período, verificou-se a vazão do gás através do tempo que uma bolha de ar levava para percorrer 3 ml da pipeta graduada (Figura 4.15-d). Foram realizadas 10 leituras de vazão em cada amostra, para cálculo de média aritmética.

Antes de cada ensaio, os corpos-de-prova foram secos em estufa à temperatura de 60°C ± 5°C até constância de massa.

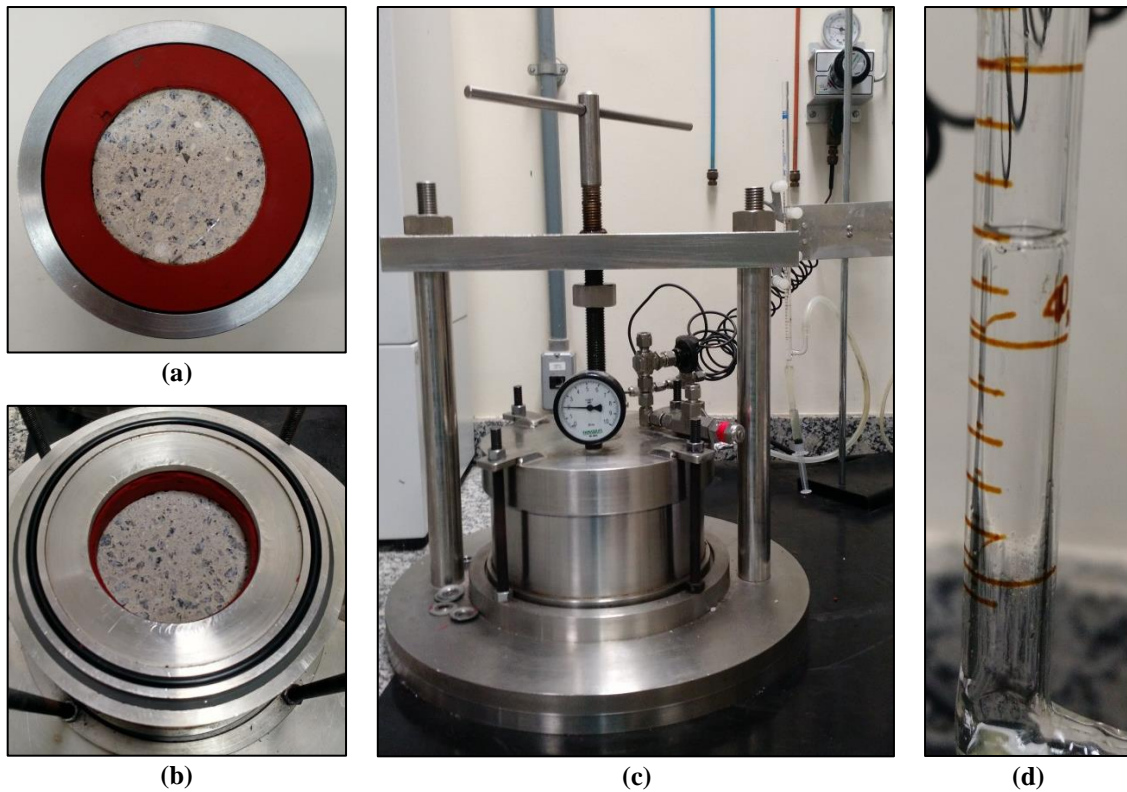


Figura 4.15 – Permeabilidade a gás: (a) Detalhe do corpo-de-prova posicionado dentro do anel de borracha; (b) posicionamento do conjunto dentro do permeâmetro; (c) permeâmetro em funcionamento; (d) bolha de ar dentro da pipeta

4.3. Caracterização dos materiais

4.3.1. Agregados

Neste estudo foi utilizado como agregado miúdo, uma areia natural quartzosa proveniente do Rio Guandu, no Rio de Janeiro (Figura 4.16-a). Como agregado graúdo foram utilizados dois tipos de brita 0, sendo uma natural de origem granítica e a outra produzida em laboratório através processos de beneficiamento de resíduos de construção e demolição (apresentado no item 4.1). A primeira é denominada ao longo do trabalho como “Brita natural” (Figura 4.16-b), enquanto a segunda é chamada de “Brita ARC” (Figura 4.16-c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16 – Agregados naturais e reciclado: (a) Areia Natural; (b) Brita Natural; (c) Brita ARC

As propriedades físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 4.7. Vale lembrar que, para o ensaio de compacidade experimental, a areia natural foi dividida em 3 classes. São elas: Classe 1, que representa os grãos maiores que 2,36 mm, Classe 2 representando os grãos de dimensões entre 1,18 e 2,36 mm e Classe 3, com partículas menores que 1,18 mm. Para os agregados graúdos, essas classes correspondiam da seguinte forma: Classe 1, grãos maiores que 7,93 mm, Classe 2, grãos com dimensões entre 6,30 e 7,93 mm, enquanto que a Classe 3, correspondia as partículas menores que 6,30 mm.

Tabela 4.7 – Propriedades físicas dos agregados

Propriedades físicas	Areia Natural	Brita Natural	Brita ARC
Massa específica (kg/m ³)	2405,0	2639,5	2571,2
Absorção total (%)	0,45	1,20	7,31
Classe 1	0,671	0,570	0,501
Compacidade Classe 2	0,753	0,558	0,488
Classe 3	0,741	0,679	0,506

É possível notar que a absorção total do agregado reciclado é consideravelmente maior que a absorção apresentada pela Brita Natural. A curva de absorção de água ao longo do tempo é apresentada na Figura 4.17. Observa-se que a absorção de água pelo agregado reciclado ocorre intensamente durante os primeiros 5 minutos de ensaio (6,6%, equivalente a 90% da absorção total), estabilizando-se logo em seguida. A absorção de água para os 10 primeiros minutos foi de 6,8% (93% da absorção máxima medida após 30 min de ensaio).

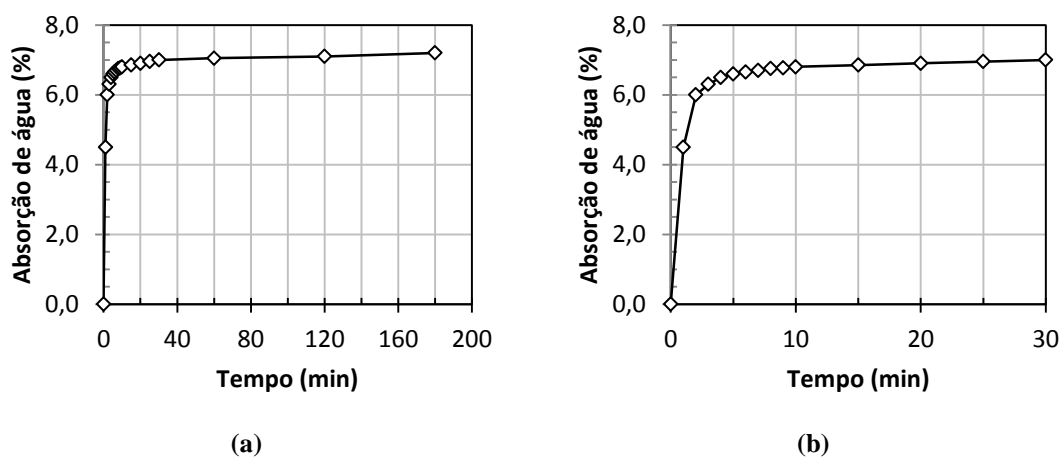


Figura 4.17 – Curva de absorção ao longo do tempo para a Brita ARC: (a) curva completa durante os 180 minutos de ensaio; (b) ampliação dos 30 minutos iniciais

A granulometria dos agregados e suas propriedades granulométricas são apresentadas nas Figura 4.18 e Tabela 4.8, respectivamente.

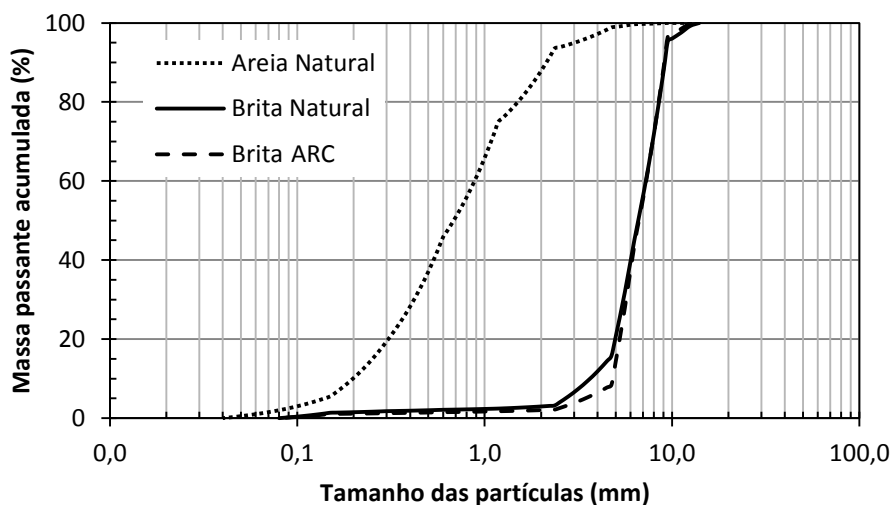


Figura 4.18 – Curvas granulométricas dos agregados

Tabela 4.8 – Propriedades granulométricas dos agregados

Propriedades granulométricas	Areia Natural	Brita Natural	Brita ARC
Dimensão máxima (mm)	4,75	9,5	9,5
Módulo de finura	2,62	-	-
Classificação	média	-	-

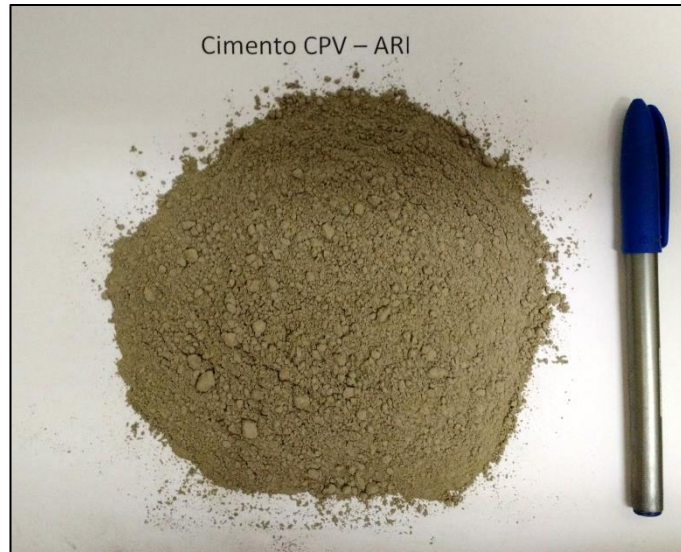
4.3.2. Cimento

Neste trabalho foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI (Figura 4.19), da Maxx Concreto, produzido pela empresa Lafarge, em conformidade com a NBR 5733 (1991). Este tipo de cimento apresenta alta resistência inicial e pertencimento a um mesmo lote de produção.

A composição química, bem como as propriedades físicas, mecânicas e granulométricas do cimento CPV – ARI utilizado são mostrados na Tabela 4.9. O cimento apresenta compactidade igual a 0,53, massa específica de 3170,0 kg/m³ e resistência à compressão aos 28 dias de 49,9 MPa. A Figura 4.20 apresenta a curva granulométrica do cimento, que apresenta D₈₀ igual a 31,5 µm e D₅₀ igual a 15,1 µm.



(a)



(b)

Figura 4.19 – Cimento CPV-ARI: (a) na embalagem; (b) amostra do cimento

Tabela 4.9 – Composição química e propriedades físicas, mecânicas e granulométricas do cimento CPV - ARI

Composto	Composição (%)	Propriedades físicas e mecânicas	
CaO	70,404		
SiO ₂	14,307		
SO ₃	5,187		
Al ₂ O ₃	4,857		
Fe ₂ O ₃	3,515		
K ₂ O	0,847		
SrO	0,415		
TiO ₂	0,259		
MnO	0,107		
Tm ₂ O ₃	0,075		
ZnO	0,028		
Perda ao fogo	3,360		
		Propriedades físicas e mecânicas	
			CPV-ARI
		Massa específica (kg/m ³)	3170,0
		Compacidade	0,53
		Resistência à compressão (MPa)	
		3 dias	32,7 (± 5,9)
		7 dias	42,6 (± 3,4)
		14 dias	46,5 (± 2,5)
		28 dias	49,9 (± 2,3)
		Propriedades granulométricas	
			CPV - ARI
		D ₈₀ (µm)	31,5
		D ₅₀ (µm)	15,1
		D ₁₀ (µm)	3,15

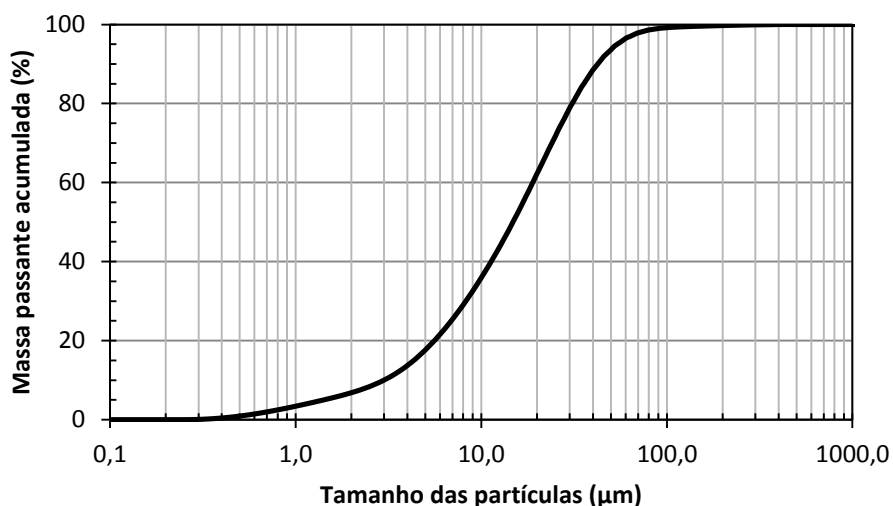


Figura 4.20 - Curva granulométrica do cimento CPV – ARI

4.3.3. Aditivo químico - Superplastificante

Neste estudo foi utilizado o aditivo superplastificante Glenium 51, produzido pela empresa BASF, que tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando alta redução de água, melhorando a trabalhabilidade, sem alterar o tempo de pega.

A Tabela 4.10 apresenta as principais propriedades do aditivo superplastificante, fornecidas pelo fabricante.



Figura 4.21 – Superplastificante Glenium 51

Tabela 4.10 – Propriedades do aditivo superplastificante (www.basf.com.br)

Descrição	Características
Tipo	Éter policarboxílico
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 – 7
Densidade (g/cm³)	1,067 – 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 – 31,5

Foram utilizados os valores médios de densidade e teor de sólidos do superplastificante para os cálculos de dosagem.

A Figura 4.22 apresenta a compatibilidade e o ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI. É possível notar que os dois materiais são compatíveis entre si, pois as curvas dos tempos de leitura estão próximas umas das outras e que o ponto de saturação corresponde a dosagem de 0,3% de sólidos do dispersante em relação à massa de cimento.

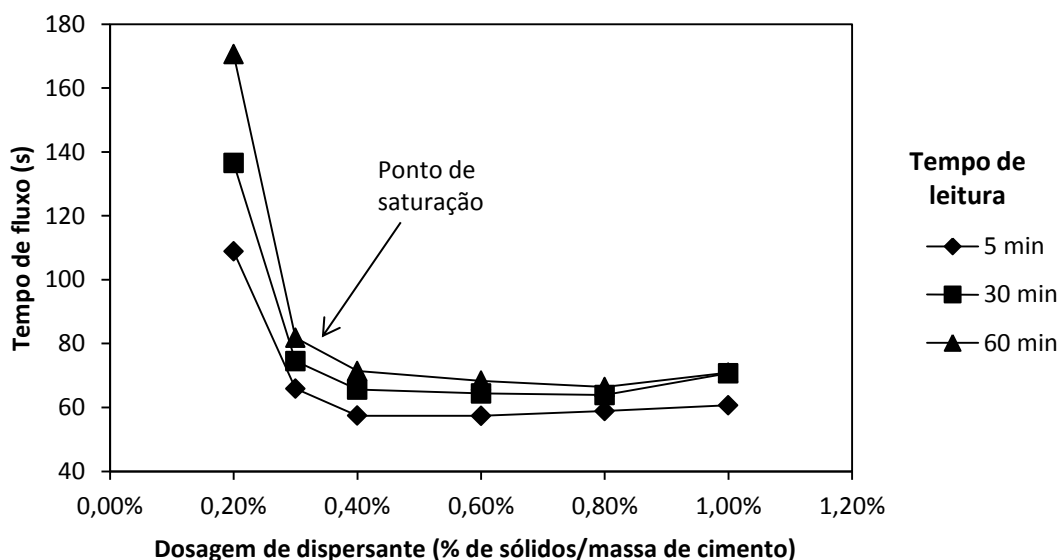


Figura 4.22 – Ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI

4.3.4. Água

A água utilizada na produção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

Capítulo 5

Dosagem, produção, moldagem e cura dos concretos

5.1. Dosagem dos concretos

Antes de iniciar as dosagens dos concretos utilizando o MEC, foi realizado um estudo preliminar para definir a compensação de água de absorção que seria adotada no trabalho. Este estudo foi realizado através de ensaios de elevação adiabática de temperatura, resistência à compressão e abatimento de tronco de cone. Após a escolha da quantidade de água a ser compensada, foram realizadas as dosagens dos concretos com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*.

5.1.1. Estudo de compensação de água de absorção dos agregados reciclados

5.1.1.1. *Dosagem dos concretos*

Antes de iniciar o estudo de dosagem, é importante definir alguns termos utilizados neste trabalho. O termo água livre diz respeito a água disponível durante a mistura para garantir as reações de hidratação e a trabalhabilidade do concreto. Já a água de absorção é definida como a água que será absorvida durante o processo de mistura dos componentes do concreto. Esta água não é levada em consideração para o cálculo do volume de concreto, pois, ao final da mistura, estará no interior dos agregados. A água total adicionada à mistura, como o próprio nome indica, corresponde a água incluída no misturador durante o processo de mistura e corresponde a soma da água livre com a água de absorção dos agregados.

Assim, foram produzidos seis concretos diferentes apenas na quantidade de água total adicionada a mistura durante a moldagem. Partiu-se de um traço de referência, onde se utilizou apenas agregados naturais e água livre de 190 litros/m³. Os outros traços surgiram a partir da substituição integral em volume da Brita Natural pela Brita ARC e

da variação da quantidade de água de absorção dos agregados. A composição granular dos seis traços é apresentada na Tabela 5.1. O teor de superplastificante utilizado em todas as misturas foi de 3,1 kg/m³.

Tabela 5.1 – Composição granular dos traços de concreto para estudo da compensação de água

Misturas	Materiais (kg/m ³)			
	Brita Natural	Brita ARC	Areia Natural	Cimento
Ref	933,0	-	860,0	305,0
SSS	-	909,0	860,0	305,0
Abs10m	-	909,0	860,0	305,0
Abs24h	-	909,0	860,0	305,0
50%abs	-	909,0	860,0	305,0
70%abs	-	909,0	860,0	305,0

A mistura denominada “Ref” é o traço inicial do estudo.

Na mistura “SSS”, o agregado reciclado (Brita ARC) foi imerso em água 24 horas antes da moldagem. No momento da moldagem, o agregado foi seco superficialmente com um pano limpo e úmido, e colocado diretamente no misturador. Neste caso, foi considerado que o agregado reciclado estava totalmente saturado e não absorveria mais água durante a mistura. Assim, a sua água de absorção é igual a zero. Esta situação é a de pré-saturação do agregado reciclado.

No caso da mistura “Abs10m”, o agregado reciclado foi colocado seco no misturador, onde o procedimento de mistura se manteve o mesmo, apenas adicionou-se a água que seria absorvida nos 10 minutos de mistura à água livre, alterando-se a água total da mistura. Esta água absorvida foi calculada a partir da curva de capacidade de absorção do agregado reciclado, apresentada no item 4.3.1, e corresponde a 93% da absorção total do agregado.

Para a mistura “Abs24h”, o procedimento foi o mesmo adotado para a mistura anterior, alterando apenas a água que seria absorvida pelo agregado reciclado, que neste caso foi considerada a absorção de 24 horas, ou seja, 100% da absorção total.

Já para as misturas “50%abs” e “70%abs”, foram consideradas 50% e 70% da absorção total dos agregados reciclados, respectivamente.

A Tabela 5.2 apresenta detalhadamente a composição da água total adicionada em cada uma das misturas. Vale lembrar que a água de absorção não faz parte do volume de concreto produzido, sendo adicionada apenas para ser absorvida pelos agregados. Apenas a água livre é considerada como água da mistura. Além disso, a mistura SSS é a que apresenta a menor quantidade de água total, pois ela entra na condição saturada na mistura e não absorve mais água durante a mistura (absorção igual a zero).

Durante a realização das moldagens para o ensaio de elevação adiabática de temperatura de cada mistura, foram moldados também quatros corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias. Além disso, também foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone para avaliar a reologia de cada concreto no estado fresco.

Tabela 5.2 – Resumo detalhado da composição da água total das seis misturas

	Quantidade de água (l/m ³)					
	Ref	SSS	Abs10m	Abs24h	50%abs	70%abs
Água livre	190,0	190,0	190,0	190,0	190,0	190,0
Água de absorção (Brita)	11,2	0,0	61,8	66,3	33,1	46,4
Água de absorção (Areia)	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Água total adicionada	205,1	193,9	255,7	260,2	227,0	240,3

5.1.1.2. Resultados obtidos

A Figura 5.1 apresenta as curvas típicas de evolução da temperatura das seis misturas em estudo, sob condições adiabáticas. Os resultados de abatimento do tronco de cone e resistência à compressão aos 7 dias de idade são apresentados na Tabela 5.3.

A temperatura inicial do ensaio de elevação adiabática de temperatura das misturas foi de $23,0 \pm 1,0$ °C e o ensaio foi realizado até que a temperatura se tornasse constante.

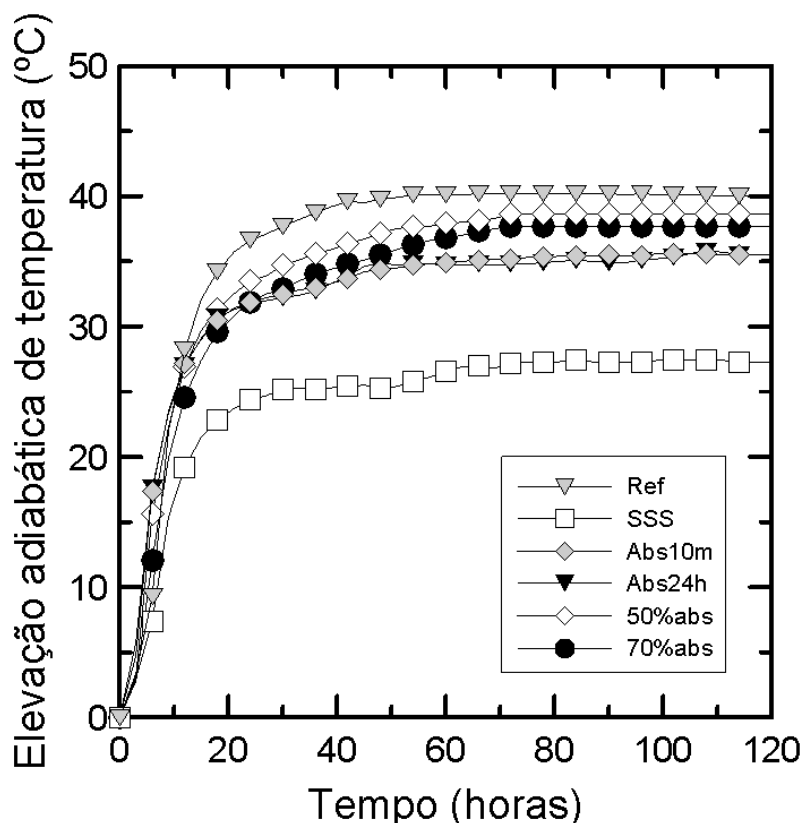


Figura 5.1 - Elevação adiabática de temperatura na escala normal para as seis misturas

Conforme visto anteriormente, a hidratação é influenciada basicamente pela composição e consumo de cimento, relação água/cimento e a temperatura inicial de ensaio. Nesse estudo, todas as misturas apresentaram o mesmo consumo de cimento de alta resistência inicial ($305,0$ kg/m³ de concreto) e iniciaram o ensaio com a mesma temperatura. Assim, é possível considerar que o principal fator que irá influenciar na diferença de comportamento das curvas de elevação adiabática de temperatura é a quantidade de água total que cada mistura apresenta.

Observando-se as curvas experimentais, nota-se que, para as seis misturas, o aumento de temperatura ocorreu de forma mais intensa nas primeiras 20 horas de ensaio e que após quatro dias de idade, a temperatura encontrava-se quase estável. Este comportamento pode ser explicado pela utilização de um tipo de cimento que apresenta alta resistência inicial, ocasionando uma grande intensidade de liberação de calor nos primeiros dias de idade.

É possível perceber que o aumento da quantidade de água total presente em cada mistura afeta diretamente no comportamento das curvas de elevação adiabática. Em todas as misturas produzidas com agregado reciclado, a elevação adiabática foi menor que a apresentada pela mistura de referência, levando a crer que em todos os casos, a quantidade de água livre na mistura era maior que a calculada. Isso significa que o agregado reciclado na presença dos demais materiais granulares da mistura, absorve uma quantidade de água menor do que a absorvida no ensaio de absorção. Assim, parte da água denominada “água de absorção” é, na verdade, a “água livre” e as misturas com esses agregados passam a ter uma relação água/cimento maior do que a calculada inicialmente, afetando diretamente as demais propriedades avaliadas dos concretos.

Tabela 5.3 – Resultados de abatimento e resistência à compressão aos 7 dias para cada mistura

Misturas	Abatimento (mm)	Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)
Ref	80	25,2 (± 0,9)
SSS	220	14,6 (± 3,9)
Abs10m	185	17,6 (± 1,9)
Abs24h	225	16,1 (± 3,3)
50%abs	85	24,6 (± 2,9)
70%abs	150	22,8 (± 1,8)

Os resultados obtidos para resistência à compressão aos 7 dias e abatimento do tronco de cone confirmam esta hipótese, pois quanto maior a “água de absorção” utilizada, maior foi o abatimento e menor foi a resistência à compressão das misturas (ver Tabela 5.3).

A mistura “SSS”, com agregados pré-saturados, apresenta resultados de resistência à compressão e abatimento inferiores aos da mistura que também compensa a absorção de água de 24 horas só que adicionada no momento da mistura (Abs24h). As curvas de elevação adiabática de temperatura dessas misturas são, no entanto, bastante diferentes entre si com a mistura “SSS”, apresentando uma cinética de hidratação mais lenta. Acredita-se que a secagem dos agregados saturados no momento da produção dos concretos adicionou mais água à mistura, provocando um excesso de água no concreto fresco, contribuindo negativamente para a resistência e elevação adiabática de temperatura. Este fato já havia sido observado por Casuccio *et al.* (2008), que preferiu secar os agregados ao ar por uma hora, antes de iniciar o processo de mistura.

As misturas “Abs10m” e “Abs24h” apresentaram propriedades semelhantes já que ambas apresentam quantidades de água total bem próximas entre si. As misturas 50%abs e 70%abs apresentaram curvas de elevação adiabática de temperatura e valores de resistência à compressão mais próximos aos da mistura de referência, porém a mistura 70%abs apresentou um valor de espalhamento significativamente maior. Como a mistura “50%abs” apresentou curva de elevação adiabática, resistência à compressão aos 7 dias e abatimento do tronco de cone mais próximos da mistura “Ref”, decidiu-se por esse valor de compensação de água e que ele seria adicionado no momento da mistura.

5.1.2. Critérios adotados para a dosagem dos concretos reciclados através do *Betonlab Pro 3*

Simulações de dosagens foram realizadas visando a implementação dos procedimentos do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) para a dosagem de concretos de três classes de resistência.

Para a utilização da ferramenta computacional *Betonlab Pro 3* foi necessária a especificação de algumas propriedades para otimização dos traços dos concretos. Os parâmetros para a dosagem das três classes de resistência são apresentados na Tabela 5.4. Posteriormente, foram escolhidos alguns traços para avaliação experimental das propriedades.

Tabela 5.4 – Parâmetros adotados para a dosagem dos concretos reciclados

Parâmetros	Valores estabelecidos
Resistência à compressão (MPa)	25, 45 e 65
Abatimento (mm)	$100 \leq \text{Abat.} \leq 150$
Água livre (l/m³ de concreto)	$165 \leq \text{AL} \leq 190$
Teor de superplastificante (%)	0,3
Propriedade otimizada	Compacidade máxima da mistura granular

As três classes de resistência estudadas foram 25, 45 e 65 MPa de resistência à compressão. Além disso, visando a reologia desejada, foi adotada uma faixa de abatimento do tronco de cone entre 100 e 150 mm, água livre entre 165 a 190 l/m³ de concreto e teor de superplastificante de 0,3% (teor de saturação). A propriedade a ser otimizada pelo programa foi a compacidade da mistura granular, optando-se pela maximização da compacidade do esqueleto granular.

Para cada classe de resistência, foram feitas simulações de dosagem, variando-se o teor de agregado reciclado presente na mistura. A descrição de cada uma das simulações é apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Descrição das simulações realizadas no programa BetonLab Pro 3

Traço	Descrição
CXX-Livre	O programa era deixado livre para escolher a melhor composição dos materiais para os parâmetros estabelecidos.
CXX-00	O programa era forçado a zerar a quantidade de Brita ARC, de forma que ele ficasse livre para escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos. Neste caso, o teor de superplastificante era deixado livre para que fosse possível atender abatimento e água livre simultaneamente.
CXX-01100	O programa era forçado a colocar pelo menos 0,1% de Brita ARC, de forma que ele ficasse livre para escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos, desde que incluísse a Brita ARC.
CXX-0120	O programa era forçado a colocar de 0,1 a 20% de Brita ARC, em relação ao total de agregado graúdo, e escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos.
CXX-2040	O programa era forçado a colocar de 20 a 40% de Brita ARC, em relação ao total de agregado graúdo, e escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos.
CXX-4060	O programa era forçado a colocar de 40 a 60% de Brita ARC, em relação ao total de agregado graúdo, e escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos.
CXX-6080	O programa era forçado a colocar de 60 a 80% de Brita ARC, em relação ao total de agregado graúdo, e escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos.
CXX-80100	O programa era forçado a colocar de 80 a 100% de Brita ARC, em relação ao total de agregado graúdo, e escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos.
CXX-100	O programa era forçado a colocar 100% de Brita ARC, em relação ao total de agregado graúdo, e escolher a melhor composição de materiais para os parâmetros estabelecidos, desconsiderando a utilização de Brita Natural.

5.1.3. Dosagens obtidas e escolha dos concretos a serem caracterizados experimentalmente

5.1.3.1. Classe C25

Na Tabela 5.6 são apresentadas as dosagens obtidas através do programa *BetonLab Pro 3*, para a classe de 25 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Já a Tabela 5.7 apresenta as propriedades de cada mistura, fornecidas pelo programa.

Tabela 5.6 – Dosagem otimizada de concretos para a classe de 25 MPa de resistência à compressão

Materiais	C25-Livre	C25-00	C25-01100	C25-0120	C25-2040	C25-4060	C25-6080	C25-80100	C25-100
Brita Natural (kg/m ³)	609,7	1005,2	609,7	803,0	609,7	600,6	395,4	197,0	0,0
Brita ARC (kg/m ³)	381,7	0,0	381,7	195,6	381,7	390,1	577,8	767,7	935,9
Areia (kg/m ³)	842,5	842,0	842,5	844,4	842,5	842,0	831,5	828,7	808,1
Cimento (kg/m ³)	267,2	267,2	267,2	266,4	267,2	267,6	277,8	278,5	299,9
SP (kg/m ³)	2,7	1,07	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	3,0
Água total (kg/m ³)	193,2	185,1	193,2	188,7	193,2	193,6	203,9	208,4	225,5

Nota-se que tanto o traço C25-Livre quanto o C25-01100 apresentam como quantidade ótima de Brita ARC igual a 39% em relação ao total de agregado graúdo. A partir destes traços, o programa buscou sempre compor os outros traços com a quantidade de agregado reciclado mais próxima da “ótima”.

Assim, foram escolhidos 3 traços para moldagem de concretos desta classe de resistência. O primeiro traço foi o considerado como a composição “ótima” de agregado reciclado (C25-01100) e será tratado como a referência desta classe. Além disso, foram escolhidos também os traços “C25-0120” e “C25-6080” quem possuíam 20% e 60% de

Brita ARC em sua composição. Note que os concretos “C25-2040” e “C25-4060” possuem praticamente a mesma composição do concreto “C25-01100”.

Vale destacar que o traço C25-0120, apesar de apresentar compacidade maior, não foi considerado a mistura “ótima”, porque não apresentou abatimento teórico previsto dentro dos limites determinados. Esta exceção ocorreu devido ao programa não conseguir otimizar um traço que atendesse simultaneamente as restrições de abatimento, teor de água livre e porcentagem de ARC.

Tabela 5.7 – Propriedades dos concretos dosados para a classe de 25 MPa

Propriedades das misturas	C25-Livre	C25-00	C25-01100	C25-0120	C25-2040	C25-4060	C25-6080	C25-80100	C25-100
Brita ARC/AG (%)	39	0	39	20	39	40	60	80	100
Água livre (l/m³)	170,0	170,0	170,0	170,0	170,0	170,3	176,3	176,2	189,8
Ar incorporado (%)	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,8	1,5
Massa específica (kg/m³)	2297	2300	2297	2301	2297	2297	2289	2283	2272
Abatimento (cm)	15	15	15	18	15	15	15	10	15
f_{c28} (MPa)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Compacidade dos grãos	0,8088	0,8266	0,8088	0,8180	0,8088	0,8083	0,7973	0,7849	0,7713

Assim, foram produzidos concretos com 20%, 39% e 60% de Brita ARC em sua composição, para a classe de 25 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. A composição destes traços estão apresentadas na Tabela 5.6 e suas propriedades teóricas, fornecidas pelo MEC, na Tabela 5.7. Note que estas misturas apresentam compacidade dos grãos variando entre 0,7973 e 0,8180.

5.1.3.2. Classe C45

Na Tabela 5.8 são apresentadas as dosagens obtidas através do programa *BetonLab Pro 3*, para a classe de 45 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Já a Tabela 5.9 apresenta as propriedades de cada mistura, fornecidas pelo programa.

Tabela 5.8 - Dosagem otimizada de concretos para a classe de 45 MPa de resistência à compressão

Materiais	C45-Livre	C45-00	C45-01100	C45-0120	C45-2040	C45-4060	C45-6080	C45-80100	C45-100
Brita Natural (kg/m ³)	496,8	949,1	496,8	570,8	496,8	494,0	325,9	162,4	0,0
Brita ARC (kg/m ³)	318,3	0,0	318,3	159,9	318,3	320,9	476,2	632,9	786,4
Areia (kg/m ³)	917,3	795,0	917,3	913,9	917,3	917,2	907,4	904,5	899,1
Cimento (kg/m ³)	385,2	391,3	385,2	391,5	385,2	385,3	397,3	400,5	406,2
SP (kg/m ³)	3,9	1,45	3,9	3,9	3,9	3,9	5,2	5,0	4,6
Água total (kg/m ³)	184,0	183,9	184,0	179,1	184,0	184,1	189,3	193,3	198,9

É possível observar que, para a classe de 45 MPa de resistência, o programa escolhe utilizar o agregado reciclado, mesmo estando livre para compor uma dosagem sem este tipo de agregado. Além disso, nota-se também que a dosagem “ótima” apresenta a mesma quantidade percentual de Brita ARC que o traço “ótimo” da classe C25 (em torno de 40%). Assim, foram escolhidos 3 traços para caracterização experimental: “C45-01100” (referência), “C45-0120” e “C45-6080”.

Vale ressaltar que, para esta classe, não foi possível otimizar um traço que atendesse simultaneamente as três restrições impostas: água livre, abatimento de tronco de cone e fração de agregado reciclado. Assim, para o traço “C45-0120”, não foi possível compor uma dosagem com no máximo 20% de Brita ARC, sendo considerada então a utilização de 22% deste material, em relação ao total de agregado graúdo. Apesar desta mistura

apresentar a maior compacidade dentre os concretos desta classe, ela não foi considerada a mistura “ótima” por não atender as restrições impostas.

Tabela 5.9 - Propriedades dos concretos dosados para a classe de 45 MPa

Propriedades das misturas	C45-Livre	C45-00	C45-01100	C45-0120	C45-2040	C45-4060	C45-6080	C45-80100	C45-100
Brita ARC/AG (%)	40	0	40	22	40	40	60	80	100
Água livre (l/m³)	165,0	170,0	165,0	165,0	165,0	165,1	167,5	167,6	169,4
Ar incorporado (%)	1,9	1,6	1,9	2,0	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2
Massa específica (kg/m³)	2305	2321	2305	2219	2305	2305	2301	2298	2295
Abatimento (cm)	15	10	15	15	15	15	14	12	11
f_{c28} (MPa)	45,0	45	45,0	45,0	45,0	45,0	45,4	45,3	45,1
Compacidade dos grãos	0,8128	0,8266	0,8128	0,8167	0,8128	0,8127	0,8062	0,7991	0,7911

5.1.3.3. Classe C65

Na Tabela 5.10 são apresentadas as dosagens obtidas através do programa *Betonlab Pro 3*, para a classe de 65 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Já a Tabela 5.11 apresenta as propriedades de cada mistura, fornecidas pelo programa.

Tabela 5.10 - Dosagem otimizada de concretos para a classe de 65 MPa de resistência à compressão

Materiais	C65-Livre	C65-00	C65-01100	C65-0120	C65-2040	C65-4060	C65-6080	C65-80100	C65-100
Brita Natural (kg/m ³)	601,2	835,8	610,6	610,6	530,5	397,7	260,6	129,4	0,0
Brita ARC (kg/m ³)	81,0	0,0	56,4	56,4	129,2	258,3	380,8	504,2	608,9
Areia (kg/m ³)	900,1	700,1	913,9	913,9	906,5	906,1	890,4	884,3	854,3
Cimento (kg/m ³)	538,1	591,9	537,3	537,3	547,2	548,9	570,2	579,1	619,3
SP (kg/m ³)	5,4	3,15	5,4	5,4	5,5	5,5	5,7	5,8	6,2
Água total (kg/m ³)	185,5	201,0	184,7	184,7	188,3	189,4	196,6	199,5	211,7

Tabela 5.11 - Propriedades dos concretos dosados para a classe de 65 MPa

Propriedades das misturas – C65	C65-Livre	C65-00	C65-01100	C65-0120	C65-2040	C65-4060	C65-6080	C65-80100	C65-100
Brita ARC/AG (%)	12	0	9	9	20	40	60	80	100
Água livre (l/m ³)	175,0	190,0	175,0	175,0	177,0	175,0	179,6	179,7	190
Ar incorporado (%)	2,1	1,5	2,1	2,1	2,1	2,3	2,2	2,4	2,1
Massa específica (kg/m ³)	2311	2332	2308	2308	2307	2306	2304	2302	2300
Abatimento (cm)	15	10	15	15	15	12,1	12,4	10	13,1
f _{c28} (MPa)	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Compacidade dos grãos	0,8181	0,8266	0,8181	0,8181	0,8158	0,8115	0,8070	0,8021	0,7968

Para esta classe de resistência, foi possível observar que as dosagens “C65-Livre” e “C65-01100” apresentaram a mesma compacidade, a mesma resistência à compressão aos 28 dias, o mesmo abatimento de tronco de cone e a mesma quantidade de água livre, sendo que a primeira com 12% de Brita ARC, enquanto a segunda composta por 9% deste material. Este fato ilustra o conceito apresentado no Capítulo 3, onde é possível ter duas compacidades iguais para frações volumétricas diferentes e a compacidade máxima ocorre na transição entre a dominância das classes (Figura 3.5).

Para a escolha dos traços a serem produzidos, foram utilizados critérios semelhantes aos utilizados para as classes C25 e C45: “C65-01100”, como referência, e “C65-2040”, “C65-4060” e “C65-6080”, como concretos reciclados com 20%, 40% e 60% de Brita ARC, frações estas iguais aos concretos produzidos das outras classes de resistência.

5.1.4. Comparação entre as dosagens do *Betonlab Pro 3*

A Figura 5.2 mostra a relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão teórica aos 28 dias de todas as dosagens apresentadas na Tabela 5.6, Tabela 5.8 e Tabela 5.10.

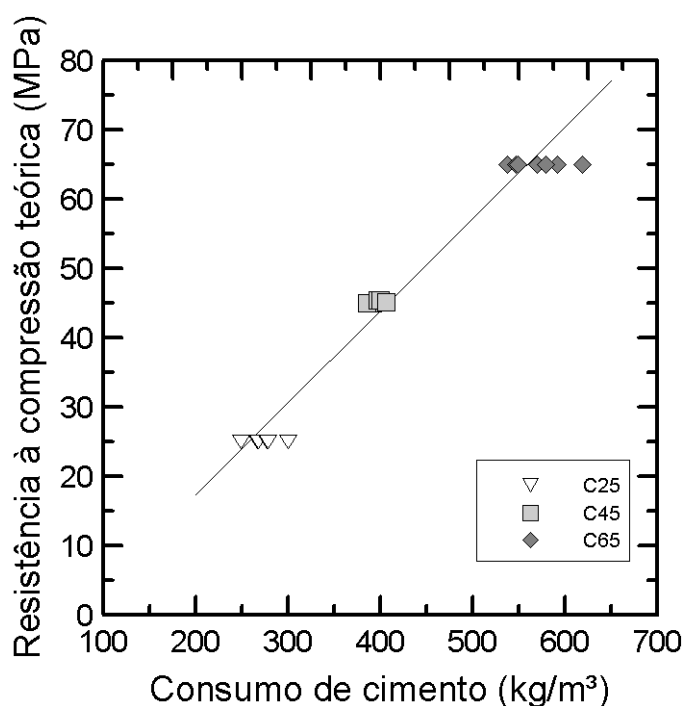


Figura 5.2 – Resistência à compressão teórica aos 28 dias versus consumo de cimento para todas as dosagens obtidas

Nota-se que a variação no consumo de cimento é maior na classe C65, enquanto que a classe C45 apresenta praticamente os mesmos valores de consumo de cimento para diferentes teores de utilização do agregado reciclado.

