WINNIE FRANCO SANTOS

TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COM HIDROFUGANTES

São Paulo

2016

WINNIE FRANCO SANTOS

TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COM HIDROFUGATE

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2016

WINNIE FRANCO SANTOS

TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COM HIDROFUGANTES

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Sérgio Cirelli Ângulo

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo,_____de_____de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Winnie

TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COM HIDROFUGANTES / W. Santos -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

166 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Absorção 2.agregados reciclados 3.hidrofugante 4.molhabilidade 5.rugosidade superficial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Vir-a-ser

"É preciso dançar sobre os
Abismos
Rir de tudo e de todos
Superar o aqui e agora
Ser uma ponte e jamais um fim
Conviver com incertezas
Desconfiar, desconfiar
Desconfiar
Tudo é passível de
Questionamento
Valores, conceitos e preceitos
O equilíbrio e a loucura
Os sentimentos mais dignos
A ciência, a história e a religião
Nada, absolutamente, nada
Pode ser considerado
Definitivo
Concluir é atrofiar, estagnar,
Morrer..."

Ivan Petrovitch

Às energias e luzes que me acompanharam e me guiaram durante essa jornada, me sustentando com coragem para agir e propor novas possibilidades.

Aos meus pais, Célio e Aurilene por terem entendido tudo antes de mim, pelo suporte à minha educação sempre.

Ao meu querido irmão Alanno, e à Sara, a quem estimo como uma irmã, pelas vibrações positivas e apoio infalível.

À vovó Ormezina *(in memorian)* pelo incentivo à leitura.

À Flecha *(in memorian*) pela ternura eterna.

A todos aqueles que são motivados pela capacidade de inovar e acreditam que é possível o desenvolvimento sustentável no mundo.

AGRADECIMENTOS

Finalmente chega o momento em que todo o caminho é lembrado, todos os passos foram necessários para aprender a chegar até aqui. Algumas pegadas com rastros de desespero e angústia. Haviam formigas, haviam armas no caminho. Outras pegadas com indícios de um pé só. As mais importantes nem deixaram marcas, pois haviam pulos de vitórias e conquistas. Nessa caminhada valeu a pena o aprendizado e crescimento. Sei que não venci sozinha. Ao meu lado caminhou um grupo.

Agradeço inicialmente ao meu orientador Prof. Sérgio Angulo por me permitir fazer parte de sua equipe. Pelo incentivo às discussões, pela motivação constante. Pela sua disponibilidade e acompanhamento assíduo. Por me ensinar a aprender. Admiro sua dedicação e paciência. Muito obrigada pela orientação! Eu realmente me senti “adotada”.

Também parte dessa equipe, agradeço ao Dr. Marco Quattrone. Pelo trabalho incansável em conjunto e apoio imprescindível. Agradeço a disposição e diligência. Foi um grande desafio para a ‘’gente’’! Ninguém disse que seria fácil, mas estou certa de que nada é impossível! Nem tudo que eu “toco estraga”. “Calma e gesso”.

Eu não teria passado da pilha de homogeneização sem vocês. Minha eterna gratidão por todo o cuidado dedicado a mim.

Ao auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo– FAPESP (processo 2013/14307-0). A Dow Corning Construction pelos produtos cedidos a pesquisa.

Ao Prof. Rafael Pileggi e à Prof. Eliane Costa por aceitarem participar das bancas de qualificação e defesa, pelas contribuições tanto para dar continuidade como no encerramento deste trabalho. O auxílio foi de fundamental importância.

À Prof. Carina Ulsen pelo suporte sempre que necessário para utilização de equipamentos no LCT e a todos os funcionários e estagiários que foram atenciosos e dedicados sem medir esforços para ajudar.

Agradeço aos outros professores da Poli que contribuíram com suas disciplinas e ensinamentos para o meu aprendizado. Em especial ao Prof. Vanderley John que desde o primeiro dia me deu boas-vindas ao sistema e fez com que eu me sentisse incluída.

Obrigada a todos os colegas de trabalho do Laboratório de Microestrutura e Eco-eficiência de Materiais (LME). Agradeço à Eliane por me apresentar aos colegas e laboratórios, por me ensinar a operar cada equipamento para ensaios de superfície e ceder uma parte do seu material. Agradeço à colaboração do Fábio Alonso no planejamento experimental e pelas sugestões. Ao César Romano pela atenção e assistência tanto em análise de dados como nas técnicas de ensaio. Ao aluno de iniciação científica João Tarifa pelo auxílio nas

atividades. À Engracia Bartuciotti pelo socorro com prestação de contas e disposição. Carla sua gentileza foi fundamental para cumprimento dos prazos. Ao Mário Takeashi pela assistência no *making of* do ensaio fotográfico das ‘’pedrinhas’’. Ao Reginaldo, Adilson, Renata e Jéssica pelo auxílio durante os ensaios. À equipe de informática: Patrícia e Rogério pela presteza. Franco, Marcel obrigada por tantos ensaios até tarde. Roberto pela torcida e carinho na etapa final. Victor Sakano e Gabriela Valencia obrigada por tudo! Simplesmente por serem tão agradáveis, prestativos e o mais importante, meus amigos. Sim, é possível ter amigos dentro de um laboratório! Ana Werle, e Marylinda o CEDIPLAC não é o mesmo sem vocês!

Aos colegas da “Farofoide” com vocês as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhora tudo. Caro Diaz, Lidiane, Débora, Isabela, Leonardo, Karol, Karen (*we need those Stones to be happy),* Caroline Pessoa pelos cafés e por compartilharem da amizade e companheirismo. Fabrício pelos momentos de descontração quando eu tinha “winnites”, comentários únicos, *rezos* e heranças costarriquenhas. Juliana e Sebastián obrigada por me acolherem com alegria. Raphael Baldusco (Rápido!) pela companhia e auxílio sempre que preciso. Yazmin seu suporte no dia da defesa foi essencial, tens a minha admiração. Agradeço a dona Josefa pelo sorriso todas as manhãs. Aos iniciantes Natália, Pedro e Daniel pelo apoio e entusiasmo.

A Camila Numazawa, Filipe Larêdo, Felipe Jaime, Carol Serna, Margarita, Ricardo Alferes e ao Marco por segurarem firme a minha mão dentro ou fora da Universidade, compartilhando de muitas alegrias e momentos nem tão felizes. Graças a vocês eu sei o que é reconhecer o valor que o outro tem e o que ele faz sem exigir nada em troca.

Aos que deixei em outras cidades, obrigada pela paciência e compreensão quando foram necessárias renuncias e não pude lhes dedicar merecida atenção. Em especial a Pedrita, minha querida amiga.

A Simone por fazer com que o trajeto à fisioterapia fosse uma viagem diferente e divertida a cada dia. Pelos cuidados durante e depois, o que resultou e uma linda amizade.

Um agradecimento especial ao Victor Steiner e à Thais Adamowicz pelo convívio saudável nessa última fase.

Aproveito para agradecer o psicólogo Victor Vieira. Por me escutar sem julgar. Pelas palavras certas, que me ajudaram a enxergar a vida de maneira diferente para enfrentar dificuldades e encontrar meu caminho.

A toda minha família. Principalmente meus pais Célio e Aurilene pela estrutura emocional e assistência financeira durante todo esse tempo. Seus cuidados e dedicação me deram esperança para prosseguir.

Winnie F. Santos
São Paulo,2016

“Quero ensinar-te o que aprendi, mas isso eu quero te dar gratuitamente, porque tu farás com esse aprendizado algo diferente do que fiz. E sei que, de algum modo, encontrarás a forma de me dizer que fizestes de forma diferente e por que o fizestes. ”

Richard Bach

RESUMO

A proposta busca reduzir a absorção de água dos agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), através do tratamento de sua superfície com hidrofugante, de maneira que estes não aumentem o consumo de água tampouco reduzam a resistência mecânica. Os agregados reciclados de RCD foram caracterizados quanto à granulometria, morfologia, porosidade, ângulo de contato aparente, absorção de água, análise de imagem e rugosidade superficial. Em seguida, os mesmos foram tratados superficialmente com dois tipos de hidrofugante: solução de silano e parafina. Todos os tratamentos permitiram reduzir a absorção de água dos agregados reciclados de RCD. O tratamento por imersão foi aquele que permitiu obter os melhores resultados e a menor variabilidade entre as técnicas. Os tratamentos hidrofugam a superfície, apesar da parafina apresentar maior molhabilidade. O tratamento com parafina apresentou, em termos de absorção de água, resultados inferiores e menos variáveis que o silano. Os parâmetros de rugosidade constataram que, ambos os materiais perdem seu perfil topográfico original quando tratados com parafina. Os diferentes agregados reciclados com cada hidrofugante foram aplicados em materiais cimentícios analisados no estado fresco e no estado endurecido. Os tratamentos reduziram a absorção e o consumo de água de mistura, porém afetaram negativamente as propriedades mecânicas, devido nova interface gerada (no caso específica de parafina) e falta de molhabilidade nas superfícies.

Palavras-chave: absorção; agregados reciclados; hidrofugante; molhabilidade; rugosidade superficial.

ABSTRACT

The proposal aims to reduce the water absorption of the Construction and Demolition Waste (CDW) recycled aggregates through hydrophobic surface treatment, so that these do not increase the concretes water consumption (nor reduce de mechanical strength). The CDW recycled aggregates were characterized regarding granulometry, morphology, porosity, apparent contact angle, water absorption, image analysis and surface roughness. Then they had their surface treated with two types of water-repellent: silane solution and paraffin. All treatments have reduced water absorption of the CDW recycled aggregate. Immersion treatment was the one that allowed the best results and the lowest variability between techniques. The treatments repel water on surface, despite the paraffin presenting better wettability. Paraffin treatment showed, in terms of water absorption, lower and less variable results than silane did. Roughness parameters found that both materials lose their topographic profile when treating with paraffin. The different recycled aggregates with each repellent were applied in cementitious materials analyzed in fresh and hardened state. The treatments reduced absorption and mixing consumption of water in the mixing, but adversely affect mechanical properties due to the new interface created (paraffin wax in special) and the lack of wettability on surfaces.

Keywords: absorption; recycled aggregates; water-repellent; wettability; surface roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Procedimento para os processamentos de agregado de RCD. 6
Figura 2-2 - Intervalo entre curvas granulométricas indicadas dos britadores de impacto e mandíbulas. 7
Figura 2-3 - Classes de esfericidade de areia reciclada de RCD; frequência absoluta e cumulativa das partículas. 10
Figura 2-4 - Absorção de água em função do tempo de um agregado graúdo reciclado de resíduos de concreto. 12
Figura 2-5 - Relação entre capacidade de absorção de água do agregado reciclado de RCD e densidade aparente. 12
Figura 2-6 - Relação entre porcentagem de pasta aderida e capacidade de absorção de água do RCD. 13
Figura 2-7 - Processo termomecânico e método de abrasão. 14
Figura 2-8 – Curvas variando fator água/cimento na relação entre porosidade média do agregado reciclado de RCD e a) resistência à compressão e b) módulo de elasticidade. Fonte: (ANGULO et al., 2010). 18
Figura 3-1 -Tensão superficial causada pelo desequilíbrio entre as forças das moléculas na superfície do líquido. 21
Figura 3-2 - Processo de formação de uma gota até seu desprendimento pela ação da gravidade e a indicação das forças de tensão superficial opostas à força peso. 21
Figura 3-3 – Ângulo de contato com as tensões interfaciais de cada meio: $\boldsymbol{\sigma lv, \sigma sl\ e\ \sigma sv}$. 22
Figura 3-4 - Molhabilidade de uma superfície sólida por um líquido: (a) θ> 90° e (b) θ< 90°, indicando a hidrofobicidade e hidrofilicidade, respectivamente. 23
Figura 3-5 - Molhabilidade de um substrato sendo controlada pela sua rugosidade. Superfície lisa (a); superfície rugosa (b). Substrato hidrofílico se tornando ainda mais hidrofílico com uma rugosidade na superfície (acima); substrato hidrofóbico se tornando super-hidrofóbica (abaixo). 24
Figura 3-6 - Menisco estável e instável em um poro. 28
Figura 3-7 - Ordem crescente de hidrofobicidade de alguns silanos. 31
Figura 3-8 - Deposição hidrolítica do silano. 32
Figura 3-9 - Efetividade do silano em substratos inorgânicos. 33

Figura 3-10 - Diagrama da separação do óleo para obtenção de parafina. 35
Figura 3-11 - Penetração de produtos à base de parafina. 37
Figura 4-1 - Materiais para a preparação dos agregados reciclados de RCD: (a) corpos de prova de concreto e (b) blocos de cerâmica vermelha. 39
Figura 4-2 - Fragmentos de (a) corpos de prova de concreto e (b) blocos de cerâmica vermelha. 40
Figura 4-3 - Britador de mandíbulas por vistas (a) lateral, (b) frontal e (c) superior. 40
Figura 4-4 - Moinho de rolos por vistas (a) frontal e (b) superior..... 40
Figura 4-5 - Pilha alongada de homogeneização do (a) ARCI e do (b) ARCV. 41
Figura 4-6 - Equipamentos utilizados para obter as amostras representativas: (a) peneirador e (b) quarteador Jones. 41
Figura 4-7 - Procedimento para tratamento por aspersão: (1) aplicação do hidrofugante na superfície do material, (2) virar material com espátula (3) segunda aplicação do hidrofugante..... 43
Figura 4-8 - Gotejador com hidrofugante em pórtico ajustado ao reômetro planetário..... 44
Figura 4-9 - Placa de aquecimento com recipiente de alumínio para tratamento dos agregados com parafina à 45ºC por imersão e (b) ARCI dentro da peneira e imerso em banho de parafina, bem como das bolhas de ar expelidas durante o tratamento. 47
Figura 4-10 - Diâmetro derivado do círculo equivalente da área de projeção de uma partícula..... 49
Figura 4-11 - Diâmetro de Feret. Extraído de Sympatec (2014)..... 49
Figura 4-12 - Goniômetro (*Krüss – DSA)* utilizado para medida do ângulo de contato :à esquerda , o equipamento, à direita, detalhe da gota de água sendo depositada na superfície do agregado. 51
Figura 4-13 - Representação esquemática do equipamento para as medidas de massa submersa ao longo do tempo. 53
Figura 4-14 - Microscópio digital modelo 3D Hirox KH-7700..... 55
Figura 4-15 - Interferômetro óptico utilizado para caracterização da topografia das amostras. À direita detalhe da lente utilizada para os ensaios. 55
Figura 4-16 - Representação esquemática dos princípios de funcionamento do microscópio óptico (NPFlex Bruker). 56

Figura 4-17 – À esquerda, a vista superior ilustrando como foi escaneada a área superficial de 5x5mm² em cada partícula de 5mm² pelo interferômetro óptico (NPFlex- Bruker), partindo sempre do mesmo ponto inicial (marcador vermelho). À direita, a área varrida dívida em 4 áreas iguais de 2,5x2,5mm²..... 57
Figura 4-18 – Ilustração do tratamento da imagem com o filtro Data Restore na superfície de 5mm² de uma partícula de ARCV: a) imagem original, b) imagem tratada gerando 4 medidas em áreas de 2,5x2,5mm² e c) superfície em 3D gerada pelo software Vision 64. As áreas vermelhas representam alturas acima do plano médio de referência, enquanto as azuis abaixo de acordo com a régua na lateral direita..... 58
Figura 4-19 - Etapas para calcular a rugosidade superficial das partículas. 59
Figura 4-20 - Diagramas de exibição tridimensional dos parâmetros 3D de amplitude média em direção à altura: (a) rugosidade média (Sa) e raiz quadrada da rugosidade média (Sq). 59
Figura 4-21 – Imagem ilustrativa após o escaneamento da superfície de uma partícula de ARCV utilizando o software Vision64. É possível observar a altura Z(x,y) em relação a um perfil X e um perfil Y do plano a altura da superfície em relação ao plano..... 60
Figura 4-22 - Curvas granulométricas dos ARCI e ARCV..... 61
Figura 4-23 - Relação de aspecto e Esfericidade de ARCI e ARCV. 61
Figura 4-24 - Distribuiução de tamanho de poros para AN e agregados reciclados sem tratar (a), ARCIs(b) e ARCVs(c). 63
Figura 4-25 - Ângulo de contato dos agregados (a) ARCI e (b)ARCV tratados com as diferentes técnicas..... 64
Figura 4-26 - Ângulo de contato dos agregados (à esquerda) ARCI e (à direita) ARCV tratados com emulsão de silano IE6694 nas concentrações de 5, 10 e 20%comparadas à IE6683..... 65
Figura 4-27- Ângulo de contato dos agregados ARCI_Pa e ARCV_Pa tratados com parafina comparadas à Placa_Pa..... 65
Figura 4-28 - Ângulo de contato dos agregados ARCI_Pa e ARCV_Pa comparados à aos agregados ARCI _Si 20% e ARCV_Si 20% tratados com a concentração de silano mais eficaz de IE6694 66
Figura 4-29 –Absorção de água acumulada ao longo do tempo para as amostras de (a)ARCI e (b) sua respectiva correção pelo valor de massa inicial; e (c)ARCV

com (d) sua respectiva correção pelo valor de massa inicial. A média das três medidas de cada amostra está apresentada em linha contínua. 68
Figura 4-30- Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV ensaiados por cada uma das técnicas (aspersão, gotejamento e imersão) de tratamento com silano. A média das três medidas de cada amostra está apresentada em linha contínua. 69
Figura 4-31 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV sem tratamento comparada à absorção das amostras ensaiados por cada uma das técnicas (aspersão, gotejamento e imersão) de tratamento com silano. 70
Figura 4-32 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV ensaiados para cada concentração de silano IE6694(5,10 e 20%). A média das três medidas de cada amostra está apresentada em linha contínua. 72
Figura 4-33- Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV sem tratamento comparada à absorção das amostras ensaiadas para cada concentração de silano IE6694(5,10 e 20%) e à concentração de silano IE6683(10%). 73
Figura 4-34 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV tratadas com silano e parafina. 74
Figura 4-35 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV sem tratamento comparadas à absorção dos seus respectivos tratamentos com silano e parafina. 75
Figura 4-36 - Aspecto superficial de partículas de (1) ARCI e (2) ARCV em comparação às tratadas com emulsão de silano (3 e 4) e parafina (5 e 6) obtidas pelo microscópio digital (Hirox KH7700)- ampliação 50x, lente: MX(G)-5040Z e resolução: 3,68µm. 76
Figura 4-37- Vista frontal da seção de partículas de (a) ARCI_Pa e (b) ARCV_Pa tratadas com parafina obtidas pelo microscópio digital (Hirox KH7700)- ampliação 50x, lente: MX(G)-5040Z e resolução: 1000µm. 77
Figura 4-38 - Distribuição do parâmetro Raiz Quadrada da Rugosidade média (Sq) (a) e Índice de Superfície (b) dos agregados natural e reciclados medidos com o interferômetro óptico (NPFLEX – Bruker) 5x; losango amarelo representa

a média; marcadores verdes são a mediana e marcadores vermelhos são valores atípicos ou inconsistentes. 78
Figura 4-39 – Ilustração da superfície 3D 5mm² produzida pelo software Vision64 de (a) AN, (b) ARCI e c) ARCV. As áreas vermelhas representam a altura acima do plano médio, enquanto as áreas azuis as alturas abaixo do plano de acordo com a escala lateral. 79
Figura 4-40 - Ilustração da superfície 3D 5mm² produzida pelo software Vision64 de (a) ARCI, (b) ARCI_Si e (c) ARCI_Pa. As áreas vermelhas representam a altura acima do plano médio, enquanto as áreas azuis as alturas abaixo do plano de acordo com a escala lateral..... 80
Figura 4-41 - Ilustração da superfície 3D 5mm² produzida pelo software Vision64 de (a) ARCV, (b) RCV_Si e (c) ARCV_Pa. As áreas vermelhas representam a altura acima do plano médio, enquanto as áreas azuis as alturas abaixo do plano de acordo com a escala lateral..... 80
Figura 4-42 Relação entre os dados de Índice de superfície e Absorção de água pela NM53:2009 para os agregados reciclados sem tratamento e tratados com silano e parafina. 81
Figura 5-1 Distribuição granulométrica do cimento CPV ARI feita em granulômetro a laser, da marca Malvern, disperso em álcool. 85
Figura 5-2- Distribuição granulométrica das frações do ARCI e do ARCV..... 86
Figura 5-3 - Sobreposição das curvas acumuladas das composições de AN (verde), ARCI (preto) e ARCV (vermelho). 86
Figura 5-4 – Programa de rotação de testes de reometria de mistura. 90
Figura 5-5 - Programa de rotação de testes de ciclo de cisalhamento..... 91
Figura 5-6 - Legenda para os gráficos de caracterização (a) das curvas de mistura e (b) do ciclo de cisalhamento das argamassas. 92
Figura 5-7 - Corpos de prova e ensaios de caracterização respectivos, onde Rc é a Resistência à compressão axial, E o Módulo de Elasticidade e Rt o ensaio de Resistência à compressão diametral..... 93
Figura 5-8 – Posições dos corpos de prova de pasta de cimento (a) na superfície do bloco cerâmico e (b) nas duas seções de rompimento à tração do CP de concreto com agregado natural (com superfície de fratura de CP’s de concreto rompidos por compressão diametral). 94