Com o auxílio da Tabela 5.6, é possível observar que, para a classe C25, o aumento do teor de Brita ARC utilizado em cada traço provoca um acréscimo no consumo de cimento. O traço C25-Livre foi a mistura que apresentou a menor quantidade de cimento necessária para que se atingisse a resistência desejada, porém como este traço era mantido totalmente livre, sua água livre é inferior aos limites impostos para os outros traços. Assim, a comparação teórica dos concretos reciclados com o concreto natural foi realizada com o concreto C25-00, que apresentava as mesmas restrições de dosagem que os concretos reciclados, com exceção do teor de superplastificante (neste caso, não foi utilizado na dosagem de saturação). A variação do consumo de cimento desta classe é igual a $32,7 \text{ kg/m}^3$

Para os concretos da classe C45, também é observada esta tendência, porém a diferença do consumo de cimento é menor que a da classe anterior, variando entre 385 e 406 kg/m^3 .

Os concretos da classe C65 apresentaram grande variação no consumo de cimento em função do teor de agregado reciclado utilizado, mas a tendência observada para as classes anteriores se manteve, podendo-se concluir que o aumento do teor de agregado reciclado nos concretos faz com que seja necessária uma quantidade menor de cimento para que se obtenha as propriedades desejadas, principalmente a resistência à compressão.

Além disso, o consumo de cimento para o concreto natural, em todas as classes, é um pouco maior ou igual ao necessário para produzir um concreto com baixo teor de agregado reciclado de mesma resistência. Assim, acredita-se que os concretos reciclados devem apresentar propriedades semelhantes as do concreto natural.

5.2. Produção, moldagem e cura dos concretos

Os concretos foram produzidos em misturador vertical planetário, modelo EX 20L, do fabricante Exímea Projetos. As etapas de colocação dos materiais no misturador, bem como o tempo de cada fase deste processo, são apresentadas a seguir:

- a) Umedecimento do misturador com água, retirando o excesso com um pano úmido;
- b) Lançamento dos agregados graúdo e miúdo, misturando-os por um minuto, para que seja possível obter uma boa homogeneização (Figura 5.3-a, Figura 5.3-b e Figura 5.3-c);
- c) Adição de 50% da água total da mistura aos agregados, misturando-se por mais um minuto (Figura 5.3-d e Figura 5.3-e);
- d) Em seguida, o cimento foi adicionado, acionando-se o misturador por mais um minuto (Figura 5.3-f);
- e) Após isso, o restante da água total e todo o superplastificante são adicionados à mistura (Figura 5.3-g e Figura 5.3-h) e homogeneizados por mais oito minutos, que é o tempo necessário para a ação total do superplastificante. Na metade desta etapa, o misturador era desligado e os materiais que não tivessem sido homogeneizados corretamente eram raspados manualmente com o auxílio de uma colher de pedreiro. Após isso, o misturador era acionado por mais quatro minutos (Figura 5.3-i).

O tempo total de mistura, a partir do momento em que a água era adicionada, foi de 10 minutos e o ensaio de abatimento do tronco de cone era realizado cerca de um minuto após o término da mistura.



(a)



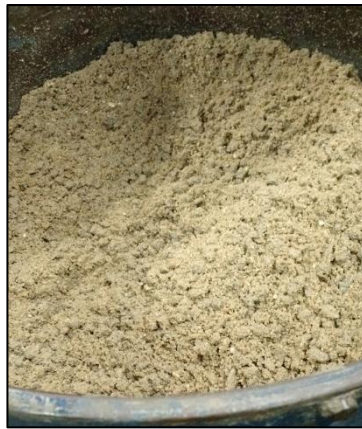
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 5.3 – Etapas do processo de mistura dos concretos: (a) e (b) lançamento dos agregados no misturador; (c) aspecto da mistura dos agregados após um minuto; (d) adição da primeira metade da água total; (e) aspecto dos agregados após adição de água; (f) adição do cimento à mistura; (g) e (h) colocação do superplastificante e do restante da água total; (i) homogeneização manual do material retido nas paredes do misturador.

Para a moldagem dos corpos-de-prova, ao final do procedimento de mistura, o concreto era adensado mecanicamente em mesa vibratória (68 Hz), sendo colocado nos moldes em três camadas (Figura 5.4). O tempo de vibração adotado foi de 30 segundos para cada camada.



Figura 5.4 – Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos: (a) colocação do material em três camadas; (b) aspecto da segunda camada após vibração

Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, protegidos da perda de umidade. Durante todas as etapas de mistura, moldagem e ensaio de abatimento do tronco de cone a temperatura da sala foi mantida a $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram colocados em câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde permaneceram até as idades de ensaios (Figura 5.5).



Figura 5.5 – Corpos-de-prova na câmara úmida

5.3. Metodologia de avaliação estatística dos resultados experimentais

No caso das propriedades avaliadas com repetição de ensaios (3 ou mais determinações), técnicas estatísticas foram implementadas para validação dos resultados experimentais obtidos.

A comparação entre os diferentes tratamentos foi feita por análise de variância (ANOVA) com o auxílio do *software OriginPro 8*, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), pelo teste de comparação de médias de Tukey. Este teste permite avaliar qualquer discrepância entre duas médias de tratamentos e é baseado na Diferença Mínima Significativa (DMS), onde a estatística do teste é dada de acordo com a Equação (5.1).

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QMRes}{r}} \quad (5.1)$$

Onde:

Δ é a Diferença Mínima Significativa (DMS);

q é a amplitude total studentizada;

$QMRes$ é o quadrado médio do resíduo;

r é o número de repetições.

Capítulo 6

Apresentação e análise dos resultados

6.1. Análise dos parâmetros “p” e “q”

Para complementar o estudo da ferramenta computacional *Betonlab Pro 3*, foi analisada a influência dos parâmetros “p” e “q” na resistência à compressão axial de concretos. Para isso, foram realizadas diferentes simulações de valores para “p” e “q” do agregado graúdo e verificou-se qual seria a resistência estimada pelo programa. Como foram utilizados sempre os mesmos agregados, variando-se unicamente os parâmetros, fornecendo sempre a mesma dosagem de entrada, as composições dos concretos não variaram. Foi escolhido um traço de entrada com 300 kg/m³ de cimento, superplastificante na dosagem de saturação (0,3% de sólidos em relação a massa de cimento) e 190 l/m³ de água livre. Além disso, optou-se por manter o mesmo volume de agregado miúdo e agregado graúdo na mistura. Assim, a dosagem utilizada está apresentada na Tabela 6.1. As propriedades dos materiais utilizados são as mesmas apresentadas no estudo experimental.

Tabela 6.1 – Dosagem dos concretos simulados para análise dos parâmetros “p” e “q”

Materiais	Consumo (kg/m³)
Brita Natural	928,2
Areia Natural	845,9
Cimento	300,0
Superplastificante	3,0
Água	202,8

A Figura 6.1 apresenta os resultados obtidos através do programa *Betonlab Pro 3*. Nota-se que quanto maior o valor obtido para o parâmetro “p”, maior é resistência à compressão esperada aos 28 dias. Para q = 0 e p variando entre 0,2 e 1,2, a resistência à

compressão varia entre 15 e 30 MPa. Isto mostra que o parâmetro “p” exerce forte influência na resistência dos concretos.

Já para o parâmetro “q”, a relação com a resistência é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o valor de “q”, menor é a resistência. Também é possível observar que este parâmetro não influencia tanto a resistência, como o parâmetro “p”.

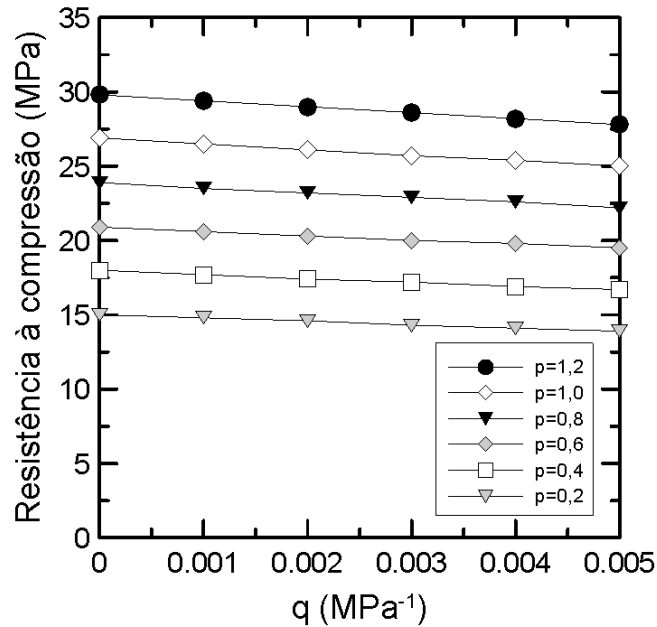


Figura 6.1 - Resistência à compressão estimada aos 28 dias em função do parâmetro “q”, para diferentes valores de “p”

O resultado destas simulações apenas confirmou a Equação 3.36, escrita novamente a seguir, onde o “p” é um parâmetro diretamente proporcional, enquanto o parâmetro “q” apresenta relação inversa com a resistência. Assim, conclui-se que a resistência à compressão é muito mais influenciada pela interface agregado-pasta, do que da resistência intrínseca do próprio agregado.

$$f_c = \frac{p \cdot f_{c_m}}{q \cdot f_{c_m} + 1}$$

Vale lembrar que os valores de resistência apresentados na Figura 6.1 também depende da composição do traço de concreto escolhido, além dos parâmetros “p” e “q”.

6.2. Abatimento do tronco de cone

A Tabela 6.2 apresenta os resultados para o ensaio de abatimento de tronco de cone para os concretos produzidos, juntamente com outras propriedades de cada mistura. É possível notar que, para todas as misturas, o abatimento obtido experimentalmente não foi correspondente ao previsto pelo programa *Betonlab Pro 3*. Outros estudos presentes na literatura também não obtiveram uma boa correlação entre os valores obtidos e os valores previstos. Silva (2004) encontrou valor próximo a 0,89 de correlação para concretos dosados pelo MEC e Martins (2014) precisou ajustar o teor de superplastificante experimentalmente, uma vez que o teor sugerido pelo programa não proporcionou o abatimento desejado. De acordo com Velasco (2008), isto pode ser causado pela falta de parâmetros de entrada que caracterizem a eficiência do superplastificante e sua capacidade de incrementar a trabalhabilidade dos concretos. Assim, não há sentido em comparar o abatimento previsto pelo programa com o abatimento obtido experimentalmente.

Durante o processo de moldagem dos corpos-de-prova, foi observada uma dificuldade maior para o adensamento das misturas com abatimento menor que 50 mm. Nessas misturas, foi necessário realizar a vibração mecânica por mais 10 segundos para que a trabalhabilidade não afetasse tanto nas propriedades analisadas.

Tabela 6.2 – Resultados de abatimento do tronco de cone para os concretos produzidos

Misturas	Água livre (l/m ³)	a/c efetivo	% RCA/AG	% pasta	Abatimento obtido (mm)
C25-01100	170,0	0,64	39	26%	60
C25-0120	170,0	0,64	20	26%	45
C25-6080	176,3	0,63	60	27%	70
C45-01100	165,0	0,43	40	29%	45
C45-0120	165,0	0,42	22	29%	30
C45-6080	167,5	0,42	60	30%	55
C65-01100	175,0	0,33	9	35%	55
C65-2040	177,0	0,32	20	35%	80
C65-4060	175,0	0,32	40	35%	85
C65-6080	179,6	0,31	60	36%	95

A Figura 6.2 apresenta uma correlação entre a porcentagem de ARC presente em cada mistura em relação ao volume total de agregado graúdo e o abatimento obtido experimentalmente, para cada classe de resistência. Observa-se uma forte correlação entre estas variáveis para as classes de 25 MPa e 45 MPa. Para a classe de 65 MPa, o valor de R^2 foi menor (0,8128), mas a tendência é mantida, mostrando que a quantidade de agregado reciclado utilizada afeta diretamente na trabalhabilidade do concreto, independente da classe de resistência. Vale destacar que o aumento da quantidade de ARC utilizado provoca um pequeno aumento na trabalhabilidade dos concretos, dentro de cada classe de resistência. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de água livre presente em cada mistura (ver Figura 6.3), assim como pela presença de uma quantidade menor de finos no agregado graúdo reciclado (Ver Figura 4.18). Além disso, foi observado também que o agregado reciclado apresenta uma forma mais arredondada em relação ao agregado natural, provavelmente provocado pelo processo de britagem do material e das dimensões do agregado.

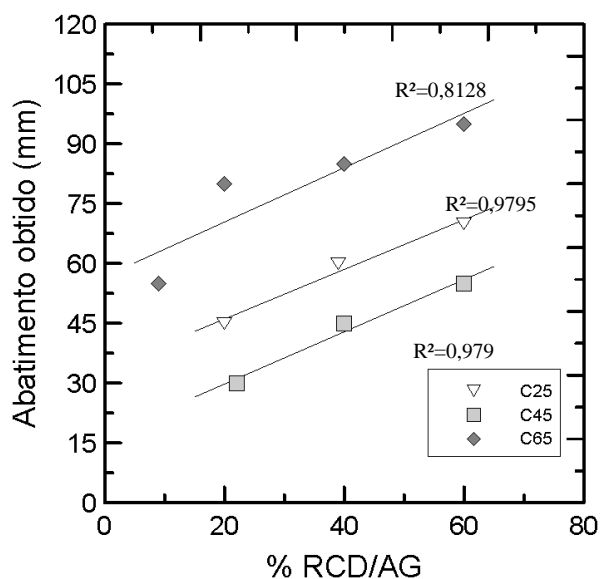


Figura 6.2 - Correlação entre o abatimento obtido e o teor de Brita ARC (%) utilizado, separados por classe de resistência

Observa-se também que as misturas da classe C45 foram as que apresentaram os menores abatimentos para os mesmos teores de agregado reciclado, ou seja, a reta da classe C45 encontra-se mais abaixo na Figura 6.2. Isto ocorre por causa da menor quantidade de água livre presente nesta classe, observado na Tabela 6.2.

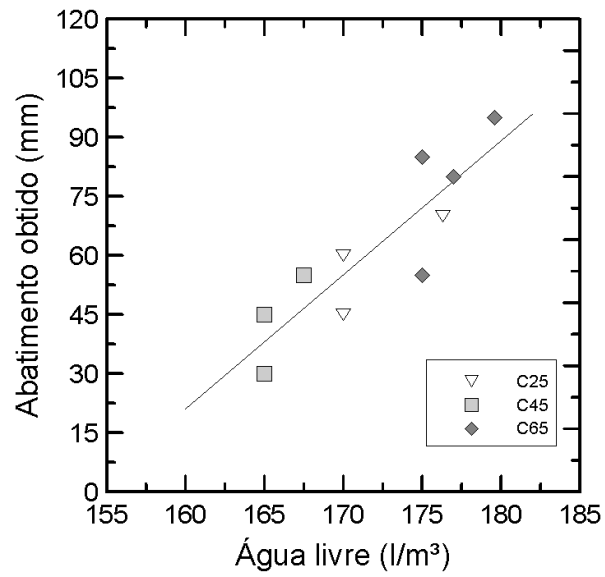


Figura 6.3 - Correlação entre o abatimento obtido e a quantidade de água livre para todas as misturas

A Figura 6.4 ilustra o abatimento do tronco de cone obtido experimentalmente para a mistura C25-6080.



Figura 6.4 – Detalhe do abatimento do tronco de cone obtido para a mistura C25-6080

6.3. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os concretos foram avaliados sob esforços de compressão após 28 dias de cura. Os resultados de resistência à compressão, deformação axial correspondente à tensão de pico (deformação de pico) e módulo de elasticidade para cada concreto são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Misturas	Resistência à compressão (MPa)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$)	Módulo de elasticidade (GPa)
C25-01100	25,43 (\pm 4,03)	2397,43 (\pm 1,52)	19,73 (\pm 2,24)
C25-0120	25,23 (\pm 6,09)	2179,58 (\pm 1,48)	20,00 (\pm 2,68)
C25-6080	23,45 (\pm 3,46)	2281,73 (\pm 2,48)	19,45 (\pm 1,48)
C45-01100	45,98 (\pm 2,50)	2559,88 (\pm 2,98)	26,55 (\pm 2,65)
C45-0120	45,78 (\pm 6,25)	2494,98 (\pm 4,10)	26,93 (\pm 2,74)
C45-6080	46,90 (\pm 4,55)	2736,03 (\pm 3,75)	27,03 (\pm 3,33)
C65-01100	68,08 (\pm 0,49)	3204,78 (\pm 1,75)	31,08 (\pm 0,85)
C65-2040	63,88 (\pm 4,86)	2619,60 (\pm 5,85)	33,70 (\pm 0,73)
C65-4060	62,53 (\pm 1,37)	2690,80 (\pm 2,79)	32,40 (\pm 0,91)
C65-6080	62,35 (\pm 1,48)	2876,50 (\pm 2,75)	31,35 (\pm 1,99)

Como pode ser observado, os concretos da classe C25 apresentaram resistência à compressão e módulo de elasticidade semelhantes e, de acordo com a análise estatística realizada (ANOVA), não apresentaram diferenças significativas nestes parâmetros. Já para a deformação de pico, os valores obtidos são considerados diferentes entre si e a mistura que apresentou a maior deformação foi a C25-01100. As curvas típicas tensão *versus* deformação para a classe C25 são apresentadas na Figura 6.5. Nela, é possível notar que as três misturas apresentaram comportamento semelhante tanto no ramo ascendente como no ramo descendente.

Para os concretos da classe C45, tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade não apresentaram variações significativas entre as três misturas, de acordo com a análise estatística realizada. Já a deformação referente à tensão máxima (deformação de pico) somente apresenta variação significativa entre as misturas C45-0120 e C45-6080, variando entre 2494,98 $\mu\epsilon$, para a primeira, e 2736,03 $\mu\epsilon$, para a segunda. As curvas típicas tensão *versus* deformação para a classe C45 são apresentadas

na Figura 6.6. Nela, é possível notar que as três misturas apresentaram comportamento semelhante no ramo ascendente, com diferença apenas para a deformação de pico da C45-6080 em relação às outras misturas.

Já para os concretos da classe C65, apenas os módulos de elasticidade das quatro misturas podem ser considerados estatisticamente iguais. Para a resistência à compressão, a única mistura que apresenta variação significativa, em comparação com os concretos da mesma classe, é a C65-01100. Neste caso, o melhor empacotamento granular da mistura pode ter proporcionado a obtenção de uma resistência maior, com o menor consumo de cimento entre as misturas. Além disso, esta mistura foi a que apresentou a maior deformação de pico, com valor correspondente a 3204,78 $\mu\epsilon$. As curvas típicas tensão *versus* deformação para a classe C65 são apresentadas na Figura 6.7.

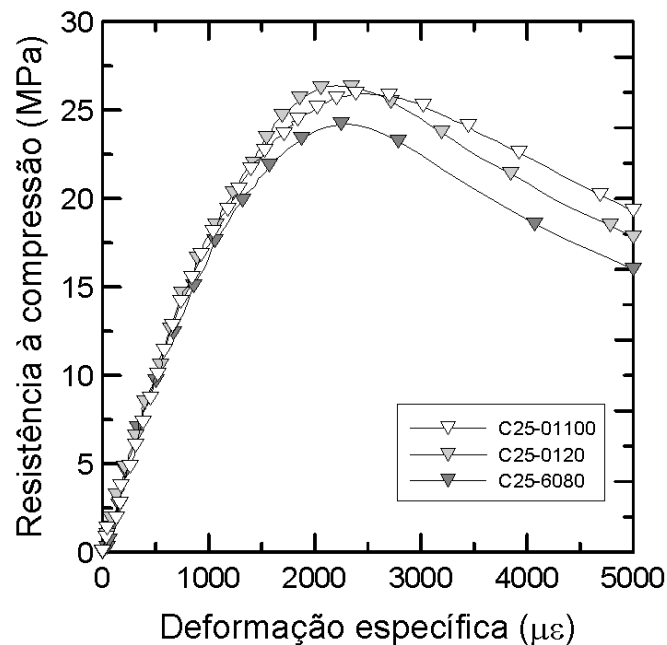


Figura 6.5 – Curvas típicas de tensão *versus* deformação axial aos 28 dias para os concretos da classe de 25 MPa de resistência

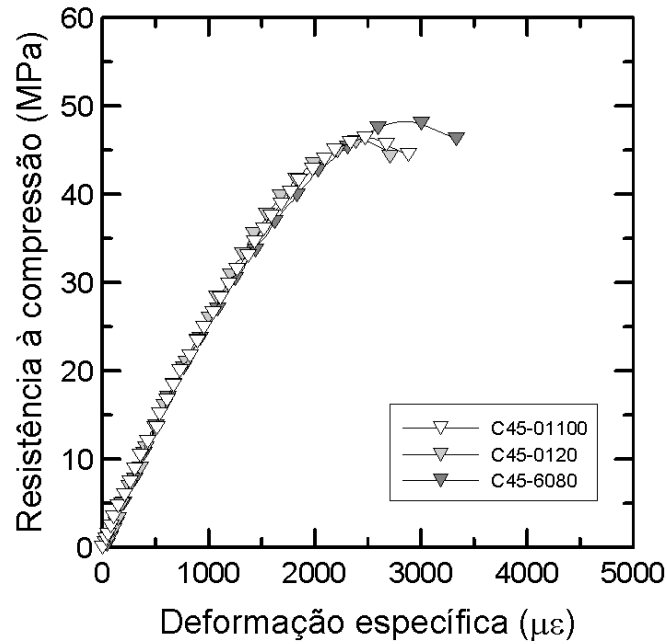


Figura 6.6 – Curvas típicas de tensão *versus* deformação axial aos 28 dias para os concretos da classe de 45 MPa de resistência

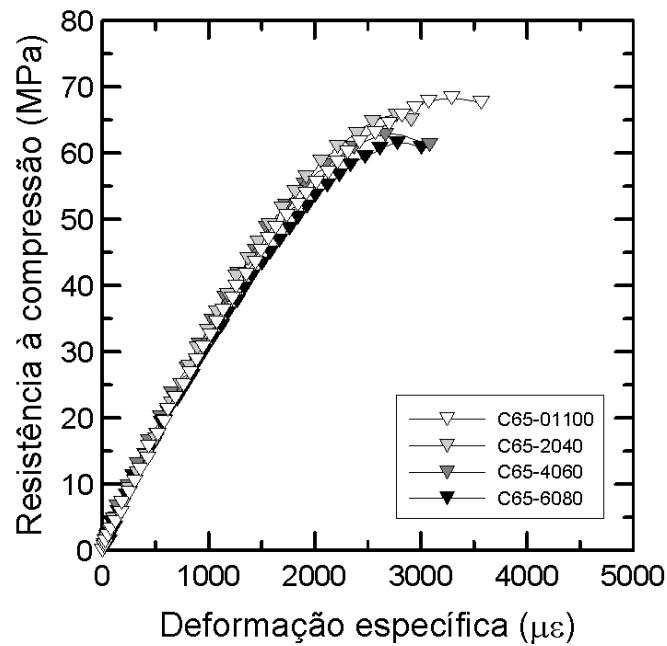


Figura 6.7 – Curvas típicas de tensão *versus* deformação axial aos 28 dias para os concretos da classe de 65 MPa de resistência

A Figura 6.8 apresenta a comparação entre o comportamento dos concretos das três diferentes classes de resistência. Nela é possível observar que, após a carga de pico, o concreto da classe C25 ainda apresenta uma resistência residual, que diminui à medida que aumenta a deformação. Este comportamento não foi observado nos concretos da

classe C45 e C65, que apresentaram uma ruptura frágil, logo após a tensão máxima. Além disso, nota-se que a deformação de pico aumenta com o aumento da classe de resistência, assim como o módulo de elasticidade. De acordo com Tasdemir *et al* (1998), em concretos de alto desempenho, o módulo de elasticidade da matriz é próximo ao módulo do agregado e, assim, as tensões tangenciais que se desenvolvem na interface matriz-agregado são menores.

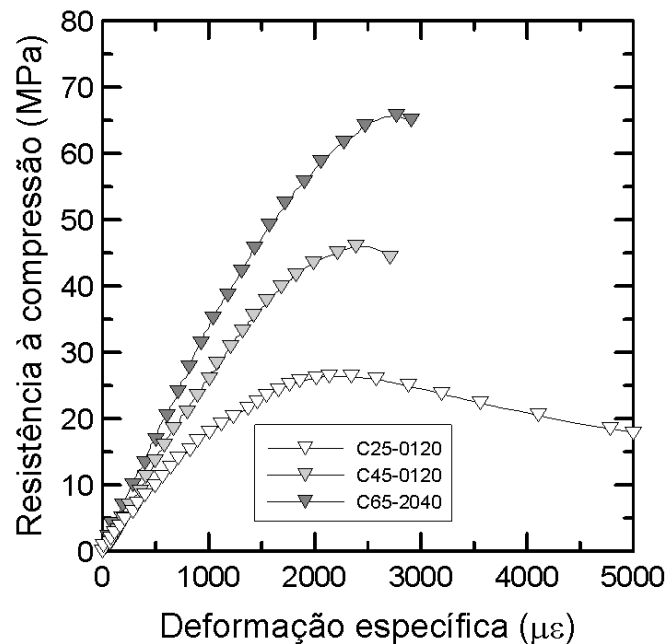


Figura 6.8 – Comparação entre o comportamento das curvas tensão *versus* deformação axial aos 28 dias para os concretos de diferentes classes de resistência

Para ilustrar o modo de ruptura dos concretos reciclados das três classes de resistência, são apresentadas, na Figura 6.9, imagens dos corpos-de-prova após o ensaio de compressão uniaxial. Nota-se que a ruptura dos concretos das três classes é do tipo cisalhante e colunar. Além disso, os concretos de maiores classes de resistências apresentaram ruptura explosiva com maior fragmentação na ruptura.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.9 – Modo de ruptura sob esforços de compressão axial dos concretos reciclados: (a) C25-6080; (b) C45-6080 e (c) C65-2040

Assim como este trabalho, Kou e Poon (2015) caracterizaram concretos reciclados de resistência normal e de alta resistência. Para concretos da classe C45, os autores encontraram valores de módulo de elasticidade em torno de 28 GPa, enquanto que para os concretos da classe C65, os valores de módulo foram próximos a 32 GPa. Observa-se

que estes valores são semelhantes aos obtidos neste trabalho. Além disso, os autores também não encontraram diferenças significativas entre as resistências de concretos de diferentes teores de agregados reciclados. Manzi, Mazzotti e Bigozzi (2013) também obtiveram valores próximos a 28 GPa para concretos de classe C45.

Em estudo realizado por Bravo *et al.* (2015), foram produzidos concretos com agregados graúdos reciclados com teores de substituição de 10, 25, 50 e 100%. Para o teor de 25% e classe C35, os concretos apresentaram módulo de elasticidade de 38 GPa. Este valor é bem superior ao obtido neste trabalho e isto ocorrer pelas diferenças nas propriedades dos agregados utilizados nos estudos.

A Figura 6.10 apresenta uma comparação entre a resistência à compressão teórica prevista pelo programa *Betonlab* e a obtida experimentalmente para os concretos dosados. Nota-se que o comportamento da curva é linear, demonstrando que a ferramenta computacional utilizada estima, com precisão, a resistência à compressão dos concretos dosados pelo MEC.

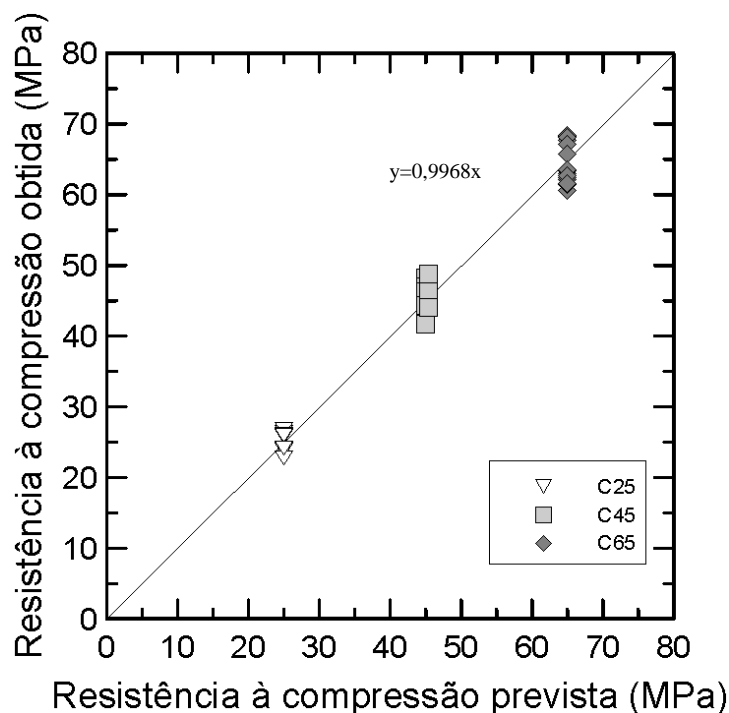


Figura 6.10 - Correlação entre as resistências à compressão obtidas experimentalmente e as resistências teóricas previstas pelo programa *Betonlab*

Além disso, também é possível correlacionar a resistência à compressão obtida experimentalmente com a relação a/c efetiva, ou seja, quantidade de água livre em relação à massa de cimento. Este gráfico é apresentado na Figura 6.11. Nota-se que a resistência à compressão do concreto tende a diminuir conforme o valor do a/c aumenta. Este é o fator mais importante do ponto de vista da resistência em concretos, pois ele afeta diretamente na porosidade da matriz de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado graúdo. De acordo com Leite (2001), o aumento do fator a/c provoca um enfraquecimento progressivo da matriz de concreto, devido ao aumento da porosidade, gerando uma diminuição da resistência. Porém, não é possível obter uma relação direta entre resistência à compressão e fator a/c efetivo, pois existem outros fatores que influenciam o comportamento mecânico dos concretos, como por exemplo, o consumo de cimento, adensamento e os tipos de agregados utilizados.

Ainda é possível notar que, para um fator a/c efetivo mais baixo (classe C65), a dispersão de valores médios de resistência à compressão é maior e os valores de resistência tendem a diminuir à medida que aumenta o teor de utilização de agregado reciclado. Isso acontece porque quanto menor o fator a/c efetivo, maior será a resistência da matriz cimentícia.

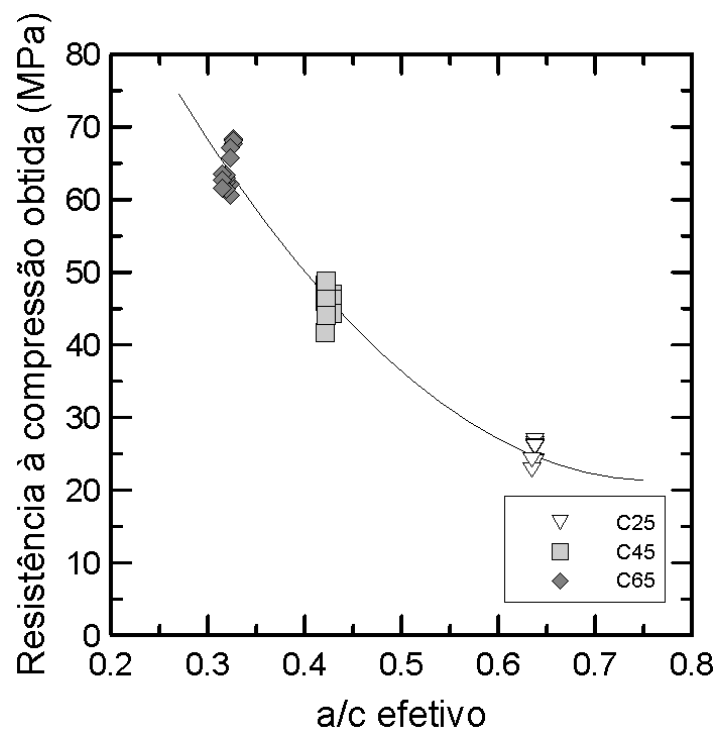


Figura 6.11 - Resistência à compressão em função do fator a/c efetivo

Também é possível correlacionar o módulo de elasticidade com a resistência à compressão para cada concreto. De acordo com a NBR 6118 (2014), o módulo de elasticidade pode ser estimado através das Equações (6.1) e (6.2), onde a primeira é aplicável para concretos com resistência entre 20 MPa e 50 MPa e a segunda é utilizada para concretos com resistência entre 50 MPa e 90 MPa. O valor de α varia de acordo com o tipo de agregado que está sendo utilizado.

$$E = \alpha \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (6.1)$$

$$E = \alpha \cdot 21,5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3} \quad (6.2)$$

Onde,

$$\alpha = \begin{cases} 1,2 & \text{para basalto e diabásio} \\ 1,0 & \text{para granito e gnaisse} \\ 0,9 & \text{para calcário} \\ 0,7 & \text{para arenito} \end{cases}$$

A Figura 6.12 apresenta as curvas com os módulos de elasticidade estimados através da NBR 6118 (2014), para diferentes valores de α , bem como os valores obtidos experimentalmente.

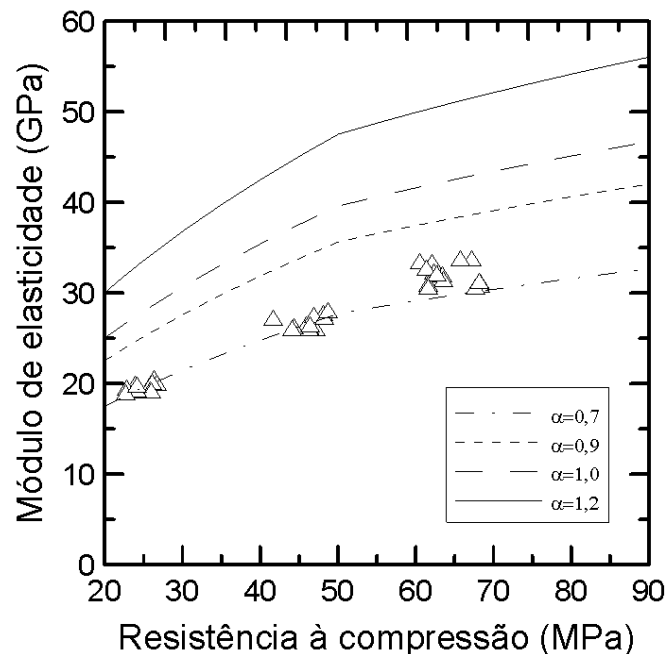


Figura 6.12 - Curvas estimadas para os valores de módulo de elasticidade em função da resistência à compressão, de acordo com a NBR 6118 (2014), para diferentes tipos de agregados

Nota-se que os concretos reciclados seguem a mesma tendência apresentada pelas curvas estimadas da norma brasileira, apesar de não existir um valor de α específico para agregados reciclados. No caso dos concretos produzidos neste trabalho, o comportamento apresentado é similar ao apresentado pelos concretos produzidos com arenitos, sendo possível deduzir que o valor de α mais adequado é 0,7.

6.4. Resistência à tração por compressão diametral

Os valores de resistência à tração por compressão diametral e seus respectivos coeficientes de variação são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Valores médios de resistência à tração por compressão diametral, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Misturas	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
C25-01100	2,79 (\pm 6,25)
C25-0120	2,30 (\pm 8,33)
C25-6080	2,08 (\pm 8,80)
C45-01100	3,79 (\pm 9,09)
C45-0120	3,88 (\pm 5,93)
C45-6080	3,77 (\pm 7,14)
C65-01100	5,01 (\pm 3,57)
C65-2040	3,90 (\pm 4,37)
C65-4060	4,77 (\pm 9,44)
C65-6080	3,76 (\pm 7,90)

A análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C25 indicou que somente o concreto C25-01100 apresentou diferença significativa a um nível de significância igual a 0,05 em relação aos outros dois concretos desta classe. Assim, é possível dizer que o concreto C25-01100 é o mais resistente à tração por compressão diametral da classe C25 (2,79 MPa), enquanto que os concretos C25-0120 e C25-6080 podem ser considerados estatisticamente iguais. Em estudo realizado por Bravo *et al.* (2015), os concretos reciclados de classe C25 apresentaram resistência à tração por compressão diametral em torno de 2,5 MPa.

Para a classe C45, os valores de resistência à tração por compressão diametral dos três concretos produzidos (em torno de 3,8 MPa) não apresentaram diferença significativa,

de acordo com a análise estatística realizada (ANOVA). Assim, para esta classe, é possível perceber que foi possível manter a resistência, mesmo aumentando o teor de utilização de agregado reciclado, sem aumentar significativamente o consumo de cimento. No estudo de Medina *et al.* (2014) um concreto reciclado com 50% de substituição apresentou resistência à compressão aos 28 dias igual 44,75 MPa e sua resistência à tração por compressão diametral foi igual a 3,35 MPa. Kou e Poon (2015) produziram concretos de classe C45 com resistência à tração por compressão diametral em torno de 2,8 MPa.

Já para a classe C65, a análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral indicou que os concretos C65-01100 e C65-4060 não apresentam diferenças significativas entre si, assim como os concretos C65-2040 e C65-6080 que também não podem ser considerados diferentes significativamente. Porém, quando comparamos estes dois pares de concretos é possível dizer que são significativamente diferentes, sendo o par C65-01100/C65-4060 mais resistente à tração por compressão diametral que o par C65-2040/C65-6080. Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) avaliaram a influência dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho. Para os concretos de classe C65, os autores encontraram valores próximos a 4,5 MPa de resistência à tração por compressão diametral.

As relações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos reciclados produzidos estão ilustradas na Figura 6.13.

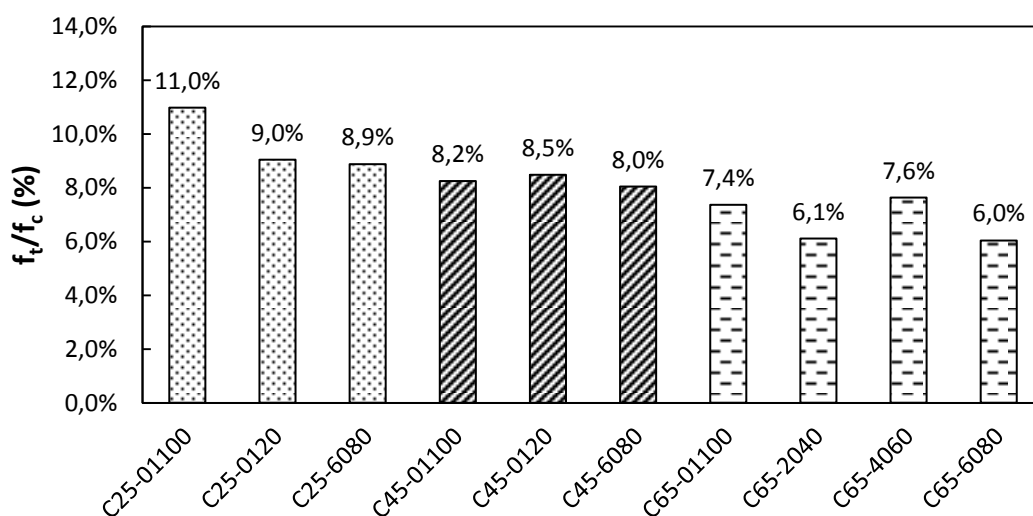


Figura 6.13 – Relação entre os resultados de tração por compressão diametral e de compressão uniaxial aos 28 dias dos concretos reciclados produzidos

Nota-se que os concretos da classe C25 apresentaram resistências à tração por compressão diametral em torno de 9,5% de suas resistências à compressão aos 28 dias, enquanto a classe C45 apresentou valores em torno de 8,3% e a classe C65 obteve valores próximos a 6,8%. Isto mostra que os concretos reciclados produzidos neste estudo tendem a apresentar uma relação f_t/f_c menor, conforme sua classe de resistência é aumentada. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), este comportamento é esperado, pois, apesar das resistências à compressão e à tração serem relacionadas, não existe uma proporcionalidade direta. Conforme a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma taxa decrescente.

6.5. Absorção total, massa específica e índice de vazios

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica para os concretos produzidos e seus respectivos coeficientes de variação.

A análise estatística dos resultados de absorção total de água, para a classe C25, indicou que apenas o concreto C25-6080 apresentou diferença significativa em relação aos resultados obtidos para os outros dois concretos de mesma classe, assim é possível dizer que neste caso, quanto maior o teor de utilização de agregados reciclados, maiores serão os valores de absorção total de água. Este comportamento era esperado e também pode ser observado nos resultados obtidos para o índice de vazios, ou seja, quanto maior a quantidade de agregados reciclados presente no concreto, maiores serão os valores de vazios presentes no material. Já para a massa específica, este desempenho ocorre de forma inversamente proporcional, pois a massa específica do agregado reciclado é inferior ao valor obtido para o agregado natural, então quanto maior o teor de utilização de agregados reciclados, menores serão os valores de massa específica.

Já para a classe C45, foi observado, através da análise estatística dos dados, que os valores obtidos para absorção total e índice de vazios do concreto com maior quantidade de agregados reciclados (C45-6080) apresentou diferença significativa em relação aos outros dois concretos de mesma classe. Assim, é possível dizer que esta mistura foi a que apresentou os menores valores de absorção total e índice de vazios desta classe.

Para a massa específica, as diferenças encontradas não são significativas a um nível de significância igual a 0,05.

Tabela 6.5 – Valores médios de absorção total de água, índice de vazios e massa específica dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Misturas	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (kg/m³)
C25-01100	2,18 (± 5,56)	4,72 (± 5,63)	2166 (± 0,1)
C25-0120	1,86 (± 5,79)	4,07 (± 5,53)	2186 (± 0,5)
C25-6080	2,58 (± 5,92)	5,43 (± 5,64)	2105 (± 0,3)
C45-01100	1,37 (± 4,06)	3,07 (± 3,61)	2239 (± 0,4)
C45-0120	1,35 (± 1,71)	3,02 (± 1,57)	2235 (± 0,1)
C45-6080	1,20 (± 0,83)	2,68 (± 0,57)	2227 (± 0,6)
C65-01100	0,60 (± 5,12)	1,39 (± 5,51)	2332 (± 0,3)
C65-2040	0,56 (± 7,48)	1,30 (± 7,49)	2323 (± 0,2)
C65-4060	0,59 (± 7,87)	1,36 (± 7,23)	2305 (± 0,3)
C65-6080	0,58 (± 7,01)	1,31 (± 7,40)	2274 (± 0,3)

Para a classe C65, tanto os valores de absorção total, quanto os valores de índice de vazios não apresentaram diferenças significativas entre os concretos produzidos, após análise estatística. Já em relação a massa específica, apenas os concretos C65-011100 e C65-2040 são considerados iguais entre si. Nesta classe, também foi observado que quanto maior a quantidade de agregados reciclados presentes no concreto, menor será sua massa específica.

Bravo *et al.* (2015) obteve resultados para absorção total de água por imersão em torno de 15% para concretos de classe C30. Apesar desse valor ser consideravelmente maior que os obtidos neste trabalho, os agregados utilizados por Bravo *et al.* (2015) apresentavam valores de absorção em torno de 9% e eram compostos por resíduos de concreto e cerâmica. Para concretos da classe C45, Medina *et al.* (2014) encontrou valores de absorção total de água em torno de 4,5% e massa específica próxima a 2300 kg/m³.

A Figura 6.14 apresenta a relação entre os valores de índice de vazios e de resistência à compressão dos concretos reciclados. É possível notar que quanto maior a resistência à compressão, menor é o valor do índice de vazios. Este índice de vazios está diretamente

relacionado ao fator a/c efetivo das misturas, ou seja, quanto maior o fator a/c efetivo, maior será o índice de vazios da mistura.

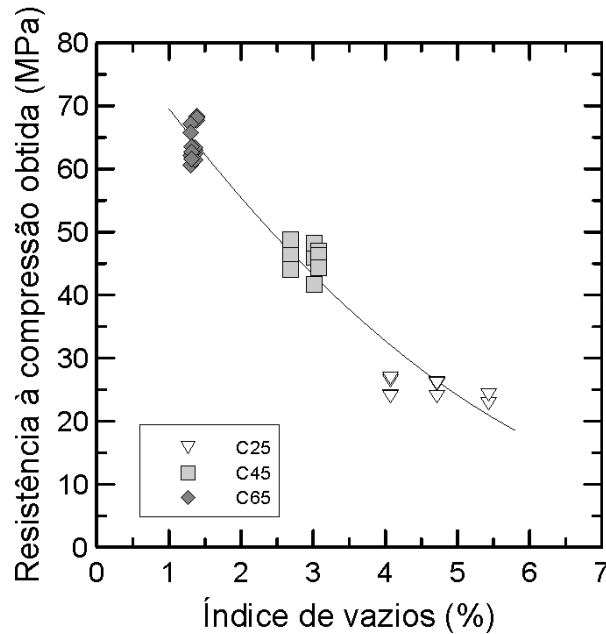


Figura 6.14 - Resistência à compressão aos 28 dias em função do índice de vazios dos concretos reciclados produzidos

Também é possível correlacionar a massa específica com o consumo de cimento de cada concreto produzido. Esta correlação é apresentada na Figura 6.15. Conforme esperado, quanto maior o consumo de cimento, maior será a massa específica do concreto. Este comportamento ocorre porque o cimento é o material que apresenta a maior massa específica dentre os materiais constituintes do concreto.

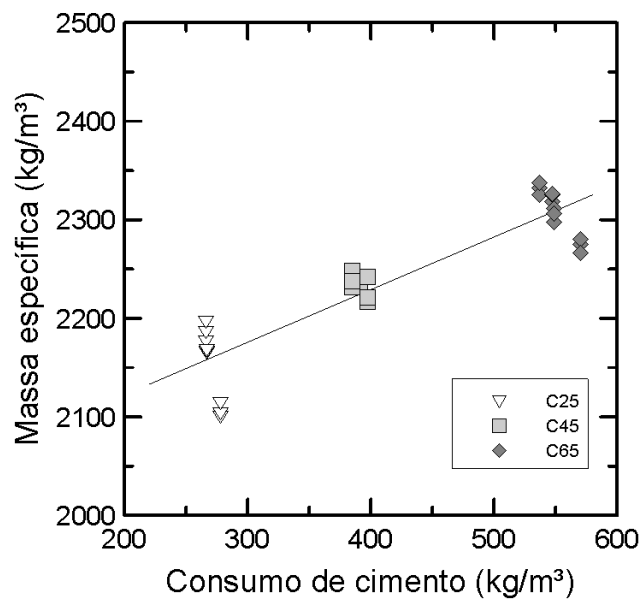


Figura 6.15 - Massa específica dos concretos reciclados em função do consumo de cimento

6.6. Absorção por capilaridade

A Tabela 6.6 apresenta os valores médios obtidos para absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas (28 dias) de ensaio.

Tabela 6.6 – Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Misturas	Absorção por capilaridade (g/cm ²)	
	72 horas	672 horas
C25-01100	0,57 (± 4,44)	1,24 (± 1,23)
C25-0120	0,41 (± 5,12)	0,92 (± 1,65)
C25-6080	0,35 (± 8,81)	0,76 (± 3,30)
C45-01100	0,22 (± 6,84)	0,45 (± 4,44)
C45-0120	0,23 (± 4,35)	0,47 (± 3,23)
C45-6080	0,21 (± 2,71)	0,46 (± 4,35)
C65-01100	0,10 (± 5,97)	0,24 (± 6,28)
C65-2040	0,11 (± 5,41)	0,26 (± 8,22)
C65-4060	0,11 (± 5,09)	0,26 (± 4,39)
C65-6080	0,11 (± 5,41)	0,27 (± 5,73)

É possível notar que a absorção por capilaridade é maior nos concretos da classe C25 e tende a diminuir conforme a resistência à compressão é aumentada. Esse comportamento já havia sido observado no ensaio de absorção de água por imersão, onde os concretos de menor resistência apresentam maior índice de vazios e, conseqüentemente, absorvem maior quantidade de água.

A análise estatística dos resultados de absorção de água por capilaridade após 72 horas de ensaio, para a classe C25, indicou que apenas o concreto C25-01100 apresentou diferença significativa em relação aos resultados obtidos para os outros dois concretos de mesma classe, sendo este valor igual a 0,57 g/cm². Após 672 horas de ensaio, todos

os valores obtidos para absorção desta classe podem ser considerados significativamente diferentes, sendo o concreto C25-6080 o que apresentou a menor absorção por capilaridade. Isso indica que apesar deste concreto ser o que apresenta maior quantidade de agregado reciclado, a absorção capilar é menor. Em estudo realizado por Bravo *et al.* (2015), os concretos da classe C30 produzidos por apresentaram absorção por capilaridade após 72 horas de ensaio em torno de 0,30 g/cm². Este valor é bem próximo aos obtidos para a classe C25, ainda mais considerando-se que são de classes resistência diferentes. Já para as classes C45 e C65, a análise estatística indicou que os concretos de mesma classe não apresentaram diferença significativa entre si, tanto para 72 horas quanto para 28 dias de ensaio. Isso mostra que para estas classes, o aumento do teor de utilização de agregado reciclado não afetou a absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos.

Os ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo para os concretos das classes C25, C45 e C65 são apresentadas na Figura 6.16, Figura 6.17 e Figura 6.18, respectivamente. Foram calculadas as absorvidades de cada mistura a partir do coeficiente angular das curvas de ajuste linear. As absorvidades dos concretos das três classes de resistência, determinadas tanto no estágio de absorção (S1) quanto no estágio de saturação (S2), bem como seus pontos de transição (P_T) estão apresentados na Tabela 6.7.

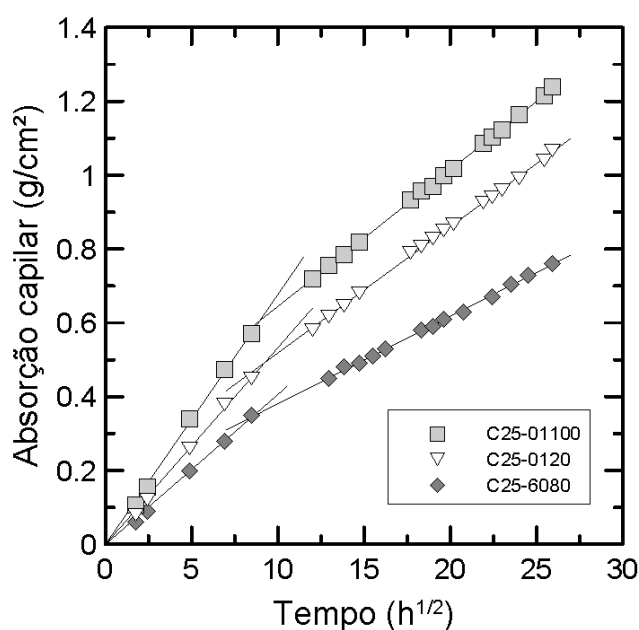


Figura 6.16 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C25

É possível notar que, para a classe C25, a absorptividade, tanto no estágio de absorção quanto no de saturação é maior no concreto C25-01100 e menor para o concreto C25-6080.

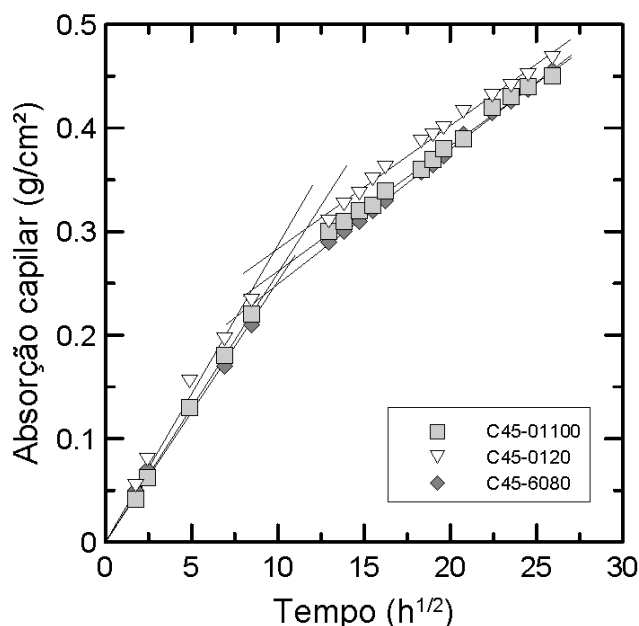


Figura 6.17 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C45

Para a classe C45, observar-se que não houve diferença significativa na absorptividade, tanto do estágio de absorção, quanto do estágio de saturação. Isto indica o aumento do teor de utilização de agregado reciclado, não influencia na absorptividade dos concretos. Ainda é possível notar, pela Figura 6.17, que seria possível realizar o mesmo ajuste linear para todos os valores de absorção por capilaridade dos três concretos desta classe com uma boa correlação.

Para os concretos da classe C65, foi observado que, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), também não há diferenças na absorptividade com relação ao teor de utilização de agregado reciclado. Neste caso, também seria possível realizar um único ajuste linear, para todos os valores de absorção capilar dos quatro concretos analisados.

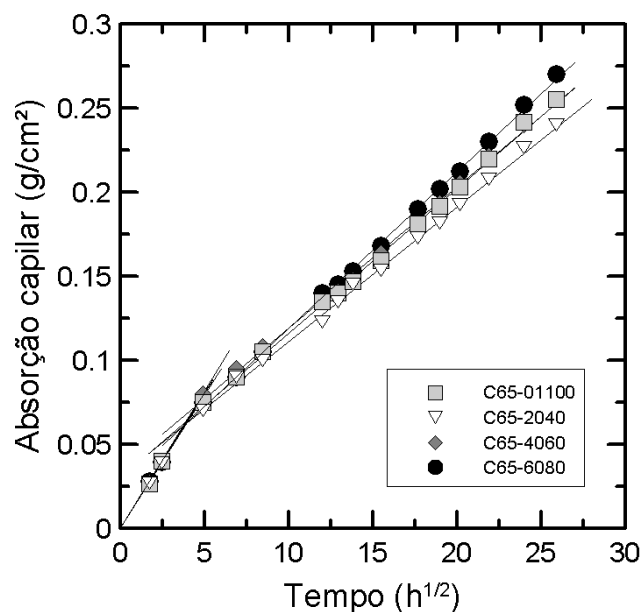


Figura 6.18 - Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo nos concretos da classe C65

Tabela 6.7 – Valores dos pontos de transição e absorvidade dos concretos produzidos

Misturas	Ponto de transição (P _T)		Absorvidade (g/cm ² .h ^{1/2})	
	g/cm ²	h ^{1/2}	S1	S2
C25-01100	0,606	8,95	0,068	0,037
C25-0120	0,493	9,24	0,053	0,034
C25-6080	0,345	8,50	0,041	0,024
C45-01100	0,263	10,13	0,026	0,012
C45-0120	0,281	9,79	0,029	0,012
C45-6080	0,246	9,77	0,025	0,013
C65-01100	0,063	3,97	0,016	0,008
C65-2040	0,065	4,04	0,016	0,009
C65-4060	0,072	4,43	0,016	0,008
C65-6080	0,061	3,80	0,016	0,009

Adicionalmente, é válido comparar o comportamento típico dos concretos de cada classe de resistência. Essa comparação é apresentada na Figura 6.19. É possível perceber que quanto menor a resistência, maior é a absorvidade tanto no estágio de absorção quanto no estágio de saturação. Isto significa que o concreto de resistência normal absorve água por capilaridade com uma velocidade maior que os concretos de alto resistência.

Outra observação importante é que o concreto da classe C65 atinge o estágio de saturação mais rapidamente que os concretos de classes menores. Como no estágio de absorção, o fluxo de água ocorre, principalmente, nos poros aprisionados e capilares maiores, isto indica que os concretos da classe C65 apresentam uma quantidade menor desses poros, alcançando mais rapidamente o ponto de transição.

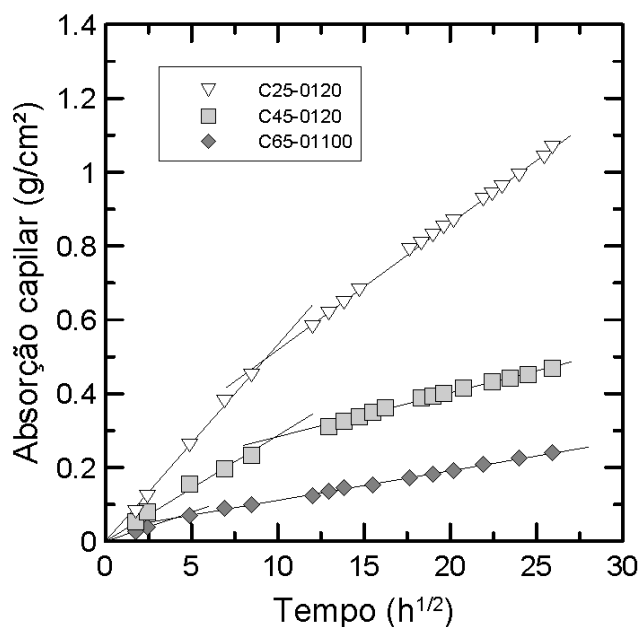


Figura 6.19 - Ajustes lineares das curvas típicas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo para cada classe de resistência

6.7. Permeabilidade à gás nitrogênio

A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de permeabilidade à gás nitrogênio. Nela são apresentados os valores de permeabilidade intrínseca (m²) e o coeficiente de permeabilidade (m/s) para os concretos produzidos e seus respectivos coeficientes de variação. Foram realizados 10 ensaios em cada amostra (separadas em topo, meio e base), de cada concreto produzido.

Tabela 6.8 – Permeabilidade intrínseca (m²) e coeficiente de permeabilidade (m/s) dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

	Permeabilidade intrínseca (m²)	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	Coeficiente de variação (%)
C25-01100	3,39.10 ⁻¹⁶	2,38. 10 ⁻¹⁰	8,40
C25-0120	3,15.10 ⁻¹⁶	2,21. 10 ⁻¹⁰	9,44
C25-6080	3,61.10 ⁻¹⁶	2,53. 10 ⁻¹⁰	5,53
C45-01100	8,88. 10 ⁻¹⁷	6,24. 10 ⁻¹¹	4,91
C45-0120	8,05. 10 ⁻¹⁷	5,65. 10 ⁻¹¹	6,24
C45-6080	8,42. 10 ⁻¹⁷	5,91. 10 ⁻¹¹	9,23
C65-01100	3,63. 10 ⁻¹⁷	2,55. 10 ⁻¹¹	4,84
C65-2040	3,56. 10 ⁻¹⁷	2,50. 10 ⁻¹¹	8,02
C65-4060	3,75. 10 ⁻¹⁷	2,64. 10 ⁻¹¹	3,86
C65-6080	6,69. 10 ⁻¹⁷	4,70. 10 ⁻¹¹	8,72

É possível notar que o aumento da classe de resistência do concreto provoca uma diminuição na permeabilidade à gás do concreto reciclado. Este comportamento já havia sido observado através dos ensaios de absorção total por imersão e absorção por capilaridade, onde os concretos com maiores classes de resistência apresentaram valores menores para absorção, tanto total quanto capilar, e para índices de vazios. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resistência e a permeabilidade estão relacionadas entre si através da porosidade capilar, então é possível dizer que os fatores que influenciam a resistência do concreto também influenciam sua permeabilidade. Assim, pode-se reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia, utilizando-se uma baixa relação água/cimento, um consumo apropriado de cimento e uma cura e adensamentos adequados. Porém, vale destacar que a principal causa da elevada permeabilidade em concretos é a microfissuração na zona de transição na interface pasta/agregados. Por isso, é recomendado que se tenha cuidado com deformações causadas por retrações térmicas e por secagem e carregamentos prematuros ou excessivos, que podem comprometer a permeabilidade do concreto.

A análise estatística, realizada através do teste de Tukey, dos resultados de permeabilidade à gás nitrogênio, para a classe C25, indicou que tanto as permeabilidades intrínsecas como os coeficientes de permeabilidade dos concretos

reciclados não apresentaram diferenças significativas, a um nível de significância igual a 0,05. Este comportamento também foi observado para os concretos da classe C45.

Já para a classe C65, o concreto C65-6080 apresentou valores de permeabilidade intrínseca e coeficiente de permeabilidade maiores que os outros concretos da mesma classe. Acredita-se que este comportamento pode ter sido provocado pela microfissuração na zona de transição, provavelmente ocasionado por algum carregamento prematuro durante o processo de desmoldagem ou cura dos concretos.

Em estudo realizado por Thomas *et al* (2013) foi analisada a durabilidade e as propriedades mecânicas de concretos reciclados. Apesar do ensaio de permeabilidade à gás ter sido realizado com gás oxigênio, a permeabilidade intrínseca obtida foi próxima a 2.10^{-17} m², para concretos de classe C55, enquanto os concretos de classe C30 apresentaram valores em torno de 8.10^{-17} m². Zong *et al.* (2014) encontrou valores de permeabilidade ao ar próximos a 3.10^{-17} m², para concretos de classe C40. Em geral, a permeabilidade à gás obtida neste estudo foi ligeiramente maior que os valores encontrados na literatura, porém diversos são os fatores que influenciam nesta propriedade, já citados anteriormente.

Capítulo 7

Conclusões

Com base nos resultados apresentados nesta dissertação conclui-se que é possível produzir concretos de resistência normal e de alta resistência com diferentes teores de agregados graúdos reciclados sem que suas propriedades mecânicas e de durabilidade sejam prejudicadas. A dosagem pelo modelo de empacotamento compressível (MEC), juntamente com o estudo de compensação de água de absorção dos agregados reciclados, foram fundamentais para que isto ocorresse.

O estudo de elevação adiabática de temperatura, juntamente com ensaios de compressão aos 7 dias e abatimento de tronco de cone, mostraram que a quantidade ideal de água de absorção do agregado reciclado equivale a 50% da absorção total de água após 24 horas, que é equivalente a quantidade de água absorvida em torno de 3 minutos de contato água-agregado.

O MEC se mostrou um método de dosagem muito adequado para a composição de traços de concretos com agregados reciclados, pois leva em consideração as diferentes propriedades de cada um dos agregados para o cálculo da dosagem. Além disso, a escolha por desenvolver traços diferentes para cada teor de agregado reciclado também foi acertada, sendo possível comparar o comportamento dos concretos dosados para uma mesma resistência e abatimento.

Com relação a reologia, o abatimento de tronco de cone obtido experimentalmente não foi correspondente ao previsto pelo programa *Betonlab Pro 3*. Como esta ferramenta computacional não apresenta parâmetros que levem em consideração a capacidade de aumentar a trabalhabilidade dos concretos, não há sentido em realizar esta comparação. Ainda neste ensaio, foi observada uma tendência a aumentar a trabalhabilidade, quanto maior o teor de Brita ARC utilizada. Este comportamento foi explicado devido a forma mais arredondada apresentada pelo agregado reciclado, ocasionado pelo processo de britagem e pela menor quantidade de finos, quando comparado ao agregado natural.

A resistência à compressão uniaxial obtida experimentalmente apresentou elevada correlação (0,9968) com os valores previstos pelo programa, assim conclui-se que o MEC foi aplicado com sucesso no desenvolvimento de concretos reciclados de diferentes classes de resistência. O módulo de elasticidade não foi estimado pelo programa por falta de informações relacionadas ao módulo de elasticidade dos agregados. Porém, através da equação sugerida pela NBR 6118 (2014), foi possível estimar os valores de módulo para cada um dos agregados presentes na norma e avaliar qual seria o comportamento mais semelhante ao apresentado pelo agregado reciclado. Concluiu-se que, apesar de não existir uma equação para agregados reciclados, o material em estudo apresentou comportamento semelhante aos agregados provenientes de arenitos.

O aumento do teor de agregado reciclado em cada mistura não influenciou, de um modo geral, a resistência à tração por compressão diametral para cada classe de resistência. Além disso, a relação f_t/f_c diminuiu à medida que a classe de resistência aumenta.

Já em relação a massa específica, o aumento do teor de utilização de agregado reciclado provoca uma diminuição desta propriedade, especialmente para os concretos das classes C25 e C65, devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado. Outra observação importante foi a respeito da ligação entre índice de vazios, fator a/c efetivo e classe de resistência dos concretos, onde quanto maior é a resistência, menor é o fator a/c efetivo e, conseqüentemente, menor é o índice de vazios. Para a classe C25, foi observado que a absorção total de água tende a ser maior nos concretos que apresentam maior quantidade de agregado reciclado.

Os resultados de absorção de água por capilaridade indicaram que o aumento do teor de utilização de agregado reciclado não afetou esta propriedade. Porém, quanto menor a classe de resistência dos concretos, maior é a absorção por capilaridade. Esta tendência já tinha sido observado para absorção total e índice de vazios.

Os ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade mostraram que tanto a absorvidade do estágio de absorção (S1) quanto a absorvidade do estágio de saturação são maiores para os concretos da classe C25. Isto significa que o concreto de resistência normal absorve água por capilaridade com uma velocidade maior que os concretos de alta resistência nos dois estágios.

A permeabilidade à gás nitrogênio dos concretos reciclados diminui conforme se aumenta a classe de resistência. Além disso, os concretos de mesma classe não apresentaram diferenças de permeabilidades significativas, podendo-se concluir que o teor de agregado reciclado não afetou na permeabilidade à gás dos concretos reciclados.

De forma geral, conclui-se que a variação do teor de agregado reciclado não apresentou influência significativa nas propriedades estudadas. Assim, o uso de agregados graúdos reciclados pode ser considerado viável, em diferentes teores de utilização, desde que seja realizado um estudo de dosagem, avaliando a melhor quantidade de água de absorção a ser considerada para cada tipo de agregado reciclado. Além disso, o modelo de empacotamento compressível mostrou-se um excelente método para estimar as propriedades mecânicas dos concretos e considerar as diferentes características dos agregados nos cálculos de dosagem.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho foram realizadas diversas dosagens de concreto pelo Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), porém somente dez traços foram caracterizados experimentalmente. Apesar deste modelo ter sido considerado um ótimo modelo para dosagem e previsão de propriedades mecânicas de concretos reciclados, seria interessante que fosse realizada uma comparação experimental com concretos dosados por outros métodos, para avaliar qual procedimento se aplica melhor para a dosagem de concretos reciclados.

Com relação a novas dosagens de concretos reciclados, acredita-se que o desenvolvimento de concretos auto adensáveis contribuiria de forma significativa para o avanço tecnológico na área estrutural, já que elementos de concreto densamente armados necessitam que as misturas de concreto fresco sejam bem fluidas, evitando-se o uso de vibradores mecânicos.

Uma observação constatada durante o estudo é que apenas o ensaio de abatimento de tronco de cone não é capaz de caracterizar integralmente o comportamento do concreto no estado fresco. Seria importante avaliar o teor de ar aprisionado e tempo de VeBe. Além disso, seria útil determinar a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, através do ensaio em um reômetro.

Um estudo da microestrutura do concreto reciclado também poderia ser realizado, através da utilização de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de imagens, avaliando o comportamento da interface pasta/agregado e sua influência nas propriedades mecânicas.

Também seria interessante o desenvolvimento de um estudo mais aprofundado a respeito da durabilidade de concretos reciclados. Neste estudo, foram avaliadas propriedades como absorção por capilaridade e permeabilidade à gás nitrogênio, mas seria importante a complementação da pesquisa com ensaios de penetração acelerada de íons cloreto, ataque por sulfatos, reação álcali-agregado e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Estudos de estabilidade dimensional também poderiam ser realizados em concretos de diferentes classes de resistência e diferentes teores de utilização de agregados reciclados, através de ensaios como fluência, retração autógena e retração por secagem.

A inclusão de agregados miúdos reciclados em concretos e sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade também poderiam ser estudadas.

Por fim, também seria importante avaliar a viabilidade econômica do uso de agregados reciclados em concretos, considerando os custos com gerenciamento e implantação de programas de reciclagem de resíduos na produção de concretos reciclados, em comparação com o custo da produção de concretos convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE, 2013, “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2013”. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil.

ACI E-701, 2007, *Aggregates for Concrete*. ACI Education Bulletin E1-07, Materials for Concrete Construction.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A., 2002, “Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC”. *Cement & Concrete Composites*, v. 24, pp. 269-279.

ANDREU, G.; MIREN, E., 2014, “Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 52, pp. 227-235.

ÂNGULO, S. C., 2005, *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

ANGULO, S.; ULSEN, C.; CARRIJO, P.; SILVA, R; JOHN, V; KAHN, H, 2004, “Characterization of Brazilian Construction and Demolition Waste Coarse Recycled Aggregate”. *RILEM Publications SARL*, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregado graúdo – Determinação da massa específica aparente e absorção de água*. NBR NM 53, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*. NBR NM 30, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. NBR NM 52, Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. NBR 15116, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos*. NBR 15115, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. NBR 9778, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. NBR 9779, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo*. NBR NM 18, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. NBR 7215, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. NBR NM 23, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. NBR 8522, Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Concreto e argamassa – Determinação da elevação adiabática de temperatura – Método de ensaio*. NBR 12819, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação*. NBR 15112, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Resíduos sólidos – Classificação*. NBR 10004, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação*. NBR 15114, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação*. NBR 15113, Rio de Janeiro, 2004.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K., 1993, “Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates”. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 9, pp. 109-126.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M., 2010, *Caracterização físico-química e mecânica de pastas de cimentação fibrosas*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BAZUCO, R. S., 1999, *Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

BECERRA CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; MOLIN, D. C. C. D.; RIBEIRO, J. L. D., 2010, “Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 24, pp. 421-430.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, A. G., 2008, *Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS*. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v.8, n.3 (jul./out.), pp. 65-76.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L., 2015, “Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants”. *Construction and Building Materials*, v. 77, pp. 357-369.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L., 2015, “Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants”. *Journal of Cleaner Production*, v. 99, pp. 59-74.

BRITO FILHO, J. A., 1999, “Cidade versus entulho”. In: *Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, São Paulo, Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, pp. 56-67.

BS 8500-2, 2006, *Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Specification for constituent materials and concrete*. British Standards Institution, London, UK.

CABRAL, A. E. B., 2007, *Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados considerando-se a variabilidade da composição do RCD*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

CAMPOS, A. R.; LUZ, A. B.; CARVALHO, E. A., 2004, “Separação em meio denso”. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M., *Tratamento de minérios*, CETEM, 4ª ed. rev., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CAPELLO, G., 2006, “Entulho vira matéria prima: agregados reciclados chegam aos canteiros das construtoras, adquiridos de empresas especializadas ou gerados na própria obra”. *Revista Técnica*, São Paulo, Editora Pini, ano 14, n. 112 (jul.), p. 32-35.

CARNEIRO, A. P., 2001, *Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Projeto Entulho Bom-Salvador, EDUFBA, Caixa Econômica Federal, 312p.

CARNEIRO, J. A., 2011, *Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Tecnologia, Feira de Santana, BA, Brasil.

CARNEIRO, J. A.; LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B.; TOLEDO FILHO, R. D., 2014, “Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete”. *Cement & Concrete Composites*, v. 46, pp. 65-72.

CARRIJO, P. M., 2005, *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil.

CASUCCIO, M.; TORRIJOS, M. C.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R., 2008, “Failure mechanism of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 22, pp. 1500-1506.

CCAA, 2008, *Use of Recycled Aggregates in Construction*. Cement Concrete Aggregates, Australia.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução CONAMA nº 307, 5 de julho de 2002.

CORDEIRO, G. C., 2006, *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CORINALDESI, V., 2010, “Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates”. *Construction and Building Materials*, v. 24, pp. 1616-1620.

DAfStb, 1998, *Guideline of the German Committee for Reinforced Concrete*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Germany.

DE LARRARD, F., *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999.

DE LARRARD, F., *Formulation et Propriétés des Bétons à Très Hautes Performances*. Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC N° 149, March 1988, Paris.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J., 2007, "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement & Concrete Composites*, v. 29, pp. 397-401.

FAGURY, S. C.; GRANDE, F. M., 2007, "Gestão de resíduos de construção e demolição (RCD) – aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP". *Exacta*, São Paulo, v. 5 (jan./jun.), n.1, pp. 35-45.

FERNANDEZ, J. A. B., 2011, *Relatório preliminar da situação atual dos resíduos sólidos no Brasil – Resíduos da construção civil*. IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Programa de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional – PNPd, Relatório III, MG, Brasil.

FORMAGINI, S., 2005, *Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GRUBE, H.; LAWRENCE, C. D., 1988, "Permeability of concrete to oxygen". RILEM Seminar on Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, University of Hanover, Hanover, Germany, 1988, pp. 68-79.

HANSEN, T. C., "Recycled of demolished concrete and masonry". *Chapman & Hall*, Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160, (RILEM TC Report 6), London, 1992.

HKBD, 2004, *Code of practice for demolition of buildings*. Hong Kong Buildings Department, China.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C., 2003, "Metodologia para o desenvolvimento de reciclagem de resíduos". In: JOHN, V. M.; ROCHA, J. C., *Utilização de resíduos na construção habitacional*, Porto Alegre: ANTAC, 2003, v. 4, pp. 8-71.

JUNGMANN, A.; QUINDT, J., “Allgig – Technology for separation of building rubble”. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. Thomas Telford Pub, pp. 45-53, London, 1998.

KOU, S.; POON, C., 2015, “Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v.77, pp. 501-508.

LATTERZA, L. M.; MACHADO Jr., E. F., “Aplicação do concreto de agregado reciclado (D_{máx} =9,5 mm) na fabricação de painéis leves de vedação”. In: *Congresso Brasileiro de Concreto*, IBRACON, Salvador, BA, Brasil, 1999.

LEITE, M. B., 2001, *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

LIMA, C.; CAGGIANO, A.; FAELLA, C.; MARTINELLI, E.; PEPE, M.; REALFONZO, R., 2013, “Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash”. *Construction and Building Materials*, v. 47, pp. 547-559.

LIMA, J. A. R., 1999, *Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

LINS, F. A. F., 2004, “Concentração gravítica”. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M., *Tratamento de minérios*, CETEM, 4ª ed. rev., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LLATAS, C., “Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste”. In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; DE BRITO, J., *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, number 47, Woodhead Publishing Limited, pp. 25-52, Philadelphia, USA, 2013.

MACHADO Jr., E. F.; LATTERZA, L. M.; MENDES, C. L., “Influência do agregado graúdo proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda do abatimento do concreto fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido”. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 40., Rio de Janeiro, IBRACON, 1998.

MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIGNOZZI, M. C., 2013, “Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate”. *Cement & Concrete Composites*, v.37, pp. 312-318.

MARTINS, A. P. S., 2014, *Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDINA, C.; ZHU, W; HOWIND, T.; DE ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M., 2014, “Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete”. *Journal of Cleaner Production*, v. 68, pp. 216-225.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. IBRACON, tradução da 3ª edição em inglês, v.1:III, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

MIRANDA, C. R., 2008, *Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química*. Tese de doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D., 2009, “A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986 – 2008”. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.9 (jan./mar.), n.1, pp. 57-71.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S., 2006, “CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties”. *Construction and Building Materials*, v. 20, pp. 615-624.

MOREIRA, L. H. H., 2010, *Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, Brasil.

MULLER, A., 2004, “Lightweight aggregates from masonry rubble”. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 8–11 November, Barcelona.

NEVILLE, A. M., *Propriedades do Concreto*. Pini, 2 ed., São Paulo, SP, Brasil, 1997.

NTC, 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Italian Ministry of Infrastructures and Transportation, Italia.

PADMINI, A. K., RAMAMURTHY, K., MATHEWS, M. S., 2009, “Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 829-836.

PEPE, M., 2015, *A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications*. Tese de doutorado, Università degli Studi di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Civile, Salerno, Italia.

POON, C.; CHAN, D., 2007, “Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates”. *Construction and Building Materials*, Hong Kong, v. 21, pp. 164-175.

RAHAL, K., 2007, “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate”. *Building and Environment*, v.42, pp. 407-415.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S., “Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete”. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, pp. 71-81, India, 2007.

RICCI, G., 2007, *Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

RILEM TC 121-DRG, 1994, “Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”. *Materials and Structures*, v.27 (Nov.), pp. 557-559.

ROCHA, C. A. A., 2008, *Estudo de concretos com adições minerais de resíduo de corte de rocha e de blocos cerâmicos moídos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

ROCHA, E. G. A., 2006, *Os resíduos sólidos de construção e demolição: gerenciamento, quantificação e caracterização. Um estudo de caso no Distrito Federal*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

SANTIAGO, E. Q. R., 2008, *Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil.

SILVA, A. S. M., 2004, *Dosagem de concreto pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury Modificado*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

TASDEMIR et al., 1998, “Evaluation of strains at peak stresses in concrete: a three-phase composite model approach”. *Cement & concrete composites*, v. 20, pp. 301-318.

TATTERSALL, G. H., 1976, “The workability of concrete”. *Cement and Concrete Association*.

TENÓRIO, J. J. L., 2007, *Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, AL, Brasil.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A.; ALAEJOS, P.; SÁNCHEZ DE JUAN, M., 2013, “Durability of recycled aggregate concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 40, pp. 1054-1065.

VAZ, A. P. R., 2013, *Comportamento de vigas reforçadas submetidas a carregamento cíclico*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VELASCO, R. V., 2008, *Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANG, S., 2014, “Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste”. *Journal of Cleaner Production*, v. 70, pp. 175-182.

ANEXO A: DOSAGEM DE CONCRETOS PELO PROGRAMA BETONLAB PRO 3

A.1. Banco dos constituintes

A primeira etapa para a dosagem dos concretos pelo programa *Betonlab Pro 3* é a criação do banco de dados dos materiais que serão utilizados. A seguir, é apresentada a sequência de preenchimento do banco de constituintes na seguinte ordem: areia natural, brita natural, Brita ARC, cimento CPV-ARI e superplastificante.

A.1.1. Areia Natural

A sequência de preenchimento das propriedades da areia natural é apresentada na Figura A.1, Figura A.2, Figura A.3, Figura A.4 e Figura A.5.

A janela "Propriétés du sable" apresenta os seguintes campos de entrada:

Propriedade	Valor
Coef. d'adhérence p	0,8092
Coef. plafond q (MPa ⁻¹)	0
Coef. de traction Kt (MPa ^{-0.43})	
Module élastique (GPa)	
Masse volumique (kg/m ³)	2405
Absorption d'eau (%)	0,45
Capacité thermique (kJ/K/Kg)	
% moyen d'alcalins actifs	
% maximum d'alcalins actifs	
Fines (inférieures à 80 µ)	
Nature	<input type="radio"/> Calcaires <input checked="" type="radio"/> Siliceuses
Dosage de saturation (%)	0,1

Botões de controle: Enregistrer, Annuler, Outils.

Figura A.1 – Propriedades gerais da Areia Natural

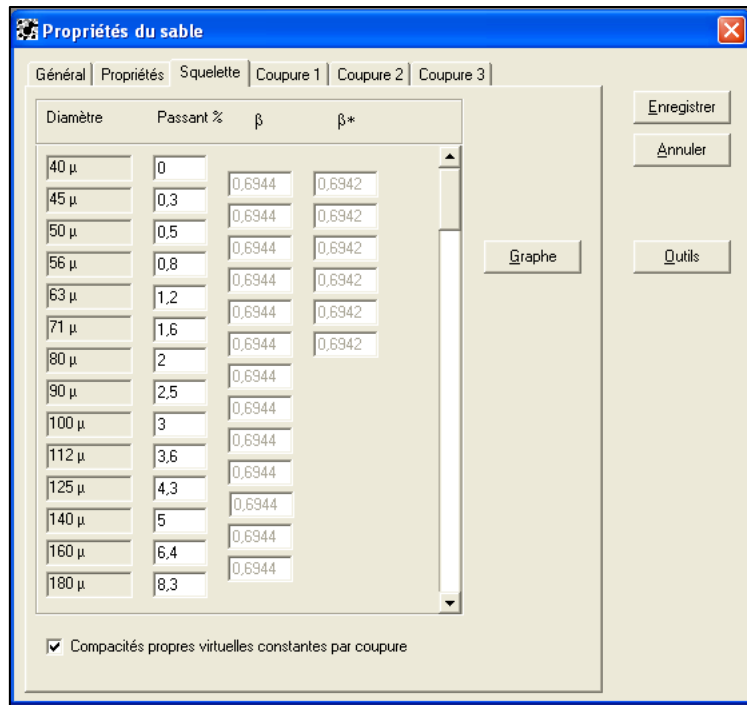


Figura A.2 – Composição granulométrica da Areia Natural

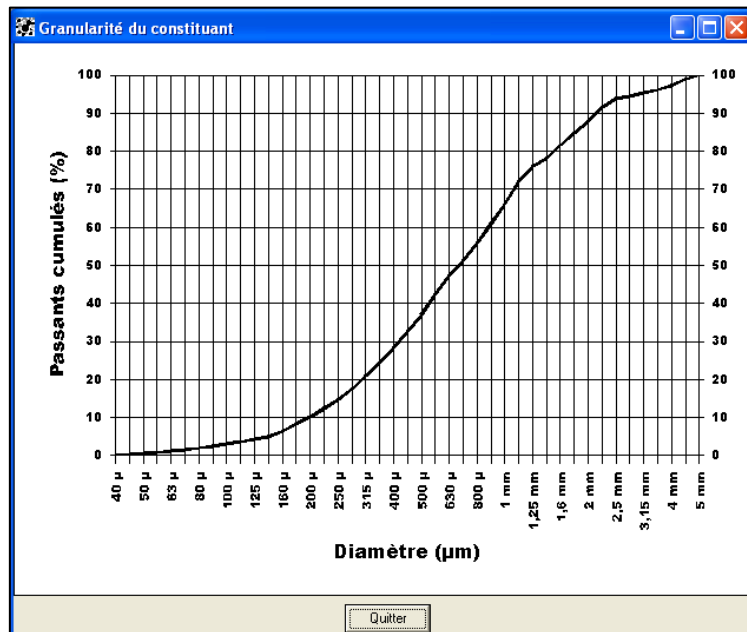


Figura A.3 – Curva granulométrica da Areia Natural

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3

Coupure 40 μ / 1,12 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale 0,741

Indice de serrage 9

Confinement Cylindre

Entrer les dimensions du cylindre en mm \varnothing 160 H 320

A saturation

Compacité expérimentale 0,741

Indice de serrage 9

Confinement Cylindre

Entrer les dimensions du cylindre en mm \varnothing 160 H 320

Enregistrer

Annuler

Outils

Figura A.4 – Compacidade experimental da classe 1 da Areia Natural

Propriétés du sable

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3

Coupure 1,12 mm / 2,5 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale 0,753

Indice de serrage 9

Confinement Cylindre

Entrer les dimensions du cylindre en mm \varnothing 160 H 320

Enregistrer

Annuler

Outils

Figura A.5 – Compacidade experimental da classe 2 da Areia Natural

A.1.2. Brita Natural

A sequência de preenchimento das propriedades da brita natural é apresentada na Figura A.6, Figura A.7, Figura A.8, Figura A.9, Figura A.10 e Figura A.11.

Propriété	Valeur
Coef. d'adhérence p	0,9885
Coef. plafond q (MPa ⁻¹)	0,00466
Coef. de traction Kt (MPa ^{-0.43})	
Module élastique (GPa)	
Masse volumique (kg/m ³)	2639
Absorption d'eau (%)	1,2
Capacité thermique (kJ/K.Kg)	
% moyen d'alcalins actifs	
% maximum d'alcalins actifs	

Figura A.6 – Propriedades gerais da Brita Natural

Diamètre	Passant %	β	β*
80 μ	0	0,6891	
90 μ	0,2	0,6891	
100 μ	0,4	0,6891	
112 μ	0,6	0,6891	
125 μ	0,9	0,6891	
140 μ	1,2	0,6891	
160 μ	1,4	0,6891	
180 μ	1,4	0,6891	
200 μ	1,5	0,6891	
224 μ	1,6	0,6891	
250 μ	1,6	0,6891	
280 μ	1,7	0,6891	
315 μ	1,8	0,6891	
355 μ	1,8	0,6891	

Compacités propres virtuelles constantes par coupure

Figura A.7 – Composição granulométrica da Brita Natural

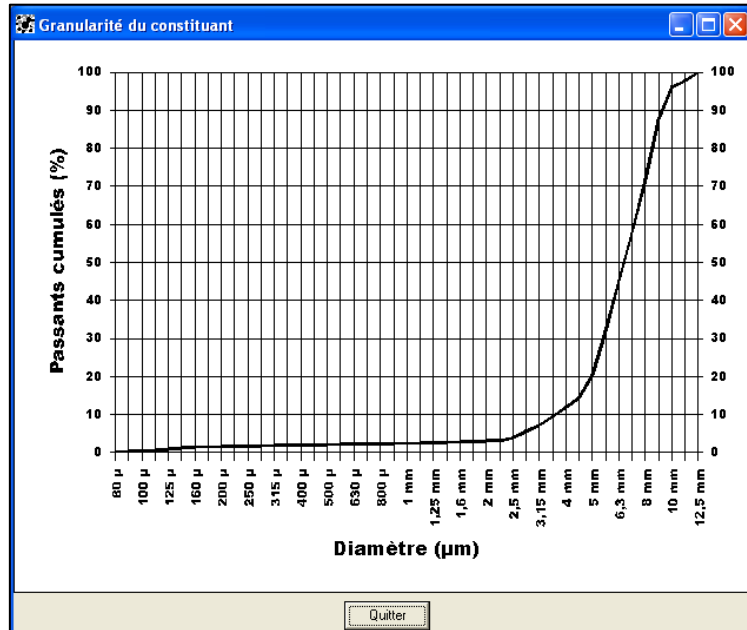


Figura A.8 – Curva granulométrica da Brita Natural

The software interface shows the experimental compaction parameters for class 1 natural sand. The 'Coupure' is set to 80 μ / 6,3 mm. The 'Sans adjuvant' section includes the following parameters:

- Compacité expérimentale: 0,679
- Indice de serrage: 9
- Confinement: Cylindre
- Enter les dimensions du cylindre en mm: Ø 160, H 320

Buttons for 'Enregistrer', 'Annuler', and 'Outils' are visible on the right side of the interface.