Figura 5-9 - Curvas de mistura das argamassas ensaiadas com os agregados AN, ARCI e ARCV e porcentagem final de água necessária para a mistura no intervalo de 0 a 180 s. 96
Figura 5-10 - Energia de mistura requerida para cada argamassa. 97
Figura 5-11 - Perfil de cisalhamento das argamassas ensaiadas comparando (a) AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) AN, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa..... 98
Figura 5-12 – Relação água/sólidos (% g/g) das argamassas. 99
Figura 5-13 - Viscosidade aparente das argamassas ensaiadas comparando (a) AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) AN, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa..... 100
Figura 5-14 - Torque de escoamento das misturas comparando (a) AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) AN, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa. 101
Figura 5-15 Valores de ar incorporado nas argamassas ensaiadas para AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa. 101
Figura 5-16 - Resistência à compressão para as argamassas ensaiadas (a) AN e ARCIs e (b) AN e ARCVs. 102
Figura 5-17 - Resistência à tração (compressão diametral) dos corpos de prova das argamassas ensaiadas (a) AN e ARCIs e (b) AN e ARCVs. 103
Figura 5-18 –Relação entre média da resistência à compressão pela resistência à tração (compressão diametral) pela dos corpos de prova das argamassas ensaiadas. 104
Figura 5-19 - Módulo elástico médio das argamassas NA, ARCIs e ARCVs. 104
Figura 5-20 - Relação entre média da resistência à compressão pelo módulo de elasticidade dos corpos de prova das argamassas ensaiadas para ARCIs e ARCVs. 105
Figura 5-21 Fraturas dos corpos de prova das argamassas ensaiadas à tração por compressão diametral. 106
Figura 5-22 Esquema indicando como ocorreu a ruptura (a) intergranular para ARCIs e (b) transgranular para ARCVs. 107
Figura 5-23 - Porosidade das argamassas AN, ARCIs e ARCVs. 107
Figura 5-24 Relação entre a porosidade das argamassas ensaiadas e as médias de resistência à compressão. 108
Figura 5-25 - Resistência de aderência à tração para superfícies de: ARCI, ARCI Si20% e ARCI_Pa (a); ARCV, ARCV Si20% e ARCV_Pa (b). 109

Figura 5-26 - Superfície dos substratos após ensaio de resistência de aderência à tração. Os substratos de ARCIs foram gerados a partir do ensaio de ruptura à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de concreto. 110
Figura 5-27 - Comparação entre resistência à tração (por compressão diametral) da argamassa e resistência de aderência à tração da pasta de cimento ao substrato (a) para ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa. 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Classificação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). .. 5
Tabela 2-2 - Composição média do resíduo de construção e demolição das cidades de Salvador/BA, São Carlos/SP, Fortaleza/CE. 5
Tabela 2-3 - Requisitos de agregados reciclados para normas de construções. 9
Tabela 3-1 -Tensão superficial de alguns líquidos à 20°C. 21
Tabela 3-2- Tensões superficiais críticas de alguns silanos. 30
Tabela 4-1 - Quantidade de material para cada técnica de tratamento com hidrofugante. 45
Tabela 4-2 - Quantidade de material utilizado para tratamento com parafina .. 47
Tabela 4-3 - Quantidade de material utilizada em cada fração de agregado miúdo para ensaio de distribuição de tamanho e forma..... 48
Tabela 4-4 - Quantidade de cada material para os ensaios de absorção. 54
Tabela 4-5 - Resultados de porosidade Hg para os agregados natural e reciclados. 62
Tabela 4-6 - Absorção de água para as amostras sem tratar e tratadas com as três técnicas diferentes de silano pela norma NM53:2009. 67
Tabela 4-7 - Absorção de água para as amostras de ARCI e ARCV tratadas com silano e parafina pela norma NM53:2009. 74
Tabela 4-8 - Resumo da análise ambiental dos tratamentos ambientais. 81
Tabela 5-1 - Composição das frações de AN, ARCI e ARCV com cimento para cada 2000g de material seco de argamassa. 87
Tabela 5-2 –Quantidade em massa dos materiais secos e hidrofugantes usados em cada composição. 88
Tabela 5-3 – Propriedades físicas da fração miúda dos agregados utilizados nas argamassas segundo a norma da ABNT NBR NM 30 (2001). 89
Tabela 5-4 - Ensaios para avaliar o comportamento mecânico das argamassas. 92
Tabela 5-5 - Quantidade de corpos de prova utilizado em ensaios de caracterização para cada tipo de agregado. 93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivo 3
1.2 Estratégia da pesquisa 3
1.3 Artigos publicados 4
2 RECICLAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE RCD 5
2.1 Reciclagem convencional 6
2.2 Caracterização dos agregados de RCD 8
2.2.1 Granulometria e forma 9
2.2.2 Densidade 10
2.2.3 Absorção de água 11
2.3 Reciclagem avançada 13
2.4 Influência dos agregados de RCD no concreto 15
2.4.1 Estado fresco 15
2.4.2 Estado endurecido 17
2.5 Conclusões Parciais 19
3 TRATAMENTO SUPERFICIAL COM HIDROFUGANTES 20
3.1 Molhabilidade 20
3.1.1 Tensão superficial líquido-ar 21
3.1.2 Ângulo de contato ideal 21
3.1.3 Ângulo de contato aparente 23
3.2 Capilaridade 25
3.3 Emulsões a base de silano 28
3.3.1 Mecanismo de acoplamento 30
3.4 Parafina 33
3.4.1 Mecanismo de acoplamento 36
3.5 Conclusões parciais 37

4 CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COM HIDROFUGANTES 39
4.1 Preparação dos agregados de RCD 39
4.2 Tratamento superficial dos agregados de RCD com hidrofugantes 42
4.2.1 Emulsão à base de silano 42
4.2.2 Parafina 46
4.3 Caracterização dos agregados de RCD 47
4.3.1 Distribuição de tamanho e forma 48
4.3.2 Porosidade 50
4.3.3 Ângulo de contato aparente 51
4.3.4 Absorção de água 52
4.3.5 Microscopia digital 3D Hirox KH-7700 54
4.3.6 Análise da rugosidade superficial 55
4.4 Resultados e discussão 60
4.4.1 Distribuição de tamanho e forma 60
4.4.2 Porosidade 62
4.4.3 Ângulo de contato aparente 63
4.4.4 Absorção de água 66
4.4.1 Microscopia digital 3D Hirox KH-7700 75
4.4.2 Análise da rugosidade superficial 77
4.5 Viabilidade econômica 81
4.6 Conclusões Parciais 82
5 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD TRATADOS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS 84
5.1 Formulações das argamassas 84
5.2 Definição do teor de água (por reometria de mistura) 89
5.3 Comportamento reológico (estado fresco) 91
5.4 Caracterização no estado endurecido 92

5.5 Resistência de aderência à tração pasta-agregado (prova de conceito) 93
5.6 Resultados e discussão 95
5.6.1 Definição do teor de água (por reometria de mistura) 95
5.6.2 Comportamento reológico (estado fresco)..... 98
5.6.3 Caracterização no estado endurecido 102
5.6.4 Porosidade e a influência na resistência 107
5.6.5 Zona de transição interna (ITZ) e sua influência na resistência . 108
5.7 Conclusões parciais 112
6 CONCLUSÕES 113
6.1 Sugestões para futuras pesquisas 114
REFERÊNCIAS 115
A. ANEXO A - CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROFUGANTES 125
1 Espectro no infravermelho e ph 125
1.1 Emulsão de silano IE6683..... 125
1.2 Emulsão de silano IE6694..... 126
1.3 Parafina..... 127
2 Viscosidade..... 128
B. ANEXO B - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE RCD..... 130
1 Distribuição de tamanho e forma das partículas 130
2 Análise de rugosidade superficial por interferometria óptica..... 130
3 Absorção de água 140
3.1 Comparação entre as técnicas de tratamento com silano..... 140
3.2 Comparação entre concentrações de silano 143
3.3 Comparação entre hidrofugantes silano e parafina..... 144

1 INTRODUÇÃO

Vários estudos comprovam a viabilidade da aplicação dos agregados reciclados provenientes de RCD (Resíduo de Construção e Demolição) em substituição ao agregado natural no concreto (AGRELA et al., 2011; ÂNGULO, 2005; BRITO; GONÇALVES, 2010; HANSEN, 1986; LEITE, 2001; POON; KOU; LAM, 2007). A utilização de agregados reciclados pode reduzir custos de transporte com matérias-primas, contribuindo para preservar recursos naturais e controlar a deposição de resíduos(EUROPEAN COMMISSION, 1999) (BLENGINI, 2009).

A pasta de cimento endurecida e a cerâmica vermelha são responsáveis pela maior porosidade dos agregados reciclados, e consequentemente, maior absorção de água em relação aos agregados naturais, aumentando a demanda de água no concreto e reduzindo o desempenho mecânico de argamassas e concretos (HANSEN, 1992; PACHECO-TORGAL et al., 2013a).

Para controlar o efeito da elevada absorção de água do agregado reciclado na trabalhabilidade do concreto, alguns autores recomendam pré-saturação do agregado (SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001), considerando o valor de absorção de água em 24 horas, outros uma parcela deste valor; ou seja, parcialmente saturado (OLIVEIRA; VAZQUEZ, 1996)

De acordo com (POON et al., 2004), a pré-saturação total do agregado reciclado (usando o valor de absorção de água de 24 horas) afeta o desempenho mecânico do concreto, devido à exsudação de água que enfraquece a zona de transição interfacial (ITZ) entre o agregado reciclado e a pasta de cimento (BRITO; SAIKIA, 2013). Por outro lado, quando o agregado reciclado é utilizado totalmente seco, a água absorvida expulsa o ar dos poros, gerando bolhas de ar na mistura, o que também enfraquece a ITZ entre a pasta e o agregado (LEITE; MONTEIRO, 2016).

Uma alternativa para diminuir a porosidade dos agregados reciclados são as tecnologias de tratamentos termomecânicos que permitem obter agregados

reciclados de concreto com teor reduzido de pasta de cimento aderida (KASAI, 2006; LARBI et al., 2000; NAGATAKI et al., 2004; TOMOSAWA; NOGUCHI; TAMURA, 2005).

Quando a pasta cimentícia é submetida à altas temperaturas, a pressão dos poros se eleva, provocando a remoção da água presente (ALONSO; FERNANDEZ, 2004). O processo de desidratação dos compostos hidratados do cimento gera fissuração e enfraquece a ITZ entre pasta e agregado (PACHECO-TORGAL et al., 2013b). A pasta de cimento pode perder até 70% da resistência mecânica quando atinge 550°C (GEORGALI; TSAKIRIDIS, 2005).

Entretanto, esses processos apresentam elevado gasto energético e as emissões de CO_2 relacionadas ao uso da energia (combustíveis fósseis e energia elétrica) (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014) para aquecer o material, o que pode comprometer a sua viabilidade ambiental do processo de reciclagem.

Outra estratégia adotada por alguns autores tem sido a de tratar a superfície de agregados e concretos com polímeros à base de silano; afim de hidrofugar a superfície. Klein et al. (2012) observou que argamassa com areia natural hidrofugada apresenta melhor trabalhabilidade quando fresca para a mesma quantidade de água. (Zhu et al. 2013) estudou o tratamento superficial do concreto com emulsão de silano e o método da adição do hidrofugante direto à mistura fresca do concreto. Concluiu que os dois métodos aumentam a durabilidade. Spaeth e Djerbi Tegguer (2013) estudaram duas técnicas de impregnação com seis tipos de polímeros (silanos/siloxanos) na superfície de agregados reciclados e observaram que os tratamentos reduziram a absorção de água do material.

O tratamento com hidrofugantes, ao dificultar que a superfície se molhe, pode reduzir a quantidade de água necessária para moldar concretos e argamassas e também evitar a formação de bolhas de ar na mistura, podendo melhorar a ITZ e o desempenho mecânico.

1.1 Objetivo

A proposta tem intuito de analisar como o tratamento da superfície com hidrofugantes (silano e parafina) dos agregados de RCD influenciam no comportamento reológico e mecânico de materiais cimentícios.

1.2 Estratégia da pesquisa

A estratégia adotada para melhor entender o comportamento dos materiais cimentícios com agregado reciclado de RCD tratado superficialmente foi dividida em duas etapas. A primeira busca caracterizar os agregados reciclados de RCD, antes e após o tratamento superficial. E a segunda, consiste em analisar a influência dessas características no comportamento de materiais cimentícios nos estados fresco e endurecido.

É apresentado em seguida o que será discutido em cada capítulo.

CAPÍTULO 2 – RECICLAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE RCD

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre a classificação dos resíduos de construção e demolição (RCD), operações de reciclagem para obtenção dos diferentes tipos de agregados reciclados, suas características e influência no concreto.

CAPÍTULO 3 – TRATAMENTO SUPERFICIAL COM HIDROFUGANTES

São apresentadas considerações a respeito dos tratamentos com hidrofugantes (silano e parafina), mecanismos de acoplamento, etc.

CAPÍTULO 4 – TRATAMENTO DOS AGREGADOS DE RCD COM HIDROFUGANTES

Foram caracterizados dois tipos de agregados reciclados de RCD (cimentício e cerâmico), antes e após o tratamento superficial, com dois tipos distintos de

hidrofugante (silano e parafina). Com o silano, foram analisadas três técnicas distintas: aspersão, gotejamento e imersão. No caso da parafina foi adotada a técnica mais eficaz encontrada para o tratamento com silano.

CAPÍTULO 5 – INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS DE RCD TRATADOS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Apresenta procedimentos de mistura de argamassa com agregados reciclados tratados e não tratados comparando seu desempenho mecânico.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES FINAIS

Aponta as considerações relevantes abordadas durante a pesquisa.

1.3 Artigos publicados

Durante o período de pesquisa foram elaborados três artigos referentes ao tema estudado:

Artigo 1: Treatments on CDW recycled aggregates surface using silane-based water repelente. (Key Engineering)

Artigo 2: Effect of superplasticizer on mortars with recycled Fine aggregates (Proceedings of the III Progress of Recycling in the Built Environment Conference)

Artigo 3: Roughness, wettability and water absorption of water repellent treated recycled aggregates (Construction & Building Materials) -Submetido e sendo revisado.

2 RECICLAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE RCD

O resíduo de construção e demolição (RCD) é constituído por diversos tipos de materiais, tais como concreto, argamassa, cerâmica, concreto asfáltico, plástico, madeira, gesso, vidro, entre outros. É recomendável separar esses materiais na obra de construção ou demolição (HANSEN, 1986; ULSEN, 2006), para que todo o resíduo seja passível de reciclagem. A Tabela 2-1 apresenta a classificação desses resíduos de acordo com a resolução nº 307 do Conama. Os resíduos classe A são os resíduos de concreto, de alvenaria e outros materiais minerais que podem ser transformados em agregados reciclados.

Tabela 2-1 - Classificação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

Classe A	a) Reformas, pavimentação, infraestruturas, terraplanagem b) Componentes cerâmicos, argamassa e concreto c) Pré-moldados em concreto
Classe B	Plástico, papel, metal, vidro, madeira, gesso, outros
Classe C	Resíduos sem recuperações viáveis, p.ex. compósitos
Classe D	Tintas e óleos com solventes, amiantos e outros contaminantes

Fonte: CONAMA (2002, 2004, 2011, 2012).

A composição média dos resíduos de RCD pode variar nas diferentes cidades do país (Tabela 2-2). A porcentagem majoritária é composta por resíduos cimentícios (concreto e argamassa), seguida de cerâmica vermelha.

Tabela 2-2 - Composição média do resíduo de construção e demolição das cidades de Salvador/BA, São Carlos/SP, Fortaleza/CE.

Composição de resíduos de RCD	%		
	São Carlos	Salvador	Fortaleza
Concreto e Argamassa	69	53	53
Rochas naturais	1,4	5	5
Plástico	-	4	-
Solos e areia	0,1	22	13
Cerâmica branca	-	5	7
Cerâmica vermelha	29	9	17
Gesso	-	-	3
Papel e matéria orgânica	0,2	-	-
Madeira	0,1	-	-
Cimento amianto	0,4	-	-
Outros	-	2	2

Fonte: CARNEIRO et al. (2000); OLIVEIRA et al. (2010), PINTO (1986); adaptado.

Independente da cidade brasileira em questão, a composição do RCD também varia ao longo do tempo. A heterogeneidade se apresenta como um grande problema para a reciclagem, uma vez que a qualidade do agregado torna-se variável (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

2.1 Reciclagem convencional

A reciclagem de RCD com vistas à produção dos agregados reciclados envolvem basicamente britagem (mandíbulas ou impacto), peneiramento a seco e meios de remoção de materiais contaminantes (HANSEN, 1992; ULSEN et al., 2013). A separação dos componentes de aço é feita por um extrator de metais ou manualmente, assim como a dos materiais orgânicos (ULSEN, 2011).

A Figura 2-1 mostra uma sequência de processamento utilizada nos Estados Unidos, Japão e em alguns países europeus como França, Alemanha, Holanda e Reino Unido.

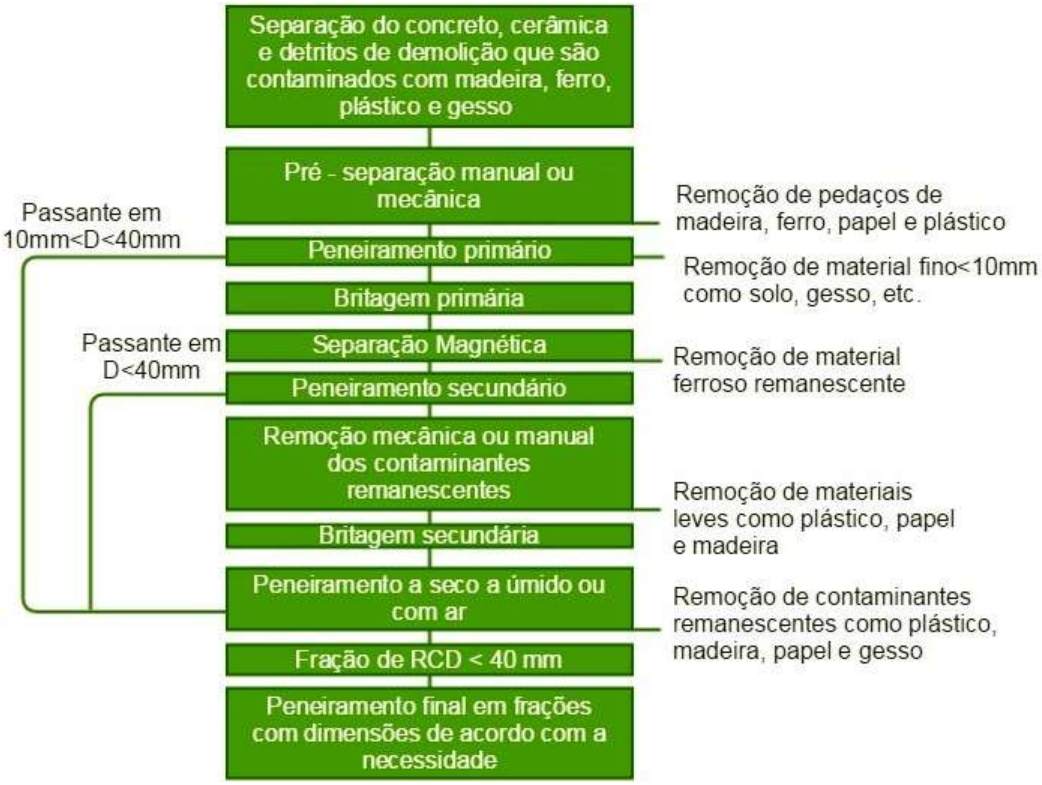


Figura 2-1 - Procedimento para os processamentos de agregado de RCD.
Fonte: HANSEN (1992). Adaptado.

Os britadores utilizados no procedimento citados na Figura 2-1 têm como função

principal definir a dimensão máxima do agregado que se pretende utilizar. Os britadores reduzem, de maneira distinta, a dimensão máxima do agregado produzido. Por exemplo, o britador de mandíbula pode britar material com granulometrias que variam de 450 a 60 mm (METSO, 2013). Já o de impacto consegue britar na variação de 315 a 2 mm (METSO, 2015). Logo, o tipo de britador necessário e número de estágios de britagem depende da granulometria desejada. A Figura 2-2 é um exemplo do intervalo e tipos de curvas granulométricas geradas por diferentes britadores.

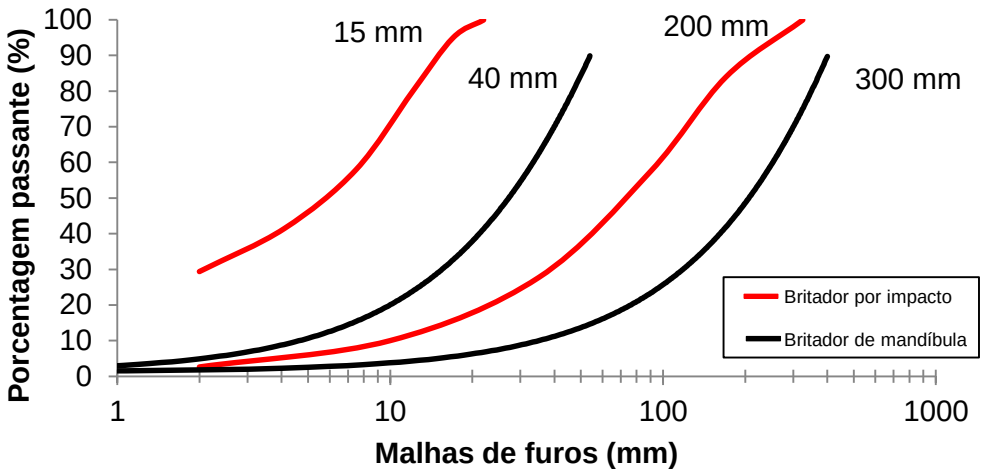


Figura 2-2 - Intervalo entre curvas granulométricas indicadas dos britadores de impacto e mandíbulas.
Fonte: METSO (2005).

Devido à presença dos contaminantes, deve-se realizar a triagem dos contaminantes (papel. Plástico, etc) por meio de catação.

De acordo com Quattrone et al. (2014), para produzir 1 tonelada de agregado por reciclagem convencional, a energia necessária varia entre 37 e 88MJ/t e as emissões entre 1,5 e 4,5 $KgCO_2$/t de acordo com o país e região.

Apesar do consumo de energia e geração de CO_2 reduzido do processo convencional de reciclagem, os agregados reciclados obtidos são heterogêneos e apresentam características físicas variáveis, porque o processo de reciclagem convencional não é capaz de melhorar suas características, o que implica em limitações de uso nos materiais cimentícios (argamassas e concretos), item que será discutido, a seguir.

2.2 Caracterização dos agregados de RCD

O agregado reciclado de RCD é caracterizado utilizando os mesmos métodos que são caracterizados os agregados naturais (AN). A norma britânica (BS 8500-1, 2006) define dois tipos para classificar os diferentes agregados de RCD. O agregado contendo no mínimo de 95% de concreto britado é definido como agregado reciclado de concreto (ARC) e aquele contendo 100% de alvenaria (argamassa, cerâmica vermelha) britada é definido como agregado reciclado de alvenaria (ARA) (BRITO; SAIKIA, 2013). O agregado reciclado misto (ARM) é constituído por uma mistura de materiais; diferentes tipos de concreto, argamassas, cerâmica vermelha, entre outros.

Os agregados reciclados costumam ser classificados de acordo com sua composição. Existem recomendações e normas de diferentes países que especificam os tipos distintos de agregados reciclados, apresentados, a seguir na Tabela 2-3.

Os teores de contaminantes estão limitados a, no máximo, 5%, sendo mais usual o teor limite de 1%.

A densidade mínima permitida para o ARC é entre 2000 a 2200 kg/m³ e para ARA e ARM entre 1500 a 2000 kg/m³. A máxima absorção de água do ARC varia de 7 a 15 % e para os ARA e ARM de 7 a 20 %.

Tabela 2-3 - Requisitos de agregados reciclados para normas de construções.

Origem da especificação	Classificação	Composição (% máxima)						Densidade Mínima: Kg/m³	Absorção de água máxima: %
		Concreto	Alvenaria	Material Orgânico	Outros contaminantes	Materiais Leves	Finos		
Brasil	ARC(1)	>90	-	2	3(4)	- (5)	7	-	7
	ARM(3)	<90	-	2	3(4)	-	10	-	12
Alemanha	ARC	>90	<10	-	1(6)	-	-	2000	10
	ARC	>70	<30	-	1(6)	-	-	2000	15
	ARA(2)	<20	>80	-	1(6)	-	-	1800	20
	ARM	>80		-	1(6)	-	-	1500	-
Hong-Kong	ARC	<100	-	-	1	0.5	4	2000	10
RILEM	ARA	-	<100	1	5	1	3	1500	20
	ARC	<100	-	0.5	1	0.5	2	2000	10
	ARC +AN(7)	<20	<10	0.5	1	0.5	2	2400	3
Reino Unido	ARC	>95	<5	1(6)		1	3	-	-
Holanda	ARC	>95	<5	0.1	1(6)	0.5	2	2000	-
	ARA	-	>65	1	1(6)	0.5	2	2000	-
Portugal	ARC	>90	0.2	0.2		1	-	2200	7
	ARC	>70	0.5	0.5		0.5	-	2200	7
	ARM	>90		2		0.1	-	2000	7
Bélgica	ARC	>90	<10	0.5	0.5(6)	-	-	-	-
	ARM	>40	>10	0.5	1(6)	1	-	-	-
	ARA	<40	>60	0.5	1(6)	1	-	-	-
Noruega	ARC	>94	<5	0.1	1(8)	1	-	2000	7
	ARM	>90		0.5	2.5(8)	-	-	2000	10
Suíça	ARC	<100	-	-	1(8)	-	-	-	-
	ARM	<100	-	-	1	-	-	-	-

Fonte: BRITO; GONÇALVES(2010). Adaptado.

Nota:
(1) ARC: Agregado reciclado de concreto
(2) ARA: Agregado reciclado de alvenaria
(3) ARM: ARC e ARA misto
(4) Sem incluir material orgânico
(5) Limite indefinido
(6) Sem incluir material betuminoso
(7) AN: Agregado natural
(8) Asfalto e materiais leves não inclusos

2.2.1 Granulometria e forma

A distribuição granulométrica dos agregados reciclados de RCD é geralmente diferente daquela resultante do agregado natural, pois os materiais possuem composição e dureza distinta (BRITO; SAIKIA, 2013).

Além disso, a superfície do agregado reciclado de RCD é rugosa devido à presença de pasta de cimento aderida. É mais angular, devido a grande quantidade de rochas britadas, diferente do agregado natural que pode ser equidimensional – areias de rio, completamente esféricas. A forma do agregado é importante para o empacotamento, trabalhabilidade e quantidade de água necessária no concreto (HANSEN, 1986). Quanto melhor o formato mais fácil sua utilização no concreto.

A Figura 2-3 apresenta curvas de esfericidade das partículas de areia reciclada de RCD. Ulsen et al. (2012) comparou um processo de reciclagem convencional à um processo com britagem complementar, através de um britador de impacto com eixo vertical, com três condições diferentes de velocidades de rotação do britador, para melhorar as características do material. A autora conseguiu, por meio deste tipo de britador, aumentar a esfericidade da areia reciclada de RCD, sendo, portanto, influenciada pelas condições de processo.

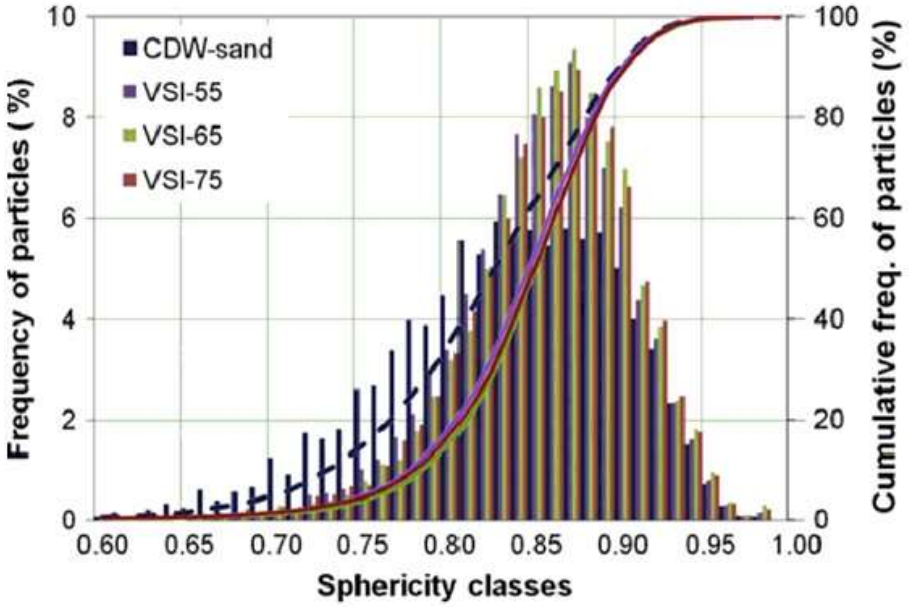


Figura 2-3 - Classes de esfericidade de areia reciclada de RCD; frequência absoluta e cumulativa das partículas.
Fonte: ULSEN et al. (2012).

2.2.2 Densidade

Densidade é a relação entre a massa e o volume. Ao determinar a densidade dos agregados de RCD, há controversas de nomenclatura quanto à distinção

entre volume aparente e volume real (WEBB, 2001a). Para o trabalho apresentado foi determinado que volume aparente é o volume de sólidos incluindo os vazios e volume real como volume de sólidos excluindo os poros acessíveis. Geralmente não se determina o volume de poros fechados.

A densidade aparente dos agregados reciclados de RCD é menor que a dos agregados naturais devido à existência de pasta de cimento mais porosa e menos densa aderida ao agregado natural , no caso das partículas cimentícias, ou devido à existência de materiais mais leves, como a cerâmica vermelha (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

A densidade real do agregado de RCD é praticamente igual à do agregado natural 2,65-2,67 kg/dm^3, pois o agregado de RCD é constituído por aproximadamente 70% de agregado natural (ANGULO, 2005). Essa propriedade depende somente da composição química e não da porosidade.

2.2.3 Absorção de água

A absorção da água do agregado reciclado de RCD é mais elevada que a do agregado normal (BRITO; SAIKIA, 2013). A pasta endurecida e a presença de cerâmica vermelha são responsáveis pela porosidade do agregado reciclado (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; HANSEN, 1986; NAGATAKI et al., 2004; PACHECO-TORGAL et al., 2013a; VIEIRA; CORREIA; BRITO, 2011).

A absorção de água das partículas cimentícias chega a 15% enquanto que a das partículas de cerâmica vermelha chega a 24% (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011). A variação dos teores desses materiais nos agregados reciclados impacta diretamente a sua absorção de água.

A absorção de água no tempo para agregados reciclados de RCD ocorre nos instantes iniciais chegando a 80 % de sua absorção 24 horas nos primeiros 5 minutos de imersão. Após esse período, a porcentagem varia lentamente como pode ser observado na Figura 2-4. Este comportamento é geralmente usado para prever a quantidade adicional de água necessária na mistura de concreto (BRITO; SAIKIA, 2013; OLIVEIRA; VAZQUEZ, 1996).

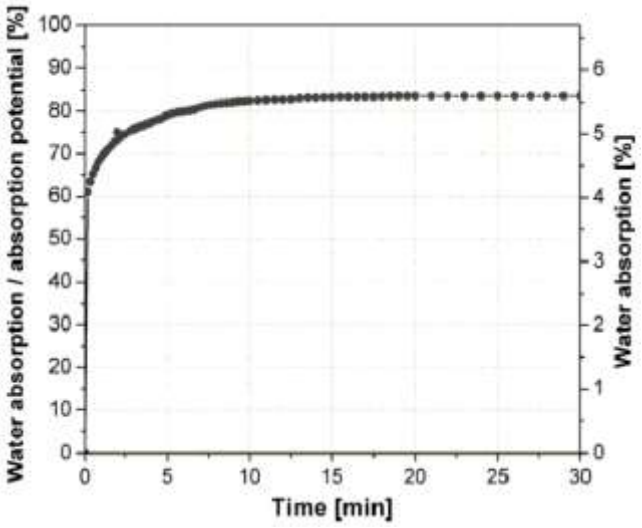


Figura 2-4 - Absorção de água em função do tempo de um agregado graúdo reciclado de resíduos de concreto.
Fonte: VIEIRA; CORREIA; BRITO (2011).

De acordo com (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009), existe correlação entre a densidade aparente e a absorção de água do agregado reciclado de concreto (Figura 2-5), pois ambas grandezas incluem nas suas determinações os volume de vazios (poros) dos agregados.

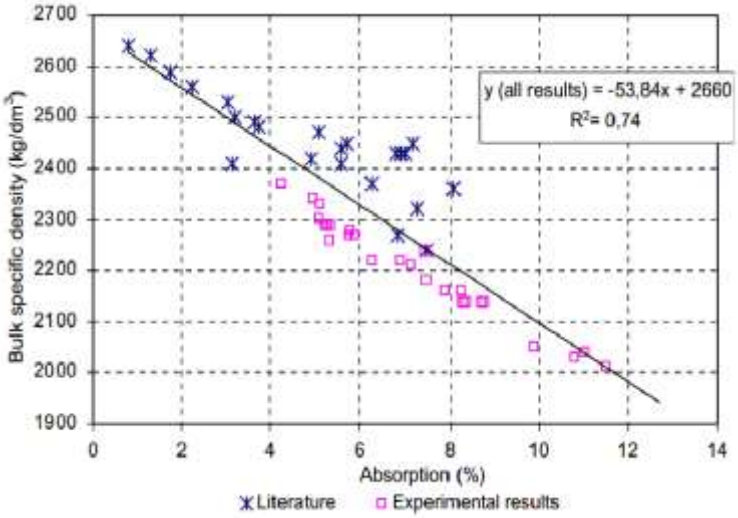


Figura 2-5 - Relação entre capacidade de absorção de água do agregado reciclado de RCD e densidade aparente.
Fonte: JUAN; GUTIÉRREZ, (2009).

A Figura 2-6 apresenta a relação entre a quantidade de argamassa (pasta de cimento e areia) e a absorção de água do agregado reciclado de concreto.

Quanto mais argamassa envolvendo o agregado, maior será a absorção de água.

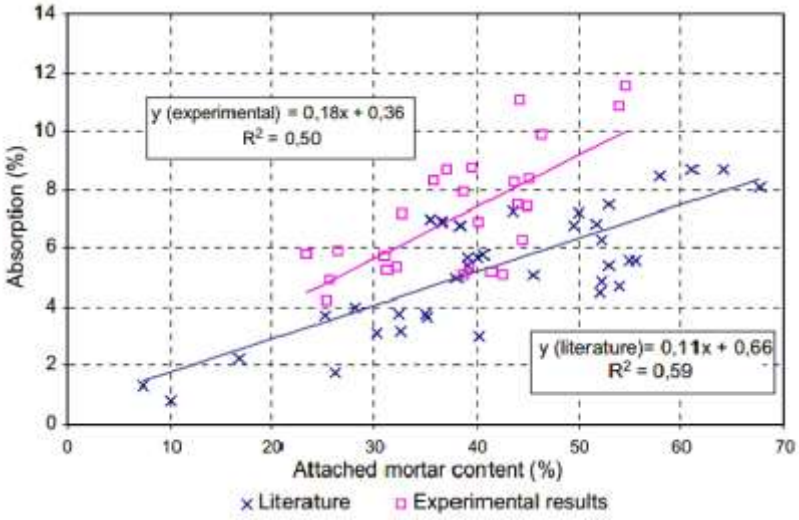


Figura 2-6 - Relação entre porcentagem de pasta aderida e capacidade de absorção de água do RCD.
Fonte: JUAN; GUTIÉRREZ (2009).

De fato, a pasta de cimento residual que envolve o agregado reciclado (e não a argamassa) e sua porosidade influencia na absorção de água do agregado reciclado de concreto (BELIN et al., 2014). A absorção de água do agregado reciclado pode ser obtida através da absorção da pasta de cimento remanescente e do agregado natural de origem. O agregado reciclado pode ainda apresentar fissuras superficiais devido a britagem, o que provoca o aumento de água e entrada de ar entre a pasta de cimento e o agregado (BRITO; SAIKIA, 2013).