Figura A.9 – Compacidade experimental da classe 1 da Brita Natural

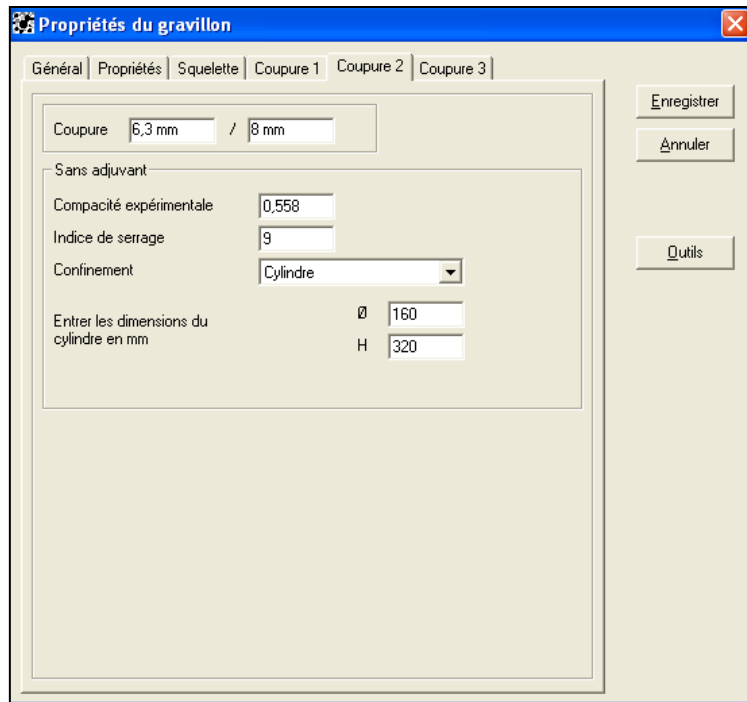


Figura A.10 – Compacidade experimental da classe 2 da Brita Natural

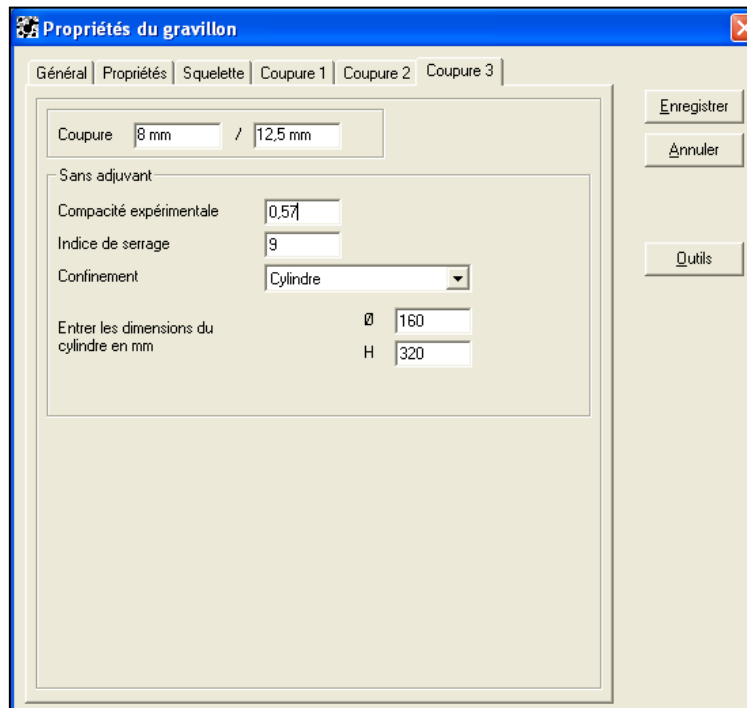


Figura A.11 – Compacidade experimental da classe 3 da Brita Natural

A.1.3. Brita ARC

A sequência de preenchimento das propriedades da Brita ARC é apresentada na Figura A.12, Figura A.13, Figura A.14, Figura A.15, Figura A.16 e Figura A.17.

Propriété	Valeur
Coef. d'adhérence p	0,9665
Coef. plafond q (MPa ⁻¹)	0,00666
Coef. de traction Kt (MPa ^{-0.43})	
Module élastique (GPa)	
Masse volumique (kg/m ³)	2571
Absorption d'eau (%)	3,65
Capacité thermique (kJ/K/Kg)	
% moyen d'alcalins actifs	
% maximum d'alcalins actifs	

Figura A.12 – Propriedades gerais da Brita ARC

Diamètre	Passant %	β	β*
80 μ	q	0,5282	
90 μ	0,2	0,5282	
100 μ	0,3	0,5282	
112 μ	0,5	0,5282	
125 μ	0,7	0,5282	
140 μ	0,9	0,5282	
160 μ	1,1	0,5282	
180 μ	1,1	0,5282	
200 μ	1,1	0,5282	
224 μ	1,2	0,5282	
250 μ	1,2	0,5282	
280 μ	1,2	0,5282	
315 μ	1,3	0,5282	
355 μ	1,3	0,5282	

Capacités propres virtuelles constantes par coupure

Figura A.13 – Composição granulométrica da Brita ARC

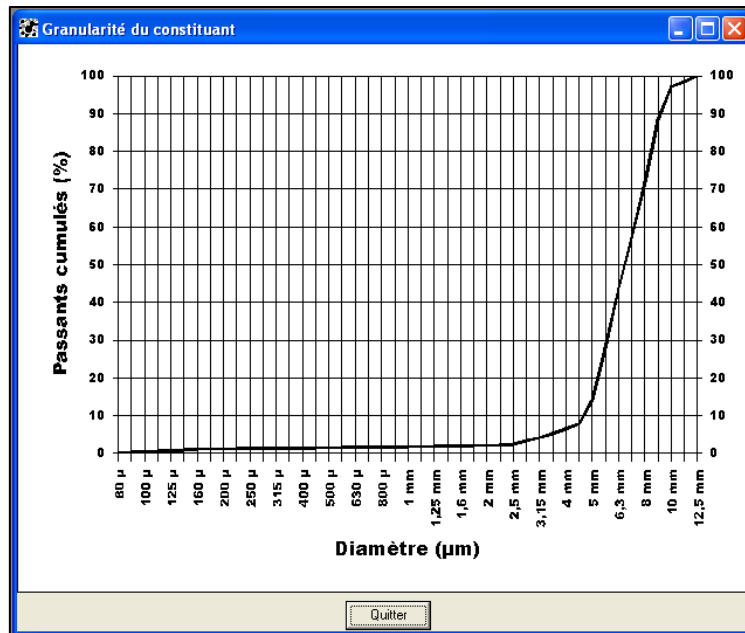


Figura A.14 – Curva granulométrica da Brita ARC

The software interface shows the following parameters for the experimental compaction of class 1 aggregate:

- Coupeure: 80 μ / 6,3 mm
- Sans adjuvant:
- Compacité expérimentale: 0,506
- Indice de serrage: 9
- Confinement: Cylindre
- Entrer les dimensions du cylindre en mm:
 - Ø: 160
 - H: 320

Figura A.15 – Compacidade experimental da classe 1 da Brita ARC

Propriétés du gravillon

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3

Coupure: 6,3 mm / 8 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale: 0,488

Indice de serrage: 9

Confinement: Cylindre

Entrer les dimensions du cylindre en mm: Ø 160, H 320

Enregistrer, Annuler, Outils

Figura A.16 – Compacidade experimental da classe 2 da Brita ARC

Propriétés du gravillon

Général | Propriétés | Squelette | Coupure 1 | Coupure 2 | Coupure 3

Coupure: 8 mm / 12,5 mm

Sans adjuvant

Compacité expérimentale: 0,501

Indice de serrage: 9

Confinement: Cylindre

Entrer les dimensions du cylindre en mm: Ø 160, H 320

Enregistrer, Annuler, Outils

Figura A.17 – Compacidade experimental da classe 3 da Brita ARC

A.1.4. Cimento CPV-ARI

A sequência de preenchimento das propriedades do cimento CPV-ARI é apresentada na Figura A.18, Figura A.19, Figura A.20, Figura A.21 e Figura A.22.

Constituants	
% Clinker (K)	95
% Cendre volante (V)	0
% Filler calcaire (L)	0
% Pouzzolane naturelle (Z)	0
% Laitier (S)	0
% Fumée de silice (D)	0
% Divers	5

Composition de Bogue	
% C3S	
% C2S	
% C3A	
% C4AF	
% Divers	
% moyen d'alcalins actifs	
% maximum d'alcalins actifs	

Figura A.18 – Composição química do cimento CPV-ARI

Classe vraie	
à 1 jour	
à 2 jours	
à 3 jours	31,8
à 7 jours	42,6
à 28 jours	49,9
à 90 jours	
à 360 jours	

Masse volumique (kg/m3)	3170
Capacité thermique (kJ/K/Kg)	
Dosage de saturation (%)	0,3
Retrait endogène	
Kc (MPa)	

Figura A.19 – Propriedades gerais do cimento CPV-ARI

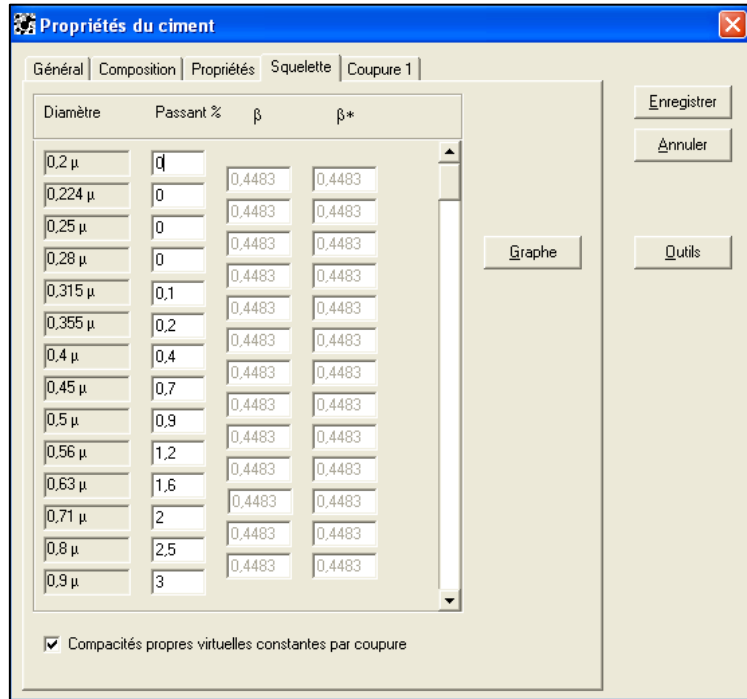


Figura A.20 – Composição granulométrica do cimento CPV-ARI

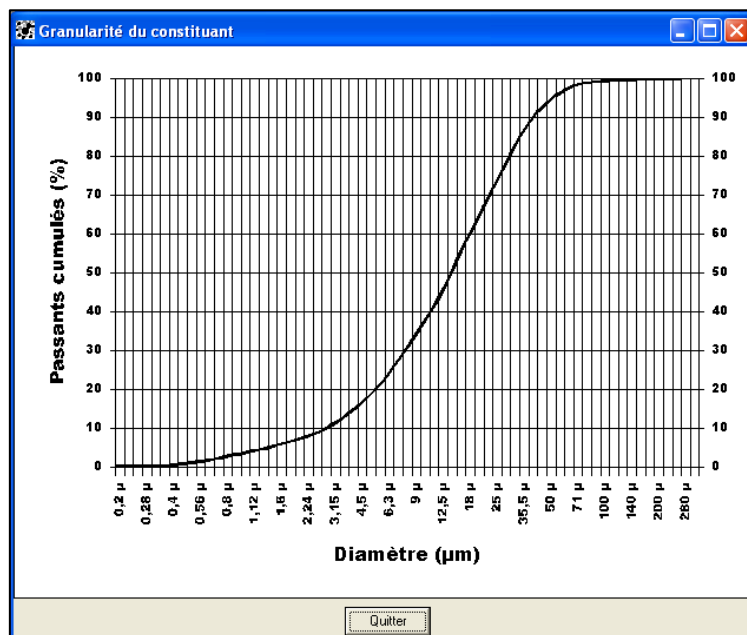


Figura A.21 – Curva granulométrica do cimento CPV-ARI

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Coupure 0,2 μ / 355 μ

Sans adjuvant

Compacité expérimentale 0,53

Indice de serrage 6,7

Confinement Aucun

A saturation

Compacité expérimentale 0,53

Indice de serrage 6,7

Confinement Aucun

Enregistrer

Annuler

Outils

Figura A.22 – Compacidade experimental do cimento CPV-ARI

A.1.4. Aditivo químico – Superplastificante

As propriedades do aditivo químico superplastificante utilizado no trabalho são apresentadas na Figura A.23.

Propriétés du superplastifiant

Général

Nom Glenium 51

Date 6/2/2015 08:25:41

Commentaires

Coût (Euro/kg)

Concentration solide (%) 30

Masse volumique (kg/l) 1,087

% moyen d'alcalins actifs

% maximum d'alcalins actifs

Enregistrer

Annuler

Figura A.23 – Propriedades do superplastificante Glenium 51

A.2. Calibração dos parâmetros “p” e “q” dos agregados

A segunda etapa para a utilização do programa Betonlab Pro 3 para a dosagem de concretos é a calibração dos parâmetros “p” e “q” (Figura A.24). O parâmetro “p” está relacionado a aderência dos grãos à pasta de cimento, enquanto o parâmetro “q” relaciona-se com a resistência intrínseca do agregado.

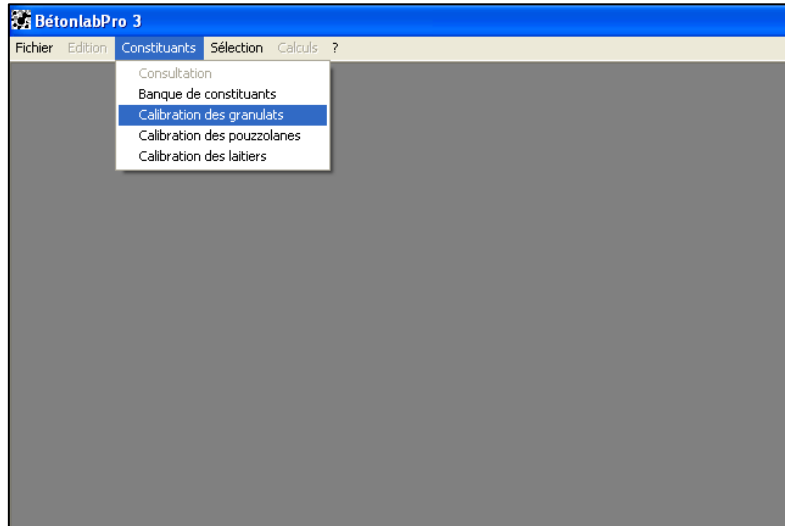
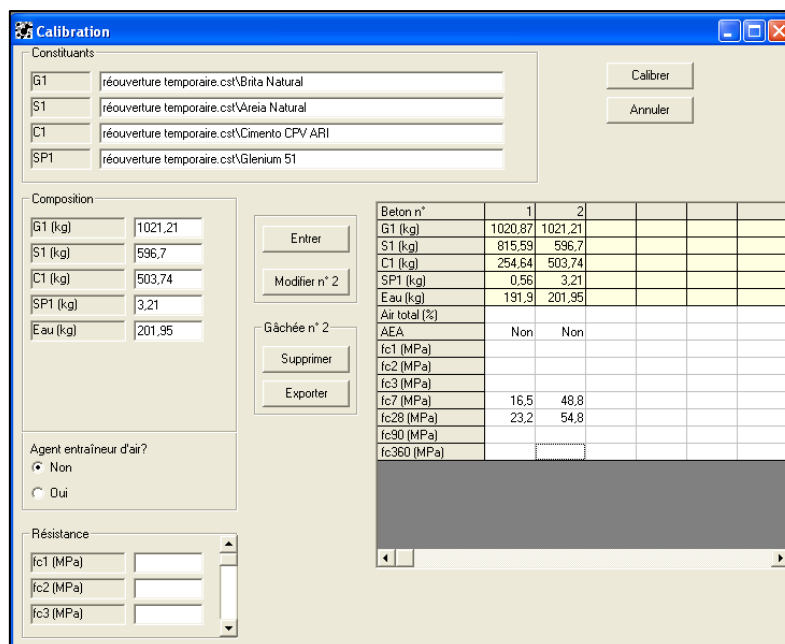


Figura A.24 – Calibração dos grãos da mistura

A Figura A.25 e a Figura A.26 apresentam as etapas para a calibração da Brita Natural.

The image shows the 'Calibration' dialog box. It is divided into several sections:

- Constituants:** Fields for G1, S1, C1, and SP1 with file paths like 'réouverture temporaire.cst\Brita Natural'.
- Composition:** Fields for G1 (kg), S1 (kg), C1 (kg), SP1 (kg), and Eau (kg) with values like 1021.21, 596.7, 503.74, 3.21, and 201.95.
- Agent entraîneur d'air?** Radio buttons for 'Non' (selected) and 'Oui'.
- Résistance:** Fields for fc1 (MPa), fc2 (MPa), and fc3 (MPa).
- Buttons:** 'Calibrer', 'Annuler', 'Entrer', 'Modifier n° 2', 'Gâchée n° 2', 'Supprimer', and 'Exporter'.
- Table:** A table with columns 'Béton n°' and two columns for values. The data is as follows:

Béton n°	1	2				
G1 (kg)	1020.87	1021.21				
S1 (kg)	815.53	596.7				
C1 (kg)	254.64	503.74				
SP1 (kg)	0.56	3.21				
Eau (kg)	191.9	201.95				
Air total (%)						
AEA	Non	Non				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	16.5	48.8				
fc28 (MPa)	23.2	54.8				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

Figura A.25 – Dados de entrada para calibração da Brita Natural

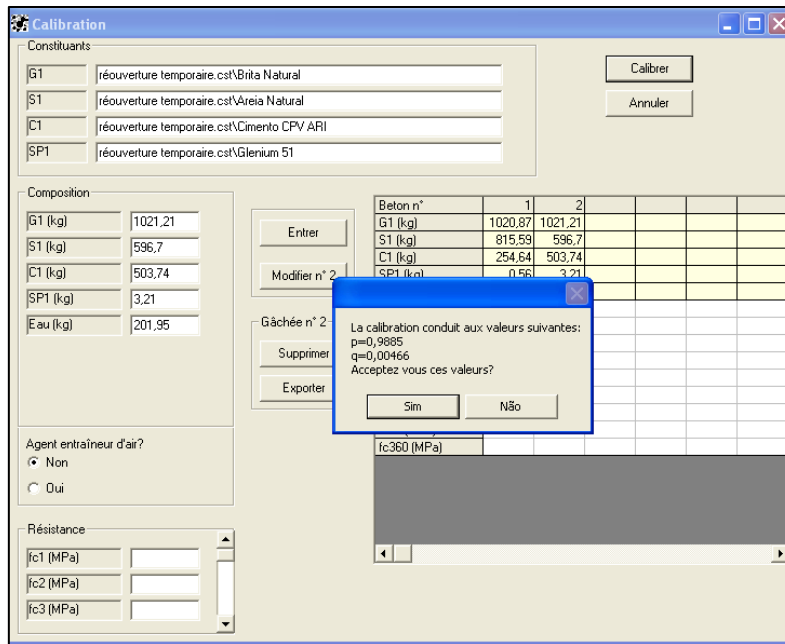


Figura A.26 – Valores de “p” e “q” obtidos para a Brita Natural

A Figura A.27 e a Figura A.28 apresentam as etapas para a calibração da Brita ARC.

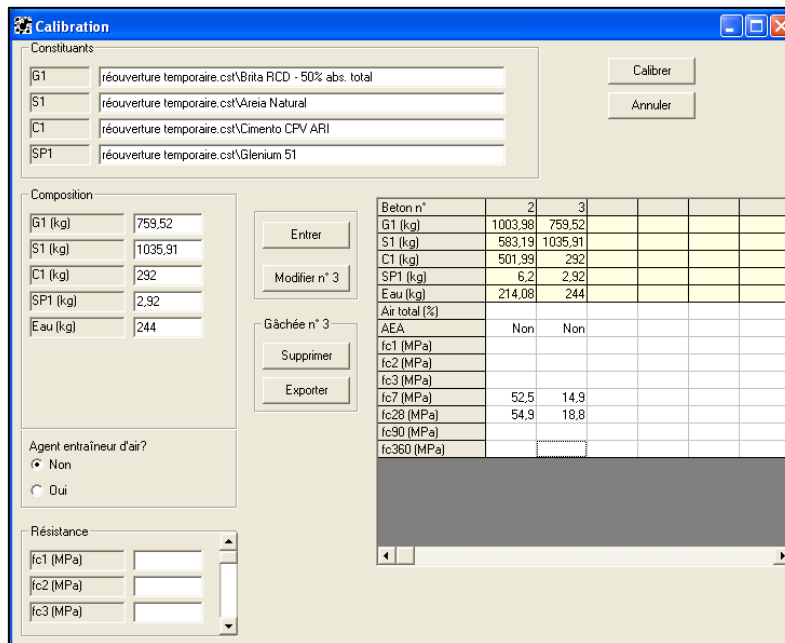


Figura A.27 – Dados de entrada para calibração da Brita ARC

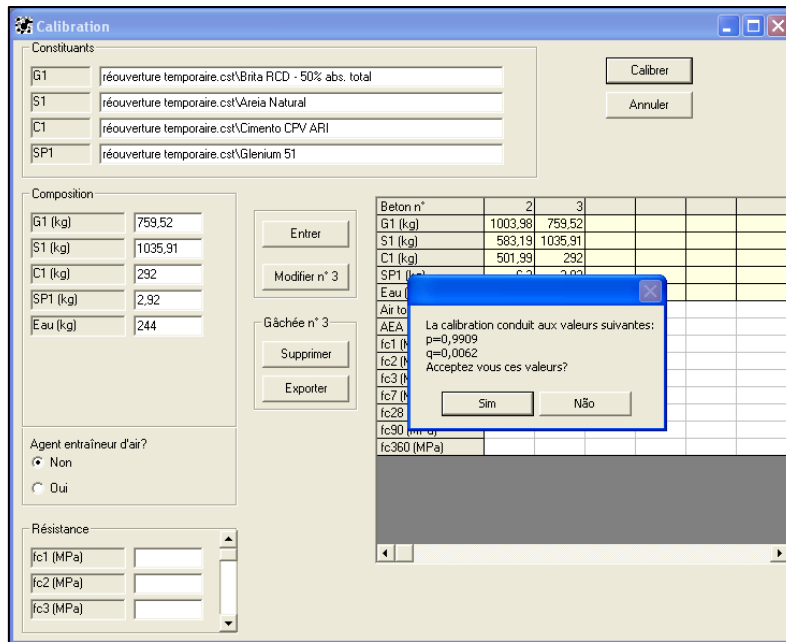


Figura A.28 – Valores de “p” e “q” obtidos para a Brita ARC

A Figura A.29 e a Figura A.30 apresentam as etapas para a calibração da Areia Natural.

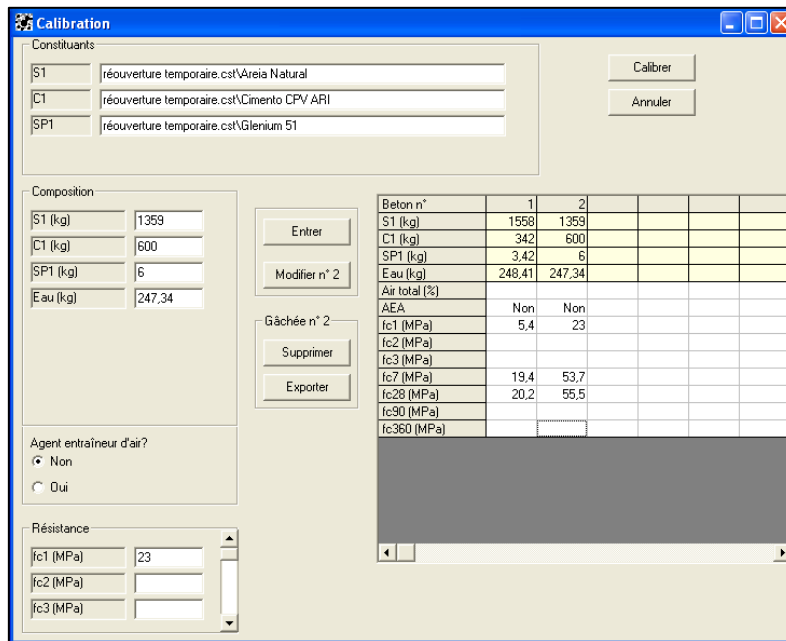


Figura A.29 – Dados de entrada para calibração da Areia Natural

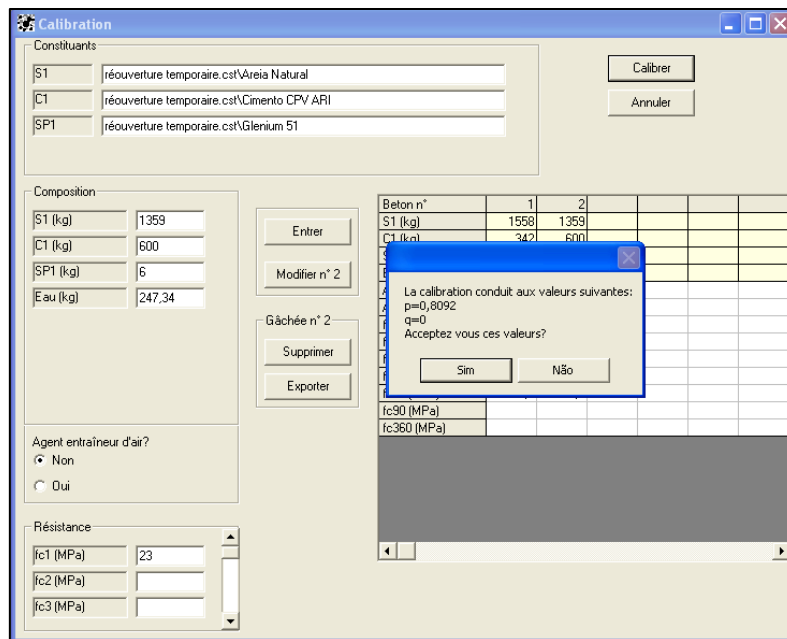


Figura A.30 – Valores de “p” e “q” obtidos para a Areia Natural

A.3. *Dosagens dos concretos*

Após a criação do banco de constituintes e calibração dos grãos, é possível iniciar a dosagem dos concretos (Figura A.31). Para isso, é necessário que o usuário selecione as propriedades que devem ser calculadas pelo programa (Figura A.32) e forneça uma composição de partida (Figura A.33). Posteriormente, o usuário pode definir os parâmetros que serão otimizados até que se chegue a dosagem desejada (Figura A.34).

A Figura A.35 apresenta os traços obtidos para os concretos da classe C25, enquanto a Figura A.36 apresenta as dosagens obtidas para os concretos da classe C45 e a Figura A.37 apresenta os traços para os concretos da classe C65.

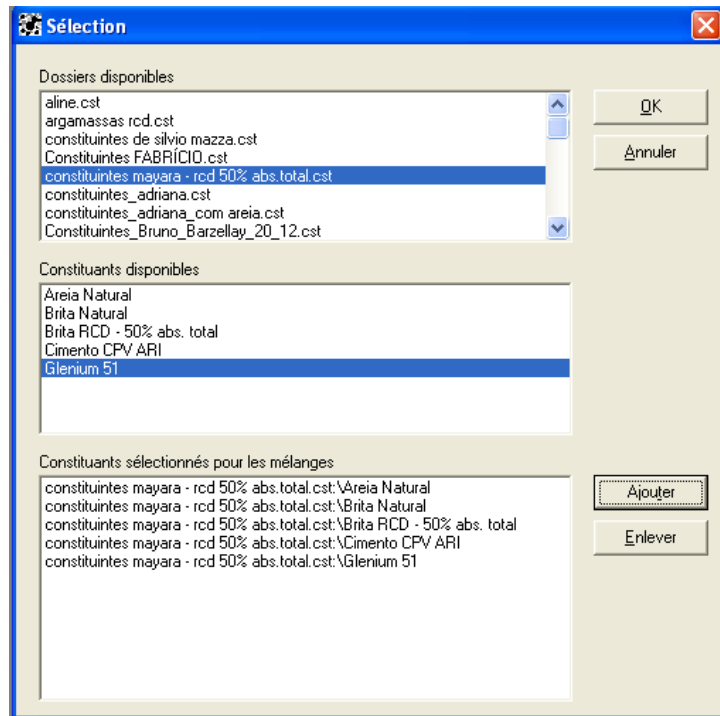


Figura A.31 – Seleção dos materiais constituintes do concreto a ser dosado

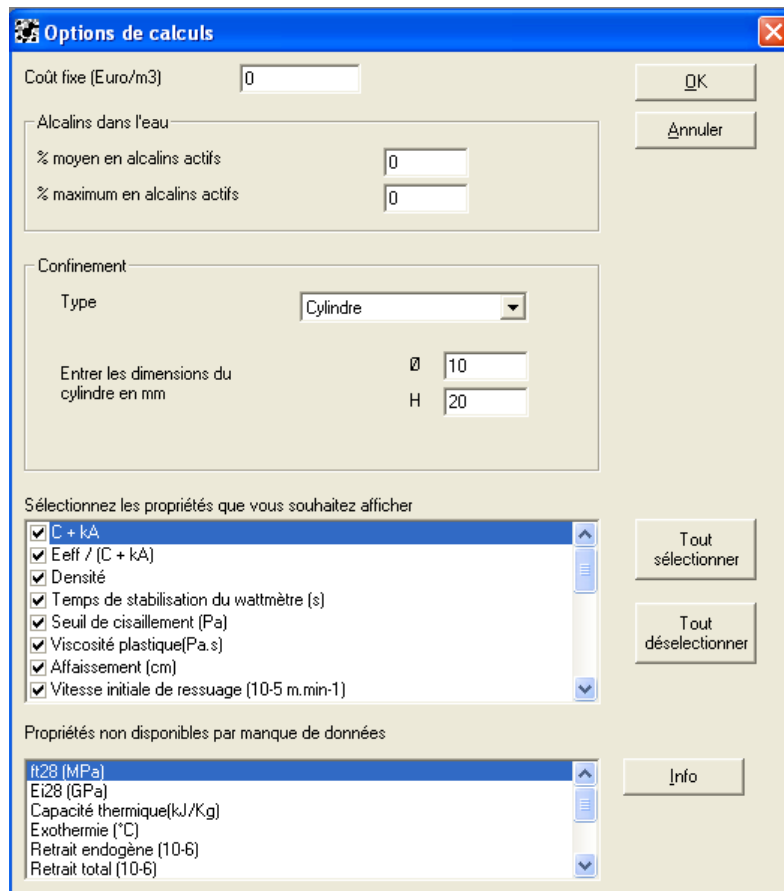


Figura A.32 – Escolha das propriedades a serem fornecidas pelo programa

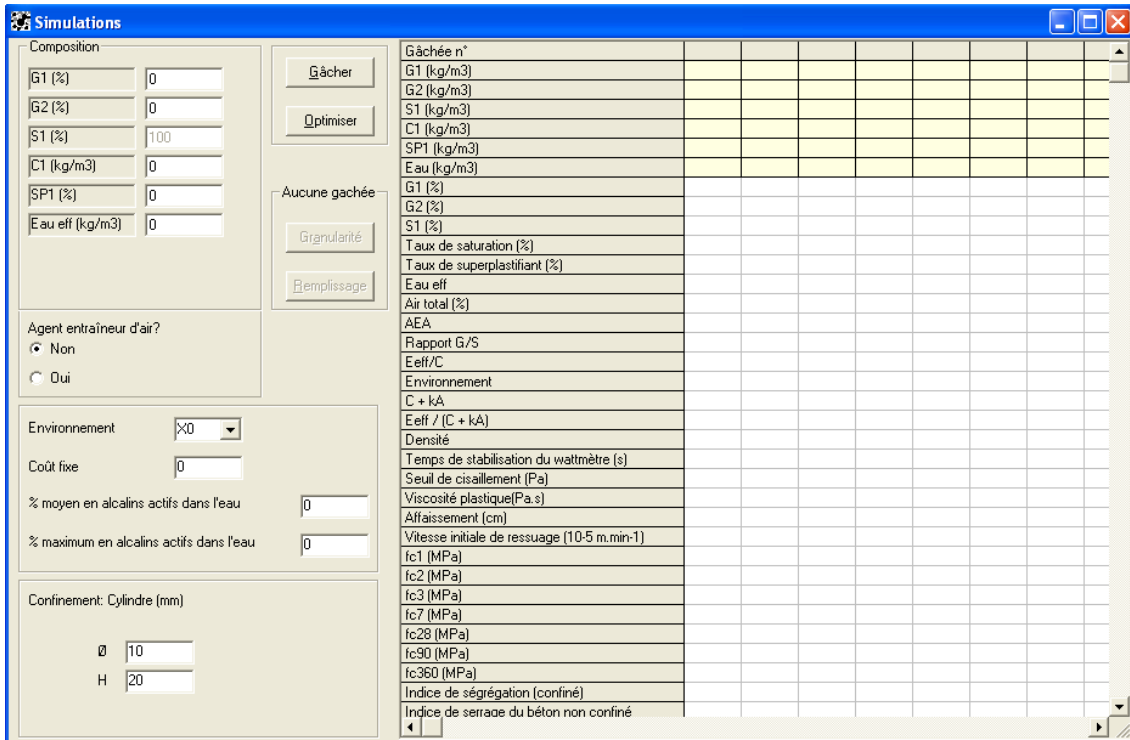


Figura A.33 – Tela inicial para a simulação das dosagens

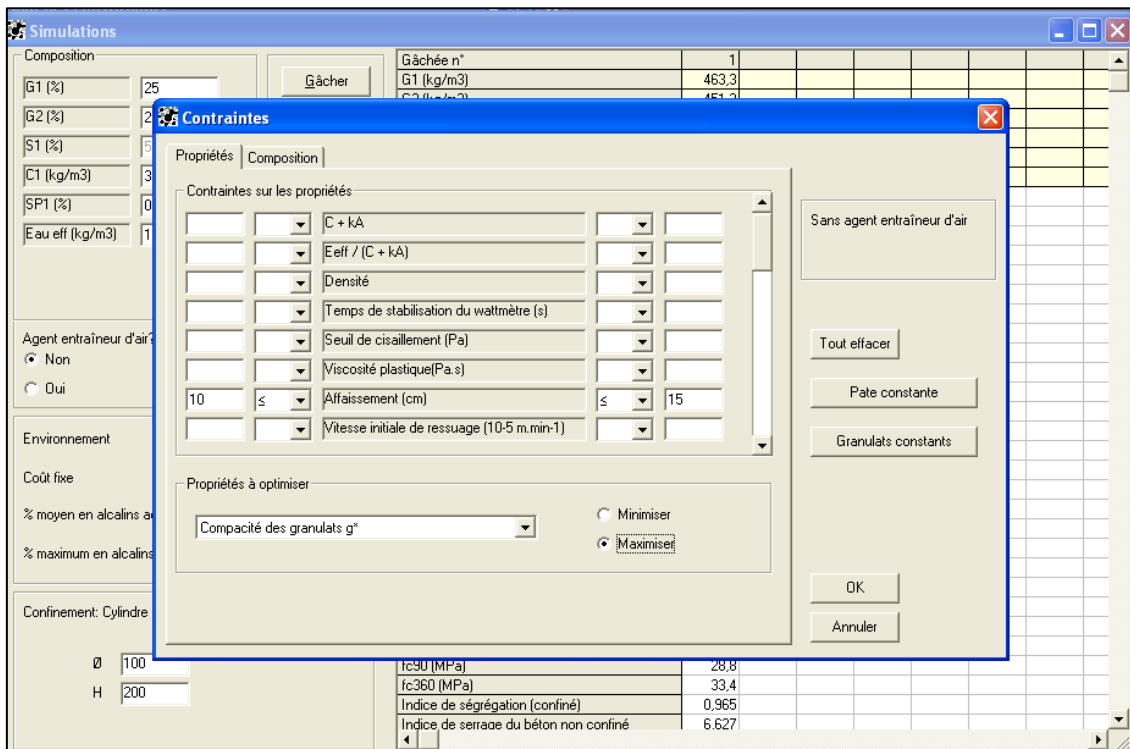


Figura A.34 – Escolha das propriedades a serem otimizadas pelo programa

BétonlabPro 3 - [25 MPa. btl]

Fichier Edition Constituants Sélection Modifications ?

Composition	1	2	3	9	10	11	12	13	14	15
G1 (%)	25									
G2 (%)	25									
S1 (%)	50									
C1 (kg/m3)	300									
SP1 (%)	0,3									
Eau eff (kg/m3)	190									
Agent entraîneur d'air?	<input checked="" type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui									
Environnement	×0									
Coût fixe	0									
% moyen en alcalins actifs dans l'eau	0									
% maximum en alcalins actifs dans l'eau	0									
Confinement: Cylindre (mm)	Ø 100 H 200									
Gâchée n°	1	2	3	9	10	11	12	13	14	15
G1 (kg/m3)	463,3	1025,9	438,3	803	609,7	600,6	395,4	197	0	609,7
G2 (kg/m3)	451,3	0	538,6	195,6	381,7	390,1	577,8	767,7	935,9	381,7
S1 (kg/m3)	844,3	859,3	833,8	844,4	842,5	842	831,5	828,7	808,1	842,5
C1 (kg/m3)	300	249,1	275,6	266,4	267,2	267,6	277,8	278,5	299,9	267,2
SP1 (kg/m3)	3	2,49	2,76	2,66	2,67	2,68	2,78	2,78	3	2,67
Eau (kg/m3)	213,7	173,8	201,7	188,7	193,2	193,6	203,9	208,4	225,5	193,2
G1 (%)	25	52,11	22,99	41,6	31,66	31,2	20,8	10,4	0	31,66
G2 (%)	25	0	29,01	10,4	20,34	20,8	31,2	41,6	52	20,34
S1 (%)	50	47,89	48	48	48	48	48	48	48	48
Taux de saturation (%)	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Taux de superplastifiant (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Eau eff	190	159,4	175	170	170	170,3	176,3	176,2	189,8	170
Air total (%)	1,3	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,8	1,5	1,5
AEA	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,083	1,194	1,172	1,183	1,177	1,176	1,17	1,164	1,158	1,177
Eeff/C	0,633	0,64	0,635	0,638	0,636	0,636	0,635	0,633	0,633	0,636
Environnement	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0
C + kA	300	249	276	266	267	268	278	278	300	267
Eeff / (C + kA)	0,633	0,64	0,635	0,638	0,636	0,636	0,635	0,633	0,633	0,636
Densité	2,276	2,311	2,291	2,301	2,297	2,297	2,289	2,283	2,272	2,297
Temps de stabilisation du wattmètre (s)	117	139	140	133	140	140	140	150	142	140
Seuil de cisaillement (Pa)	662	1288	1277	1029	1281	1281	1276	1697	1267	1281
Viscosité plastique (Pa.s)	153	297	302	245	300	300	300	401	315	300
Affaissement (cm)	22,2	15	15	18	15	15	15	10	15	15
Vitesse initiale de ressage (10-5 m.min-1)	0,87	0,39	0,62	0,55	0,54	0,54	0,64	0,63	0,86	0,54
fc1 (MPa)	7,7	7,4	7,6	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6	7,8	7,5
fc2 (MPa)	12	11,6	11,9	11,8	11,8	11,8	11,9	11,9	12,1	11,8
fc3 (MPa)	14,7	14,4	14,7	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,9	14,6
fc7 (MPa)	19,9	19,7	19,9	19,9	19,9	19,9	20	19,9	20,1	19,9
fc28 (MPa)	24,8	25	25	25	25	25	25	25	25	25
fc90 (MPa)	28,8	29,3	29,1	29,2	29,2	29,2	29,1	29,1	29	29,2
fc360 (MPa)	33,4	34,3	33,9	34	34	34	33,8	33,8	33,6	34
Indice de ségrégation (confiné)	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965
Indice de serrage du béton non confiné	6,627	7,465	7,635	7,215	7,582	7,585	7,649	8,134	7,776	7,582
Indice de serrage du béton confiné	7,094	7,996	8,342	7,753	8,228	8,234	8,373	9,044	8,679	8,228
Contribution des fines Kf	1,686	1,71	1,701	1,696	1,705	1,705	1,7	1,709	1,686	1,705
Contribution des gros gravillons K'gg	2,284	2,229	3,02	2,383	2,761	2,775	3,098	3,66	3,77	2,761
Compacité du squelette non confiné Ø*	0,8461	0,8592	0,8425	0,8538	0,8479	0,8476	0,841	0,8331	0,8261	0,8479
Compacité des granulats g*	0,8059	0,8266	0,7997	0,818	0,8088	0,8083	0,7973	0,7849	0,7713	0,8088

Figura A.35 – Dosagens otimizadas para a classe C25

BétonlabPro 3 - [45 MPa. btl]

Fichier Edition Constituants Sélection Modifications ?