2.3 Reciclagem avançada

Com o intuito de melhorar as características dos agregados reciclados de RCD, existem diferentes técnicas de remoção da pasta de cimento aderida na superfície do material tais como tratamento mecânico, termomecânico e eletromecânico.

O número de estágios de britagem ou moagem influi no teor de pasta de cimento do agregado reciclado. Com o aumento da britagem, o conteúdo da pasta de

cimento anexada pode diminuir e, por conseguinte, a qualidade do agregado pode ser melhorada, reduzindo a porosidade (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009).

(NAGATAKI et al., 2004) desenvolveu um processo de reciclagem que consiste em britar o concreto com uma combinação de britador de mandíbula e britador de impacto, seguidos de um segundo britador de mandíbula modificado, com o intuito de promover no material duas vezes mais abrasão que as outras técnicas, removendo a pasta cimentícia do agregado original. A desvantagem desse processo é produzir quantidade excessiva de areia em detrimento da brita reciclada, o que, em algumas situações, pode não ser interessante para a produção do concreto.

Outra técnica de processamento em duas fases para a produção de agregado reciclado está apresentada nos estudos de (LI et al., 2009). O tratamento térmico a 250 ou 500°C ocorre após o material passar por britador de mandíbula e posteriormente o agregado aquecido passa em um britador de impacto, obtendo-se conteúdo bem reduzido de pasta de cimento nos agregados reciclados de concreto.

A Figura 2-7 esquematiza esse processo em que, neste caso específico, o resíduo de concreto é aquecido por até 60 minutos à temperatura aproximada de 300ºC, então passa por britador e moinho. A combinação de aquecimento e atrito produz agregado reciclado de porosidade reduzida.

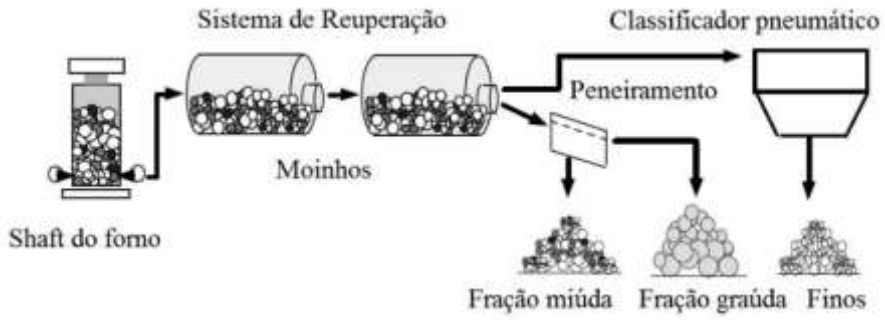


Figura 2-7 - Processo termomecânico e método de abrasão.
Fonte:TOMOSAWA et al. (2005), adaptado.

Outra alternativa é aquecer o agregado reciclado de concreto em um forno rotativo a 700ºC para desidratar e desintegrar a pasta de cimento e separar os agregados naturais, por simples peneiramento, sem a necessidade de britagem ou moagem adicional (MULDER et al., 2007).

De acordo com (KASAI, 2006), esse tipo de tratamento termomecânico reduz a porosidade do agregado reciclado de concreto. O aquecimento para a produção de agregados reciclados de alta qualidade fragiliza a pasta de cimento que seguido de uma etapa de atrição possibilita a transformação da pasta de cimento em finos, separando-se dos agregados naturais (TOMOSAWA et al., 2005). Como os tratamentos termomecânicos fazem intenso uso de energia, os mesmos consomem muita eletricidade para atrição e muito combustível para o aquecimento (SHIMA et al., 2005).

O agregado graúdo reciclado que passa por tratamentos termomecânicos movidos a combustível tem consumo de energia de 36 a 62 vezes mais alto que um processo convencional de reciclagem. Tratamentos térmicos alimentados por combustível chegam a 200 Kg de CO_2/t. Tratamentos mecânicos aumentam o consumo entre 3 a 4 vezes. Esse tipo de processamento emite entre 3,8 a 21,7 Kg de CO_2/t. Ambos processos são mais impactantes em termos de consumo de energia e emissões de CO_2 (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014)

2.4 Influência dos agregados de RCD no concreto

2.4.1 Estado fresco

Características dos agregados reciclados de RCD como granulometria, absorção de água e excesso de finos influenciam o estado fresco do concreto (HANSEN, 1992), levando a um maior consumo de água durante a mistura. Além do que, a heterogeneidade dificulta o controle de consistência do mesmo (PACHECO-TORGAL et al., 2013a). Torkittikul e Chaipanich (2010) utilizaram resíduos cerâmicos como agregados reciclados e observaram redução da consistência quando substituíram 100%, o que foi atribuído tanto à absorção de água quanto a angularidade e morfologia do agregado.

O maior consumo de água para que a mistura atinja trabalhabilidade adequada, ao utilizar em argamassa, está relacionado com a porosidade, mas também com a superfície específica das partículas (HAWLITSCHEK, 2013). Uma possível explicação para a existência deste tipo de correlação é que grande parte dos poros estão interligados com a superfície do agregado e são permeáveis (interconectados).

Alguns autores alegam que saturar o agregado de RCD antes de preparar o concreto pode prevenir a absorção da água de mistura (HANSEN, 1992; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001), porém a saturação completa pode afetar o desempenho mecânico do concreto (POON et al., 2004), pois a água pode exsudar.

Em concretos com agregado natural se forma um filme de água ao redor do agregado, onde a relação água/cimento na ITZ pode ser o dobro daquela encontrada na pasta. Com a hidratação, o espaço preenchido pela água próximo ao agregado é gradualmente substituído por hidratos. Em um sistema com cimento e agregado reciclado, mesmo havendo adesão entre a nova matriz cimentícia e a pasta remanescentes da partícula, a maior quantidade de água demandada durante a mistura acarreta a uma menor resistência do concreto no estado endurecido (POON; SHUI; LAM, 2004).

Quando o agregado reciclado está parcialmente saturado, Oliveira e Vazquez (1996) indicam haver a formação de uma interface pasta-agregado mais consolidada, melhorando as propriedades mecânicas do concreto. Entretanto, não há como afirmar a quantidade exata de água necessária para a pré-saturação dos agregados reciclados no concreto. Angulo e Figueiredo (2011), assim como muitos pesquisadores, recomendam valores intermediários entre 80% e 90% pera evitar a perda de consistência do concreto nos primeiros 10-30 minutos da mistura, tentando estabelecer uma quantidade mais exata da quantidade de água que é absorvida pelo agregado.

Angulo (2005) observou que as medidas de abatimento de tronco de cone de concreto com agregado graúdo reciclado de RCD e não corresponderam à trabalhabilidade do concreto com agregado natural. Por isso é importante avaliar a trabalhabilidade a partir do seu comportamento reológico, obtendo-se análises mais precisas. O método de abatimento não é o ideal para comparações de consistência entre concreto com agregado natural e com reciclado.

A literatura costuma considerar apenas o método de abatimento de tronco de cone para avaliar a consistência do concreto, contudo, é um ensaio monoponto, uma vez que apresenta mensura limitada (somente da tensão de escoamento). Através de reômetros (ensaios multipontos) é possível obter mais de uma taxa de cisalhamento avaliada durante os ensaios, permitindo relacionar valores de torque com tempo de mistura e estimar a energia dissipada durante o processo (BARBOSA, 2010; FRANÇA, 2012). É compreendido como reologia o estudo do fluxo e deformação dos materiais no estado fresco quando submetido a uma determinada tensão (OLIVEIRA et al., 2000).

2.4.2 Estado endurecido

As propriedades mais importantes do concreto com agregado reciclado que devem ser analisadas são: resistência à compressão, módulo de elasticidade, densidade e porosidade (PACHECO-TORGAL et al., 2013a). Por serem porosos, os agregados reciclados têm maior facilidade de fragmentar. Quanto menor a porosidade do agregado reciclado de RCD, maior será a resistência a esforços mecânicos ou de abrasão (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Existe uma correlação entre a densidade aparente dos agregados reciclados de concreto e a resistência à compressão dos concretos (HANSEN, 1992). Normalmente, a resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da substituição do agregado natural por agregado reciclado de RCD. O aumento da porosidade e a fraca ligação entre o agregado e a matriz são a causa dessa redução. Isso acontece de forma clara quando todo agregado natural é substituído. Por outro lado, quando uma porcentagem pequena de agregado é

substituída, pode influenciar menos no desempenho do concreto (BRITO; SAIKIA, 2013; LEITE, 2001).

A influência da porosidade média do agregado reciclado na resistência à compressão e no módulo de elasticidade para diferentes relações água/ cimento pode ser observada na Figura 2-8.

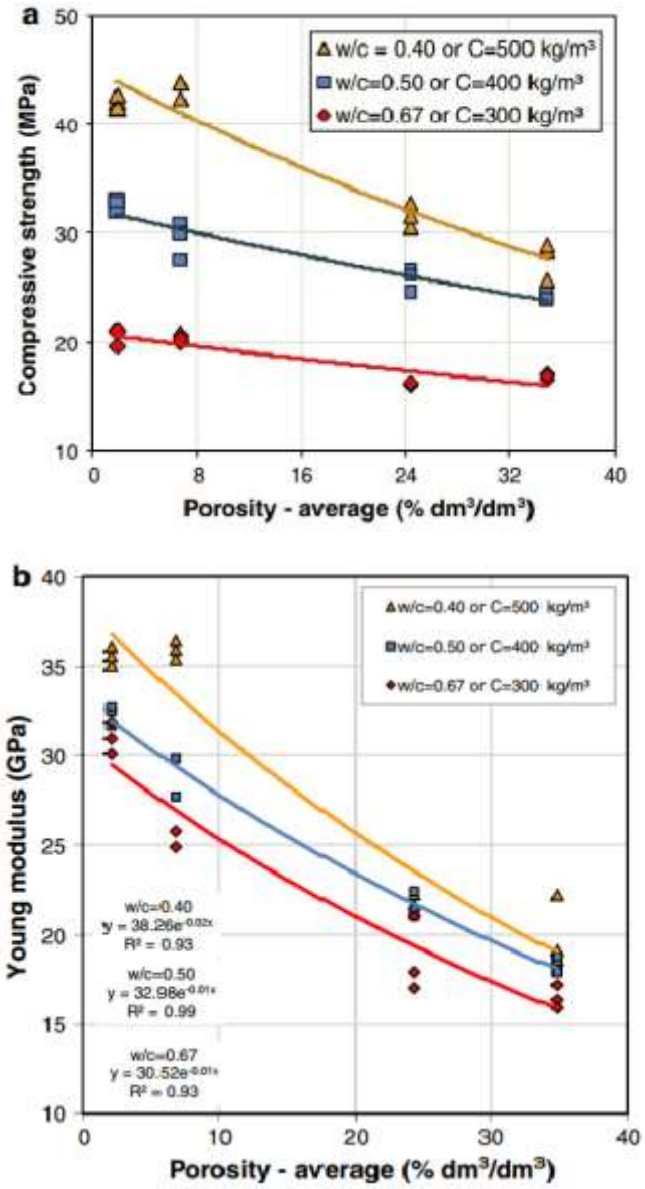


Figura 2-8 – Curvas variando fator água/cimento na relação entre porosidade média do agregado reciclado de RCD e a) resistência à compressão e b) módulo de elasticidade. Fonte: (ANGULO et al., 2010).

A influência no módulo de elasticidade se assemelha à resistência a compressão. O impacto do aumento da porosidade de 0 a 40% levou a uma redução de 60% do módulo de elasticidade em relação ao agregado natural.

2.5 Conclusões Parciais

Os agregados reciclados de RCD apresentam características como granulometria, rugosidade, relação de aspecto e excesso de finos que podem influenciar a trabalhabilidade no concreto.

Por apresentar alta porosidade, o material reciclado terá maior absorção de água. Como consequência, concretos e argamassas no estado fresco, demandam elevados valores de água ao substituir o agregado natural. O desempenho mecânico no estado endurecido também pode ser afetado devido ao aumento da porosidade e a fraca ligação entre o agregado e a matriz.

O ensaio de absorção de água ao longo do tempo para agregados reciclados de RCD é útil para prever a quantidade adicional de água necessária na mistura de concreto. Saturar o material reciclado antes de preparar a mistura pode reduzir a absorção da água no estado fresco.

As tecnologias de reciclagem avançada permitem diminuir a camada de pasta cimentícia que envolve o agregado reciclado de concreto, reduzindo a porosidade. No entanto, produz maior quantidade de materiais finos e tem maior consumo de energia e emissão de CO_2 que a reciclagem convencional, além de não ser uma alternativa quando se trata da alta porosidade em materiais cerâmicos.

3 TRATAMENTO SUPERFICIAL COM HIDROFUGANTES

O tratamento superficial com aplicação de hidrofugantes visa reduzir parte dos efeitos negativos dos agregados reciclados durante a produção do concreto; em especial, o aumento da demanda de água, para uma dada condição de trabalhabilidade.

Essas melhorias estão restritas às condições reológicas e não implicam na redução da porosidade presente no agregado reciclado. Esse tipo de melhoria do agregado reciclado teria a vantagem de evitar o consumo de energia e gastos com combustíveis do processo avançado de reciclagem (que procura remover a pasta de cimento e reduzir a porosidade do agregado).

3.1 Molhabilidade

Molhabilidade é a tendência de um líquido se espalhar por uma superfície sólida. Uma superfície é dita molhada quando um líquido se espalha sobre a superfície uniforme sem a formação de gotículas (ARKLES, 2006). A molhabilidade é governada por dois fatores: a característica da superfície (tensão superficial – interface sólido, ar e líquido) e a estrutura geométrica do mesmo (NASCIMENTO et al., 2014; SHIBUICHI et al., 1998).

A tensão superficial de um líquido é originada por um desequilíbrio de forças de coesão das moléculas na interface do líquido com o ar (Figura 3-1). Uma molécula no meio de um líquido se beneficia da interação com as moléculas vizinhas. Em contraste, moléculas da superfície perdem metade das interações de coesão (GENNES; BROCHARD-WYART; QUERE, 2004).

Para manter mínima a energia livre na superfície, as moléculas superficiais são puxadas pelas moléculas internas criando uma pressão e reduzindo sua área superficial. A força intermolecular de coesão que contrai a superfície é chamada de tensão superficial (BRACCO; HOLST, 2013).

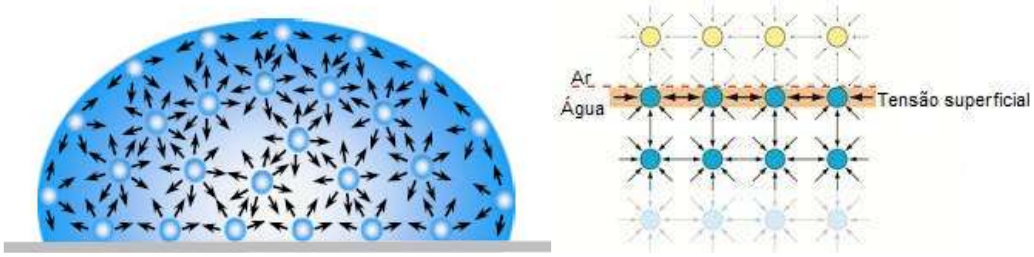


Figura 3-1 -Tensão superficial causada pelo desequilíbrio entre as forças das moléculas na superfície do líquido.
Fonte: (YUAN; LEE, 2013).

3.1.1 Tensão superficial líquido-ar

Existem diversas técnicas para quantificar a tensão superficial dos líquidos em contato com o ar (ADAMSON, 1990). Um dos métodos mais utilizados para se medir a tensão superficial de um líquido é o método do peso da gota (Figura 3-2), onde a força coesiva da tensão superficial é igual à força peso da gota dividido pelo perímetro do capilar (BARNES; GENTLE, 2011), incluindo um fator de correção. É expressa, portanto, em m/N x m^{-1}.

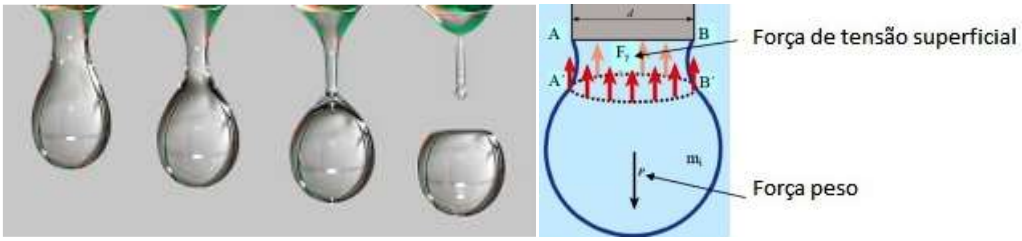


Figura 3-2 - Processo de formação de uma gota até seu desprendimento pela ação da gravidade e a indicação das forças de tensão superficial opostas à força peso.
Fonte: ADAMSON (1990). Adaptado.

A Tabela 3-1 apresenta alguns exemplos de tensão superficial.

Tabela 3-1 -Tensão superficial de alguns líquidos à 20°C.

Líquido	Etanol	Acetona	Ciclohexano	Glicerol
γ(mN/m)	23	24	25	63
Líquido	Água	Água (100°C)	Vidro fundido	Mercúrio
γ(mN/m)	73	58	~300	485

Fonte:Gennes (2004).

3.1.2 Ângulo de contato ideal

Quando um líquido é posicionado sobre a superfície de um sólido são formadas três interfaces: a interface líquido-sólido, a sólido-ar, e a líquido-ar. Cada interface contém uma força de coesão específica resultado da tensão superficial

entre os meios (MARMUR, 2009). Para que se atinja uma condição de equilíbrio (menor energia livre na superfície), líquidos e outros materiais isotrópicos se contraem em forma de esfera, equilibrando a ação das três tensões superficiais (YUAN; LEE, 2013) fazendo com que a interface se comporte como uma membrana elástica. O ângulo θ entre a superfície aparente do sólido e a tangente da superfície do líquido é chamado de ângulo de contato aparente (OR; TULLER, 2005).

O ângulo de contato ideal é o equilíbrio de um líquido depositado sobre uma superfície sólida, lisa, rígida, homogênea, não solúvel e não reativa (MARMUR, 2009), qual molhabilidade é descrita através da equação de Young (VALIPOUR; BIRJANDI; SARGOLZAEI, 2014; WHYMAN; BORMASHENKO; STEIN, 2008).

$$\mathbf{cos\theta_Y = \frac{\sigma_{sv-}\sigma_{sl}}{\sigma_{lv}}} \quad (1)$$

Onde σ_{lv}, σ_{sl} e σ_{sv} são as tensões interfaciais de líquido-vapor, sólido-líquido e sólido-vapor, respectivamente (Figura 3-3) de acordo com a linha onde as três fases se encontram é chamada linha tripla e governa o fenômeno da molhabilidade, pois o ângulo de contato depende as tensões superficiais (BORMASHENKO, 2015).

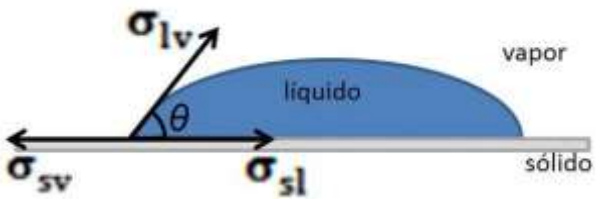


Figura 3-3 – Ângulo de contato com as tensões interfaciais de cada meio: σ_{lv}, σ_{sl} e σ_{sv}.

O ângulo de contato de Young depende somente da natureza físico–química das três fases e é independente da gravidade e forma geométrica do sistema. Essa forma de medida do ângulo de contato é diferente do ângulo de contato aparente, que é um ângulo de contato medido em um superfície rugosa ou heterogênea, quais os detalhes topográficos não podem ser visualizados a olho nu (MARMUR, 2009).

3.1.3 Ângulo de contato aparente

A técnica mais usada para determinar a molhabilidade é através da medida do ângulo de contato aparente e uma das formas de medir o ângulo de contato é através do goniômetro, que realiza a medida direta do ângulo de contato da gota (NASCIMENTO et al., 2014). O método da gota séssil é o mais comum na evolução da molhabilidade. Uma pequena gota é extraída de uma seringa e depositada em uma superfície sólida, onde a gota espontaneamente se espalha. (EXTRAND, 2009).

A elevada aversão à água, hidrofobia, que a flor de Lótus apresenta na superfície de suas folhas é chamada efeito Lótus. Através da estrutura hierárquica exposta pela folha, com presença de saliências nanométricas, denominadas papilas, e ceras epicuticulares hidrofóbicas é possível elevada repulsão da água pelo ângulo de contato maior que 90º entre a superfície e a gota de água (MING et al., 2009). Esta, tomando forma mais esférica, como na Figura 3-4(ab).

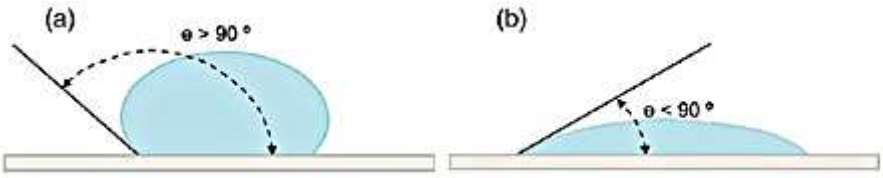


Figura 3-4 - Molhabilidade de uma superfície sólida por um líquido: (a) θ> 90° e (b) θ< 90°, indicando a hidrofobicidade e hidrofilicidade, respectivamente.
Fonte: KLEIN et al.(2012).

Diferentes energias de superfície resultam em diferentes ângulos de contato entre o líquido e superfície sólida. Quando um sólido contém grupos polares (hidroxilas – OH^-) o mesmo tem boa afinidade com a água e desenvolve forças de adesão fortes no sólido, resultando numa superfície hidrofílica (θ< 90º) (BARNES; GENTLE, 2011). Assim, um líquido com baixa tensão superficial em uma superfície sólida com alta tensão superficial irá se espalhar pela superfície (WEBB, 2001b). Quando o inverso ocorre, o líquido não molha o sólido, resultando em um ângulo de contato > 90º.

A rugosidade da superfície tem sido estudada utilizando meios mais precisos como geometria fractal, espectro de textura e estruturas com aproximações tridimensionais (3D) (ALSHIBLI; ALSALEH, 2004). Outro método para obter medidas de superfície é através de interferometria óptica, qual consiste em fazer medidas de ângulos e distâncias através da interferência de ondas eletromagnéticas sobre a superfície. Através da relação entre a área de superfície do material e a mesma área plana, é possível calcular o fator de rugosidade de acordo com o Modelo de Wenzel (WENZEL, 1936).

Para superfícies rugosas e heterogêneas em geral o ângulo de contato varia de acordo com a inclinação ou a composição química do local da superfície do sólido. Por consequência, a linha de contato não será retilínea e a forma da interface líquido-vapor deverá se acomodar (MARMUR, 2009).

A rugosidade da superfície pode controlar o grau de molhabilidade (para uma determinada superfície química) reforçando a tendência natural do material (ONDA et al., 1996). De acordo com Gennes et al. (2004) à medida que a rugosidade aumenta, uma substância hidrofílica se torna ainda mais hidrofílica, da mesma forma que uma substância hidrofóbica pode se tornar super-hidrofóbica (Figura 3-5).

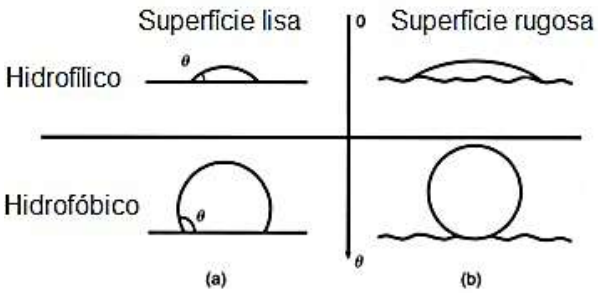


Figura 3-5 - Molhabilidade de um substrato sendo controlada pela sua rugosidade. Superfície lisa (a); superfície rugosa (b). Substrato hidrofílico se tornando ainda mais hidrofílico com uma rugosidade na superfície (acima); substrato hidrofóbico se tornando super-hidrofóbica (abaixo).
Fonte:GENNES; BROCHARD-WYART; QUERE (2004).

Para explicar o efeito da rugosidade no ângulo de contato aparente de uma gota na superfície de um sólido são comumente usados dois modelos: um descrito por (WENZEL, 1936) e o outro por Cassie e Baxter (1944). Os dois métodos assumem que mudanças nas áreas interfaciais controlam a molhabilidade (EXTRAND, 2009).

No modelo de Wenzel, a gota mantém contato com toda a superfície do sólido e penetra completamente as cavidades. De acordo com o modelo, um material rugoso tem área superficial maior que um material liso, o que altera o ângulo de contato aparente (QUÉRÉ, 2008).

De acordo com o método de Cassie a superfície prende o ar nos espaços vazios entre protuberâncias formando ‘’bolsas de ar’’ e a hidrofobicidade é fortalecida, pois a gota se acomoda parcialmente sobre o ar (WHYMAN; BORMASHENKO; STEIN, 2008).

Em uma mesma superfície os dois modelos de Wenzel e Cassie podem coexistir. Sob estímulos externos como pressão, vibração, impacto e campo elétrico, o regime de “bolsas de ar” de Cassie podem se converter ao de Wenzel (BORMASHENKO, 2015). Logo, a transição de molhagem provém, devido ao deslocamento da linha de contato trifásica.

Vekateswara Rao et al. (2007) e Shirtcliffe et al. (2007) estudaram substratos porosos e mostraram que a tensão superficial pode ser a razão para a transição do modelo de Cassie para o de Wenzel. Mesmo com a tensão superficial baixa, líquidos não aquosos penetraram os poros superficiais dos substratos.

3.2 Capilaridade

Quando uma superfície é molhada, o líquido entra pelos capilares devido à tensão superficial. A capilaridade resulta de duas forças opostas: adesão de um líquido à superfície de um sólido e a força coesiva de tensão superficial do líquido (BARNES; GENTLE, 2011).

A capilaridade depende de parâmetros físicos da interface entre um líquido e um sólido (ângulo de contato, rugosidade) assim como a tensão superficial do liquido com o ar (OR; TULLER, 2005).

Quando uma extremidade de um tubo é forçada a penetrar por uma interface vapor-líquido pelo lado do vapor, o líquido entrará espontaneamente pelo capilar e subirá até um nível acima da interface líquido-vapor externa. Um líquido hidrofugante ao entrar pelo capilar ficará em um nível abaixo da interface externa líquido-vapor, ou seja, esse último líquido deve ser forçado a entrar no capilar. Isso ocorre porque no interior do capilar e ao longo da interface vapor-líquido-sólido, a interface líquido-sólido assume um ângulo que resulta em equilíbrio de forças (WEBB, 2001b).

Esse equilíbrio pode ser expressado pela Equação de Young-Laplace para superfícies esféricas, onde a diferença de pressão da superfície é:

$$\Delta \boldsymbol{p} = \frac{\boldsymbol{2\gamma cos\theta}}{\boldsymbol{r}} \qquad (2)$$

Onde Δp é a diferença de pressão entre os extremos do tubo γ é a tensão na superfície líquido-vapor, r, como é uma superfície esférica, é o raio do poro capilar e θ o ângulo de contato formado entre a parede capilar e o líquido.

A absorção capilar se relaciona com o ângulo de contato (θ) entre o menisco formado pela água e a parede do poro. Se θ < 90°, ocorre absorção e a gota de água apresenta curvatura côncava, eliminando a interface líquido-vapor, fazendo com que o líquido penetre. Se θ > 90°, a água será repelida do capilar (KLEIN et al., 2012). Quanto maior o ângulo maior a aversão à água, pois há um aumento da interface sólido-vapor.

Em um poro cilíndrico a pressão associada à presença de um líquido aplica uma força conhecida como força capilar. Irregularidades nas superfícies de partículas tendem a reduzir as forças capilares, quais, literalmente forçam os líquidos para dentro de materiais porosos. Quanto menor o poro, maior será a pressão aplicada pelo líquido ao material (KOLASINSKI, 2008).

A viscosidade de um fluido indica a resistência ao fluxo, a facilidade de escoar continuamente quando sujeito à uma tensão externa. Quanto menor sua

viscosidade, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante, quanto mais viscoso maior é a coesão entre si das moléculas das lâminas adjacentes do fluido (OLIVEIRA et al., 2000) .

Para levar em consideração a viscosidade de um líquido dentro do capilar é utilizada a equação de Hagen-Poiseuille, qual governa o movimento de um fluido dentro de um tubo. Para uma taxa de escoamento Q,

$$\boldsymbol{Q} = \frac{\boldsymbol{\pi \Delta P r^4}}{\boldsymbol{8 \eta l}} \qquad (3)$$

ΔP é a diferença de pressão entre os extremos do tubo , l é o comprimento do tubo, r é o raio do tubo e η é o coeficiente de viscosidade. A taxa de escoamento vai depender do r do tubo e da viscosidade (PICKOVER, 2008). A equação descreve características de um fluxo laminar, inversamente proporcional à viscosidade e ao comprimento do tubo.

(WASHBURN, 1921) assume que o poro é cilíndrico e a abertura é circular em seção transversal e foi o primeiro a combinar a equação de Hagen-Poiseuille com a Equação de Young- Laplace para determinar as taxas de ascensão capilar através de uma equação que calcula a distância a ser percorrida por um líquido que é absorvido em um tubo cilíndrico por capilaridade a um determinado tempo:

$$\frac{\boldsymbol{L^2 = \gamma r cos \theta t}}{\boldsymbol{2 \eta}} \qquad (4)$$

Onde L é a ascensão capilar no tempo t, r o raio, γ a tensão superficial e η a viscosidade e θ o ângulo de contato formado entre a parede capilar e o líquido. Quanto menor a viscosidade, maior a ascensão capilar.

Sato e Agopyan (1998) analisaram a influência do volume total de vazios e das dimensões dos poros nas propriedades de transporte de água em concreto e observaram que, quando o concreto está em contato com a água, a ascensão capilar ocorre somente nas camadas superficiais, pois apresentam poros abertos

e conectados. Os poros opõem uma resistência ao escoamento de fluídos, poros menores apresentam maiores resistências hidráulicas que os maiores. Ao longo do movimento da interface água-vapor pelo poro, pode ser interrompida ao atingir uma situação de um aumento no diâmetro, o que reduz a força capilar, de acordo com a Figura 3-6.

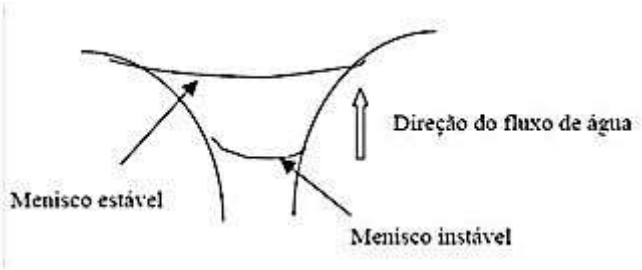


Figura 3-6 - Menisco estável e instável em um poro.
Fonte:SATO; AGOPYAN(1998).

3.3 Emulsões a base de silano

Os produtos hidrofóbicos utilizados atualmente no mercado atual são todos sílico-orgânicos, tais como: silanos ou trialcoxialkisilanos; siloxanos oligoméricos; siloxanos poliméricos. Os silanos são hidrofugantes incolores, caracterizados pelo tamanho das moléculas, a reatividade e a solubilidade em água e nos solventes orgânicos. Os silanos reagem quimicamente com materiais à base de sílica ou alumina (MEDEIROS; GOMES; HELENE, 2006). Elas possuem forma química conhecida como alkiltrialkoxisilano, estrutura molecular pequena, o que lhes permite penetrar em substâncias bem densas.

Os hidrofugantes são recomendados para impedir a penetração de cloretos no concreto. O processo consiste na inserção do hidrofugante nos poros do concreto formando uma camada que impede a entrada de líquido (principalmente água contaminada com cloretos), mas é possível que o vapor de água entre e saia do concreto (MEDEIROS; HELENE, 2008).

O método testado por Zhu et al. (2013) através do revestimento da superfície do concreto com emulsão de silano, tendo por finalidade protegê-lo de agentes externos, pôde diminuir a absorção de água, aumentar a durabilidade do

concreto e proteger a armação de aço. Em materiais com porosidade elevada, o silano atinge maior profundidade. De acordo com Spaeth e Djerbi Tegguer(2013b) o tratamento é resistente em meios alcalinos.

Silanos podem alterar a tensão superficial crítica de substratos que está associada à molhabilidade. Qualquer líquido com tensão superficial menor que a tensão superficial crítica do substrato irá molhá-lo. A Tabela 3-2 mostra as tensões superficiais críticas de alguns silanos.

Tabela 3-2- Tensões superficiais críticas de alguns silanos.

Tensões superficiais	γ **(**mN/m)
Heptadecafluorodecyltrichorosilano	12
Politetrafluoretileno	18,5
Metiltrimethoxysilano	22,5
Viniltrietoxysilano	25
Etiltrimethoxysilano	27
Propiltrimethoxysilano	28,5
Policlorotrifluoroetileno	31
Trifluoeopeopiltrimethoxysilano	33,5
3-(2-aminoetil)-aminopropiltrimethoxysilano	33,5
Cyanoetiltrimethoxysilano	34
Aminopropyltriethoxysilano	35
Cloropropiltrimetoxisilano	40,5
Mercaptopropiltrimetoxissilano	41
Glicidoxipropiltrimetoxisilano	42,5

Fonte:GELEST (2006).

3.3.1 Mecanismo de acoplamento

Um requisito mínimo para a adesão é que a emulsão do hidrofugante molhe adequadamente o substrato. Isso acontece quando a tensão superficial (energia) do substrato é maior do que a tensão superficial do líquido e, quando a viscosidade do líquido é baixa o suficiente para fluir (NEWTON, 1730). Muitas superfícies inorgânicas, tais como cerâmica e minerais, têm tensões superficiais mais elevadas do que as dos líquidos (de natureza polimérica). A adsorção das emulsões hidrofóbicas sobre a superfície do substrato pode produzir forças de adesão acima da resistência coesiva do silano (MITTAL; PIZZI, 2009).

Substâncias à base de óleos e silicones têm tensão superficial baixas ($\gamma \approx 20$mN/m). Um líquido se espalha completamente se é menos polarizável que o sólido. Polidimetilsiloxanos são líquidos ideais de baixa tensão superficial utilizados como repelentes de fórmula geral $(CH_3)_3$-Si-O-[(CH_3)2SiO]n-Si$(CH_3)_3$. Sua estrutura consiste de siloxano (grupo Si-O) ligado a dois grupos metil responsáveis por características hidrofóbicas e apolares. O número n se refere ao grau de polimerização. Possuem tensão superficial baixa independente do

peso molecular (GENNES; BROCHARD-WYART; QUERE, 2004). A hidrofobicidade depende do grupo orgânico ligado à molécula de silano. A Figura 3-7 mostra alguns silanos em ordem crescente de hidrofobicidade.

Mais hidrofóbico ↓	Nome Químico	Grupo Alcóxido	Grupo organofuncional
	Tetraetoxisilado	Etoxi	-
	Metiltrimetoxisilano	Metoxi	Metil
	Metiltrietoxisilano	Etoxi	Metil
	Dimetildimetoxisilano	Metoxi	Metil
	Propiltrimetoxisilano	Metoxi	Propil
	Propiltrietoxisilano	Etoxi	Propil
	Isobutiltrimetoxisilano	Metoxi	Isobutil
	Isobutiltrietoxisilano	Etoxi	Isobutil
	Feniltrimetoxisilano	Metoxi	Fenil
	n-Octiltrietoxisilano	Etoxi	n-Octil

Figura 3-7 - Ordem crescente de hidrofobicidade de alguns silanos.
Fonte: GELEST (2006).

Grupos de compostos orgânicos com as mesmas propriedades químicas (estruturas semelhantes) têm sido acoplados às superfícies Si através de ligações Si-C. Essas ligações requerem ativação por irradiação ou aquecimento.

Os agentes de acoplamento silanos contêm grupos funcionais químicos que reagem com os grupos silanóis (Si-OH) e a adesão ao substrato pode ser feita por ligações covalentes, além dos agentes acoplantes conterem um outro grupo funcional diferente que poderia reagir durante a cura (PLUEDDEMANN, 1991).

A reação envolve quatro etapas: inicialmente ocorre a hidrólise dos três grupos hidrolisáveis, em seguida a condensação para oligômeros, quais fazem ligações de hidrogênio com grupos OH do substrato. Por último, durante a secagem, é formada uma ligação covalente no substrato e há perda de água. As etapas de deposição hidrolítica do silano podem ser observadas na Figura 3-8.

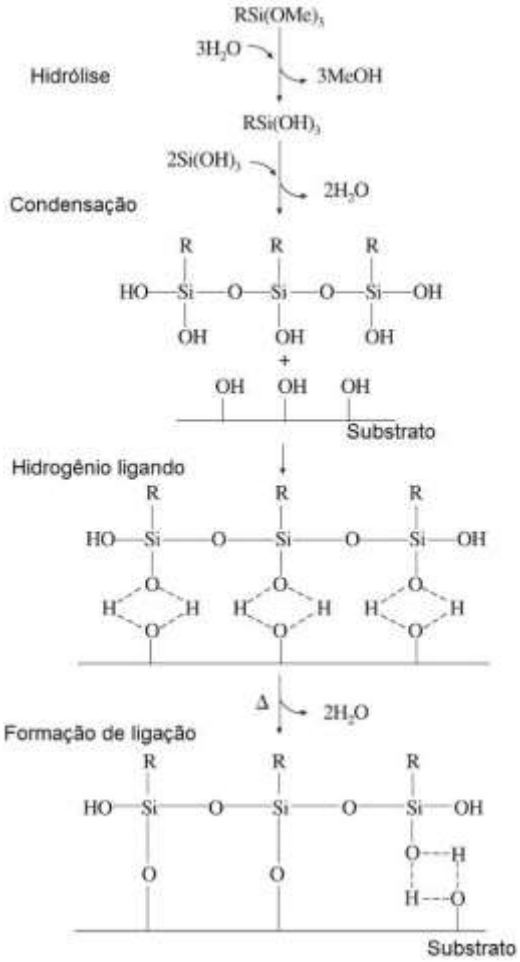


Figura 3-8 - Deposição hidrolítica do silano.
Fonte: ARKLES (2006).