Composition	1	9	10	11	12	13	14	16	17	18	20	21
G1 (%)	25											
G2 (%)	25											
S1 (%)	50											
C1 (kg/m3)	300											
SP1 (%)	0,3											
Eau eff (kg/m3)	190											
Agent entraîneur d'air?	<input checked="" type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui											
Environnement	×0											
Coût fixe	0											
% moyen en alcalins actifs dans l'eau	0											
% maximum en alcalins actifs dans l'eau	0											
Confinement: Cylindre (mm)	Ø 100 H 200											
Gâchée n°	1	9	10	11	12	13	14	16	17	18	20	21
G1 (kg/m3)	463,3	257,4	496,8	496,8	570,8	496,8	494	318,3	323,5	325,9	162,4	0
G2 (kg/m3)	451,3	540,2	318,3	318,3	159,9	318,3	320,9	465,2	472,7	476,2	632,9	786,4
S1 (kg/m3)	844,3	904,3	917,3	917,3	913,9	917,3	917,2	886,5	900,7	907,4	904,5	899,1
C1 (kg/m3)	300	400,9	385,2	385,2	391,5	385,2	385,3	422,6	406	397,3	400,5	406,2
SP1 (kg/m3)	3	4,01	3,85	3,85	3,92	3,85	3,85	5,98	5,68	5,17	5,01	4,64
Eau (kg/m3)	213,7	194,1	184	184	179,1	184	184,1	198,5	191,8	189,3	193,3	198,9
G1 (%)	25	14,27	27,15	27,15	32,85	27,15	27	18	18	18	9	0
G2 (%)	25	30,73	17,85	17,85	9,44	17,85	18	27	27	27	36	45
S1 (%)	50	55	55	55	57,71	55	55	55	55	55	55	55
Taux de saturation (%)	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Taux de superplastifiant (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,42	0,42	0,39	0,38	0,34
Eau eff	190	170	165	165	165	165	165	165,1	177,9	170,6	167,5	169,4
Air total (%)	1,3	1,9	1,9	1,9	2	1,9	1,9	1,7	1,9	2	2,1	2,2
AEA	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,083	0,882	0,889	0,889	0,8	0,889	0,889	0,884	0,884	0,884	0,879	0,875
Eeff/C	0,633	0,424	0,428	0,428	0,421	0,428	0,428	0,421	0,42	0,422	0,419	0,417
Environnement	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0	×0
C + kA	300	401	385	385	392	385	385	423	406	397	400	406
Eeff / (C + kA)	0,633	0,424	0,428	0,428	0,421	0,428	0,428	0,421	0,42	0,422	0,419	0,417
Densité	2,276	2,301	2,305	2,305	2,219	2,305	2,305	2,297	2,3	2,301	2,298	2,295
Temps de stabilisation du wattmètre (s)	117	151	150	150	151	150	150	143	150	152	156	159
Seuil de cisaillement (Pa)	662	1283	1286	1286	1237	1286	1286	915	1185	1331	1523	1651
Viscosité plastique (Pa.s)	153	407	400	400	413	400	400	322	390	420	468	502
Affaissement (cm)	22,2	15	15	15	15	15	15	19,3	16,1	14,4	12,2	10,7
Vitesse initiale de ressage (10-5 m.min-1)	0,87	0,12	0,11	0,11	0,49	0,11	0,11	0,16	0,12	0,11	0,11	0,11
fc1 (MPa)	7,7	23,5	23,1	23,1	23,2	23,1	23,1	24	24	23,7	23,9	23,9
fc2 (MPa)	12	31,2	30,9	30,9	31	30,9	30,9	31,8	31,8	31,5	31,6	31,6
fc3 (MPa)	14,7	35,1	34,8	34,8	34,9	34,8	34,8	35,7	35,7	35,4	35,4	35,4
fc7 (MPa)	19,9	40,8	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	41,4	41,5	41,2	41,2	41,1
fc28 (MPa)	24,8	45	45	45	45	45	45	45,5	45,6	45,4	45,3	45,1
fc90 (MPa)	28,8	48,4	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,9	49	48,8	48,6	48,4
fc360 (MPa)	33,4	52,3	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,8	53	52,8	52,5	52,2
Indice de ségrégation (confiné)	0,965	0,946	0,947	0,947	0,943	0,947	0,947	0,945	0,945	0,946	0,945	0,945
Indice de serrage du béton non confiné	6,627	8,013	7,944	7,944	7,952	7,944	7,945	7,543	7,91	8,063	8,304	8,466
Indice de serrage du béton confiné	7,094	8,398	8,294	8,294	8,226	8,294	8,295	7,864	8,267	8,439	8,73	8,941
Contribution des fines Kf	1,686	3,164	3,126	3,126	3,468	3,126	3,126	3,172	3,214	3,207	3,25	3,268
Contribution des gros gravillons K'gg	2,284	1,893	1,68	1,68	1,318	1,68	1,682	1,687	1,785	1,834	2,049	2,267
Compacité du squelette non confiné Ø*	0,8461	0,8389	0,8445	0,8445	0,8435	0,8445	0,8444	0,8373	0,8394	0,8404	0,8372	0,8334
Compacité des granulats g*	0,8059	0,8033	0,8128	0,8128	0,8167	0,8128	0,8127	0,8062	0,8062	0,8062	0,7991	0,7911

Figura A.36 – Dosagens otimizadas para a classe C45

BétonlabPro 3 - [65 MPa.bt]										
Fichier Edition Constituants Sélection Modifications ?										
Composition		Gâchée n°								
G1 (%)	25	1	2	3	4	5	6	7	9	10
G2 (%)	25	421,6	601,2	610,6	610,6	530,5	397,7	260,6	129,4	0
S1 (%)	50	410,7	81	56,4	56,4	129,2	258,3	380,8	504,2	608,9
C1 (kg/m3)	500	768,4	900,1	913,9	913,9	906,5	906,1	890,4	884,3	854,3
SP1 (%)	0,3	500	538,1	537,3	537,3	547,2	548,9	570,2	579,1	619,3
Eau eff (kg/m3)	190	5	5,38	5,37	5,37	5,47	5,49	5,7	5,79	6,19
Agent entraîneur d'air?		Béton n°1								
<input checked="" type="radio"/> Non		Gâcher								
<input type="radio"/> Oui		Optimiser								
Environnement		Granularité								
Coût fixe		Remplissage								
% moyen en alcalins actifs dans l'eau		G1 (%)								
% maximum en alcalins actifs dans l'eau		G2 (%)								
Confinement: Cylindre (mm)		S1 (%)								
Ø 100		Taux de saturation (%)								
H 200		Taux de superplastifiant (%)								
		Eau eff								
		Air total (%)								
		AEA								
		Rapport G/S								
		Eeff/C								
		Environnement								
		C + kA								
		Eeff / (C + kA)								
		Densité								
		Temps de stabilisation du wattmètre (s)								
		Seuil de cisaillement (Pa)								
		Viscosité plastique (Pa.s)								
		Affaissement (cm)								
		Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)								
		fc1 (MPa)								
		fc2 (MPa)								
		fc3 (MPa)								
		fc7 (MPa)								
		fc28 (MPa)								
		fc90 (MPa)								
		fc360 (MPa)								
		Indice de ségrégation (confiné)								
		Indice de serrage du béton non confiné								
		Indice de serrage du béton confiné								
		Contribution des fines Kf								
		Contribution des gros gravillons K'gg								
		Compacité du squelette non confiné Ø"								
		Compacité des granulats q"								

Figura A.37 – Dosagens otimizadas para a classe C65

ANEXO B: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS “p” E “q” NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

Composition		Gâchée n°	
G1 (%)	50	G1 (kg/m3)	928,2
S1 (%)	50	S1 (kg/m3)	845,9
C1 (kg/m3)	300	C1 (kg/m3)	300
SP1 (%)	0,3	SP1 (kg/m3)	3
Eau eff (kg/m3)	190	Eau (kg/m3)	202,8
Agent entraîneur d'air? <input checked="" type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui		G1 (%)	50
Environnement: >X0		S1 (%)	50
Coût fixe: 0		Taux de saturation (%)	0,31
% moyen en alcalins actifs dans l'eau: 0		Taux de superplastifiant (%)	0,3
% maximum en alcalins actifs dans l'eau: 0		Eau eff	190
Confinement: Aucun		Air total (%)	1,1
		AEA	Non
		Rapport G/S	1,097
		Eeff/C	0,633
		Environnement	>X0
		C + kA	300
		Eeff / (C + kA)	0,633
		Densité	2,28
		Temps de stabilisation du waltmètre (s)	103
		Seuil de cisaillement (Pa)	449
		Viscosité plastique (Pa.s)	104
		Affaissement (cm)	24,7
		Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)	0,87
		fc1 (MPa)	4,4
		fc2 (MPa)	7
		fc3 (MPa)	8,6
		fc7 (MPa)	11,8
		fc28 (MPa)	15
		fc90 (MPa)	17,6
		fc360 (MPa)	20,8
		Indice de ségrégation (confiné)	0,965
		Indice de serrage du béton non confiné	5,98
		Indice de serrage du béton confiné	5,98
		Contribution des fines Kf	1,678

Figura B.1 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 0,2 e q = 0

Composition		Gâchée n°	
G1 (%)	50	G1 (kg/m3)	928,2
S1 (%)	50	S1 (kg/m3)	845,9
C1 (kg/m3)	300	C1 (kg/m3)	300
SP1 (%)	0,3	SP1 (kg/m3)	3
Eau eff (kg/m3)	190	Eau (kg/m3)	202,8
Agent entraîneur d'air? <input checked="" type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui		G1 (%)	50
Environnement: >X0		S1 (%)	50
Coût fixe: 0		Taux de saturation (%)	0,31
% moyen en alcalins actifs dans l'eau: 0		Taux de superplastifiant (%)	0,3
% maximum en alcalins actifs dans l'eau: 0		Eau eff	190
Confinement: Aucun		Air total (%)	1,1
		AEA	Non
		Rapport G/S	1,097
		Eeff/C	0,633
		Environnement	>X0
		C + kA	300
		Eeff / (C + kA)	0,633
		Densité	2,28
		Temps de stabilisation du waltmètre (s)	103
		Seuil de cisaillement (Pa)	449
		Viscosité plastique (Pa.s)	104
		Affaissement (cm)	24,7
		Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)	0,87
		fc1 (MPa)	4,4
		fc2 (MPa)	6,9
		fc3 (MPa)	8,5
		fc7 (MPa)	11,7
		fc28 (MPa)	14,8
		fc90 (MPa)	17,3
		fc360 (MPa)	20,4
		Indice de ségrégation (confiné)	0,965
		Indice de serrage du béton non confiné	5,98
		Indice de serrage du béton confiné	5,98
		Contribution des fines Kf	1,678

Figura B.2 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 0,2 e q = 0,001

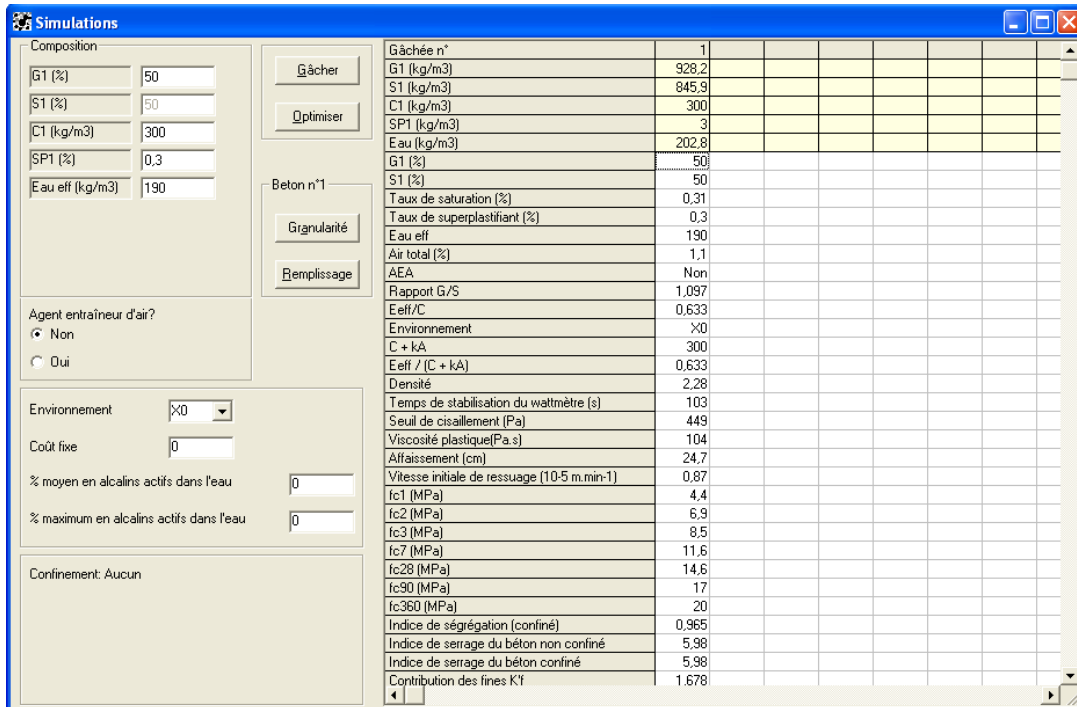


Figura B.3 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,002$

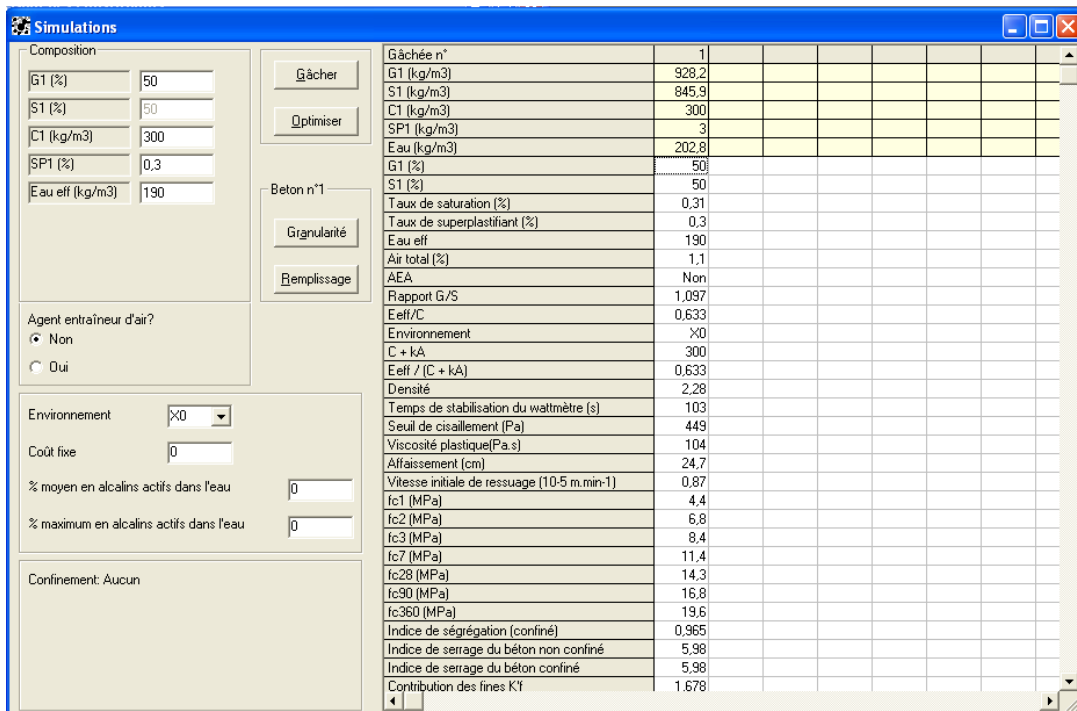


Figura B.4 - Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,003$

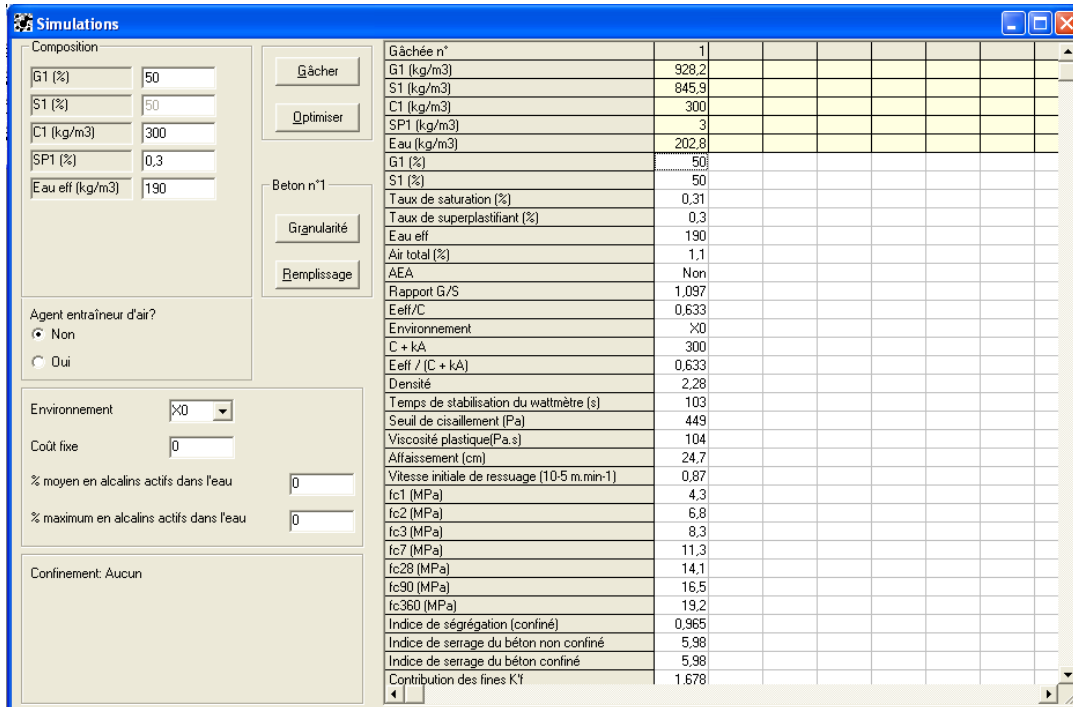


Figura B.5 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,004$

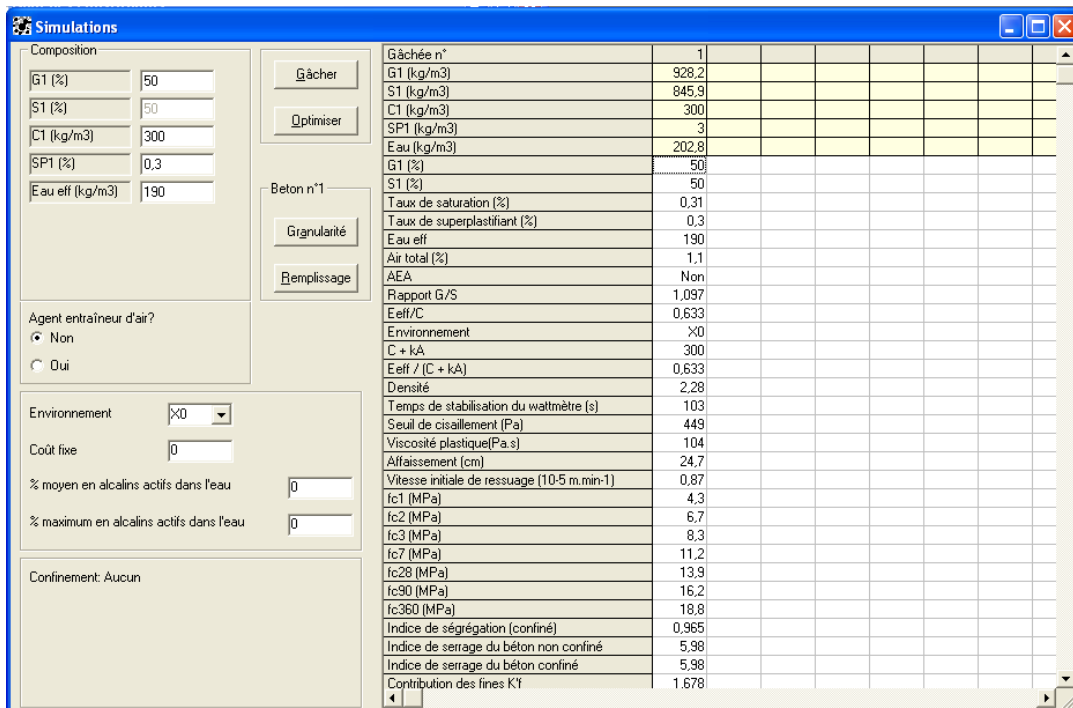


Figura B.6 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,2$ e $q = 0,005$

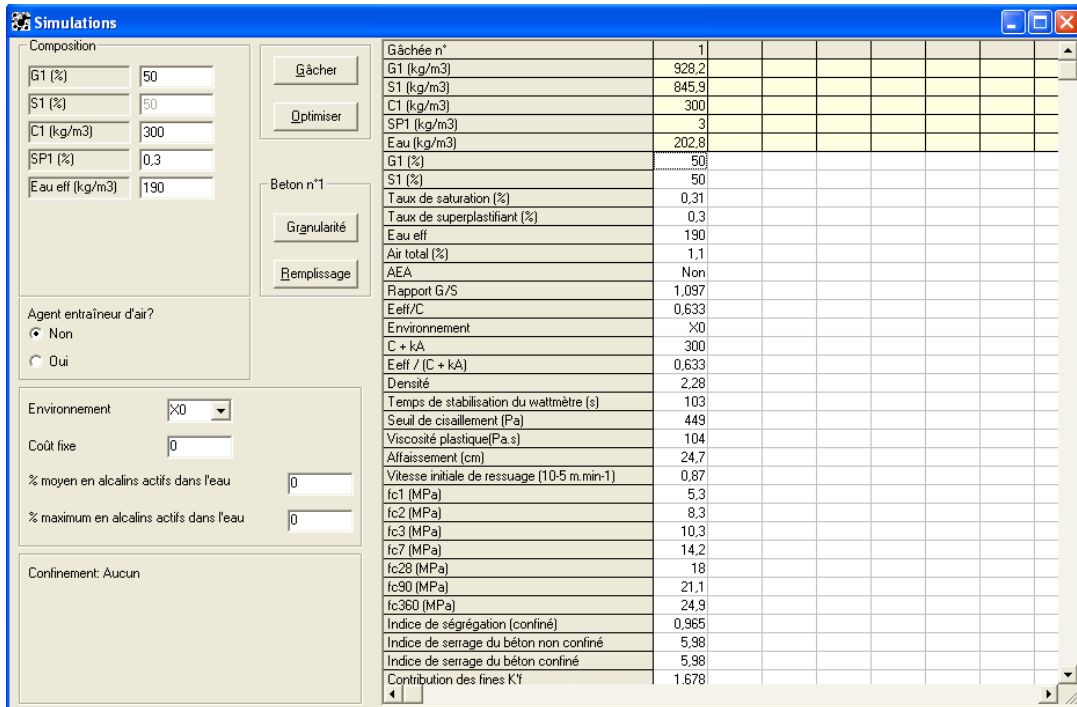


Figura B.7 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0$

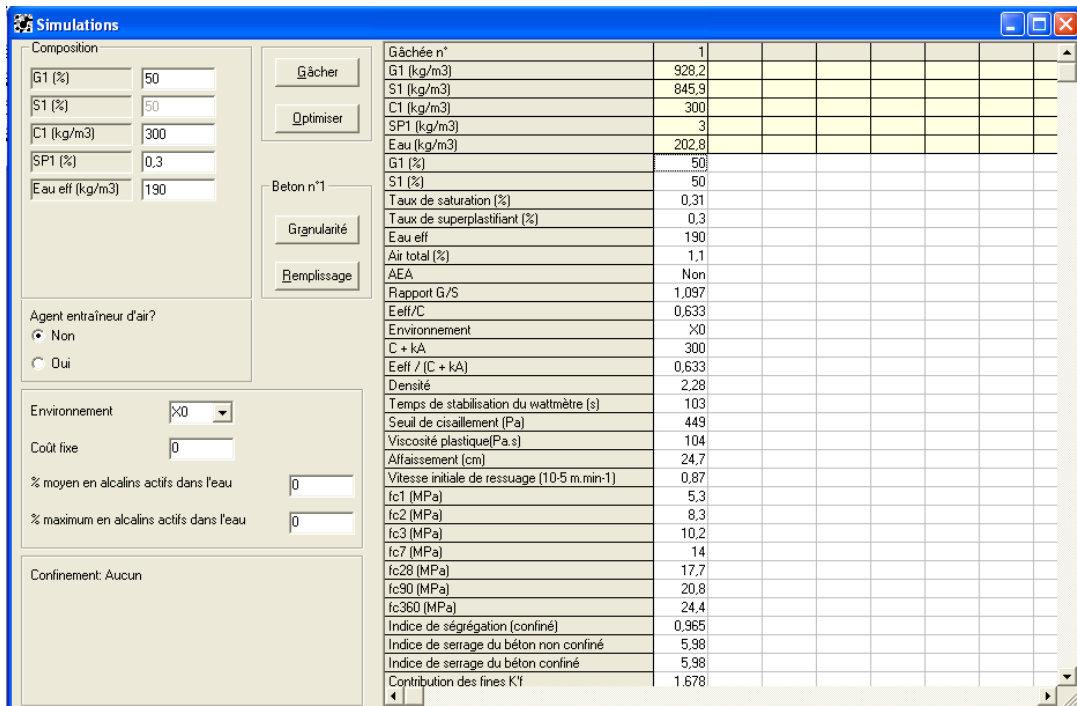


Figura B.8 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,001$

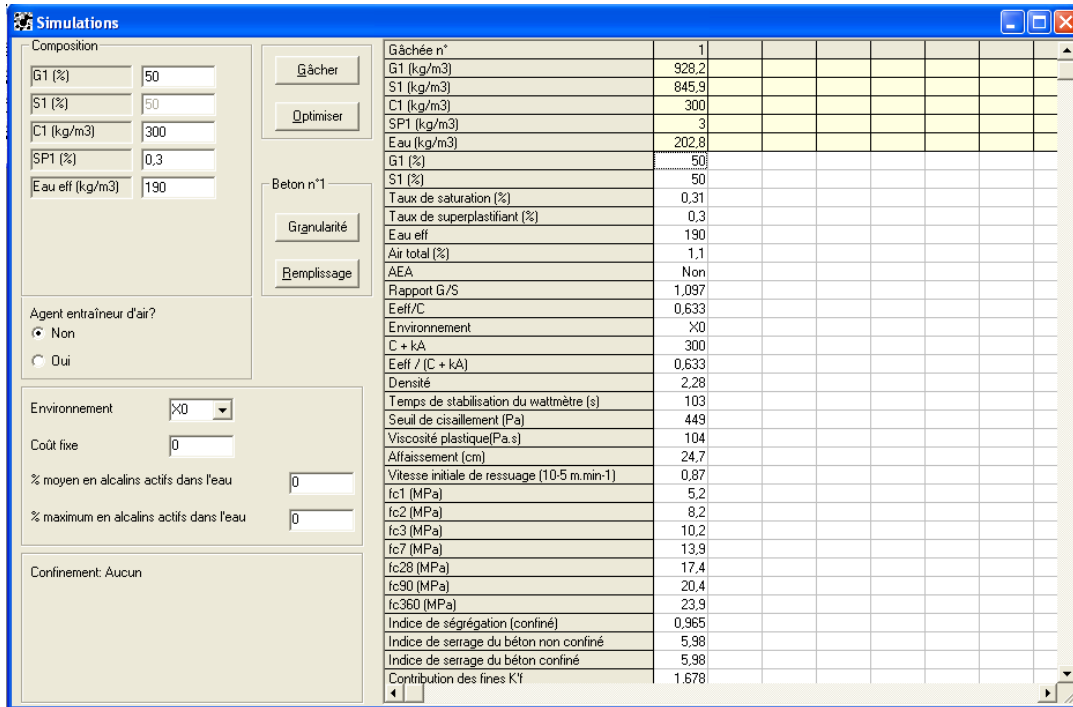


Figura B.9 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,002$

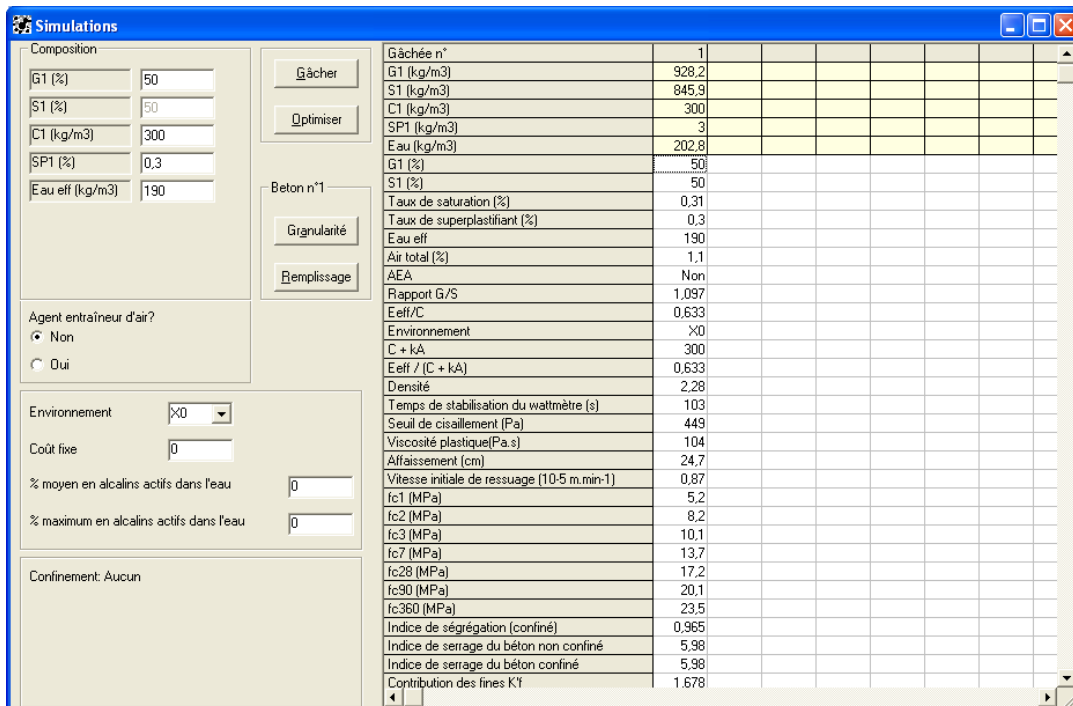


Figura B.10 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,003$

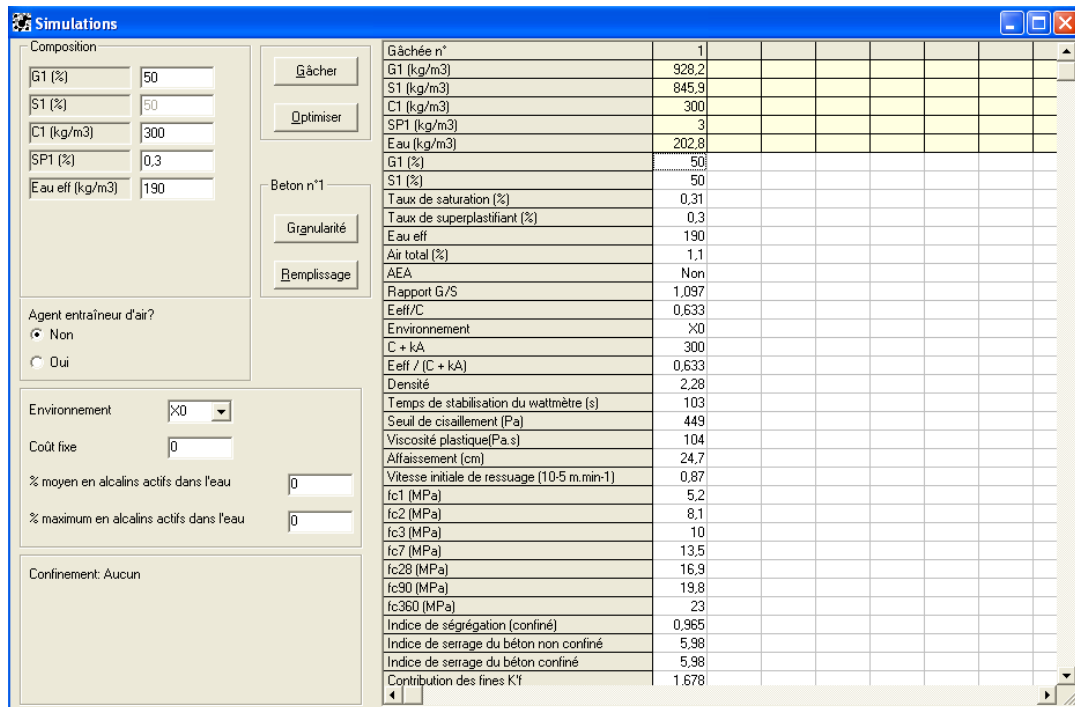


Figura B.11 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,004$

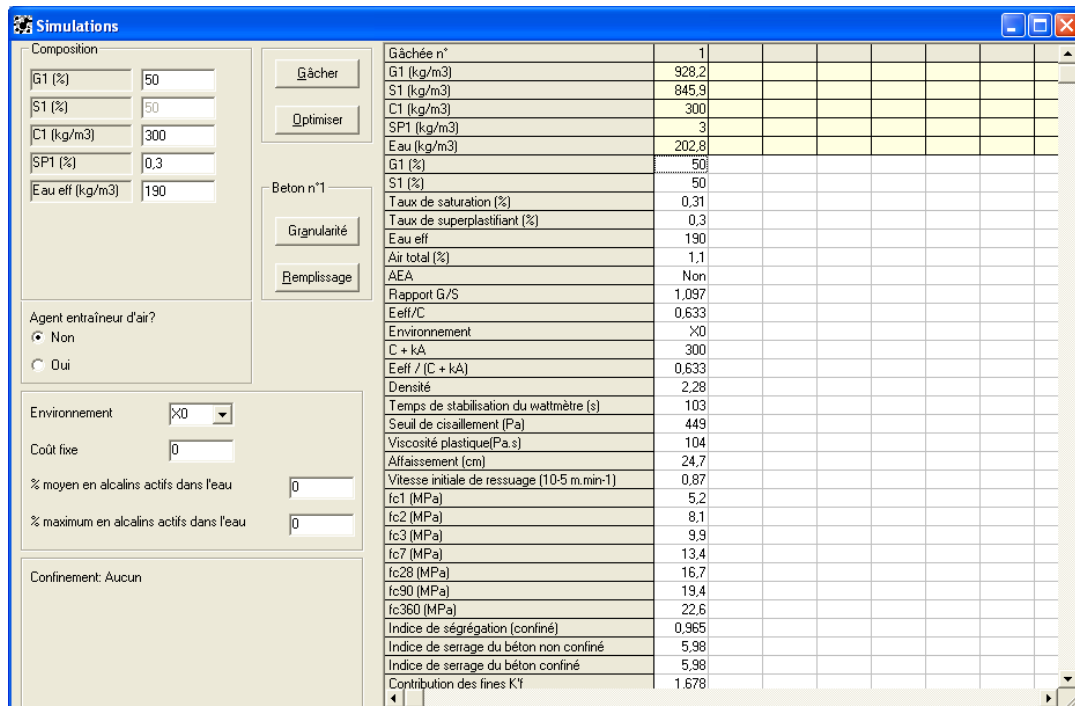


Figura B.12 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,4$ e $q = 0,005$

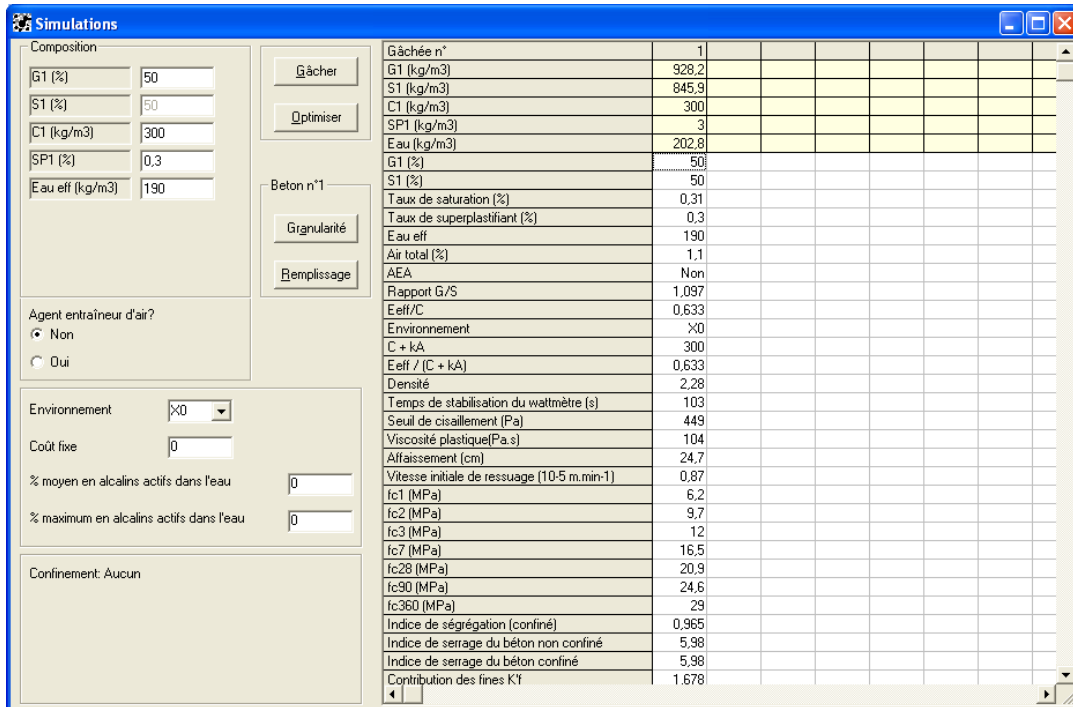


Figura B.13 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0$

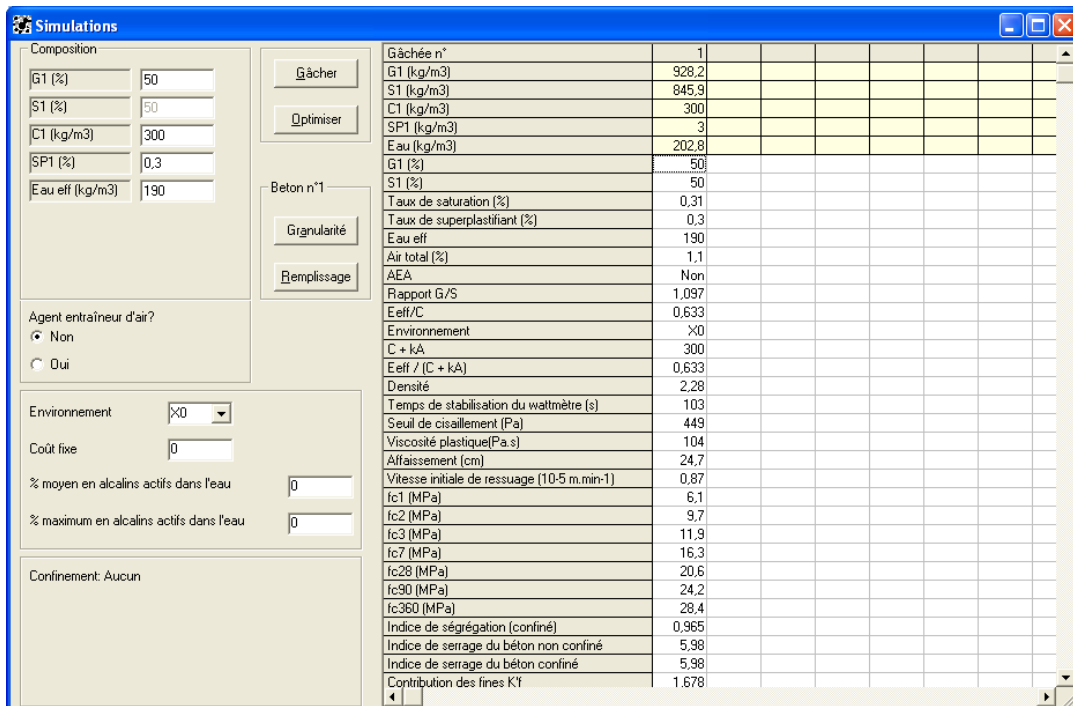


Figura B.14 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,001$

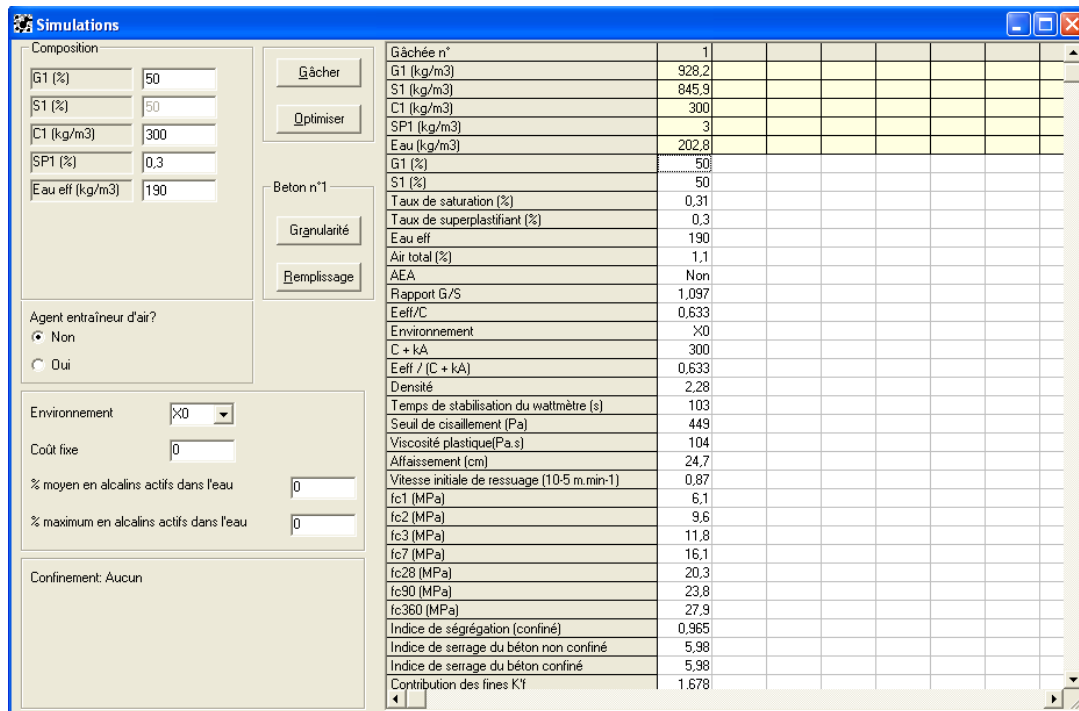


Figura B.15 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 0,6 e q = 0,002

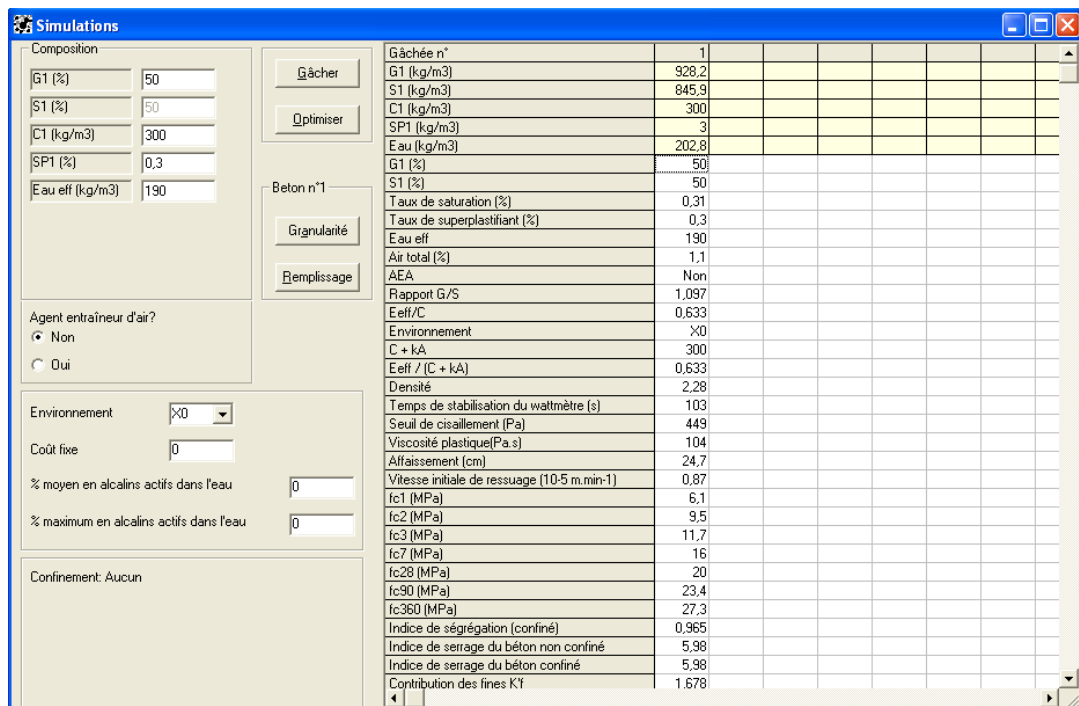


Figura B.16 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 0,6 e q = 0,003