Quando a superfície tratada é aquecida até 120ºC entre 30 a 90 minutos, acontecem ligações covalentes. Com a evaporação da água, as ligações se rompem e se refazem para compensar a tensão interna.

Ao comparar as propriedades de vários laminados de poliéster tratados com de silano, foi observado que a secagem à 110ºC teve melhor desempenho que os tratados em temperatura ambiente, e menor desempenho à 160ºC (PLUEDDEMANN, 1991).

O grau de polimerização dos silanos é determinado pela quantidade de água disponível. Quanto menor a solubilidade em água, menor a polimerização. Quando o silano reage com a superfície do substrato, esta pode ser modificada. Também a região de interface pode prejudicar o sistema dependendo das suas propriedades físicas e químicas tais como a quantidade de água ou hidroxilas

que podem interferir no acoplamento. As hidroxilas residuais que não foram condensadas também podem interferir na atividade (ARKLES, 2006). A Figura 3-9 mostra a efetividade do silano como agente de ligação em função do substrato acoplado.

	SUBSTRATOS
EXCELENTE	Sílica
	Quartzo
	Vidro
	Alumínio
	Silicatos de Alumínio (ex.:Argilas)
	Silicones
	Cobre
BOM	Estanho
	Talco
	Óxidos Inorgânicos
	Aço, Ferro
FRACO	Asbestos (Amianto)
	Níquiel
	Zinco
	Chumbo
	Mármore, cal
	Sulfato de Cálcio
RUIM	Baritina
	Grafite
	Negro de carbono (forma impura do carbono)

Figura 3-9 - Efetividade do silano em substratos inorgânicos. Fonte: ARKLES (2006).

3.4 Parafina

Outros compostos orgânicos que também apresentam hidrofobicidade são os alcanos, oriundos de gás natural e petróleo, usados em parte como parafina. Utilizada na indústria nos setores de acondicionamento, revestimentos, ceras e produção de velas, é um hidrocarboneto que tem estrutura química C_nH_{2n+2}(LING; POON, 2013). A parafina comercial tem ponto de fusão de 20° a 70°C, dependendo do número de átomos de carbono; quanto mais átomos de carbono mais alto o ponto de fusão da parafina (TURNER; BROWN; HARRISON, 1955).

A parafina com ponto de fusão de 26°C é usada como material de mudança de fase no concreto. Devido a sua inatividade em meio alcalino, a parafina tem compatibilidade com materiais de construção e estabilidade química a longo prazo, além de ter preço acessível e não ser tóxica (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010; CABEZA et al., 2007a, 2007b; CASTELLÓN et al., 2010; ZALBA et al., 2003). A parafina torna-se fluida acima do ponto de fusão sem apresentar segregação de fase (de forma homogênea)(LING; POON, 2013). No entanto, é um material inflamável.

O modo mais antigo e econômico de promover hidrorrepelência em uma superfície é revesti-la com substâncias hidrofóbicas como parafina. Essa substância tem sido aplicada a sólidos aquecendo-os a uma temperatura de fusão ou em emulsões(KISSA, 2001).

A parafina pode ser utilizada no concreto como selante, através da aspersão sobre a superfície do concreto, processo comumente utilizado em pavimentação asfáltico para reduzir a necessidade de cura do material (CERVO et al., 2010), e também para a vedação de corpos de prova.

A matéria–prima para a fabricação de parafina sólida é uma mistura de óleo e cera, um subproduto do refino de óleo lubrificante. O primeiro passo é a retirada do óleo do material, que é separado por cristalização, onde a matéria é aquecida e misturada com um ou mais solventes. Ao resfriar, a parafina se cristaliza deixando o óleo na solução. Quanto menor a porcentagem de óleo, mais pura e refinada a parafina é considerada (MÓZES, 1983). O produto é comercializado de forma sólida ou líquida. A matéria-prima para a parafina líquida é obtida através da destilação do petróleo.

A Figura 3-10 mostra a obtenção de parafina através da separação por combinação de diferentes métodos (formação de aduto com ureia, cromatografia e outros métodos químicos).

Figura 3-10 - Diagrama da separação do óleo para obtenção de parafina.
Fonte: MÓZES (1983)

Estudos de tratamento da superfície de concreto com parafina foram realizados por Lawrence Radiation Laboratory (1955), aplicando parafina em estado líquido por penetração para selar os poros da superfície do concreto reduzindo a absorção de líquidos radioativos do ambiente em que o concreto estava exposto, pois quando a parafina se solidifica os poros são selados.

(ONDA et al., 1996) estudou a molhabilidade em superfícies fractais formadas de cera AKD (Dímero Alquil Ceteno). Essas superfícies repeliram água completamente com ângulo de contato aparente maior que 174º. Cortando a superfície fractal e obtendo uma superfície plana, o ângulo de contato diminuiu, assumindo que a hidrofobicidade se relaciona à rugosidade do material.

Nascimento et al. (2014) estudou o ângulo de contato de várias superfícies de parafina, constatando que quanto maior a rugosidade menor a molhabilidade desse material.

3.4.1 Mecanismo de acoplamento

A parafina, derivada do petróleo, é composta por moléculas de cadeias de carbono abertas, normais ou ramificadas, de alto peso molecular. Portanto, é uma mistura de alcanos (HIMRAN; SUWONO; MANSOORI, 1994). Os alcanos são formados por correntes de carbono com um grupo metil em cada ponta. A fórmula básica é C_nH_{2n+2} e variam de nonano (n=9) a hexadecano (n=16). São apolares, não reagem com a superfície de um substrato. Têm uma baixa viscosidade de 1 mPa.s (comparada a da água). A viscosidade e a tensão superficial aumentam de acordo com o tamanho da cadeia molecular (GENNES; BROCHARD-WYART; QUERE, 2004). A tensão superficial crítica da parafina é $\gamma_c = 25{,}5$ (GELEST, 2006).

Quando uma molécula é polar (hidrofílica) em uma ponta e apolar (hidrofóbica) na outra, esta última, geralmente uma corrente de alcano, é depositada em uma superfície com água, o lado polar é atraído enquanto a corrente de alcano repele a água (KOLASINSKI, 2008).

A aderência ocorre por migração das partículas de parafina derretida à superfície. Quando o revestimento resfria há a recristalização das partículas formando uma camada contínua na superfície. Por serem extremamente não – polares pode haver diminuição da aderência entre o tratamento e o substrato.

As parafinas macrocristalinas tendem à capacidade de deslizar sobre outra superfície sem causar danos mecânicos. Isso pode ser explicado pelo fato de parafinas líquidas terem propriedades microcristalinas, além da redução do tamanho das partículas, como consequência conferem menos deslizamento que parafina sólidas, quais têm uma proporção mais elevada de cristais (MÓZES, 1983).

Uma parafina contendo até 5% de óleo pode penetrar facilmente por superfícies porosas tornando-as hidrofóbicas, impedindo a passagem de vapores e gases (KOLESKE; SPRINGATE; BREZINSKI, 2015). A Figura 3-11 mostra como a

penetração da parafina ocorre nos poros por impregnação, formando uma camada que não permite a entrada de outras substâncias no substrato.

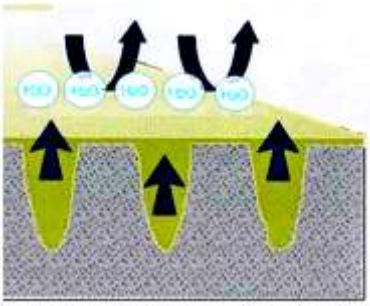


Figura 3-11 - Penetração de produtos à base de parafina.

As emulsões de parafina permitem melhor empacotamento de partículas para a superfície do revestimento, pois é mais fácil inserir as partículas menores nos interstícios formando, portanto, uma camada mais densa.

3.5 Conclusões parciais

A molhabilidade de uma superfície sólida é definida através da medida do ângulo de contato aparente, qual indicará hidrofobicidade ou hidrofilicidade de acordo com a tensão superficial gerada pelas interfaces formadas sobre aquela superfície. Alguns estudos, os modelos de Wenzel e o de Cassie -Baxter adotam que a molhabilidade se relaciona com a rugosidade. Logo, a molhabilidade e a rugosidade irão controlar a absorção capilar de líquidos.

Os dois tipos de tratamento buscam reduzir a absorção de água do agregado durante a produção de argamassas e concretos como uma alternativa ao processo avançado de reciclagem (termomecânico).

Os silanos são considerados hidrofugantes incolores e solúveis em água. Têm estrutura molecular pequena, o que lhes permite penetrar em poros mais profundos e estreitos. Possuem reação físico-química com materiais inorgânicos, podendo alterar a tensão superficial de substratos. A adesão da

emulsão ao substrato pode ser feita por ligações covalentes e necessitam ativação por secagem.

A parafina também é considerada um hidrofugante. É um hidrocarboneto com ponto de fusão em 26°C usado no concreto como material de mudança de fase, revestimento, selante e vedação de corpos de prova, devido a sua inatividade em meio alcalino, compatibilidade com materiais de construção e estabilidade química a longo prazo.

O acoplamento da parafina é uma reação física, ocorre por penetração das partículas de parafina em estado fluido pela superfície. Sendo uma molécula apolar, não reage com a superfície de um substrato, podendo inclusive reduzir a aderência entre tratamento e substrato. É aplicada em estado líquido quando aquecida e se solidifica ao resfriar dentro dos poros selando a superfície. Quando o revestimento resfria, há a recristalização das partículas formando uma camada contínua na superfície.

4 CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COM HIDROFUGANTES

Compreendendo as características dos agregados reciclados de RCD, os processamentos para obtê-los e obstáculos para melhorá-los, optou-se pelos tratamentos químicos dos agregados reciclados com silano e parafina. Assim, os agregados foram caracterizados e três técnicas de tratamento por silano foram avaliadas para escolher a mais eficaz. Tendo esta definida, os agregados foram tratados com parafina e ambos caracterizados novamente com cada tipo de hidrofugante para entender a superfície dos agregados reciclados tratados.

4.1 Preparação dos agregados de RCD

Com o intuito de estudar os principais materiais presentes nos agregados reciclados de RCD, foram coletados corpos de prova de concreto (~250Kg) com intervalo de resistência à compressão entre 25 e 30 MPa (Figura 4-1a) e blocos de cerâmica vermelha (~250Kg) com dimensões 9×19×19cm para vedação com intervalo de resistência à compressão entre 0,2 e 0,5 MPa (Figura 4-1b).

Figura 4-1 - Materiais para a preparação dos agregados reciclados de RCD: (a) corpos de prova de concreto e (b) blocos de cerâmica vermelha.

Os mesmos foram pré-fragmentados manualmente, com uma marreta, como ilustra a Figura 4-2, para viabilizar a alimentação no britador de mandíbula. Os materiais fragmentados foram então britados em um britador de mandíbula com abertura mínima de 12mm, até que, no mínimo, 95% da massa total fosse passante na peneira de malha 9,5mm. No caso dos agregados de blocos de cerâmica vermelha, devido à maior presença de partículas com formato lamelar, foi necessário utilizar o britador de rolo (com abertura de 9mm), até se conseguir

a condição estipulada (95% da massa passante em malha de 9,5 mm). Os equipamentos podem ser observados nas Figura 4-3 e Figura 4-4.

Figura 4-2 - Fragmentos de (a) corpos de prova de concreto e (b) blocos de cerâmica vermelha.

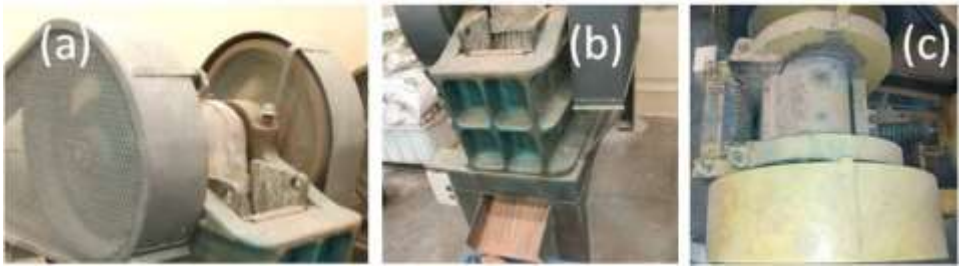


Figura 4-3 - Britador de mandíbulas por vistas (a) lateral, (b) frontal e (c) superior.

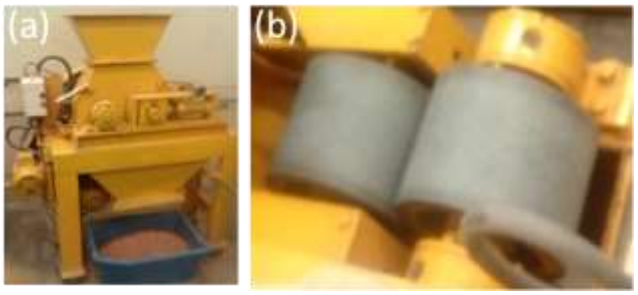


Figura 4-4 - Moinho de rolos por vistas (a) frontal e (b) superior.

Os agregados reciclados foram então denominados ARCI (agregado reciclado cimentício) e ARCV (agregado reciclado de cerâmica vermelha). Para cada tipo de agregado reciclado, foi realizada uma pilha alongada de homogeneização (Figura 4-5) (PETERSEN; MINKKINEN; ESBENSEN, 2005), que foi dividida em 10 amostras representativas de aproximadamente 50 kg.

Figura 4-5 - Pilha alongada de homogeneização do (a) ARCI e do (b) ARCV.

Uma amostra de 50 kg de cada tipo de agregado reciclado foi extraída de uma seção da pilha de homogeneização. Essas amostras foram peneiradas nas peneiras de malha de 4,75 mm e 0,15 mm (Figura 4-6a), gerando duas frações granulométricas: a graúda (9,5-4,75mm) e a miúda (4,75-0,15 mm). A fração abaixo de 0,15 mm não foi utilizada no estudo.

A fração graúda e miúda foi então quarteada, em quarteador Jones (Figura 4-6a e Figura 4-6b), obtendo-se amostras representativas de cerca de 2 kg cada. Essas amostras foram encaminhadas para as etapas de tratamento superficial e caracterização.

Figura 4-6 - Equipamentos utilizados para obter as amostras representativas: (a) peneirador e (b) quarteador Jones.

4.2 Tratamento superficial dos agregados de RCD com hidrofugantes

O tratamento superficial foi realizado apenas para a fração graúda dos agregados de RCD (entre 4,75 e 9,52mm), pois determinados ensaios de caracterização (absorção de água, rugosidade, ângulo de contato) não foram adequados para se caracterizar a fração miúda, antes e após o tratamento superficial.

4.2.1 Emulsão à base de silano

Para avaliar e selecionar a técnica de tratamento superficial mais eficaz, os tratamentos foram realizados na fração graúda dos ARCI e ARCV com hidrofugante à base de emulsão de octiltrietoxisilano Dow Corning IE6683, com pH 4,93, solúvel em água, disponível em mercado nacional para revestimento de materiais porosos tais como blocos cerâmicos e de concreto, rochas e argamassa. O produto tem 40% conteúdo ativo (Sólidos Si). O silano (mais hidrofóbico de acordo com a Figura 3-7) e a concentração em água (10% em massa) foram escolhidos de acordo com precedentes investigações (MARANHÃO, 2009) e disponibilização do material. Para o trabalho a nova emulsão passa ter 4% de fase dispersa.

As três diferentes técnicas de tratamento superficial dos agregados reciclados buscam simular, em laboratório, o possível tratamento em escala industrial, para, a partir dos resultados obtidos, se definir a mais eficaz. São elas:

- <u>Aspersão:</u> simula uma condição industrial na qual o agregado reciclado é tratado por aspersão, sob os transportadores de correia, na própria usina de reciclagem. As amostras dispostas em bandejas (35x50cm) foram tratadas através de aspersão da emulsão em três ciclos consecutivos. Após o primeiro ciclo, o material foi revirado com uma espátula e as aplicações subsequentes executadas em regiões não tratadas anteriormente (Figura 4-7).

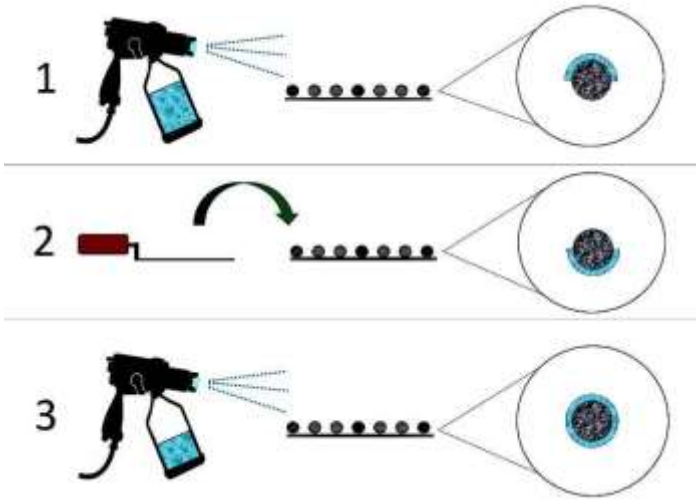


Figura 4-7 - Procedimento para tratamento por aspersão: (1) aplicação do hidrofugante na superfície do material, (2) virar material com espátula (3) segunda aplicação do hidrofugante.

Foi utilizado um aspersor eletromecânico para pintura com uma vazão de 0,0044 l/s. Para o tratamento, a bandeja foi envolvida em plástico, para assegurar que o hidrofugante não seria desperdiçado durante a aspersão.

Para atingir a mesma condição de molhagem superficial, foram utilizados 0,152 *l*/kg para ARCI e 0,464 *l*/kg para ARCV. A quantidade variou devido à diferença de porosidade dos agregados reciclados.

- Gotejamento: simula uma condição industrial na qual o agregado reciclado é tratado na usina de concreto pré-misturado, durante a etapa de preparação do concreto. O hidrofugante é gotejado no agregado em um misturador de eixo vertical ou betoneira, antes da mistura dos demais materiais durante a dosagem do concreto.

  Pela possibilidade de controlar a velocidade de rotação da raquete o material foi disposto na cuba do reômetro rotacional planetário da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a emulsão foi aplicada com gotejador (Figura 4-8), a uma velocidade de 2 gotas por segundo durante 20 minutos, mantendo a velocidade mínima de rotação da raquete de 50 rpm, com intuito de não quebrar as partículas de agregados reciclados. O objetivo era manter o material em rotação, para homogeneizar a aplicação

do tratamento sobre a superfície das partículas. A quantidade de emulsão usada foi de 0,187 *l*/kg para ARCI e 0,282 *l*/kg de material tratado para ARCV. O tratamento com ARCV necessitou 5 minutos a mais por ainda apresentar superfície seca após 20 minutos.

Figura 4-8 - Gotejador com hidrofugante em pórtico ajustado ao reômetro planetário.

- Imersão: requer uma instalação industrial complementar, seja na usina de reciclagem ou na usina de concreto. Este tratamento consistiu em imergir as amostras em emulsão de silano. As amostras foram colocadas em recipientes plásticos de dimensões 40x25x30 cm^3 e, sobre elas, despejada a emulsão até atingir uma altura de 2cm entre a superfície e o nível da amostra, para assegurar que as partículas se mantivessem totalmente cobertas pela emulsão durante todo o procedimento. Os recipientes foram mantidos fechados por 24h.

Para ARCI foi necessário 0,60 l/kg de agregado e 0,824 l/kg para ARCV. Para o ARCV foi necessária maior quantidade de emulsão, devido à maior porosidade do material. 62% do volume da emulsão utilizada em cada material foi reaproveitado.

Após os tratamentos os materiais passaram a ter novas nomenclaturas especificadas junto às quantidades de amostra tratadas de cada material na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Quantidade de material para cada técnica de tratamento com hidrofugante.

Tipo de agregado	Tratamento	Nomenclatura da amostra	Massa da amostra (g)
ARCI	Gotejamento	ARCI got	1.434
	Aspersão	ARCI asp	1.457
	Imersão	ARCI ime	1.514
ARCV	Gotejamento	ARCV got	1.514
	Aspersão	ARCV asp	1.162
	Imersão	ARCV ime	871

Após cada tratamento o agregado foi seco a 105ºC em estufa durante 24 horas. Antes dos ensaios de caracterização, o material atingiu uma condição de equilíbrio térmico resfriando por 2 horas em condição ambiente.

Selecionada a técnica de tratamento com silano mais eficaz, foi testado também um outro hidrofugante à base de emulsão de octiltrietoxisilano Dow Corning IE6694, de pH 6,38, para se comparar a eficiência entre os mesmos. O produto tem 60% conteúdo ativo (Sólidos Si). A concentração em água foi definida, de acordo com ensaios de ângulo de contato aparente e de absorção de água no tempo realizados nos agregados graúdos reciclados (descritos no item 4.3), testando-se diferentes concentrações em volume: 5,10 e 20% em massa.

Foram também analisados o espectro no infravermelho e viscosidade dos silanos, de forma a complementar a análise sobre a eficiência desses tratamentos dos agregados reciclados.

Para os ensaios de espectroscopia no infravermelho (FIT-R) foi utilizado o equipamento Nicolet 6700 –FT-IR, no qual o hidrofugante é aplicado sobre pastilha de brometo de potássio (KBR).

Os valores viscosidade dinâmica em função da temperatura foram medidos para o silano IE 6694 com teor de 20% em emulsão e para a parafina. Os ensaios foram realizados em um reômetro AR550, TA Instruments, utilizando-se geometria de placas paralelas. A viscosidade do silano IE6683 foi obtida pelo fornecedor.

Maiores detalhes dos ensaios de infravermelho e viscosidade estão em ANEXO A.

4.2.2 Parafina

A parafina utilizada em estudo foi a utilizada na fabricação de velas (estado sólido), composta por moléculas de triacontano, com pH variando entre 8 a 10. O espectro no infravermelho e a viscosidade da parafina foram também avaliados experimentalmente, conforme descrito no item anterior.

O tratamento com parafina foi realizado apenas na fração graúda dos agregados reciclados e feito por imersão, pois foi considerada a técnica mais eficaz (ver item 4.4). Para isso, foi necessário aquecer a parafina sólida, até sua conversão ao estado líquido, à uma temperatura acima de 45 ºC. A técnica por imersão foi a única técnica viável de ser implementada no laboratório, pois foi a única que permitiu a operacionalização do tratamento num curto intervalo de tempo; evitando, assim, a transformação da parafina do estado líquido para sólido.

Para derreter a parafina e mantê-la no estado líquido durante o tratamento por imersão foi utilizada placa de aquecimento (Figura 4-9) mantida à 100ºC. Dentro de um recipiente de alumínio, sobre a placa, 300g de amostra foi tratado por vez, sendo imersa com uma peneira, para facilitar a retirada do material após o tratamento.

Figura 4-9 - Placa de aquecimento com recipiente de alumínio para tratamento dos agregados com parafina à 45ºC por imersão e (b) ARCI dentro da peneira e imerso em banho de parafina, bem como das bolhas de ar expelidas durante o tratamento.

O intervalo de tratamento para cada fração foi controlado pelo tempo de imersão suficiente para o agregado expulsar todo ar de seu interior, o que era visível pelas bolhas expelidas, não ultrapassando 10 minutos. Em seguida, cada fração tratada foi retirada do recipiente de alumínio, através de peneira, sendo resfriado à temperatura ambiente em uma bandeja de alumínio.

A bandeja foi movimentada manualmente, mantendo o agregado tratado em movimento com ajuda de uma espátula para dispersar os agregados, evitando que as partículas grudassem entre si ou na bandeja durante a solidificação.

Após o tratamento com parafina os materiais passaram a ter outras denominações especificadas junto às quantidades de amostras tratadas de cada material na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Quantidade de material utilizado para tratamento com parafina

Tipo de agregado	Tratamento	Nomenclatura da amostra	Massa da amostra (g)
ARCI	Parafina	ARCI Pa	1245
ARCV	Parafina	ARCV Pa	1139

4.3 Caracterização dos agregados de RCD

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização para os dois tipos de agregados reciclados, antes e após os tratamentos:

- Distribuição de tamanho e forma
- Porosidade
- Ângulo de contato aparente
- Absorção de água
- Microscopia e análise da rugosidade superficial

4.3.1 Distribuição de tamanho e forma

A distribuição de tamanho e de forma dos agregados reciclados de RCD foram avaliadas com equipamento QicPic da empresa Sympatec[1], que realiza essas determinações por análise de imagem dinâmica em tempo real (LIST; KOHLKER; WITT, 2010)

Esse ensaio foi realizado em triplicata na amostra íntegra de ARCI e ARCV, incluindo a fração graúda e miúda. Para a fração miúda de ARCI e ARCV foram ensaiadas separadamente as granulometrias: 0,15 a 0,60 mm; 0,60 a 2,36mm e 2,36 a 4,75mm (Tabela 4-3). Essa separação na fração miúda foi necessária para se evitar a sobreposição de partículas durante a análise, eliminando possíveis erros de interpretação dos parâmetros de tamanho e forma.

Tabela 4-3 - Quantidade de material utilizada em cada fração de agregado miúdo para ensaio de distribuição de tamanho e forma.

Ensaio de distribuição de tamanho e forma		
Frações	**Massa (g)**	
	ARCI	ARCV
0,15 – 0,60	90,51	110,21
0,60 – 2,36	791,78	751,76
2,36 – 4,75	2445,63	1501,55
4,75 - 9,5	5679,09	5499,31

Foi respeitado o valor de massa mínima por amostra de ensaio da (ABNT NBR NM 248, 2003). O equipamento analisou mais de 10 mil partículas por amostra, sendo considerada suficiente em termos de representatividade.

[1] http://www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/QICPIC.html

A primeira informação obtida pelo método de análise de imagem é o contorno da partícula. Essa imagem retém informação da forma da partícula, além do tamanho (obtido pelo parâmetro Feret mínimo – ver explicação a seguir). Pode-se também calcular outros tipos de parâmetros que não os obtidos diretamente da partícula. Pode-se, por exemplo, determinar o diâmetro de um círculo que tem a mesma área que a área de projeção da partícula (Figura 4-10).

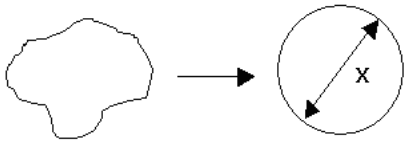


Figura 4-10 - Diâmetro derivado do círculo equivalente da área de projeção de uma partícula.

A análise da forma foi realizada pelos seguintes parâmetros:

a) <u>relação de aspecto</u>: é igual a razão entre os diâmetros de Feret (SYMPATEC MANUAL, 2014) máximo e mínimo da partícula, que é um grupo de diâmetros derivados da distância de duas retas tangentes ao contorno da partícula em uma mesma direção paralela (Figura 4-11), tendo valor máximo igual a 1, representando uma esfera;

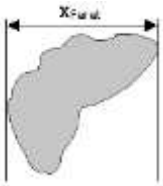


Figura 4-11 - Diâmetro de Feret. Extraído de Sympatec (2014).

b) <u>esfericidade (S):</u> representa a relação entre o perímetro de um círculo com a mesma área da projeção da partícula (A) e o perímetro “real” da partícula (P). O parâmetro é calculado pela relação de Cox (1927) $S = 2\cdot[(\pi A)^{0,5}]/P$ (ALLEN, 2003; BLOTT; PYE, 2008). O resultado varia de 0 a 1, quanto menor o valor mais irregular é a forma da partícula. Uma forma irregular causa o aumento do perímetro. Quanto maior a esfericidade, mais a forma se aproxima de um círculo, com superfície totalmente lisa.

Os ensaios de distribuição e forma das partículas foram também realizados para os agregados graúdos reciclados tratados pela técnica de gotejamento, pois a mistura mecânica do material seco implicou em atrito e quebras das partículas (ANEXO B). Constatou-se que as outras técnicas de tratamento não danificavam

as partículas e, por isso, não deveriam implicar em mudança na distribuição e forma das partículas, sendo considerada dispensável essa análise.

4.3.2 Porosidade

A porosidade foi determinada pela técnica de intrusão de mercúrio (WEBB, 2001b). A técnica foi usada para obter informação sobre a distribuição de tamanhos de poros, e a porosidade total.

O objetivo foi verificar a influência do tamanho de poros na eficiência do tratamento. Após o tratamento, a redução de porosidade foi avaliada apenas pelo ensaio de absorção de água no tempo, que informa as alterações ocorridas na porosidade total do material.

Para a maioria dos materiais o ângulo de contato entre o mercúrio e o sólido, θ, é maior que 90º (o mercúrio não molha o sólido), é necessário aplicar uma pressão, P, para molhar a superfície do material e forçar o mercúrio a entrar nos poros. Em condições de equilíbrio, conhecendo-se a tensão superficial do mercúrio γ, a pressão P é inversamente proporcional ao raio do poro (r_p).

$$\mathbf{r_p = -\frac{2\gamma\cos\theta}{P}} \qquad (6)$$

Para cada valor de pressão, é registrado o volume de mercúrio intrudido, resultando em uma curva de onde será obtida informação sobre o tamanho e distribuição dos poros.

A determinação da distribuição do diâmetro de poros dos agregados foi realizada em porosímetro da marca Micromeritics, modelo Autopore III 9420, capaz de aplicar uma pressão máxima de intrusão de mercúrio de 414 MPa e detectar um diâmetro mínimo de 3 nm. Como condição de ensaio foi utilizada tensão superficial de mercúrio de 0,485 N/m, densidade de 13,5335 g/cm^3 e ângulo de contato mercúrio/sólido de 130º.

A massa da amostra foi pesada antes de iniciar o ensaio. A massa do conjunto foi obtida após o estágio de baixa pressão, no qual ocorre o preenchimento do penetrômetro com mercúrio. O penetrômetro preenchido com amostra e mercúrio foi então pesado e a massa do conjunto inserida nos dados do programa; iniciou-se então o estágio de alta pressão.

A dificuldade, no caso de materiais finos ou em pó, é na determinação da pressão de enchimento correta; essa pressão deve ser tal que o mercúrio preencha todo espaço entre as partículas, mas, devido ao efeito de entupimento, pode penetrar acidentalmente nos seus poros (VAN BRAKEL; MODRÝ; SVATÁ, 1981).

4.3.3 Ângulo de contato aparente

Foi determinado através do goniômetro (*Krüss – DSA 100*), utilizando-se água deionizada com tensão superficial de 0,0072 N/m, e depositando-se na superfície do material uma gota monitorada por câmera (Figura 4-12), com leituras a cada 30 s, por um período de 10 minutos ou até ocorrer a adsorção e absorção total da gota nos poros, a uma temperatura de 22ºC.

Figura 4-12 - Goniômetro (*Krüss – DSA)* utilizado para medida do ângulo de contato :à esquerda , o equipamento, à direita, detalhe da gota de água sendo depositada na superfície do agregado.

Para o ensaio foram escolhidas aleatoriamente 3 partículas graúdas de cada tipo de tratamento e para cada partícula foram monitoradas três leituras de gotas com volume 6µl.

O ensaio também foi realizado para medir o ângulo de contato na superfície de uma placa de parafina sólida denominada Placa_Pa para comparar às superfícies dos agregados tratados com esta mesma parafina.

Não foi possível medir o ângulo de contato nos agregados ARCI e ARCV antes do tratamento devido à absorção instantânea da gota de água.

4.3.4 Absorção de água

Foram realizados, em triplicata, por dois métodos distintos de absorção de água:

- NBR NM53 (ABNT:2009): ensaio normalizado, comumente empregado para agregados naturais.
- Absorção de água ao longo do tempo: ensaio utilizado normalmente para se determinar a cinética de absorção de água dos agregados reciclados.

Para observar a cinética de absorção ao longo do tempo, baseado nos trabalhos de Leite (2001) e Djerbi Tegguer (2012), o ensaio de absorção de água no tempo foi realizado da seguinte forma:

1. A amostra foi secada durante 24 horas em estufa a 110ºC, resfriada durante 2 horas, até atingir o equilíbrio com a temperatura ambiente e a massa seca foi determinada.
2. Foi ligada a balança que está conectada a um computador e um programa de aquisição de dados (WinWedge), que transfere automaticamente os valores de massa em um arquivo Excel.
3. Foi acoplada na balança, bandeja com fundo em malha de abertura menor que o material ensaiado Figura 4-13. A bandeja foi submersa e tarada antes de começar o ensaio.
4. A amostra foi colocada na bandeja, distribuindo de maneira uniforme, formando uma camada de mínima espessura que reduza o aprisionamento de bolhas de ar durante o ensaio.
5. Os resultados de massa submersa foram obtidos a cada 20 segundos no arquivo Excel, de acordo com configuração estabelecida pelo usuário do programa.

6. Foi construído o gráfico de absorção de água acumulada através da Equação 7. Massa sub (2º) é a primeira medida de massa submersa, obtida no menor tempo possível (20 segundos).

$$ABS(t) = \frac{Massasub(t) - Massasub(20)}{Massa\sec a} x100 \qquad (7)$$

7. Quando a absorção de água acumulada é menor que o resultado obtido pelo ensaio normalizado da NBR NM53, o gráfico deve ser reconstruído corrigindo o valor utilizado como massa inicial (instante zero).

8. A massa inicial foi calculada através da Equação 8:

$$Mi = Mf - (\frac{AbsNBR}{100})xM\sec a \qquad (8)$$

Onde *Mi* é a massa inicial, *Mf* a massa final, *AbsNBR* é a absorção de água pela NBR NM 53 e *Mseca* é a massa seca.

9. Foi determinada a massa submersa no instante zero, subtraindo-se o primeiro valor de massa submersa determinada pela balança do incremento de massa no instante zero.

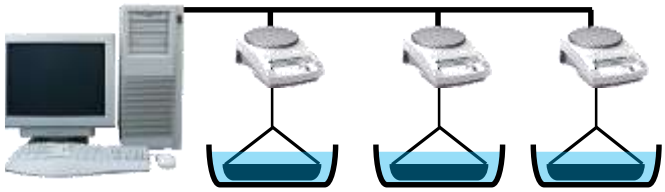


Figura 4-13 - Representação esquemática do equipamento para as medidas de massa submersa ao longo do tempo.

Os ensaios de absorção foram realizados, primeiramente para os materiais sem tratamento e, em seguida, com os materiais tratados pelas três técnicas. Após a escolha da melhor técnica os ensaios foram realizados em materiais tratados com silano IE6694 em diferentes concentrações (5,10 e 20 %) e comparados ao IE 6683 (concentração 10%). Posteriormente foi ensaiado o material tratado com parafina.

Os ensaios de absorção foram realizados somente com a fração graúda porque o método é difícil de controlar; qualquer vibração da água interfere nos resultados, causando ruídos nos dados obtidos. A porosidade do agregado

reciclado também influencia, pois quando as bolhas de ar aprisionadas saem do material durante o ensaio, as mesmas interferem no valor da massa registrada, que é a única medida obtida pelo ensaio. Logo, foi admitido que o comportamento utilizando o valor do agregado graúdo fosse similar ao miúdo.

A quantidade de material ensaiado encontra-se na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Quantidade de cada material para os ensaios de absorção.

Tratamento	Material	Técnica	Massa (g)
--	ARCI	-	1608,12
	ARCV		1501,91
IE6683	ARCI	got	1434,12
	ARCI	asp	1457,74
	ARCI	ime	1514,26
	ARCV	got	1514,4
	ARCV	asp	1161,93
	ARCV	ime	871,06
IE6694	ARCI	5%	1465,88
	ARCI	10%	1216,3
	ARCI	20%	1620,92
	ARCV	5%	1425,96
	ARCV	10%	1162,7
	ARCV	20%	1781,58
Parafina	ARCI	-	1245,2
	ARCV	-	1139,96

4.3.5 Microscopia digital 3D Hirox KH-7700

A superfície da amostra dos agregados foi inicialmente avaliada por meio de microscópio digital modelo 3D Hirox KH-7700 (HIROX, 2008) ilustrado na Figura 4-14. Esse microscópio óptico digital permitiu a obtenção em imagens 3D em foco, onde procurou-se analisar a pasta de cimento remanescente ao redor do agregado natural em ARCI, a presença de finos na superfície dos agregados após a britagem em ARCV e identificar os tratamentos com hidrofugantes nas superfícies dos agregados reciclados. Foi utilizada lente com magnificação de 50x: MX(G)-5040Z e resolução: 3.679µm.

Figura 4-14 - Microscópio digital modelo 3D Hirox KH-7700.

4.3.6 Análise da rugosidade superficial

A análise da rugosidade foi feita utilizando um interferômetro óptico (NPFLEX – Bruker) (BRUKER, 2015)(Figura 4-15) e lentes objetivas com magnificação de 5x; multiplicadores de 0.55; sistema anti-vibração.

Figura 4-15 - Interferômetro óptico utilizado para caracterização da topografia das amostras. À direita detalhe da lente utilizada para os ensaios.

Nessa técnica um feixe de luz proveniente de uma única fonte é divido em dois: um se comporta como referência e é direcionado ao detector; o outro, direcionado à amostra em ensaio, que o reflete em direção ao detector(BRUNDLE; EVANS; WILSON, 1992). Os dois feixes de luz possuem diferentes caminhos ópticos. (A espessura e o índice de refração de cada material analisado interferem neste caminho óptico). Se a diferença de trajeto

óptico entre os dois feixes de luz estiver dentro do comprimento de coerência da fonte, *franjas* de interferência serão geradas. Através da análise do sinal de interferência são obtidos dados quantitativos da superfície da amostra (Figura 4-16).