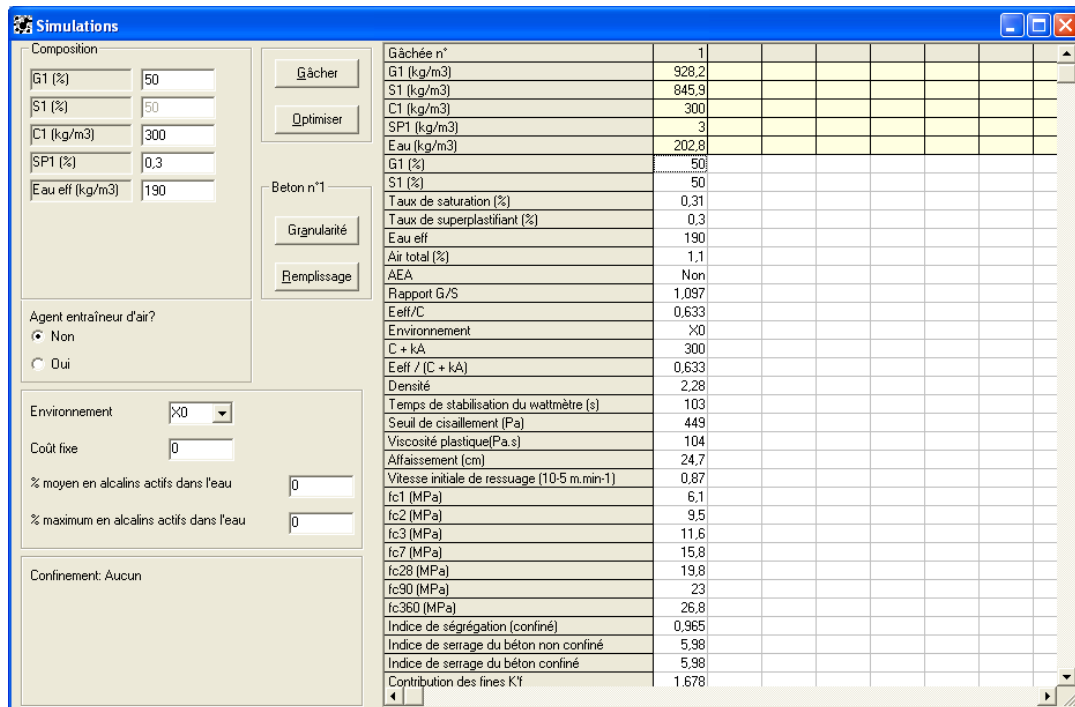


Figura B.17 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,004$

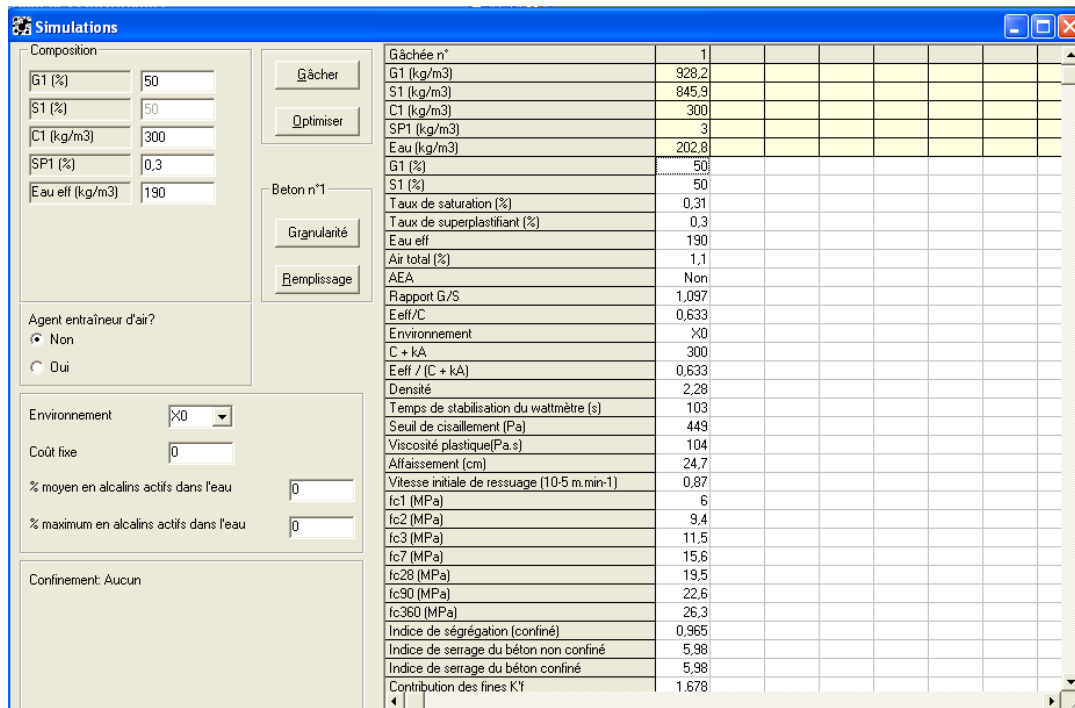


Figura B.18 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,6$ e $q = 0,005$

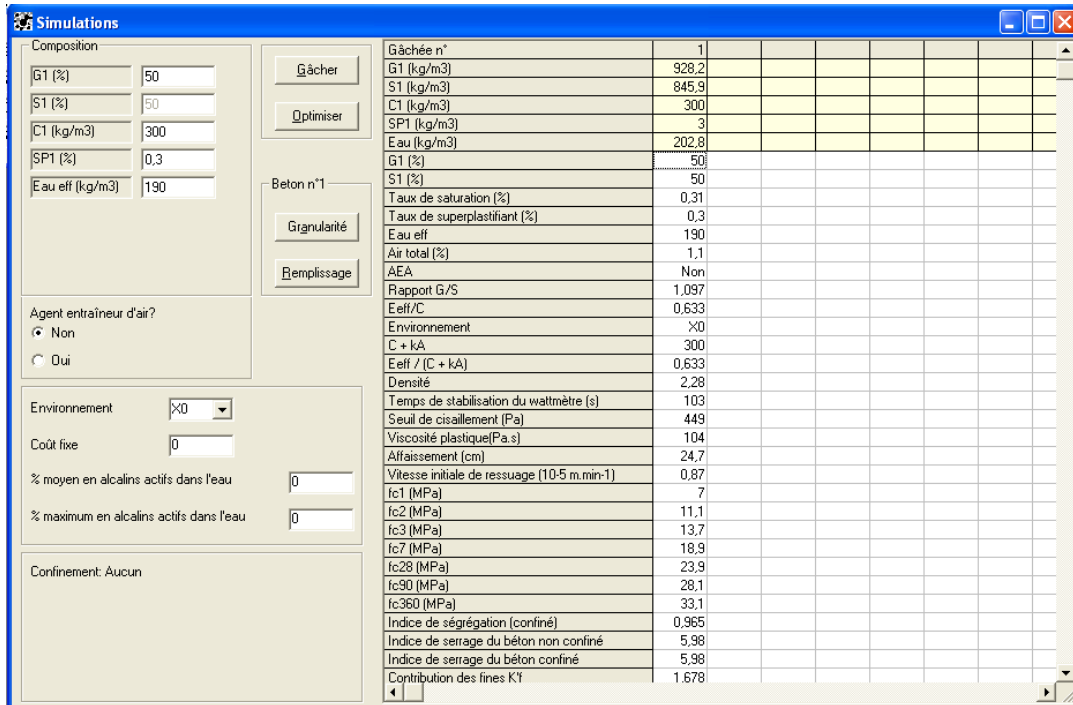


Figura B.19 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0$

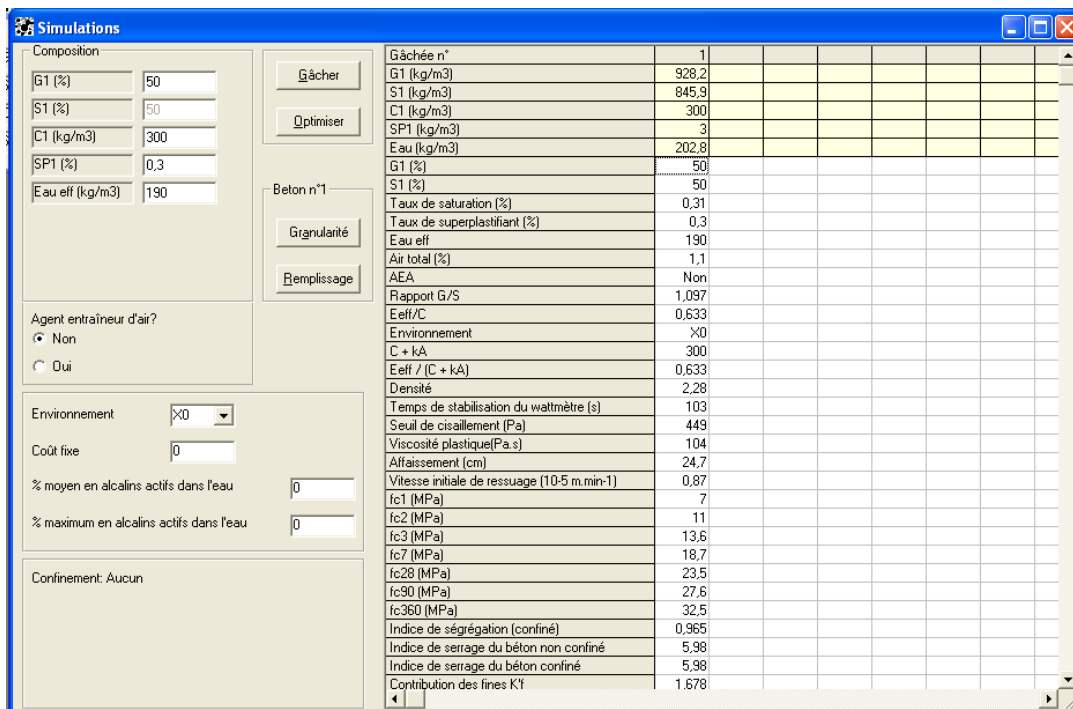


Figura B.20 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,001$

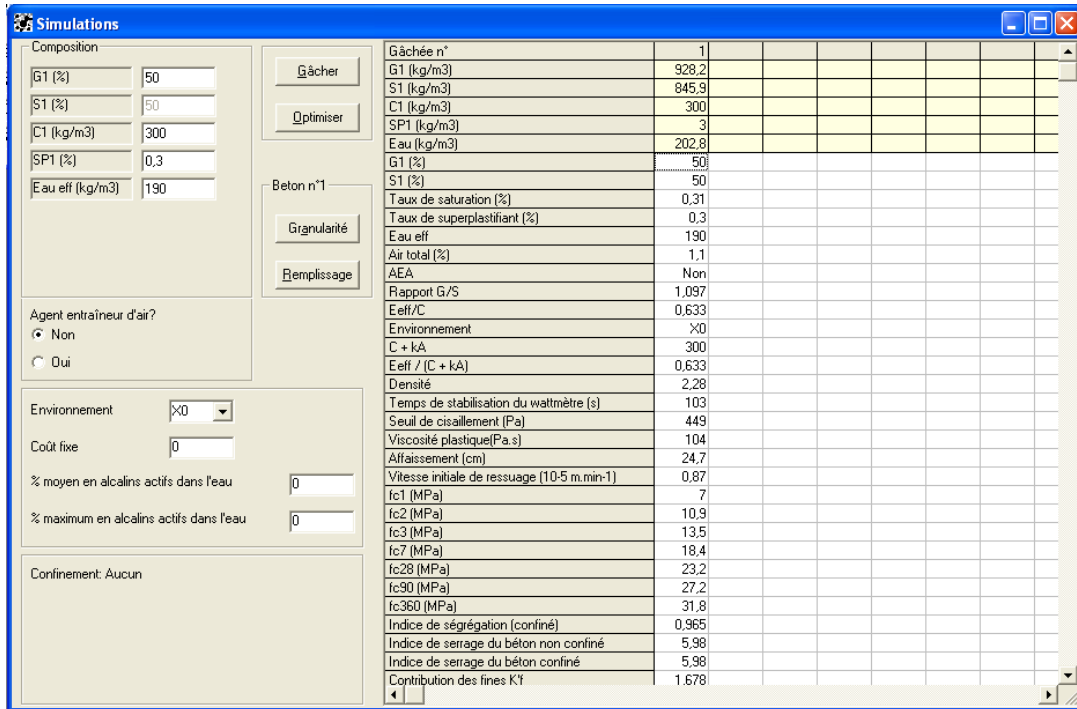


Figura B.21 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,002$

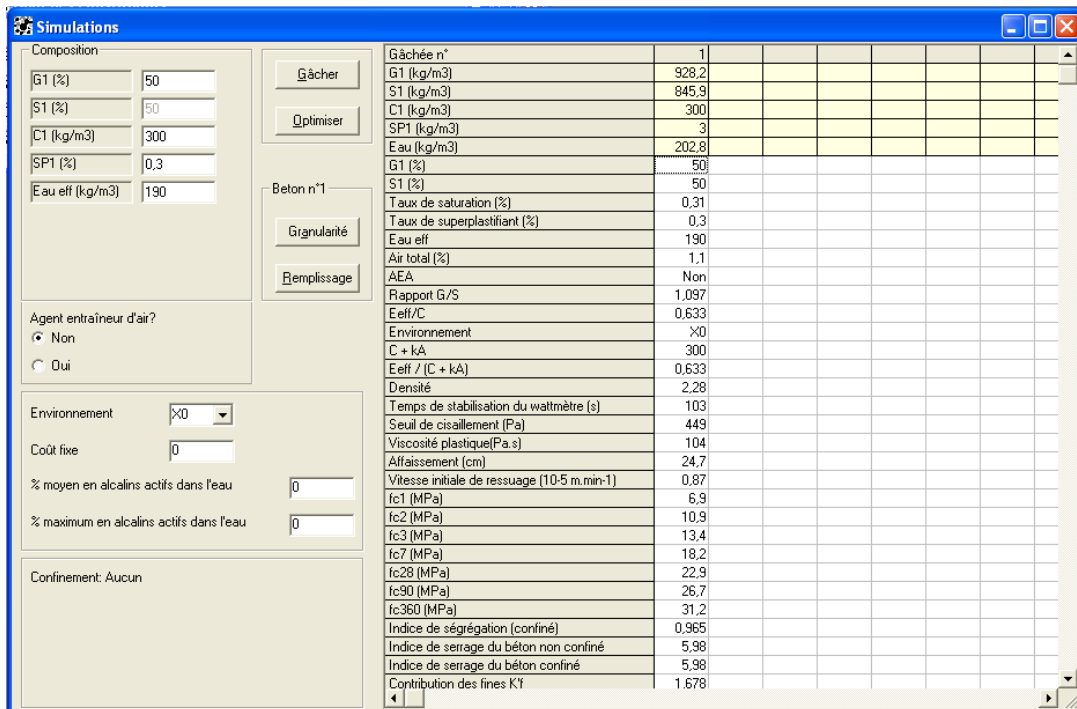


Figura B.22 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,003$

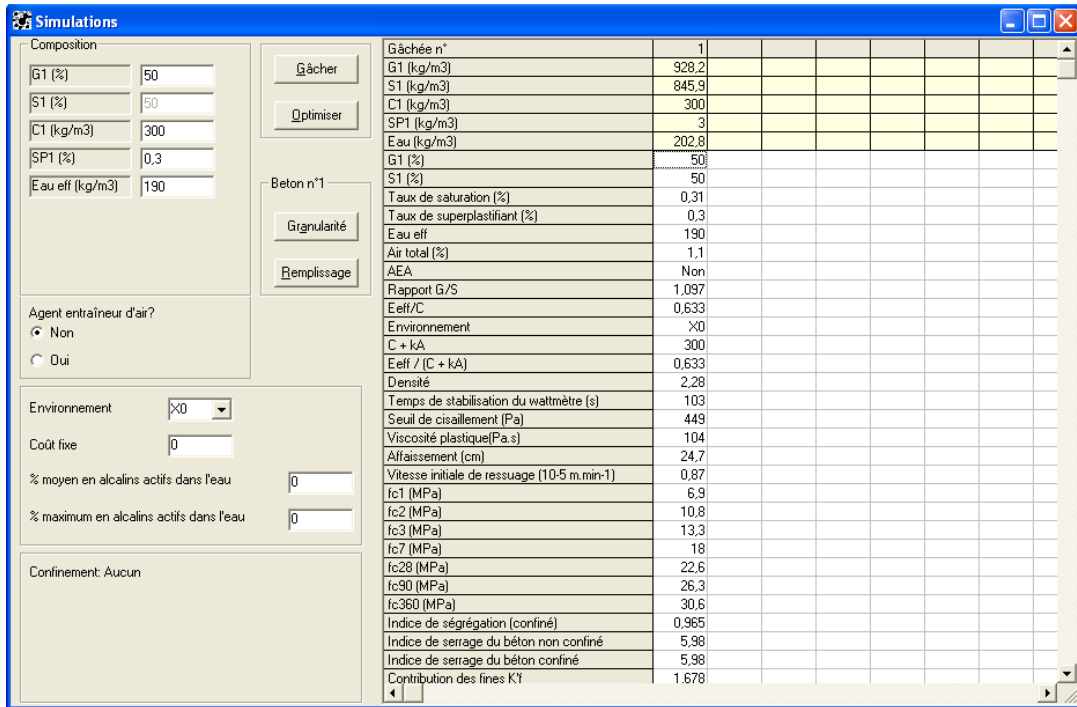


Figura B.23 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,004$

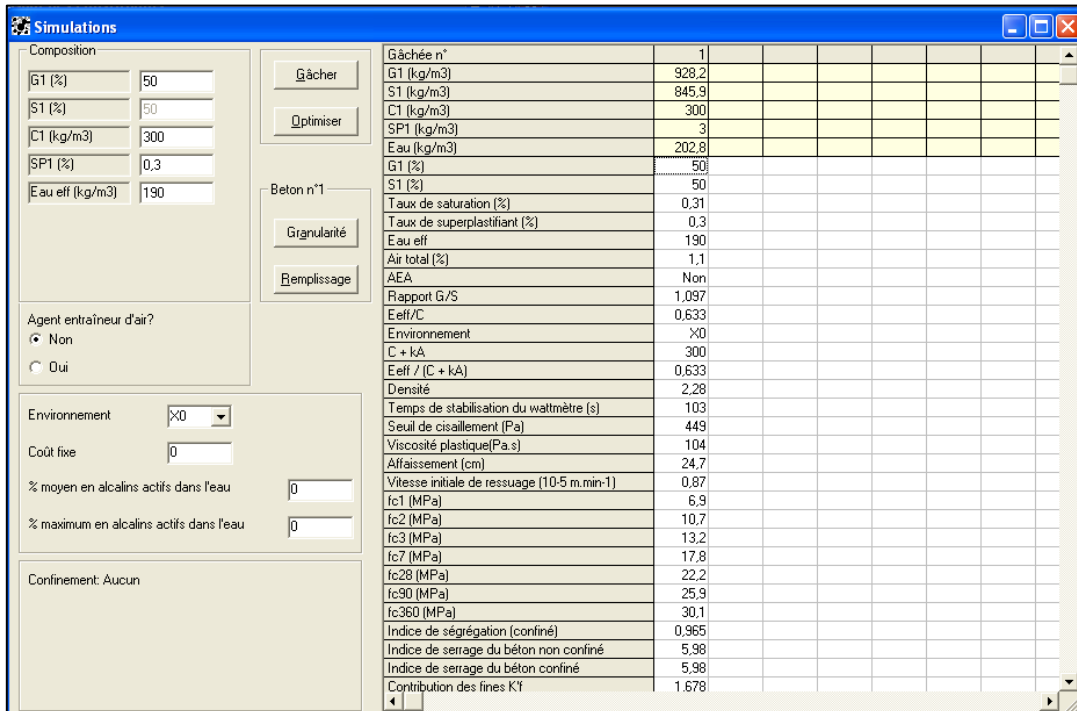


Figura B.24 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 0,8$ e $q = 0,005$

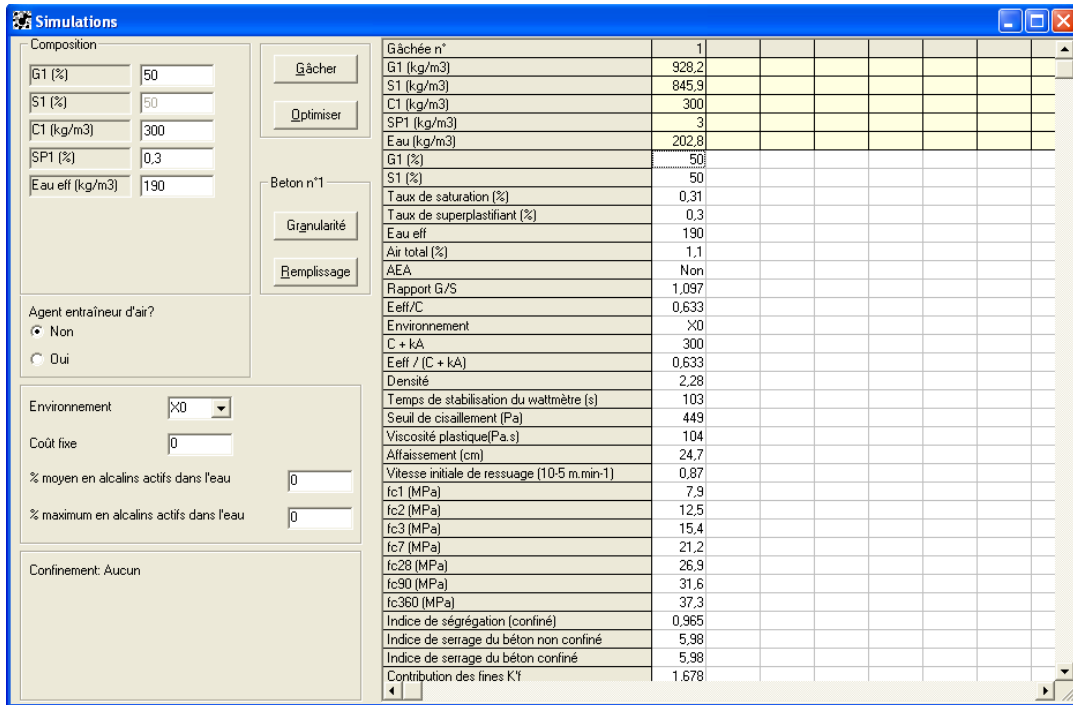


Figura B.25 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0$

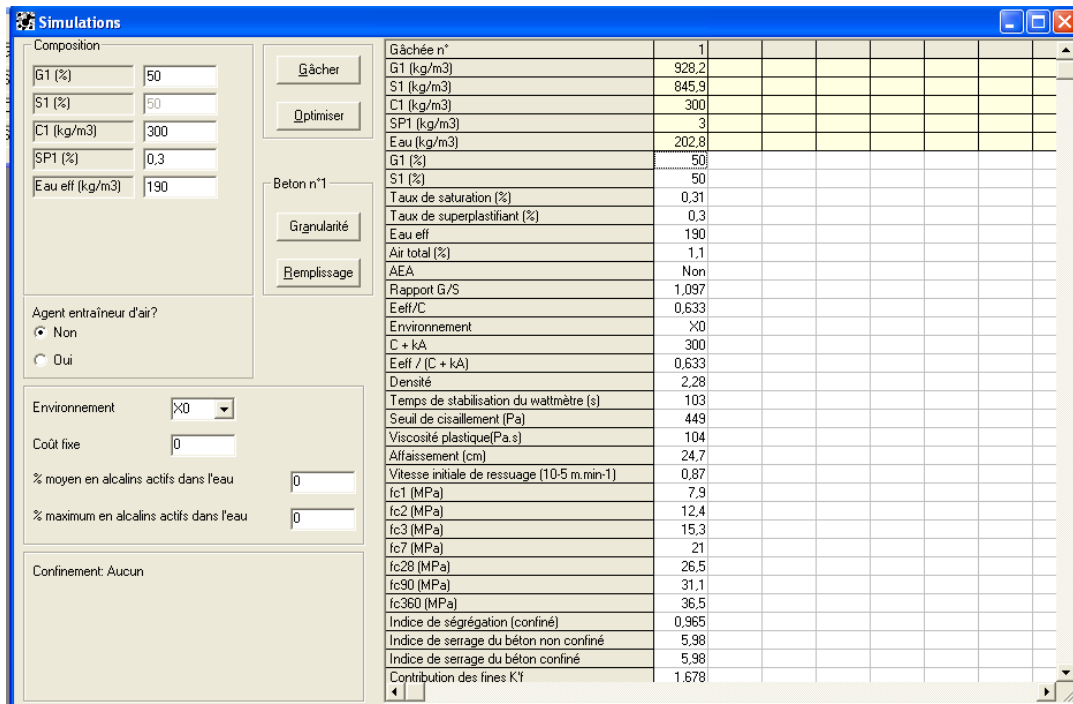


Figura B.26 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,001$

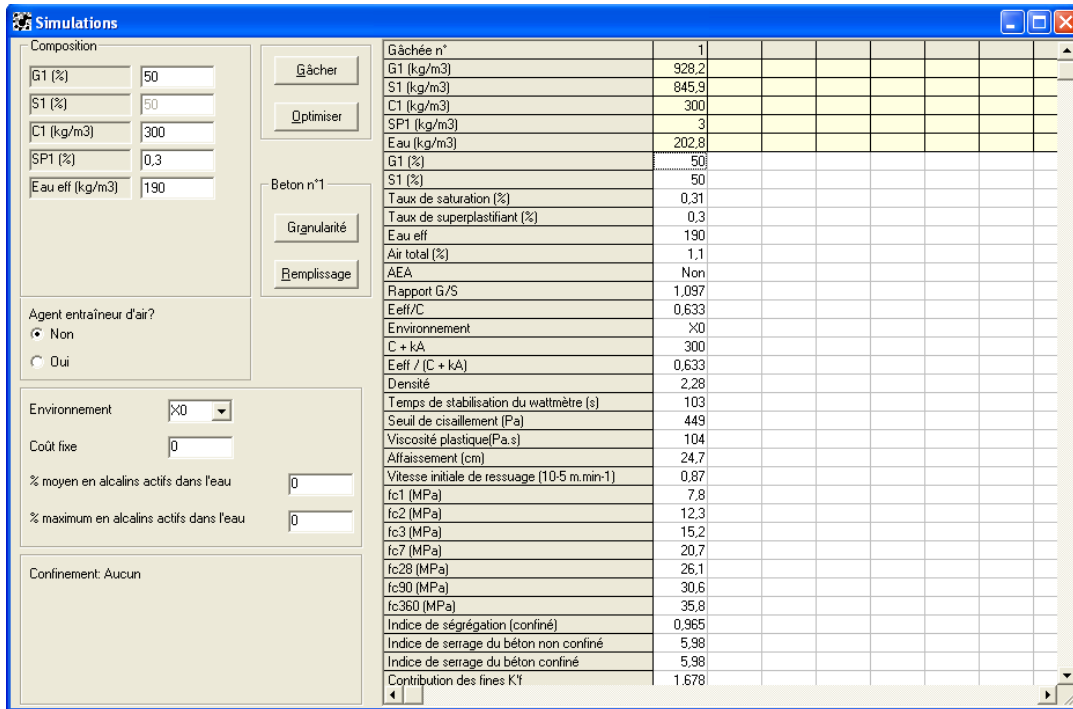


Figura B.27 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 1,0 e q = 0,002

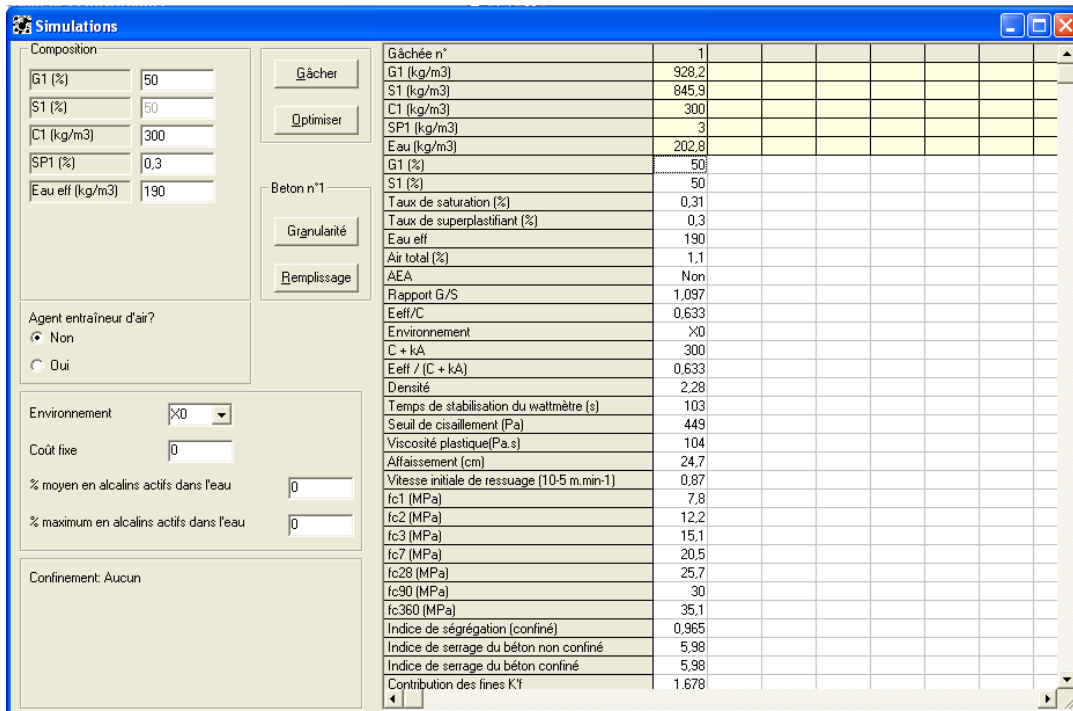


Figura B.28 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 1,0 e q = 0,003

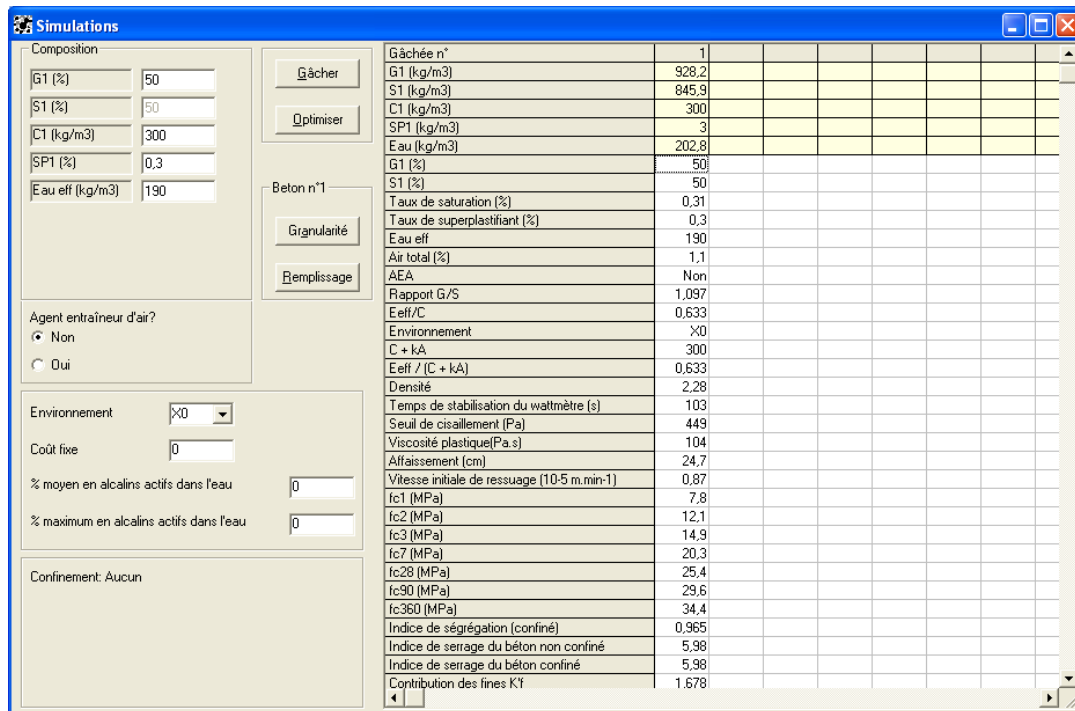


Figura B.29 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,004$

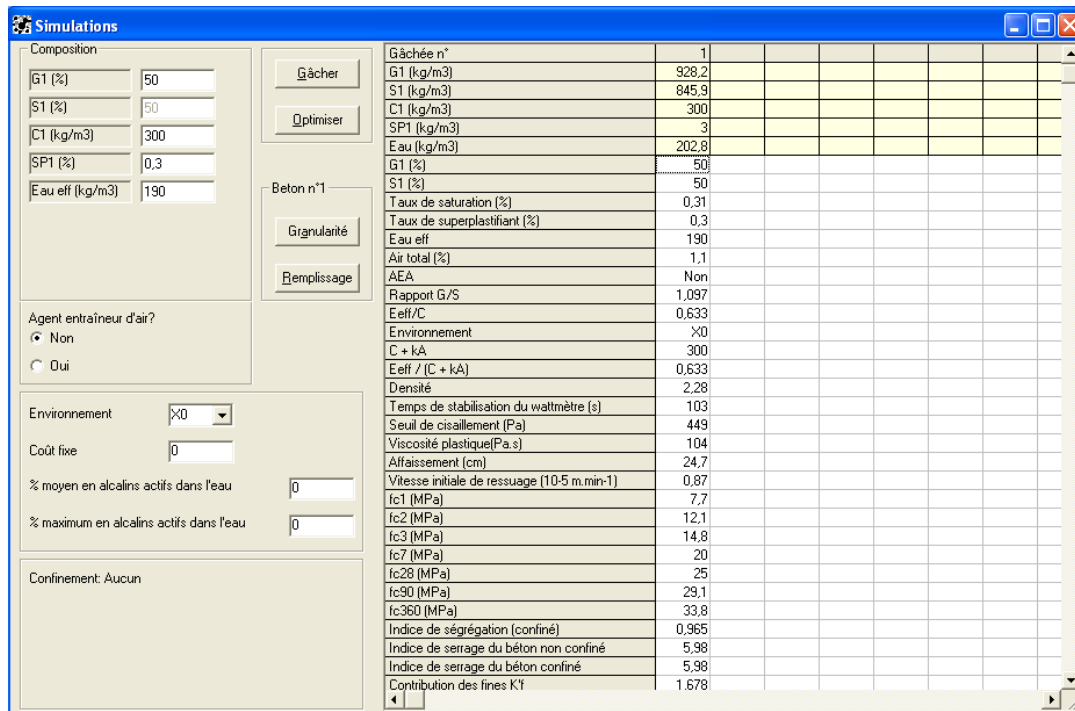


Figura B.30 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,0$ e $q = 0,005$

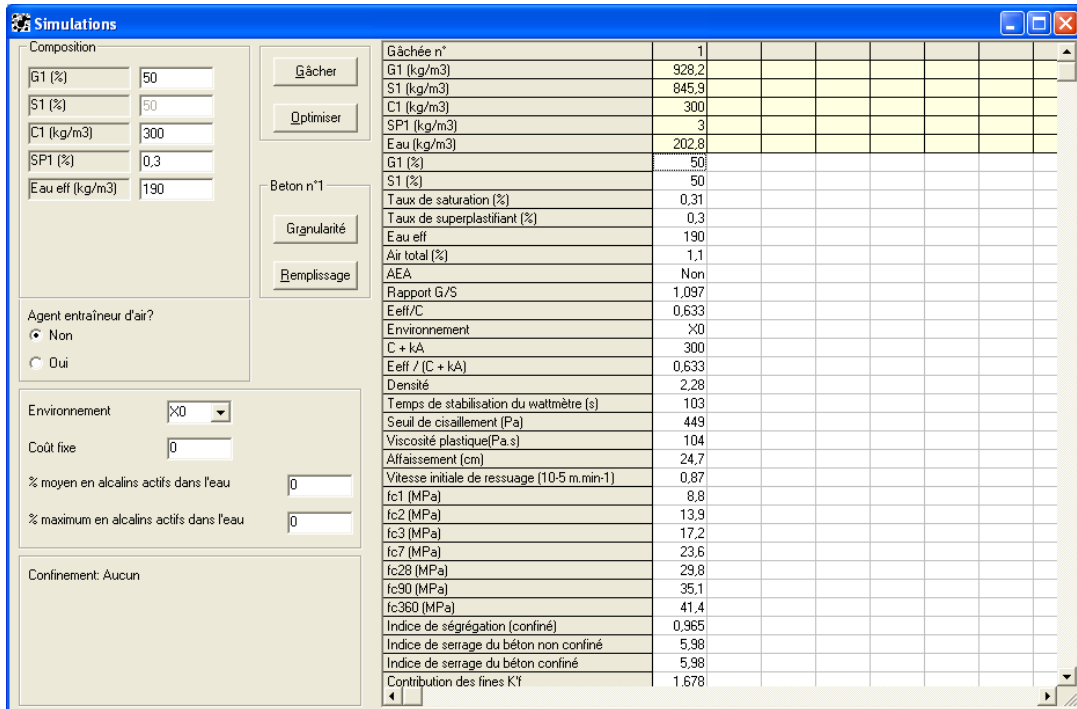


Figura B.31 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0$

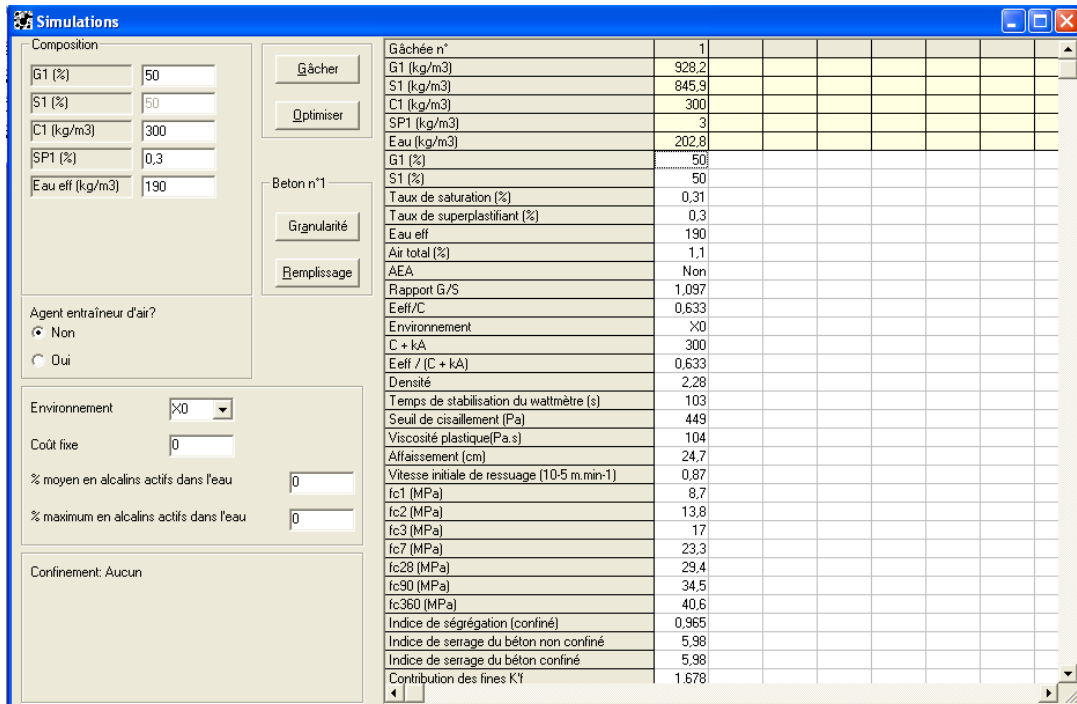


Figura B.32 – Propriedades calculadas pelo programa para $p = 1,2$ e $q = 0,001$

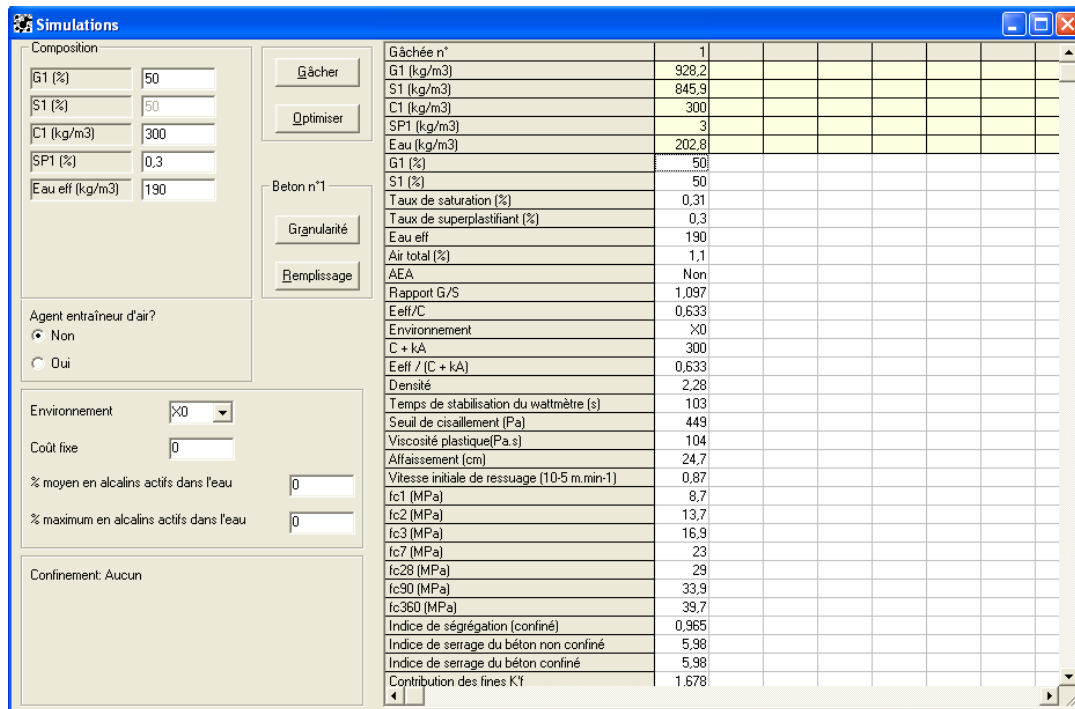


Figura B.33 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 1,2 e q = 0,002

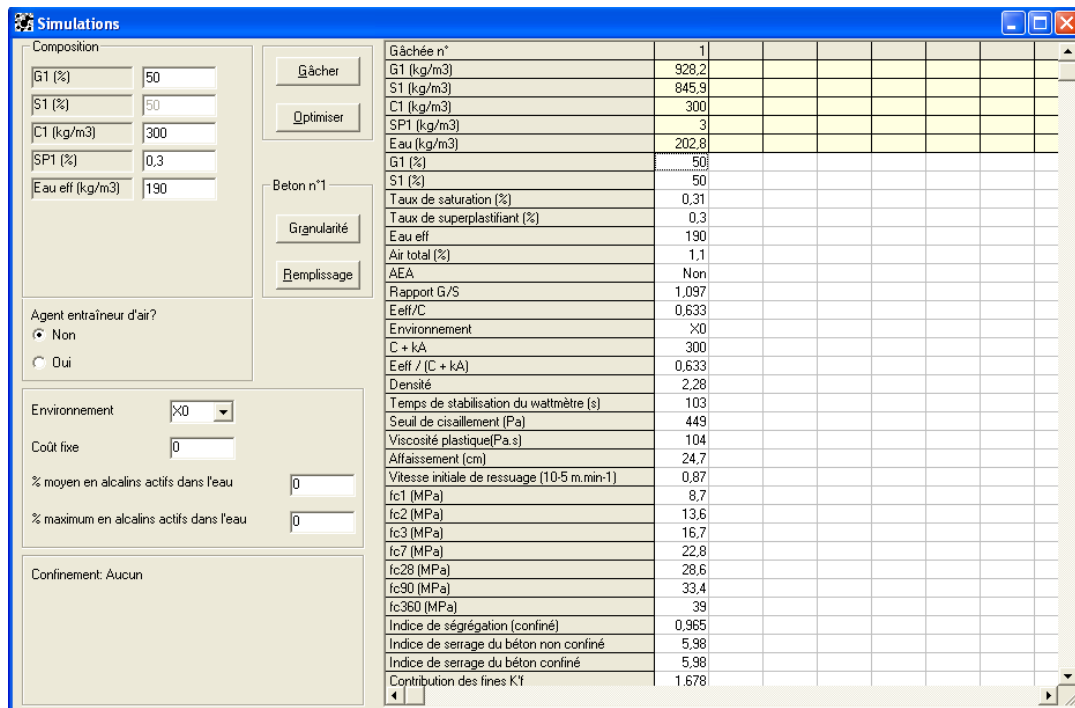


Figura B.34 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 1,2 e q = 0,003

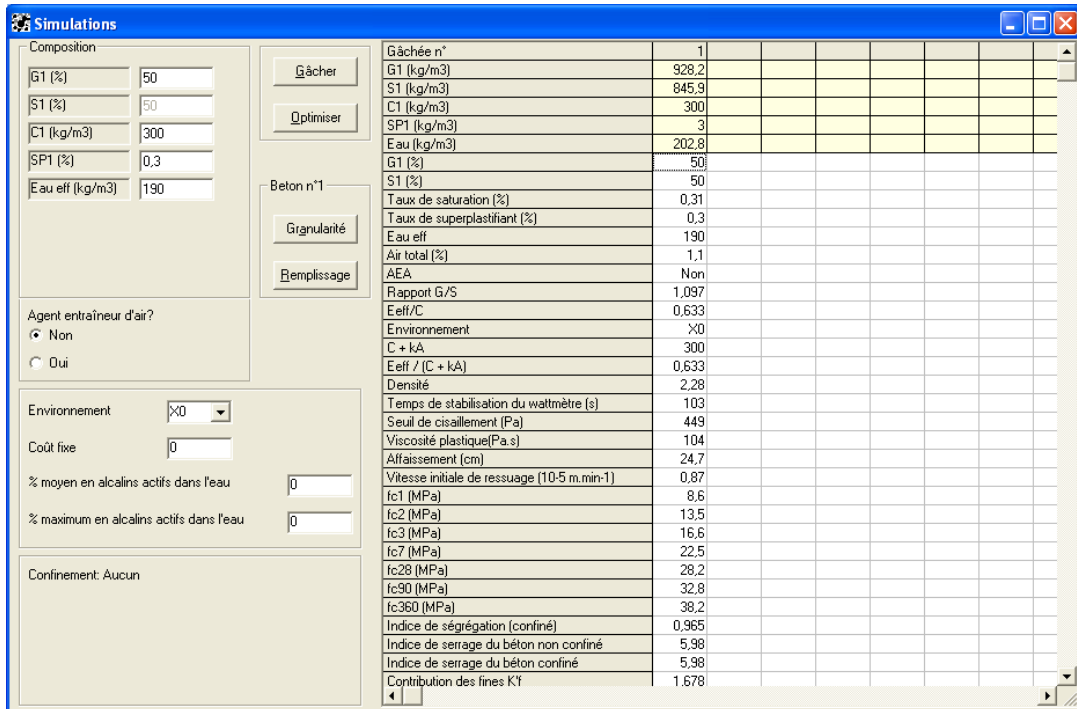


Figura B.35 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 1,2 e q = 0,004

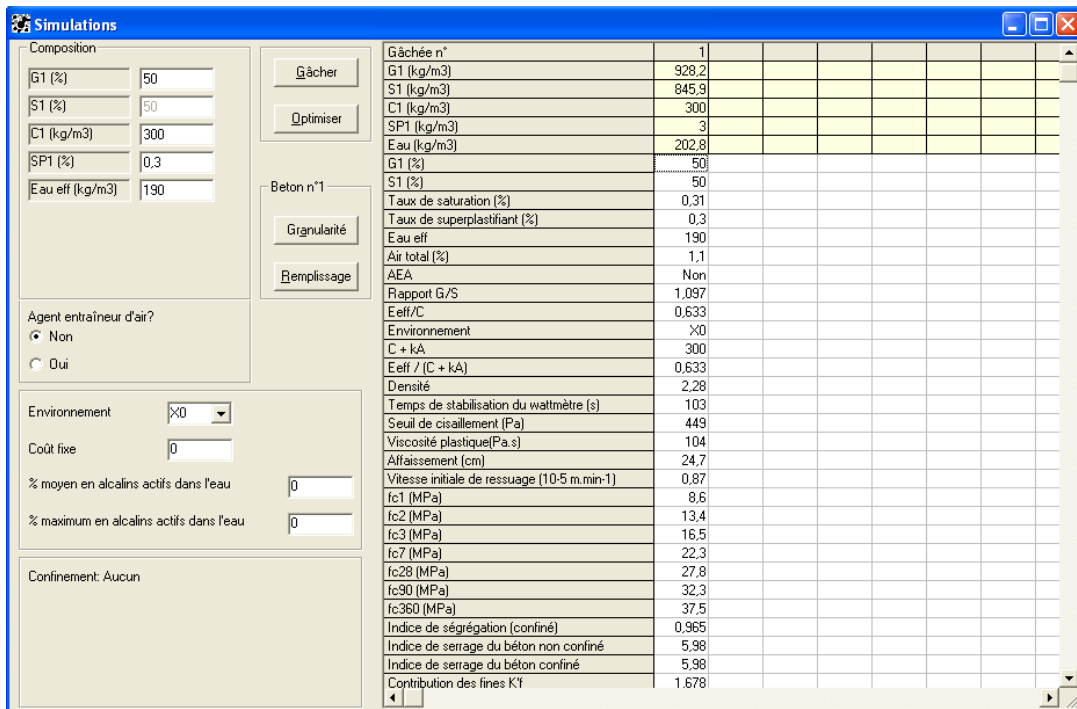


Figura B.36 – Propriedades calculadas pelo programa para p = 1,2 e q = 0,005

ANEXO C: COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS SOB ESFORÇOS DE COMPRESSÃO AXIAL

As curvas tensão versus deformação axial dos concretos reciclados caracterizados experimentalmente são apresentados nas figuras a seguir (Figura C.1 a Figura C.10).

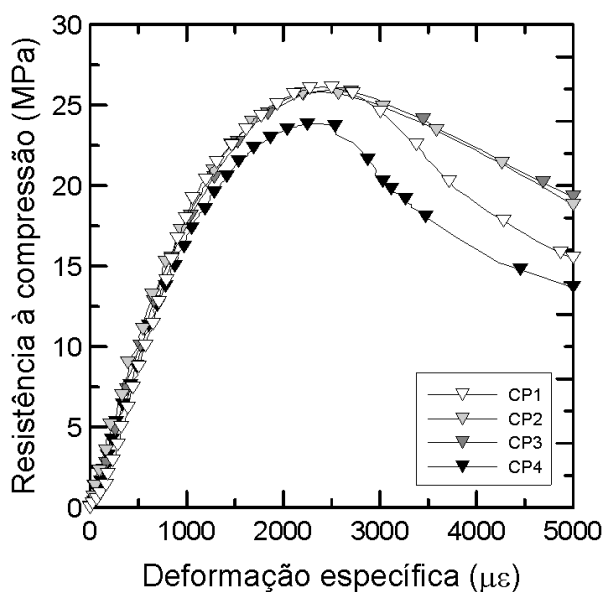


Figura C.1 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C25-01100

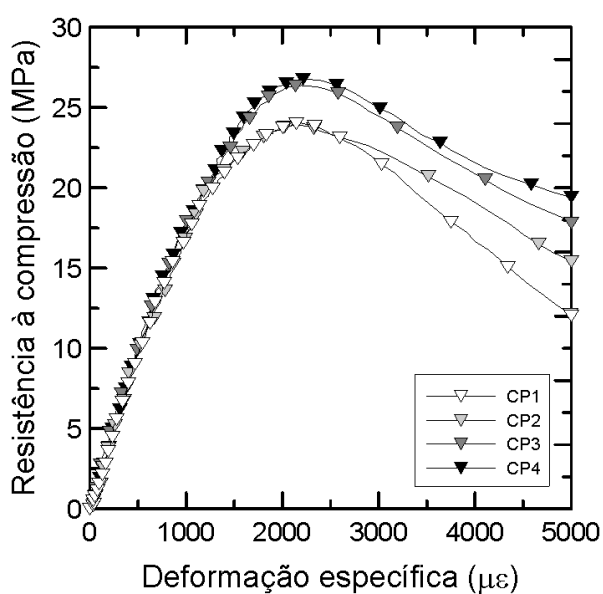


Figura C.2 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C25-0120

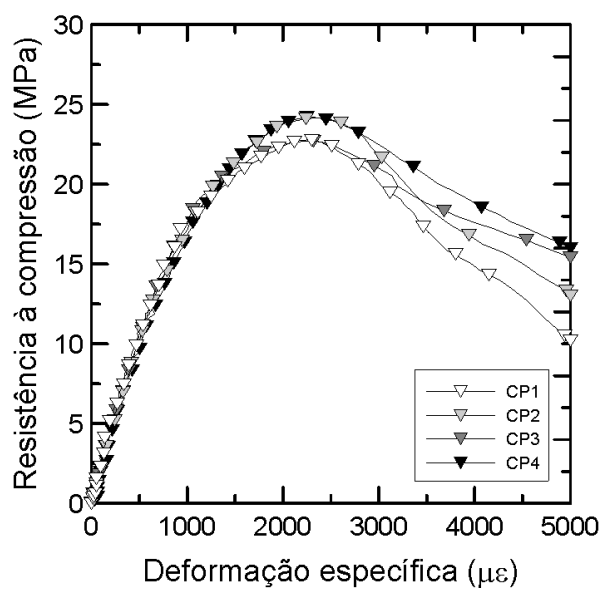


Figura C.3 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C25-6080

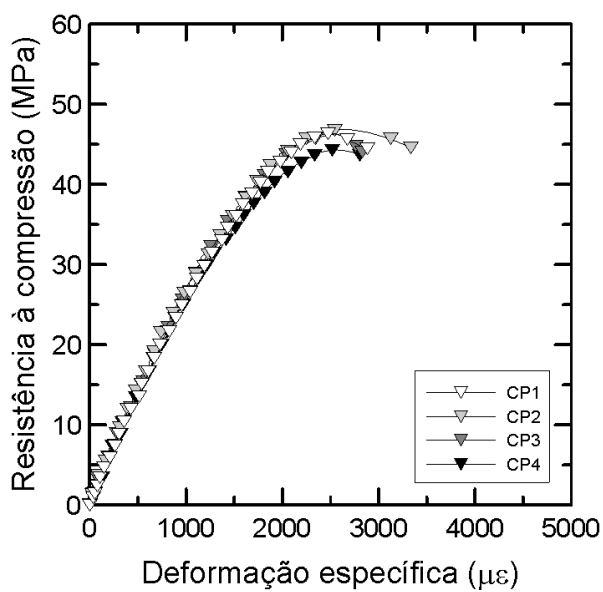


Figura C.4 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C45-01100

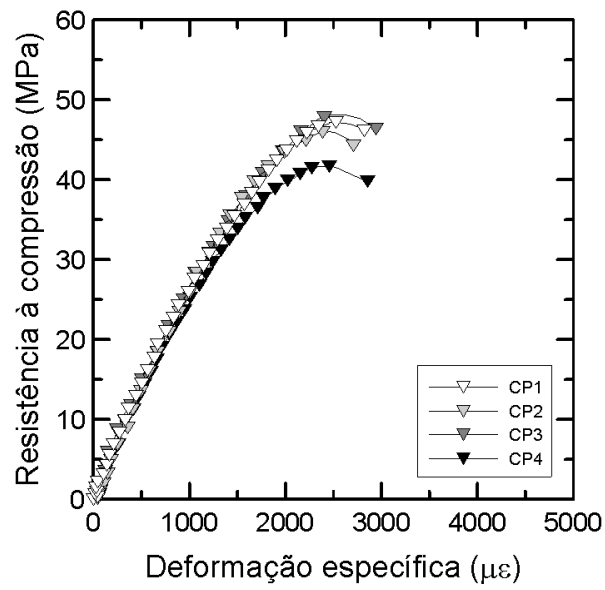


Figura C.5 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C45-0120

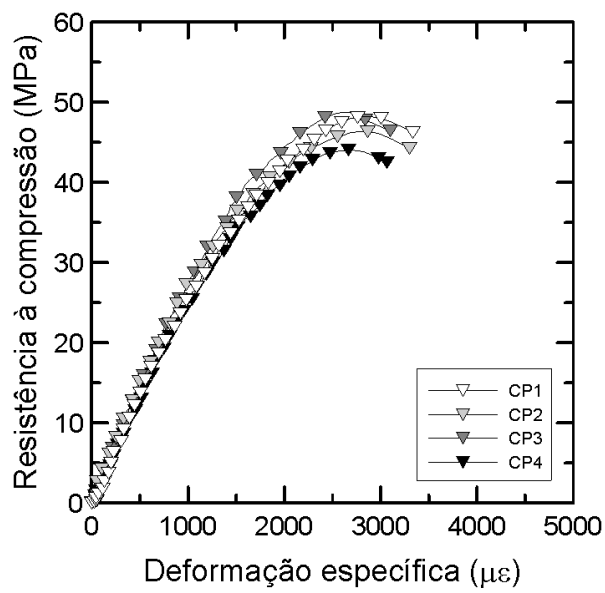


Figura C.6 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C45-6080

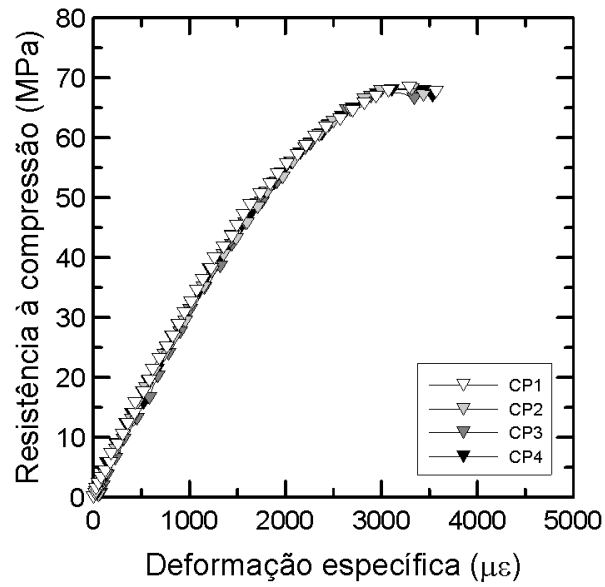


Figura C.7 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-01100

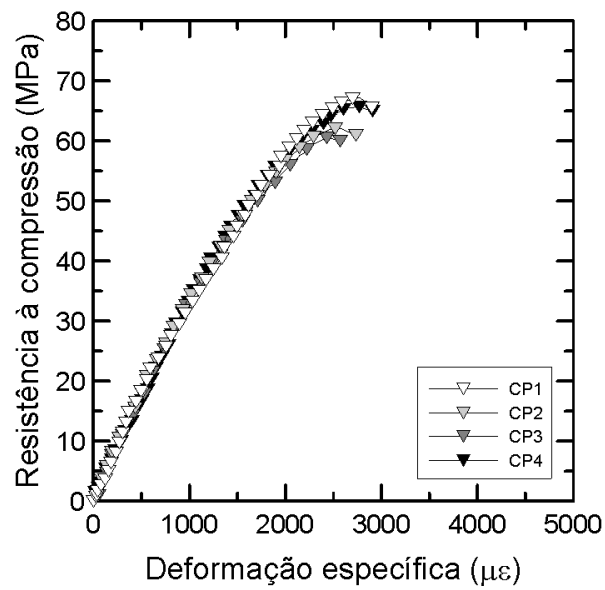


Figura C.8 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-2040

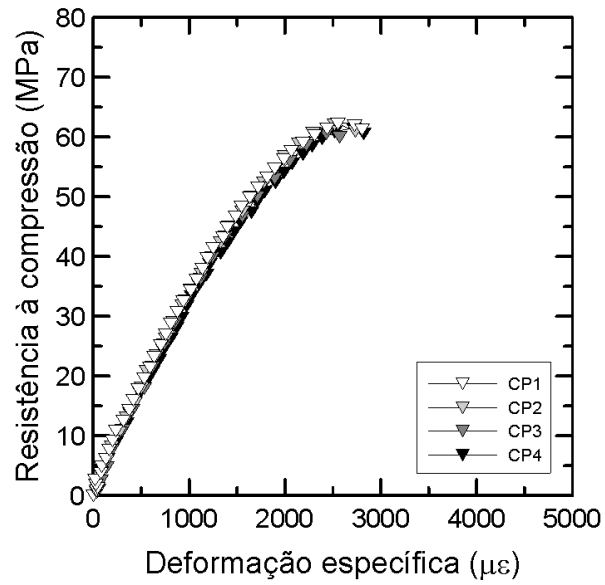


Figura C.9 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-4060

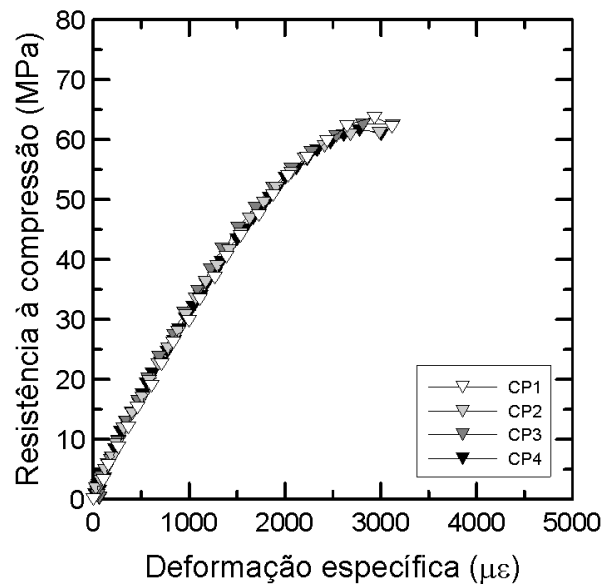


Figura C.10 – Curva tensão *versus* deformação dos corpos-de-prova da mistura C65-6080

As imagens dos corpos-de-prova cilíndricos após o ensaio de compressão axial aos 28 dias são apresentadas a seguir. A Figura C.11 apresenta os corpos-de-prova das três misturas da classe C25. A Figura C.12 ilustra os corpos-de-prova das três misturas da classe C45. Já a Figura C.13 mostra os corpos-de-prova de duas misturas da classe C65.



(a)



(b)



(c)

Figura C.11 – Corpos-de-prova da classe C25 ensaiados sob esforços de compressão axial, aos 28 dias: (a) C25-0120; (b) C25-01100 e (c) C25-6080



(a)



(b)



(c)

Figura C.12 - Corpos-de-prova da classe C45 ensaiados sob esforços de compressão axial, aos 28 dias: (a) C45-0120; (b) C45-01100 e (c) C45-6080



(a)



(b)

Figura C.13 - Corpos-de-prova da classe C65 ensaiados sob esforços de compressão axial, aos 28 dias: (a) C65-01100 e (b) C65-2040

ANEXO D: ANÁLISE ESTATÍSTICA

No caso das propriedades avaliadas com repetição de ensaios (3 ou mais determinações), técnicas estatísticas foram implementadas para validação dos resultados experimentais obtidos.

A comparação entre os diferentes tratamentos foi feita por análise de variância (ANOVA) com o auxílio do *software OriginPro 8*, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), pelo teste de comparação de médias de Tukey. Os resultados das análises estatísticas são apresentados nos itens a seguir.

D.1. Resistência à compressão do cimento

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
3 dias	4	32,675	1,91725	0,95862
7 dias	4	42,65	1,42945	0,71473
14 dias	3	46,53333	1,16762	0,67412
28 dias	4	49,925	1,17296	0,58648

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	654,89767	218,29922	100,0052	2,89286E-8
Error	11	24,01167	2,18288		
Total	14	678,90933			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,96463	0,0346	1,47746	42,70667

Means Comparisons								
Tukey Test								
	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
7 dias 3 dias	9,975	1,04472	13,50293	5,95375E-6	0,05	1	6,83088	13,11912
14 dias 3 dias	13,85833	1,12843	17,36812	3,32231E-7	0,05	1	10,46229	17,25437
14 dias 7 dias	3,88333	1,12843	4,86683	0,02429	0,05	1	0,48729	7,27937
28 dias 3 dias	17,25	1,04472	23,35094	0	0,05	1	14,10588	20,39412
28 dias 7 dias	7,275	1,04472	9,848	1,19327E-4	0,05	1	4,13088	10,41912
28 dias 14 dias	3,39167	1,12843	4,25065	0,05032	0,05	0	-0,00437	6,78771

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.1 – Análise estatística da resistência à compressão do cimento

D.2. Calibração dos parâmetros “p” e “q”

D.2.1. Argamassa natural – Areia Natural

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
1 dia	3	5,43333	0,25166	0,1453
7 dias	3	19,43333	1,33167	0,76884
28 dias	3	22,2	0,2	0,11547

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	484,77556	242,38778	387,47602	4,53504E-7
Error	6	3,75333	0,62556		
Total	8	488,52889			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics				
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean	
0,99232	0,05041	0,79092	15,68889	

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
7 dias	1 dia	14	0,64578	30,65884	1,52008E-6	0,05	1	12,01851	15,98149
28 dias	1 dia	16,76667	0,64578	36,71761	4,91342E-7	0,05	1	14,78518	18,74816
28 dias	7 dias	2,76667	0,64578	6,05877	0,01226	0,05	1	0,78518	4,74816

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.2 – Análise estatística da resistência à compressão do traço pobre da argamassa natural

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
1 dia	3	22,96667	1,09697	0,63333
7 dias	3	53,66667	1,65025	0,95277
28 dias	3	55,46667	3,50761	2,02512

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	2001,98	1000,99	185,02588	4,06173E-6
Error	6	32,46	5,41		
Total	8	2034,44			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics				
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean	
0,98404	0,05282	2,32594	44,03333	

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
7 dias	1 dia	30,7	1,89912	22,86127	8,79617E-6	0,05	1	24,87283	36,52717
28 dias	1 dia	32,5	1,89912	24,20167	6,33731E-6	0,05	1	26,67283	38,32717
28 dias	7 dias	1,8	1,89912	1,3404	0,63287	0,05	0	-4,02717	7,62717

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.3 – Análise estatística da resistência à compressão do traço rico da argamassa natural

D.2.2. Concreto natural – Brita Natural

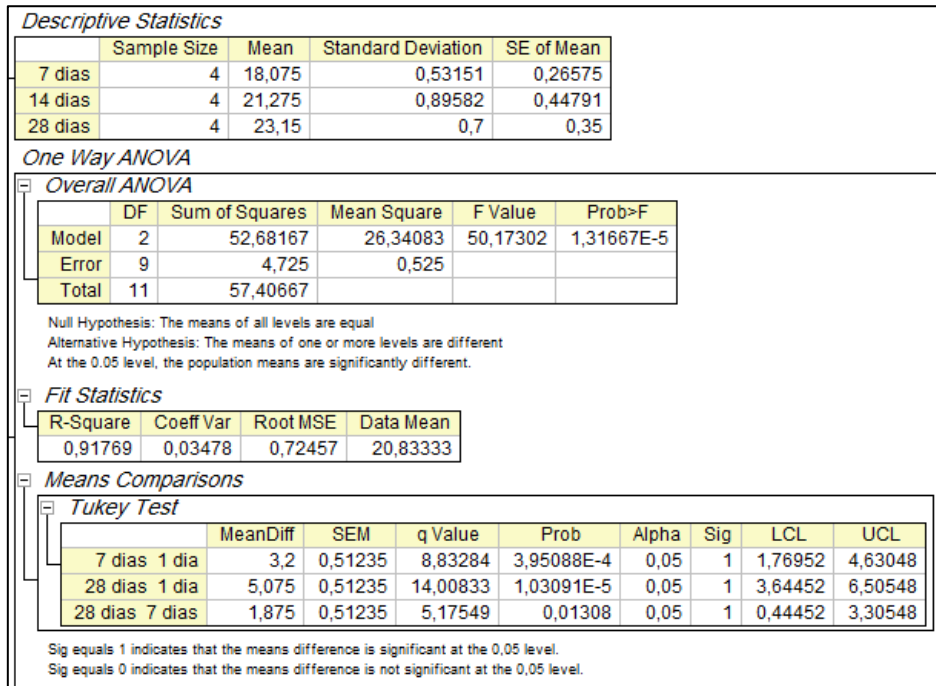


Figura D.4 – Análise estatística da resistência à compressão do traço pobre do concreto natural

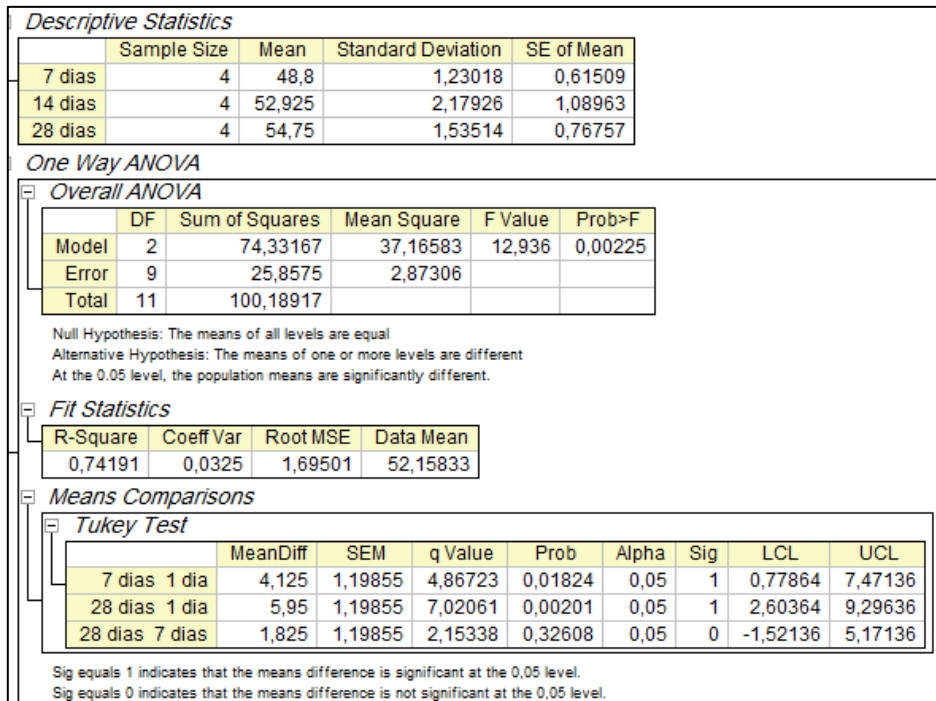


Figura D.5 – Análise estatística da resistência à compressão do traço rico do concreto natural

D.2.3. Concreto reciclado – Brita ARC

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
7 dias	3	22,26667	1,25033	0,72188
14 dias	4	26,425	0,3594	0,1797
28 dias	4	27,9	0,45461	0,2273

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	56,64765	28,32383	54,80926	2,14021E-5
Error	8	4,13417	0,51677		
Total	10	60,78182			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,93198	0,02783	0,71887	25,82727

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
7 dias	1 dia	4,15833	0,54904	10,71092	1,67747E-4	0,05	1	2,58947	5,7272
28 dias	1 dia	5,63333	0,54904	14,51019	1,8276E-5	0,05	1	4,06447	7,2022
28 dias	7 dias	1,475	0,50832	4,10368	0,04685	0,05	1	0,02251	2,92749

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.6 – Análise estatística da resistência à compressão do traço pobre do concreto reciclado

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
7 dias	3	52,5	0,81854	0,47258
14 dias	4	52,775	3,43742	1,71871
28 dias	3	54,9	3,43948	1,98578

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	10,6935	5,34675	0,61917	0,56546
Error	7	60,4475	8,63536		
Total	9	71,141			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,15031	0,0551	2,9386	53,33

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
7 dias	1 dia	0,275	2,24439	0,17328	0,99177	0,05	0	-6,33492	6,88492
28 dias	1 dia	2,4	2,39936	1,41459	0,59981	0,05	0	-4,6663	9,4663
28 dias	7 dias	2,125	2,24439	1,33898	0,6304	0,05	0	-4,48492	8,73492

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.7 – Análise estatística da resistência à compressão do traço rico do concreto reciclado

D.3. Estudo de compensação de água de absorção – Resistência à compressão

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
Ref	4	25,175	0,23629	0,11815
SSS	3	14,56667	0,56862	0,3283
Abs10m	4	17,625	0,3304	0,1652
Abs24h	4	16,1	0,52915	0,26458
50%abs	3	24,56667	0,70946	0,40961
70%abs	4	22,75	0,41231	0,20616

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	5	371,17439	74,23488	339,52112	1,22125E-15
Error	16	3,49833	0,21865		
Total	21	374,67273			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics									
Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
SSS	Ref	-10,60833	0,35713	42,00811	0	0,05	1	-11,75905	-9,45761
Abs10m	Ref	-7,55	0,33064	32,29285	0	0,05	1	-8,61536	-6,48464
Abs10m	SSS	3,05833	0,35713	12,11074	2,82537E-6	0,05	1	1,90761	4,20905
Abs24h	Ref	-9,075	0,33064	38,81558	0	0,05	1	-10,14036	-8,00964
Abs24h	SSS	1,53333	0,35713	6,07187	0,00612	0,05	1	0,38261	2,68405
Abs24h	Abs10m	-1,525	0,33064	6,52273	0,00325	0,05	1	-2,59036	-0,45964
50%abs	Ref	-0,60833	0,35713	2,40895	0,54867	0,05	0	-1,75905	0,54239
50%abs	SSS	10	0,38179	37,04162	0	0,05	1	8,76983	11,23017
50%abs	Abs10m	6,94167	0,35713	27,48842	0	0,05	1	5,79095	8,09239
50%abs	Abs24h	8,46667	0,35713	33,52729	0	0,05	1	7,31595	9,61739
70%abs	Ref	-2,425	0,33064	10,37221	2,10816E-5	0,05	1	-3,49036	-1,35964
70%abs	SSS	8,18333	0,35713	32,40531	0	0,05	1	7,03261	9,33405
70%abs	Abs10m	5,125	0,33064	21,92064	9,2491E-8	0,05	1	4,05964	6,19036
70%abs	Abs24h	6,65	0,33064	28,44337	0	0,05	1	5,58464	7,71536
70%abs	50%abs	-1,81667	0,35713	7,19385	0,00128	0,05	1	-2,96739	-0,66595

Figura D.8 – Análise estatística da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos produzidos durante o estudo de compensação de água de absorção

D.4. Resistência à compressão dos concretos reciclados

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C25-01100	4	25,425	1,02429	0,51214
C25-0120	4	25,275	1,53921	0,7696
C25-6080	4	23,45	0,81035	0,40517

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	9,67167	4,83583	3,56012	0,0726
Error	9	12,225	1,35833		
Total	11	21,89667			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,4417	0,04715	1,16548	24,71667

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C25-0120	C25-01100	-0,15	0,82412	0,25741	0,98194	0,05	0	-2,45093	2,15093
C25-6080	C25-01100	-1,975	0,82412	3,38917	0,09235	0,05	0	-4,27593	0,32593
C25-6080	C25-0120	-1,825	0,82412	3,13177	0,12189	0,05	0	-4,12593	0,47593

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.9 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da classe C25

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C45-01100	4	45,975	1,1471	0,57355
C45-0120	4	45,775	2,86167	1,43084
C45-6080	4	46,9	2,13385	1,06693

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	2,88167	1,44083	0,30747	0,74273
Error	9	42,175	4,68611		
Total	11	45,05667			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,06396	0,04684	2,16474	46,21667

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C45-0120 C45-01100	-0,2	1,5307	0,18478	0,99064	0,05	0	-4,47373	4,07373
C45-6080 C45-01100	0,925	1,5307	0,85461	0,82137	0,05	0	-3,34873	5,19873
C45-6080 C45-0120	1,125	1,5307	1,03938	0,74976	0,05	0	-3,14873	5,39873

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.10 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da classe C45

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C65-01100	4	68,075	0,3304	0,1652
C65-2040	4	63,875	3,10524	1,55262
C65-4060	4	62,525	0,85391	0,42696
C65-6080	4	62,35	0,92556	0,46278

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	85,39687	28,46562	10,043	0,00136
Error	12	34,0125	2,83438		
Total	15	119,40937			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,71516	0,02622	1,68356	64,20625

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C65-2040 C65-01100	-4,2	1,19046	4,98943	0,01884	0,05	1	-7,73433	-0,66567
C65-4060 C65-01100	-5,55	1,19046	6,59317	0,00266	0,05	1	-9,08433	-2,01567
C65-4060 C65-2040	-1,35	1,19046	1,60374	0,67667	0,05	0	-4,88433	2,18433
C65-6080 C65-01100	-5,725	1,19046	6,80106	0,00208	0,05	1	-9,25933	-2,19067
C65-6080 C65-2040	-1,525	1,19046	1,81164	0,59108	0,05	0	-5,05933	2,00933
C65-6080 C65-4060	-0,175	1,19046	0,20789	0,9988	0,05	0	-3,70933	3,35933

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.11 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da classe C65

D.5. Deformação de pico no ensaio de resistência à compressão dos concretos reciclados

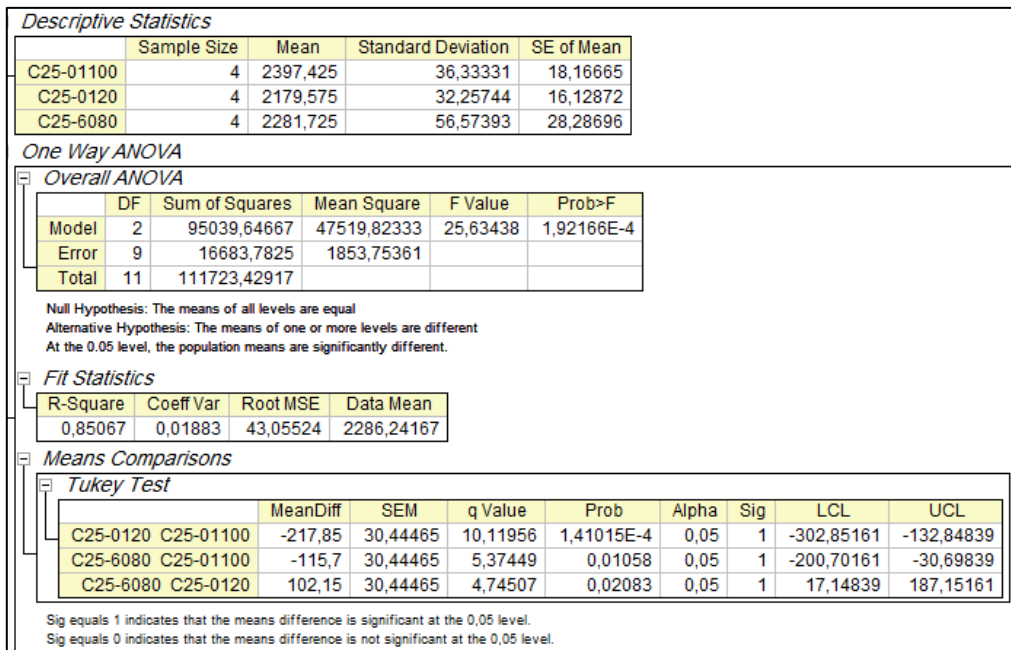


Figura D.12 – Análise estatística da deformação de pico sob esforços de compressão axial dos concretos da classe C25

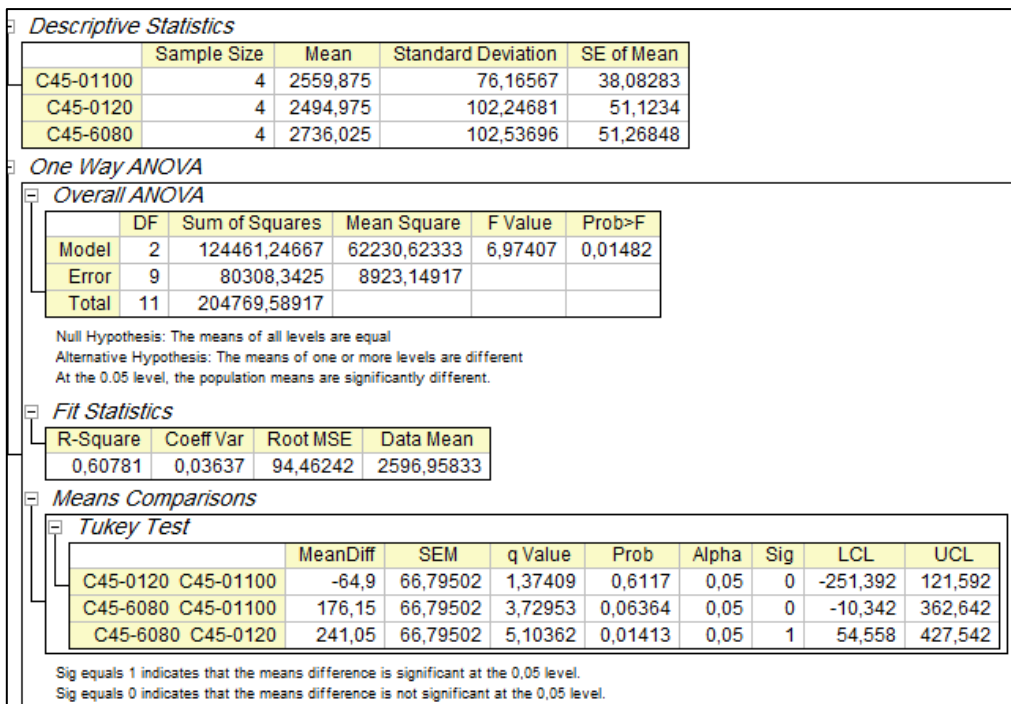


Figura D.13 – Análise estatística da deformação de pico sob esforços de compressão axial dos concretos da classe C45

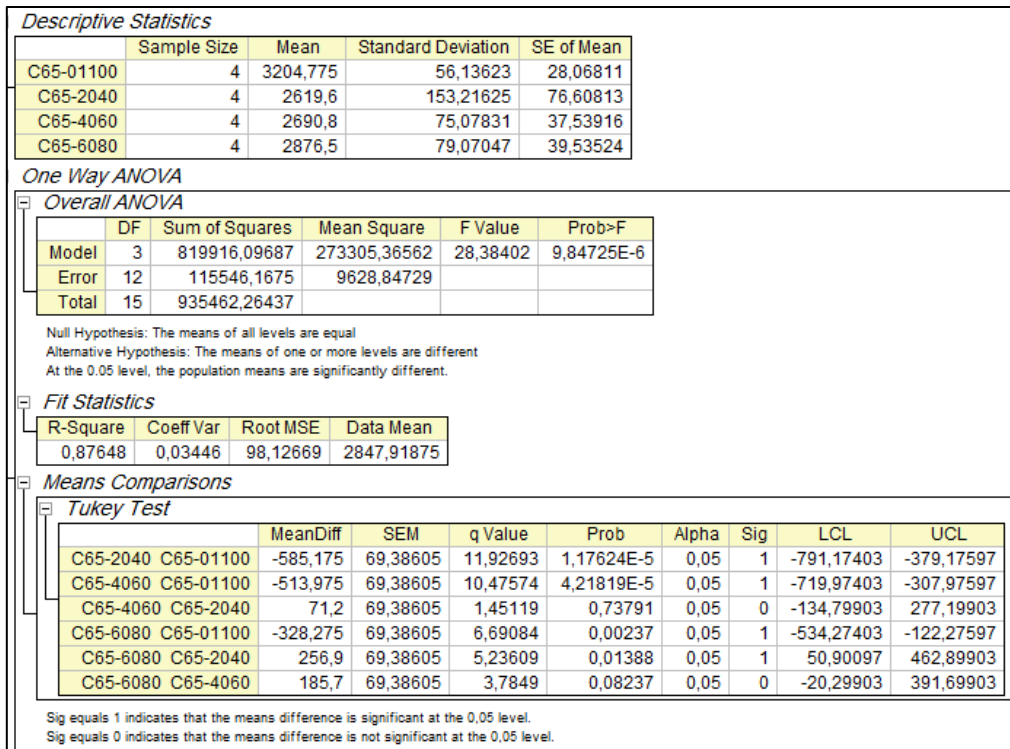


Figura D.14 – Análise estatística da deformação de pico sob esforços de compressão axial dos concretos da classe C65

D.6. Módulo de elasticidade dos concretos reciclados sob esforços de compressão axial

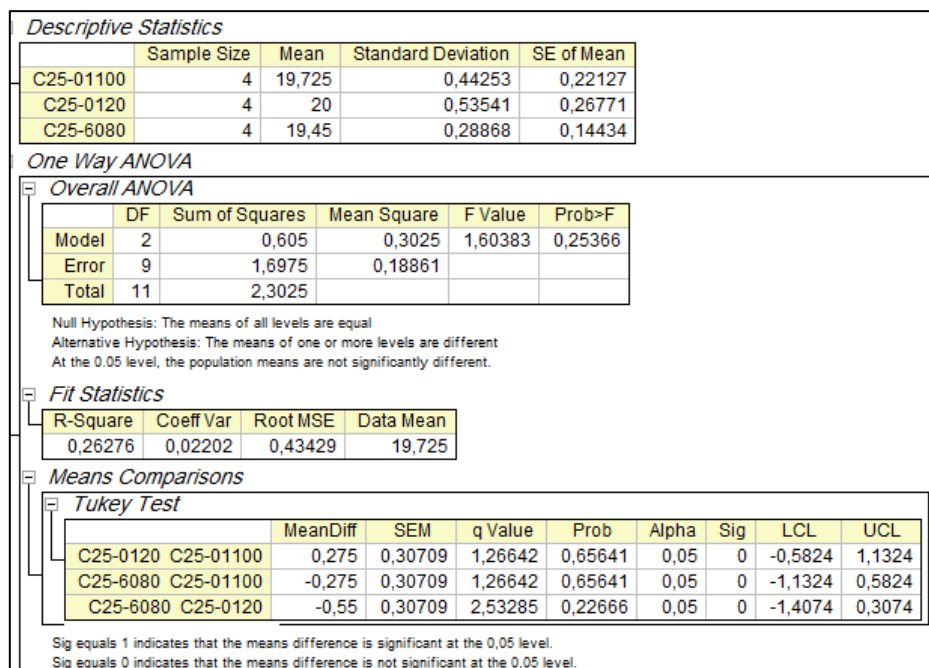


Figura D.15 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos concretos da classe C25

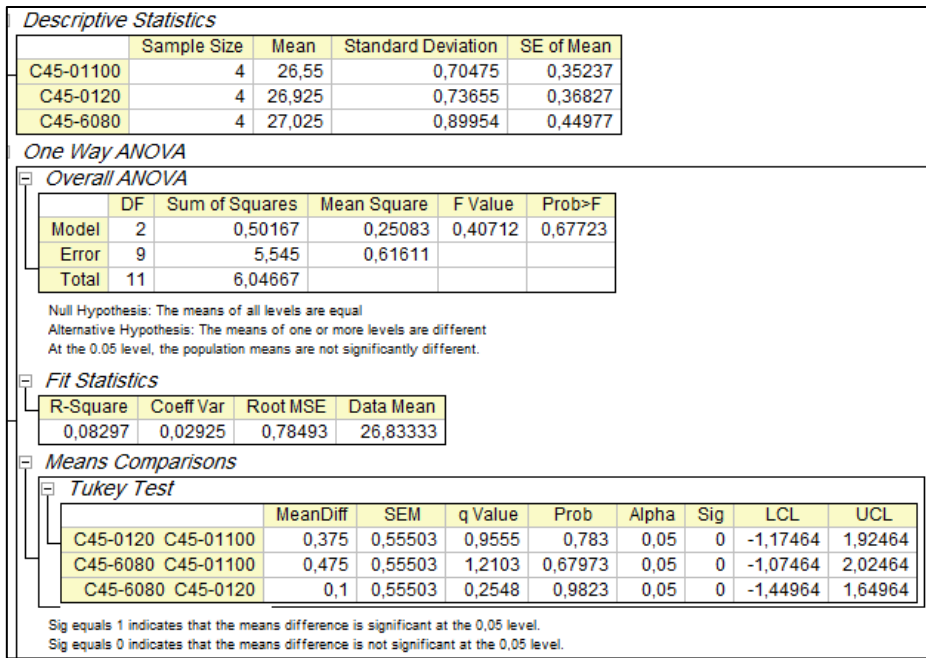


Figura D.16 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos concretos da classe C45

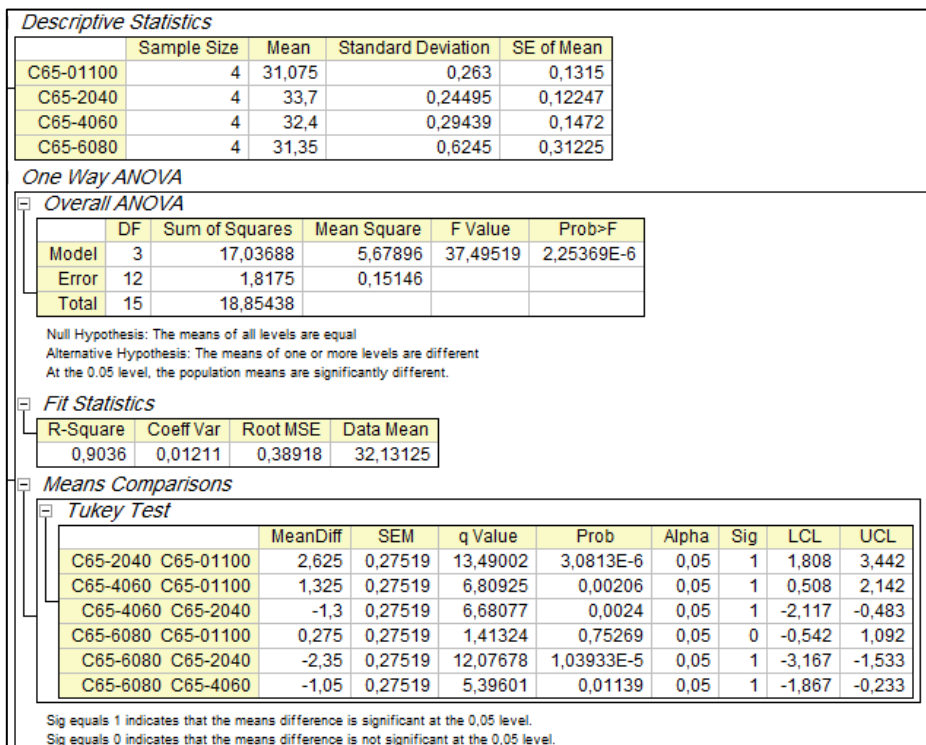


Figura D.17 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos concretos da classe C65

D.7. Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias dos concretos reciclados

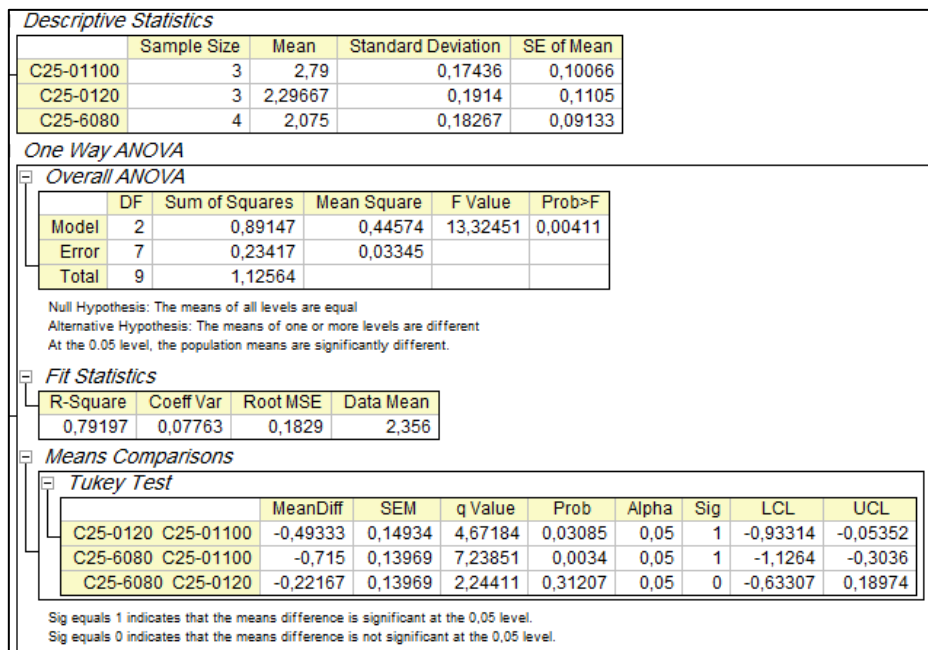


Figura D.18 – Análise estatística da resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C25

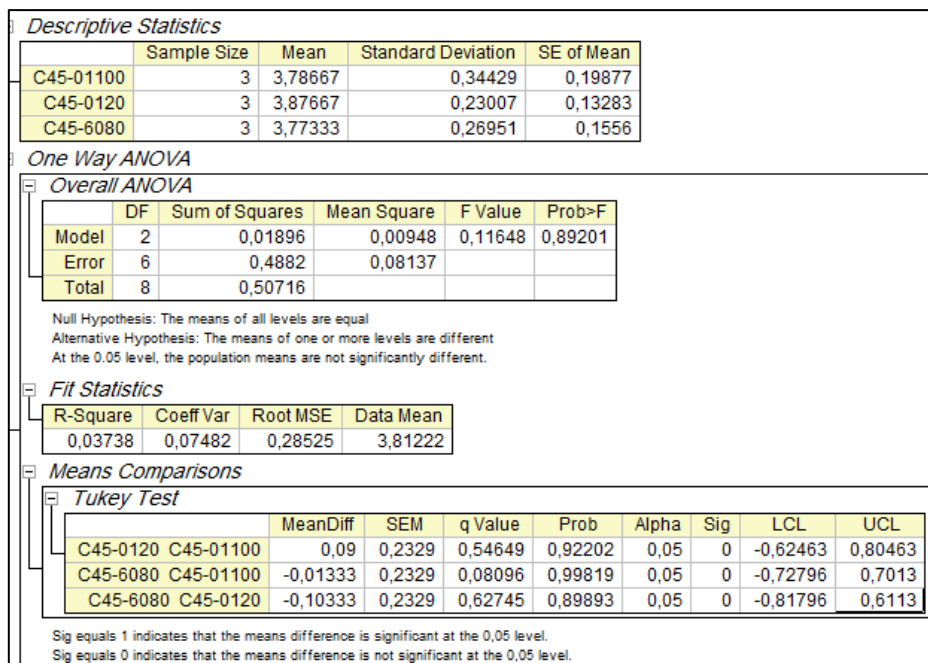


Figura D.19 – Análise estatística da resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C45

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C65-01100	3	5,01333	0,17898	0,10333
C65-2040	3	3,90333	0,17039	0,09838
C65-4060	3	4,77	0,45033	0,26
C65-6080	3	3,75667	0,2967	0,1713

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	3,50249	1,1675	13,27078	0,00179
Error	8	0,7038	0,08797		
Total	11	4,20629			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,83268	0,06802	0,29661	4,36083

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C65-2040 C65-01100	-1,11	0,24218	6,48192	0,00777	0,05	1	-1,88554	-0,33446
C65-4060 C65-01100	-0,24333	0,24218	1,42096	0,7513	0,05	0	-1,01887	0,5322
C65-4060 C65-2040	0,86667	0,24218	5,06096	0,02957	0,05	1	0,09113	1,6422
C65-6080 C65-01100	-1,25667	0,24218	7,3384	0,00368	0,05	1	-2,0322	-0,48113
C65-6080 C65-2040	-0,14667	0,24218	0,85647	0,92745	0,05	0	-0,9222	0,62887
C65-6080 C65-4060	-1,01333	0,24218	5,91743	0,01303	0,05	1	-1,78887	-0,2378

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.20 – Análise estatística da resistência à tração por compressão diametral dos concretos da classe C65

D.8. Absorção total de água dos concretos reciclados

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C25-01100	3	2,18	0,12124	0,07
C25-0120	3	1,86333	0,10786	0,06227
C25-6080	3	2,58333	0,15275	0,08819

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,78136	0,39068	23,59799	0,00143
Error	6	0,09933	0,01656		
Total	8	0,88069			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,88721	0,05825	0,12867	2,20889

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C25-0120 C25-01100	-0,31667	0,10506	4,26276	0,05345	0,05	0	-0,63902	0,00569
C25-6080 C25-01100	0,40333	0,10506	5,42941	0,02005	0,05	1	0,08098	0,72569
C25-6080 C25-0120	0,72	0,10506	9,69217	0,00116	0,05	1	0,39765	1,04235

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.21 – Análise estatística do ensaio de absorção total de água dos concretos da classe C25

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C45-01100	3	1,37	0,05568	0,03215
C45-0120	3	1,35333	0,02309	0,01333
C45-6080	3	1,2	0,01	0,00577

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,05269	0,02634	21,16964	0,00191
Error	6	0,00747	0,00124		
Total	8	0,06016			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,87588	0,02697	0,03528	1,30778

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C45-0120 C45-01100	-0,01667	0,0288	0,81832	0,83612	0,05	0	-0,10505	0,07171
C45-6080 C45-01100	-0,17	0,0288	8,34683	0,00255	0,05	1	-0,25838	-0,08162
C45-6080 C45-0120	-0,15333	0,0288	7,52852	0,00431	0,05	1	-0,24171	-0,06495

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.22 – Análise estatística do ensaio de absorção total de água dos concretos da classe C45

Descriptive Statistics

	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C65-01100	3	0,59667	0,03055	0,01764
C65-2040	3	0,55667	0,04163	0,02404
C65-4060	3	0,58667	0,04619	0,02667
C65-6080	3	0,57667	0,04041	0,02333

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	0,00263	8,75E-4	0,54404	0,66572
Error	8	0,01287	0,00161		
Total	11	0,01549			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,16945	0,06924	0,0401	0,57917

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C65-2040 C65-01100	-0,04	0,03274	1,72756	0,63154	0,05	0	-0,14486	0,06486
C65-4060 C65-01100	-0,01	0,03274	0,43189	0,98936	0,05	0	-0,11486	0,09486
C65-4060 C65-2040	0,03	0,03274	1,29567	0,7973	0,05	0	-0,07486	0,13486
C65-6080 C65-01100	-0,02	0,03274	0,86378	0,9258	0,05	0	-0,12486	0,08486
C65-6080 C65-2040	0,02	0,03274	0,86378	0,9258	0,05	0	-0,08486	0,12486
C65-6080 C65-4060	-0,01	0,03274	0,43189	0,98936	0,05	0	-0,11486	0,09486

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.23 – Análise estatística do ensaio de absorção total de água dos concretos da classe C65

D.9. Índice de vazios dos concretos reciclados

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C25-01100	3	4,71667	0,26558	0,15333
C25-0120	3	4,06667	0,22502	0,12991
C25-6080	3	5,43333	0,30665	0,17704

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	2,80389	1,40194	19,54384	0,00236
Error	6	0,4304	0,07173		
Total	8	3,23429			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,86693	0,05652	0,26783	4,73889

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C25-0120	C25-01100	-0,65	0,21868	4,20352	0,0563	0,05	0	-1,321	0,021
C25-6080	C25-01100	0,71667	0,21868	4,63465	0,03875	0,05	1	0,04567	1,38766
C25-6080	C25-0120	1,36667	0,21868	8,83818	0,00189	0,05	1	0,69567	2,03766

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.24 – Análise estatística dos resultados de índice de vazios dos concretos da classe C25

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C45-01100	3	3,06667	0,1106	0,06386
C45-0120	3	3,01667	0,04726	0,02728
C45-6080	3	2,67667	0,01528	0,00882

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,2702	0,1351	27,57143	9,44967E-4
Error	6	0,0294	0,0049		
Total	8	0,2996			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,90187	0,02397	0,07	2,92

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C45-0120	C45-01100	-0,05	0,05715	1,23718	0,67429	0,05	0	-0,22537	0,12537
C45-6080	C45-01100	-0,39	0,05715	9,65	0,00118	0,05	1	-0,56537	-0,21463
C45-6080	C45-0120	-0,34	0,05715	8,41282	0,00244	0,05	1	-0,51537	-0,16463

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.25 – Análise estatística dos resultados de índice de vazios dos concretos da classe C45

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C65-01100	3	1,38667	0,07638	0,0441
C65-2040	3	1,29667	0,09713	0,05608
C65-4060	3	1,35667	0,09815	0,05667
C65-6080	3	1,31333	0,09713	0,05608

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	0,0151	0,00503	0,58641	0,64071
Error	8	0,06867	0,00858		
Total	11	0,08377			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,18026	0,06923	0,09265	1,33833

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C65-2040	C65-01100	-0,09	0,07565	1,68258	0,64938	0,05	0	-0,33224	0,15224
C65-4060	C65-01100	-0,03	0,07565	0,56086	0,97744	0,05	0	-0,27224	0,21224
C65-4060	C65-2040	0,06	0,07565	1,12172	0,85568	0,05	0	-0,18224	0,30224
C65-6080	C65-01100	-0,07333	0,07565	1,37099	0,76997	0,05	0	-0,31558	0,16891
C65-6080	C65-2040	0,01667	0,07565	0,31159	0,99591	0,05	0	-0,22558	0,25891
C65-6080	C65-4060	-0,04333	0,07565	0,81013	0,93746	0,05	0	-0,28558	0,19891

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.26 – Análise estatística dos resultados de índice de vazios dos concretos da classe C65

D.10. Massa específica dos concretos reciclados

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C25-01100	3	2166,06	1,49278	0,86186
C25-0120	3	2185,73	10,04472	5,79932
C25-6080	3	2105,53333	7,21181	4,16374

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	10481,89162	5240,94581	101,34943	2,37626E-5
Error	6	310,26987	51,71164		
Total	8	10792,16149			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,97125	0,00334	7,19108	2152,44111

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C25-0120	C25-01100	19,67	5,87149	4,73774	0,0355	0,05	1	1,65422	37,68578
C25-6080	C25-01100	-60,52667	5,87149	14,57851	1,19976E-4	0,05	1	-78,54245	-42,51088
C25-6080	C25-0120	-80,19667	5,87149	19,31625	2,3639E-5	0,05	1	-98,21245	-62,18088

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.27 – Análise estatística dos resultados de massa específica dos concretos da classe C25

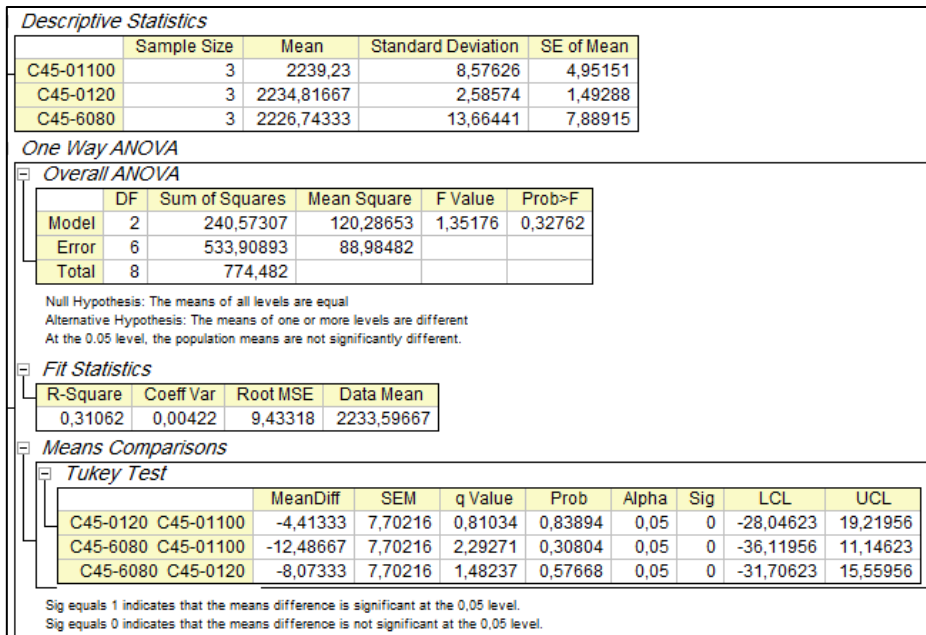


Figura D.28 – Análise estatística dos resultados de massa específica dos concretos da classe C45

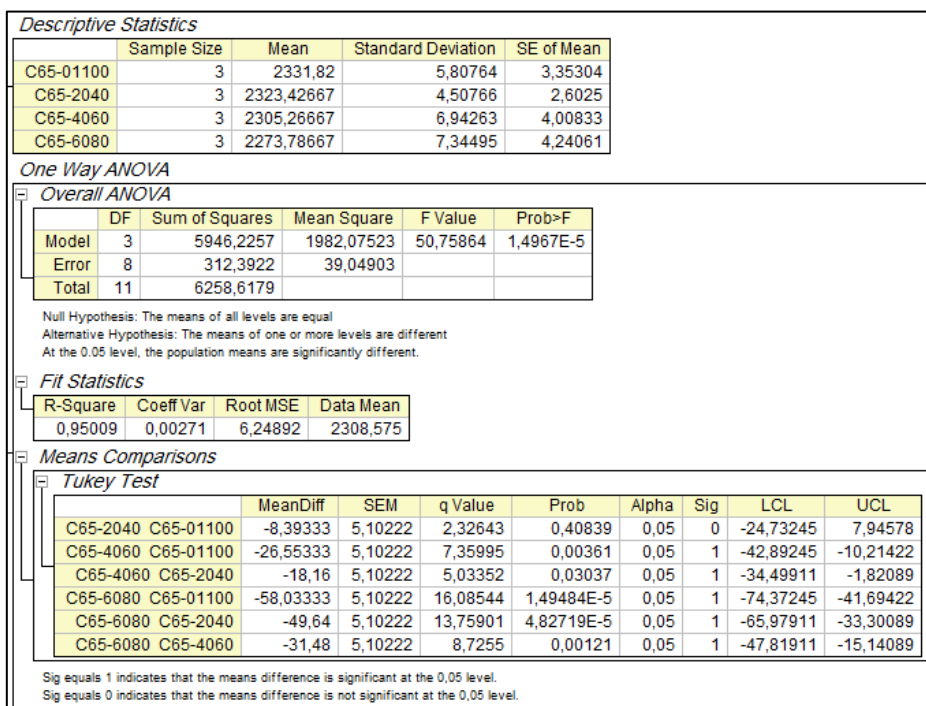


Figura D.29 – Análise estatística dos resultados de massa específica dos concretos da classe C65

D.11. Absorção por capilaridade dos concretos reciclados

D.11.1. Absorção capilar em 72 horas

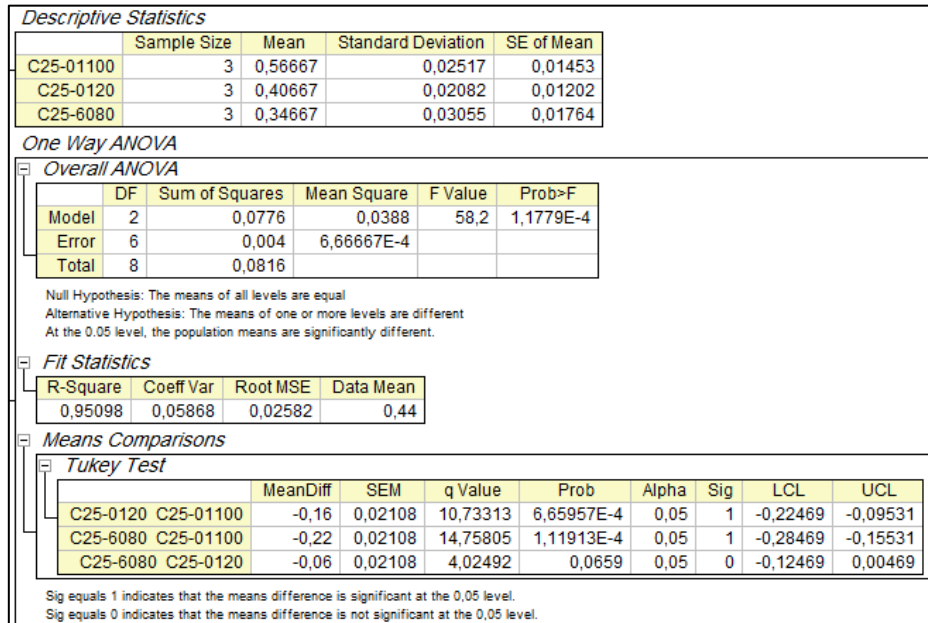


Figura D.30 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 72 horas, dos concretos da classe C25

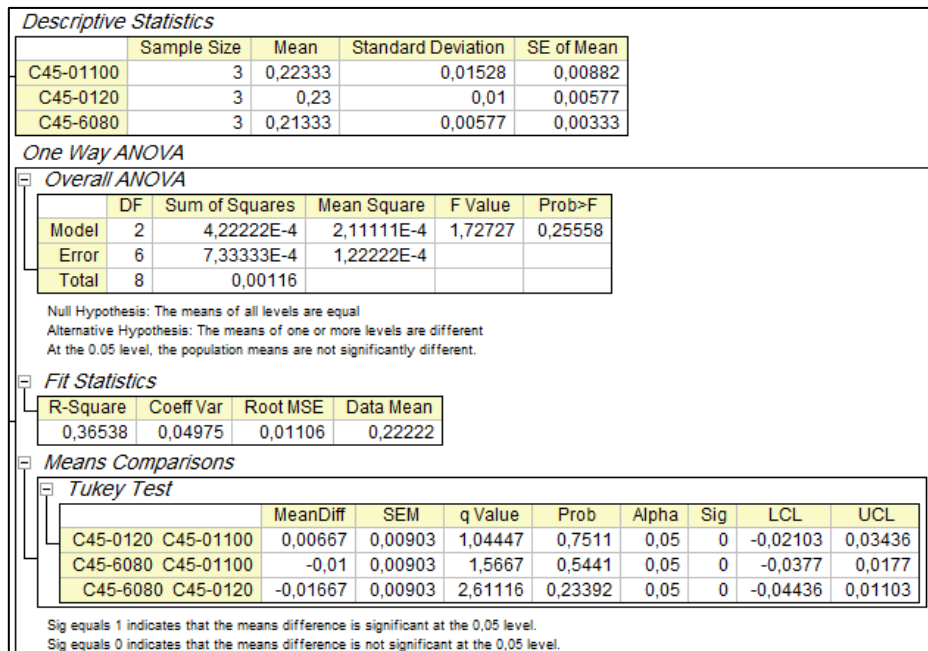


Figura D.31 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 72 horas, dos concretos da classe C45

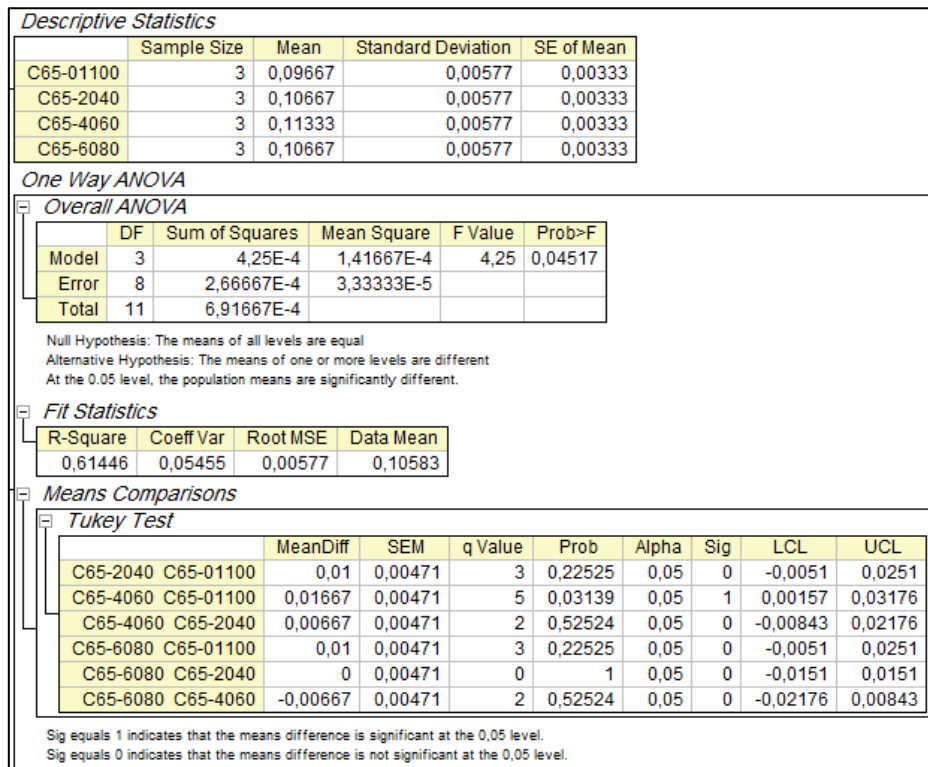


Figura D.32 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 72 horas, dos concretos da classe C65

D.11.2. Absorção capilar em 28 dias

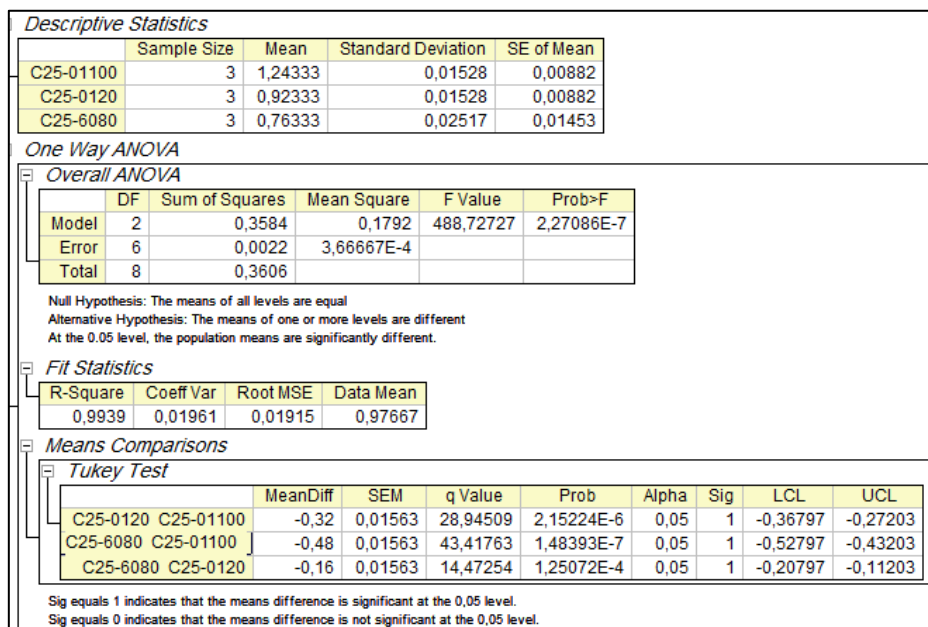


Figura D.33 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 28 dias, dos concretos da classe C25

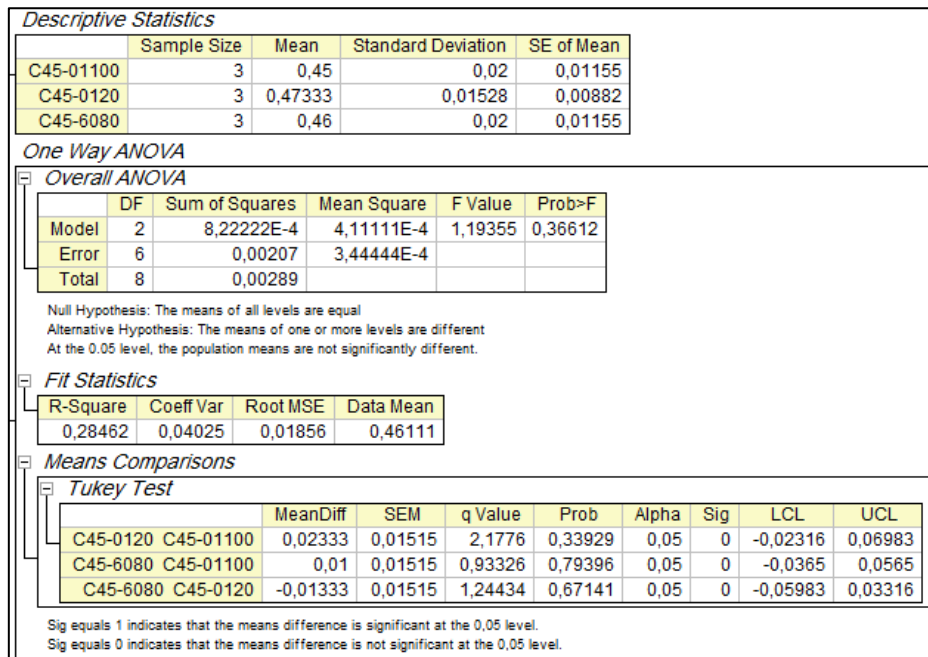


Figura D.34 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 28 dias, dos concretos da classe C45

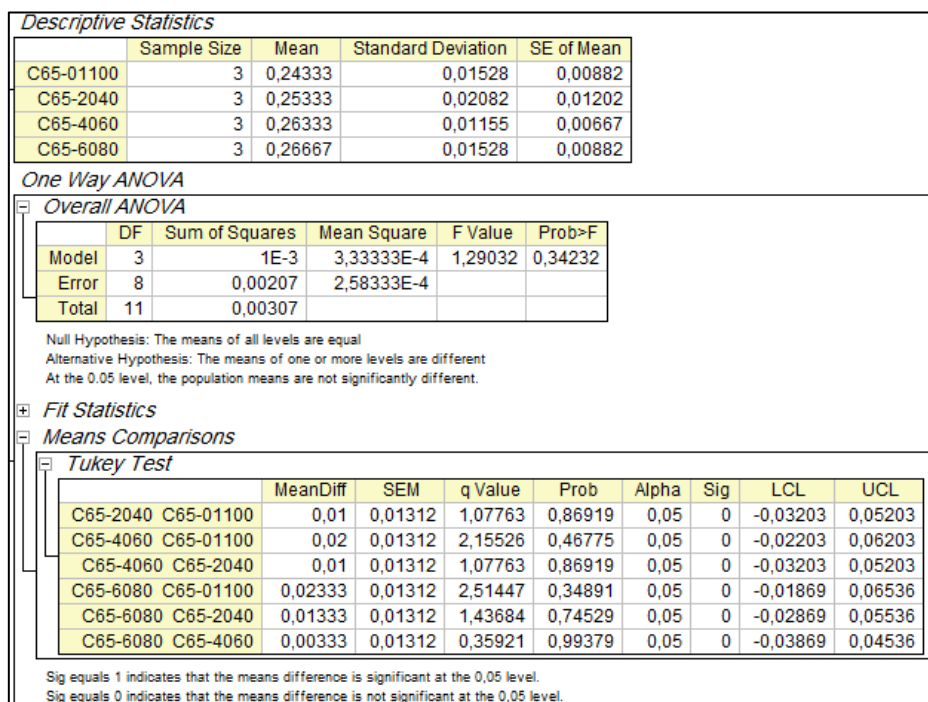


Figura D.35 – Análise estatística dos resultados de absorção capilar, em 28 dias, dos concretos da classe C65

D.12. Permeabilidade à gás nitrogênio dos concretos reciclados

D.12.1. Permeabilidade intrínseca

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C25-01100	3	3,38885E-16	2,84669E-17	1,64353E-17
C25-0120	3	3,15106E-16	2,97521E-17	1,71774E-17
C25-6080	3	3,61056E-16	1,99681E-17	1,15286E-17

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	3,16841E-33	1,5842E-33	--	--
Error	6	4,18855E-33	6,98092E-34		
Total	8	7,35696E-33			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.
 There is no enough information to draw conclusion.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0	0,07809	2,64214E-17	3,38349E-16

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C25-0120	C25-01100	-2,37791E-17	2,1573E-17	1,55883	0,5471	0,05	0	-8,99726E-17	4,24144E-17
C25-6080	C25-01100	2,2171E-17	2,1573E-17	1,45341	0,58802	0,05	0	-4,40225E-17	8,83645E-17
C25-6080	C25-0120	4,59501E-17	2,1573E-17	3,01225	0,16365	0,05	0	-2,02434E-17	1,12144E-16

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.36 – Análise estatística dos resultados de permeabilidade intrínseca dos concretos da classe C25

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C45-01100	3	8,8844E-17	4,35985E-18	2,51716E-18
C45-0120	3	8,05108E-17	5,02338E-18	2,90025E-18
C45-6080	3	8,41807E-17	7,77069E-18	4,48641E-18

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	1,04657E-34	5,23284E-35	--	--
Error	6	2,09253E-34	3,48754E-35		
Total	8	3,13909E-34			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
 At the 0,05 level, the population means are significantly different.
 There is no enough information to draw conclusion.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0	0,06988	5,90554E-18	8,45118E-17

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C45-0120	C45-01100	-8,3332E-18	4,82185E-18	2,44406	0,27062	0,05	0	-2,31283E-17	6,46193E-18
C45-6080	C45-01100	-4,6633E-18	4,82185E-18	1,36771	0,62196	0,05	0	-1,94584E-17	1,01318E-17
C45-6080	C45-0120	3,6699E-18	4,82185E-18	1,07635	0,73855	0,05	0	-1,11252E-17	1,8465E-17

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.37 – Análise estatística dos resultados de permeabilidade intrínseca dos concretos da classe C45

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C65-01100	3	3,63438E-17	1,76029E-18	1,0163E-18
C65-2040	3	3,56021E-17	2,85407E-18	1,6478E-18
C65-4060	3	3,75462E-17	1,44871E-18	8,36414E-19
C65-6080	3	6,69411E-17	5,83847E-18	3,37084E-18

One Way ANOVA

Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	2,09112E-33	6,97041E-34	--	--
Error	8	9,48616E-35	1,18577E-35		
Total	11	2,18598E-33			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are significantly different.
There is no enough information to draw conclusion.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0	0,07807	3,4435E-18	4,41083E-17

Means Comparisons

Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C65-2040	C65-01100	-7,41664E-19	2,81161E-18	0,37305	0,99306	0,05	0	-9,74542E-18	8,26209E-18
C65-4060	C65-01100	1,20238E-18	2,81161E-18	0,60478	0,97207	0,05	0	-7,80138E-18	1,02061E-17
C65-4060	C65-2040	1,94404E-18	2,81161E-18	0,97784	0,89755	0,05	0	-7,05971E-18	1,09478E-17
C65-6080	C65-01100	3,05973E-17	2,81161E-18	15,39018	2,09039E-5	0,05	1	2,15936E-17	3,96011E-17
C65-6080	C65-2040	3,1339E-17	2,81161E-18	15,76323	1,74354E-5	0,05	1	2,23352E-17	4,03427E-17
C65-6080	C65-4060	2,93949E-17	2,81161E-18	14,78539	2,82734E-5	0,05	1	2,03912E-17	3,83987E-17

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.38 – Análise estatística dos resultados de permeabilidade intrínseca dos concretos da classe C65

D.12.2. Coeficiente de permeabilidade

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C25-01100	3	2,37902E-10	1,99841E-11	1,15379E-11
C25-0120	3	2,21209E-10	2,08864E-11	1,20588E-11
C25-6080	3	2,53467E-10	1,40179E-11	8,09324E-12

One Way ANOVA

Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	1,56147E-21	7,80734E-22	2,26933	0,18454
Error	6	2,06422E-21	3,44037E-22		
Total	8	3,62569E-21			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,43067	0,07809	1,85482E-11	2,37526E-10

Means Comparisons

Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C25-0120	C25-01100	-1,66933E-11	1,51446E-11	1,55883	0,5471	0,05	0	-6,31621E-11	2,97755E-11
C25-6080	C25-01100	1,55644E-11	1,51446E-11	1,45341	0,58802	0,05	0	-3,09044E-11	6,20332E-11
C25-6080	C25-0120	3,22576E-11	1,51446E-11	3,01225	0,16365	0,05	0	-1,42112E-11	7,87264E-11

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.39 – Análise estatística dos resultados de coeficiente de permeabilidade dos concretos da classe C25

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C45-01100	3	6,23698E-11	3,06068E-12	1,76708E-12
C45-0120	3	5,65197E-11	3,52648E-12	2,03602E-12
C45-6080	3	5,90961E-11	5,45514E-12	3,14953E-12

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	5,15774E-23	2,57887E-23	1,50044	0,29621
Error	6	1,03125E-22	1,71875E-23		
Total	8	1,54702E-22			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,3334	0,06988	4,14578E-12	5,93285E-11

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C45-0120	C45-01100	-5,85003E-12	3,38501E-12	2,44406	0,27062	0,05	0	-1,62364E-11	4,53637E-12
C45-6080	C45-01100	-3,2737E-12	3,38501E-12	1,36771	0,62196	0,05	0	-1,36601E-11	7,11269E-12
C45-6080	C45-0120	2,57632E-12	3,38501E-12	1,07635	0,73855	0,05	0	-7,81007E-12	1,29627E-11

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.40 – Análise estatística dos resultados de coeficiente de permeabilidade dos concretos da classe C45

Descriptive Statistics				
	Sample Size	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
C65-01100	3	2,55139E-11	1,23575E-12	7,13458E-13
C65-2040	3	2,49932E-11	2,0036E-12	1,15678E-12
C65-4060	3	2,6358E-11	1,01702E-12	5,87175E-13
C65-6080	3	4,69936E-11	4,09869E-12	2,36638E-12

One Way ANOVA					
Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	1,03056E-21	3,43519E-22	58,78383	8,57429E-6
Error	8	4,67501E-23	5,84376E-24		
Total	11	1,07731E-21			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different
At the 0,05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,9566	0,07807	2,41739E-12	3,09647E-11

Means Comparisons									
Tukey Test									
		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
C65-2040	C65-01100	-5,20659E-13	1,97379E-12	0,37305	0,99306	0,05	0	-6,84142E-12	5,80011E-12
C65-4060	C65-01100	8,44085E-13	1,97379E-12	0,60478	0,97207	0,05	0	-5,47668E-12	7,16485E-12
C65-4060	C65-2040	1,36474E-12	1,97379E-12	0,97784	0,89755	0,05	0	-4,95602E-12	7,68551E-12
C65-6080	C65-01100	2,14798E-11	1,97379E-12	15,39018	2,09039E-5	0,05	1	1,5159E-11	2,78005E-11
C65-6080	C65-2040	2,20004E-11	1,97379E-12	15,76323	1,74354E-5	0,05	1	1,56797E-11	2,83212E-11
C65-6080	C65-4060	2,06357E-11	1,97379E-12	14,78539	2,82734E-5	0,05	1	1,43149E-11	2,69564E-11

Sig equals 1 indicates that the means difference is significant at the 0,05 level.
Sig equals 0 indicates that the means difference is not significant at the 0,05 level.

Figura D.41 – Análise estatística dos resultados de coeficiente de permeabilidade dos concretos da classe C65