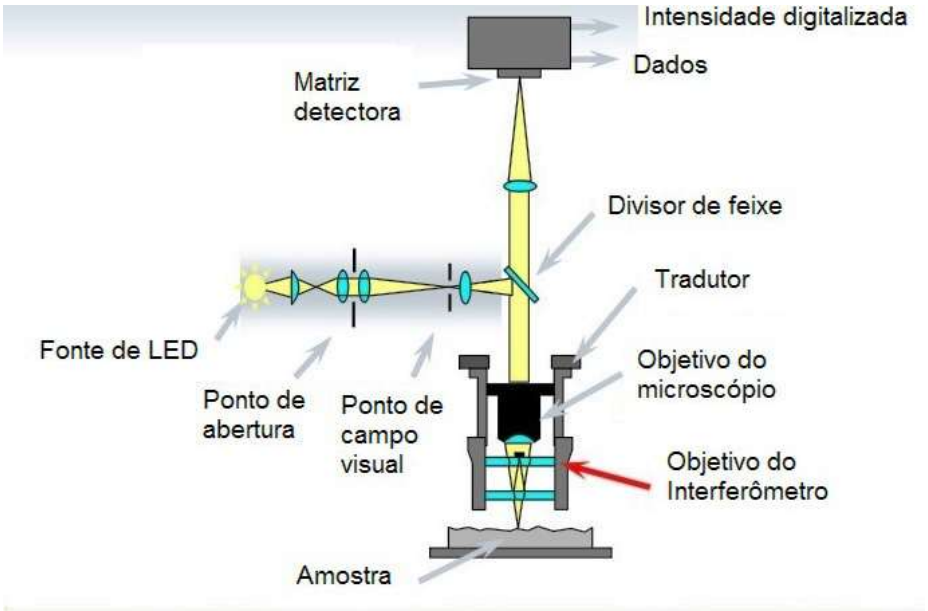


Figura 4-16 - Representação esquemática dos princípios de funcionamento do microscópio óptico (NPFlex Bruker).
Fonte:SCHMIT (2013) Adaptado.

O ensaio foi feito com medidas de ângulos e distâncias através da interferência de ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte sobre a amostra. A altura de coordenada (cada pixel) da superfície é medida através do comprimento de onda da luz emitida e recebida.

O equipamento é complementado com o software Vision64, no qual uma série de algoritmos matemáticos são executados em cada leitura para estimar os diferentes índices de rugosidade. O Plano de referência é medido automaticamente enquanto a rugosidade é dada de acordo com cada amostra.
A interação de ondas luminosas com a superfície ocorre quando um feixe de luz se divide em duas séries de ondas que são refletidas resultando em *franjas* brilhantes no visor do software.

Para encontrar as *franjas* em uma amostra é necessário ajustar o eixo Z para colocar a superfície da mesma em foco. Primeiramente, deve-se mover o

cabeçote para baixo com as fontes ligeiramente abaixo da sua distância de trabalho (6,5mm para o tipo de interferômetro e lentes usados neste estudo). Em seguida, aumentar o eixo Z para encontrar o foco, garantindo assim, que a fonte não colida com a amostra.

Para medir superfícies rugosas foi utilizada a fase de operação VSI (interferometria de escaneamento vertical). Com o intuito de padronizar o ensaio para parâmetros de comparação, em todos os ensaios foi adotado um intervalo de varredura com valores de ‘’Backscan” e “Length” de 1500x1500µm. “Backscan” é a distância que o sistema se move para trás antes de iniciar uma varredura. Por isso, deve ser um valor acima do pico mais alto na superfície da amostra ensaiada. “Length” é o comprimento vertical que o sistema irá verificar durante a medição, portanto deve ser cerca de 20% maior que a altura máxima entre um pico e um vale da amostra. Devido à natureza do material poroso a ser ensaiado (cimentício e cerâmico) foi utilizada a luz verde.

Foram ensaiadas arbitrariamente 5x5 mm² da superfície de 10 partículas de agregado graúdo para cada tipo de material como ilustra Figura 4-17. Objetivando maior detalhamento da análise dos dados, cada área escaneada foi segmentada em 4 áreas menores iguais de 2,5x2,5mm² com valores de rugosidade superficial diferentes, totalizando 40 medidas para cada material. A configuração do equipamento ofereceu uma resolução óptica de ~2 µm.

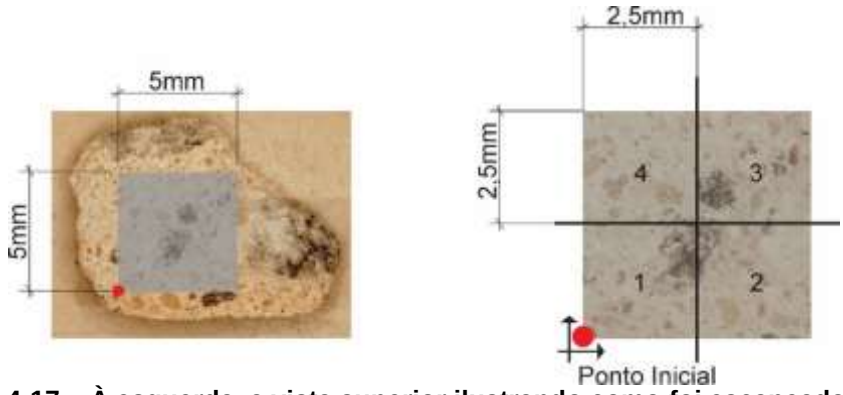


Figura 4-17 – À esquerda, a vista superior ilustrando como foi escaneada a área superficial de 5x5mm² em cada partícula de 5mm² pelo interferômetro óptico (NPFlex-Bruker), partindo sempre do mesmo ponto inicial (marcador vermelho). À direita, a área varrida dívida em 4 áreas iguais de 2,5x2,5mm².

Para manter as amostras imóveis durante o ensaio, antes de cada ensaio a partícula foi apoiada sobre um cubo de 1 cm³ de massa de modelar (disponível em mercado) padronizado sobreposto à base do equipamento.

Os ensaios foram realizados somente com a fração graúda dos materiais, devido à dificuldade de fazer a varredura em áreas menores que as estabelecidas pela forma dos grãos.

Além dos agregados reciclados, um teste adicional foi realizado para um agregado natural (AN), utilizado como amostra de referência. Devido às superfícies distintas dos materiais, houve dificuldade para focar o eixo Z e encontrar as *franjas.* O tratamento com parafina também dificultou o ensaio devido à superfície lisa refletora. Cada ensaio durou em média 2h.

As imagens geradas apresentam pequenas áreas de pixels não analisados (pontos negros). Para tratamento das imagens com o software Vision64 foi utilizado o filtro “Data Restore’, que preenche as falhas usando dados de interpolações com a altura dos pontos vizinhos (Figura 4-18). Após filtrar as imagens, foram obtidos os parâmetros calculados pelo software e gerada sua imagem em 3D. A sequência do ensaio pode ser acompanhada na Figura 4-19.

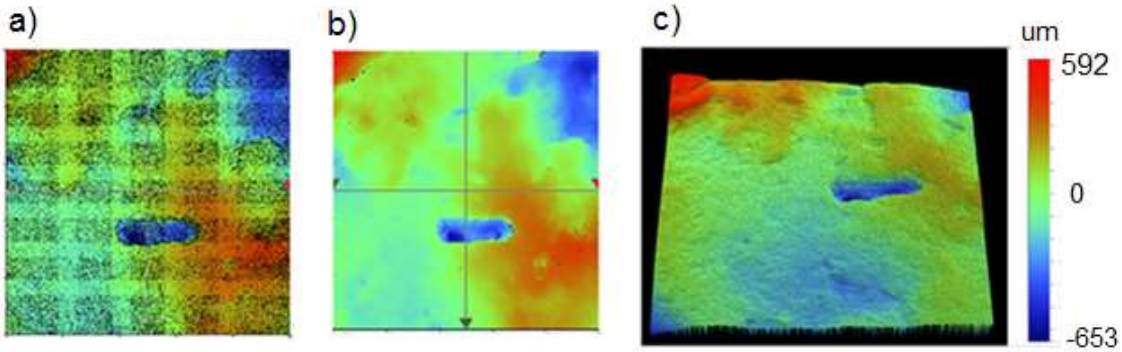


Figura 4-18 – Ilustração do tratamento da imagem com o filtro Data Restore na superfície de 5mm² de uma partícula de ARCV: a) imagem original, b) imagem tratada gerando 4 medidas em áreas de 2,5x2,5mm² e c) superfície em 3D gerada pelo software Vision 64. As áreas vermelhas representam alturas acima do plano médio de referência, enquanto as azuis abaixo de acordo com a régua na lateral direita.

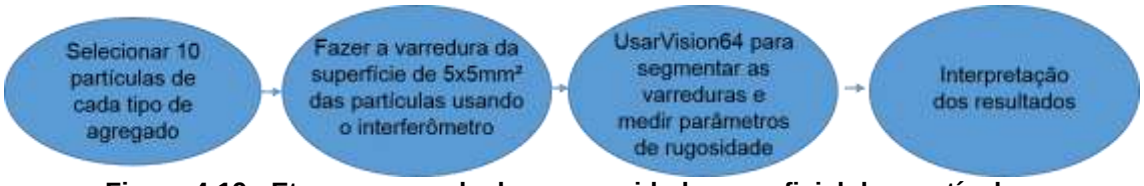


Figura 4-19 - Etapas para calcular a rugosidade superficial das partículas.

Dentre os parâmetros calculados pelo software foram adotados o parâmetro 3D de amplitude Raiz Quadrada da Rugosidade Média (Sq) que apresenta alterações de altura mais perceptíveis e o Índice de Superfície que são os mais úteis para o estudo (ALSHIBLI; ALSALEH, 2004; ISO 4287, 1997; ZECCHINO, 2010):

- Raiz quadrada da rugosidade média (Sq) representa a raiz quadrada do parâmetro da Rugosidade média (Sa), qual é o volume exibido tridimensionalmente, para os picos e vales identificados, dividido pela área de projeção da superfície (medida linear). Sua equação pode ser observada na Figura 4-20.

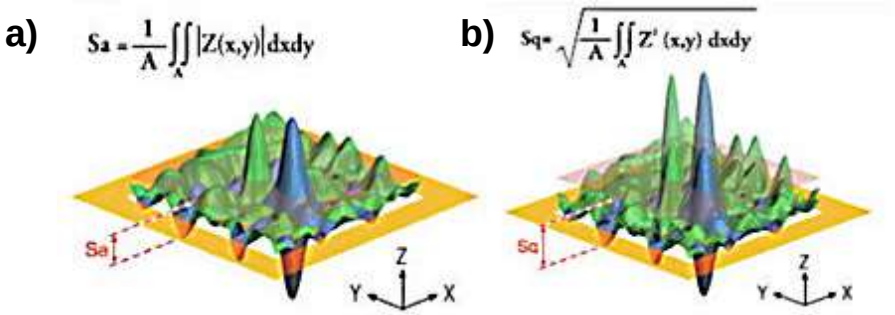


Figura 4-20 - Diagramas de exibição tridimensional dos parâmetros 3D de amplitude média em direção à altura: (a) rugosidade média (Sa) e raiz quadrada da rugosidade média (Sq).
Fonte: OLYMPUS (2015).

Os picos de superfície são a área acima do nível médio da superfície (eixo X- eixo Y). Os vales são a área abaixo do nível médio da superfície (eixo X- eixo Y) (Figura 4-21).

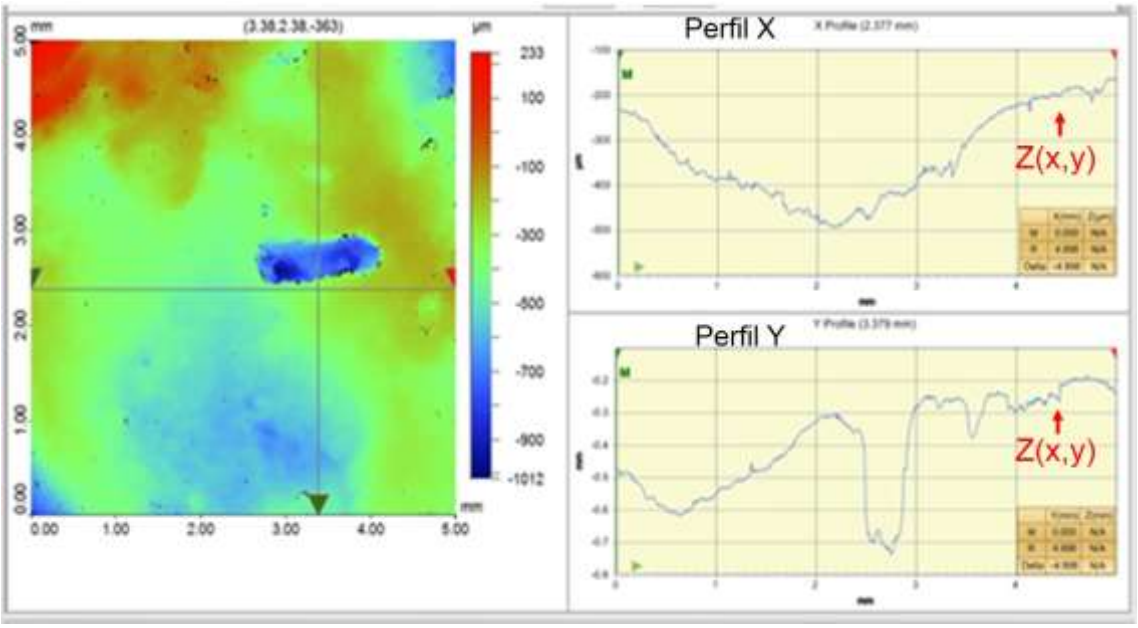


Figura 4-21 – Imagem ilustrativa após o escaneamento da superfície de uma partícula de ARCV utilizando o software Vision64. É possível observar a altura Z(x,y) em relação a um perfil X e um perfil Y do plano a altura da superfície em relação ao plano.

- Índice de superfície: é a razão adimensional entre a área real medida da superfície e área de projeção da superfície da Região de Interesse (RDI). Seu valor é ≥ 1 (1 representa uma superfície lisa). Neste caso, os valores de picos e vales não são considerados em módulo. A área de projeção corresponde à área dentro RDI dos 2,5 x 2,5mm² que foi detectada pelas ondas; a área real corresponde à área de superfície rugosa dessa mesma RDI. Os pontos não captados pela interferometria não entram em nenhum dos dois valores.

4.4 Resultados e discussão

4.4.1 Distribuição de tamanho e forma

As curvas da distribuição granulométrica do ARCI e ARCV estão apresentadas na Figura 4-22. Como o material cerâmico é mais friável que o cimentício, a granulometria do ARCV é mais fina que a do ARCI (no intervalo de 10 a 0,5 mm).

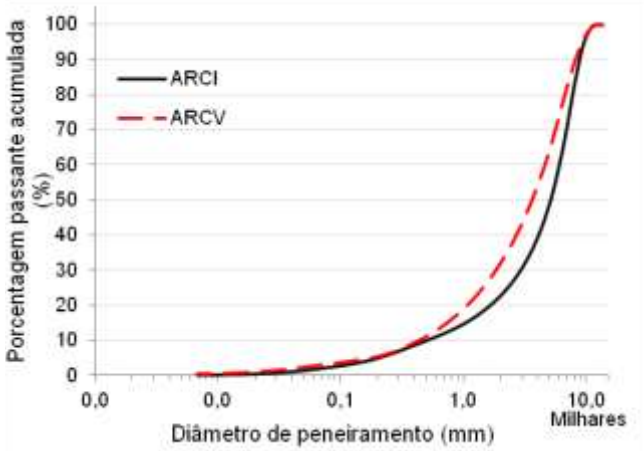


Figura 4-22 - Curvas granulométricas dos ARCI e ARCV.

O ARCV exibe relação de aspecto (b/l) menor que o ARCI, apresentando um formato mais alongado. ARCI possui relação de aspecto mais próxima a 1, como pode ser observado nas curvas acumuladas dos dois materiais sobrepostas na Figura 4-23, devido ao formato de ARCI ser mais arredondado que ARCV ou forma quadrada.

As curvas discretas de ambos os materiais apresentam valores de frequência de partículas com suas maiores porcentagens próximas a 0,7.

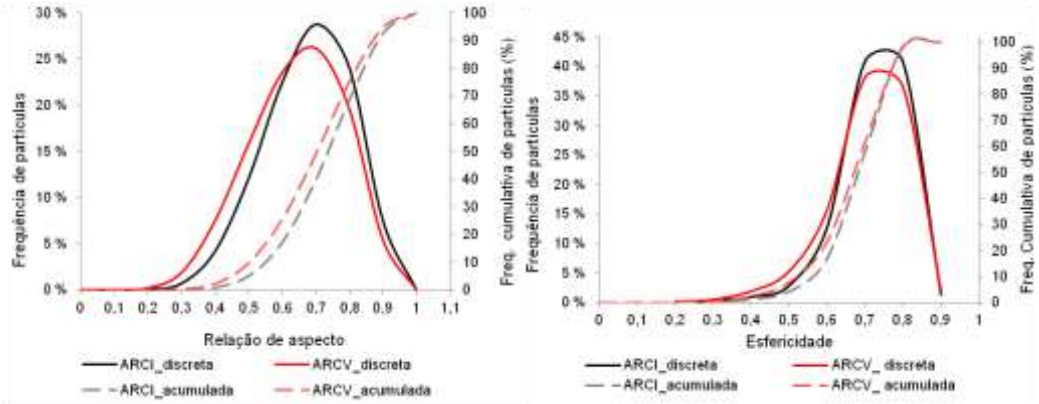


Figura 4-23 - Relação de aspecto e Esfericidade de ARCI e ARCV.

Da mesma forma, o ARCV apresenta menor esfericidade que o ARCI, de acordo com as curvas acumuladas sobrepostas no gráfico de esfericidade da Figura 4-23, por possuir um formato mais anguloso. Assim como na relação de aspecto, seus valores de frequência de partículas para a esfericidade têm suas maiores porcentagens próximos a 0.7. Apesar da maior aproximação de ARCI a 1, é nítida a semelhança das curvas.

Dos agregados reciclados tratados, foi necessário repetir os ensaios de distribuição granulométrica e análise morfológica após o tratamento com silano por gotejamento, pois houve atrito das partículas durante o ensaio, modificando sua morfologia e distribuição granulométrica (ANEXO B)

4.4.2 Porosidade

A Tabela 4-5 apresenta os resultados de porosidade por intrusão de mercúrio dos agregados reciclados.

Tabela 4-5 - Resultados de porosidade Hg para os agregados natural e reciclados.

Agregado	Porosidade (% ml/ml)	Área total de poros (m^2/g)
AN	1,36	0,07
ARCI	9,54	3,58
ARCI-Si	6,65	2,28
ARCI-Pa	2,99	5,02
ARCV	32,12	15,77
ARCV-Si	30,98	14,93
ARCV-Pa	8,84	6,94

A porosidade do ARCI foi significativamente inferior à do ARCV, correspondendo aproximadamente um terço deste valor. Coerentemente, o mesmo ocorre com a área de poros que é 5 vezes maior.

A variação de tamanho dos poros dos agregados reciclados e o AN é similar (5-10.000nm) (Figura 4-24a). O tratamento com silano reduziu a porosidade significativamente, pois o tratamento formou uma camada película no interior dos poros, em ARCI bloqueando o acesso em poros menores que o tamanho da molécula do silano (10 nm) (Figura 4-24b). Para ARCV_Si não foi observada mudança na distribuição de poros (figura c).

O tratamento com parafina reduziu ~70% da porosidade em ARCI_Pa e ARCV_Pa (Tabela 4-5). Este tratamento preencheu os poros maiores que 100nm em ARCI_Pa (Figura 4-27b) e maior parte deles em ARCV_Pa (Figura 4-27c). Foi observado que a quantidade de poros pequenos (<30nm) aumentou

após este último tratamento, o que pode ter ocorrido por influência da porosidade da parafina.

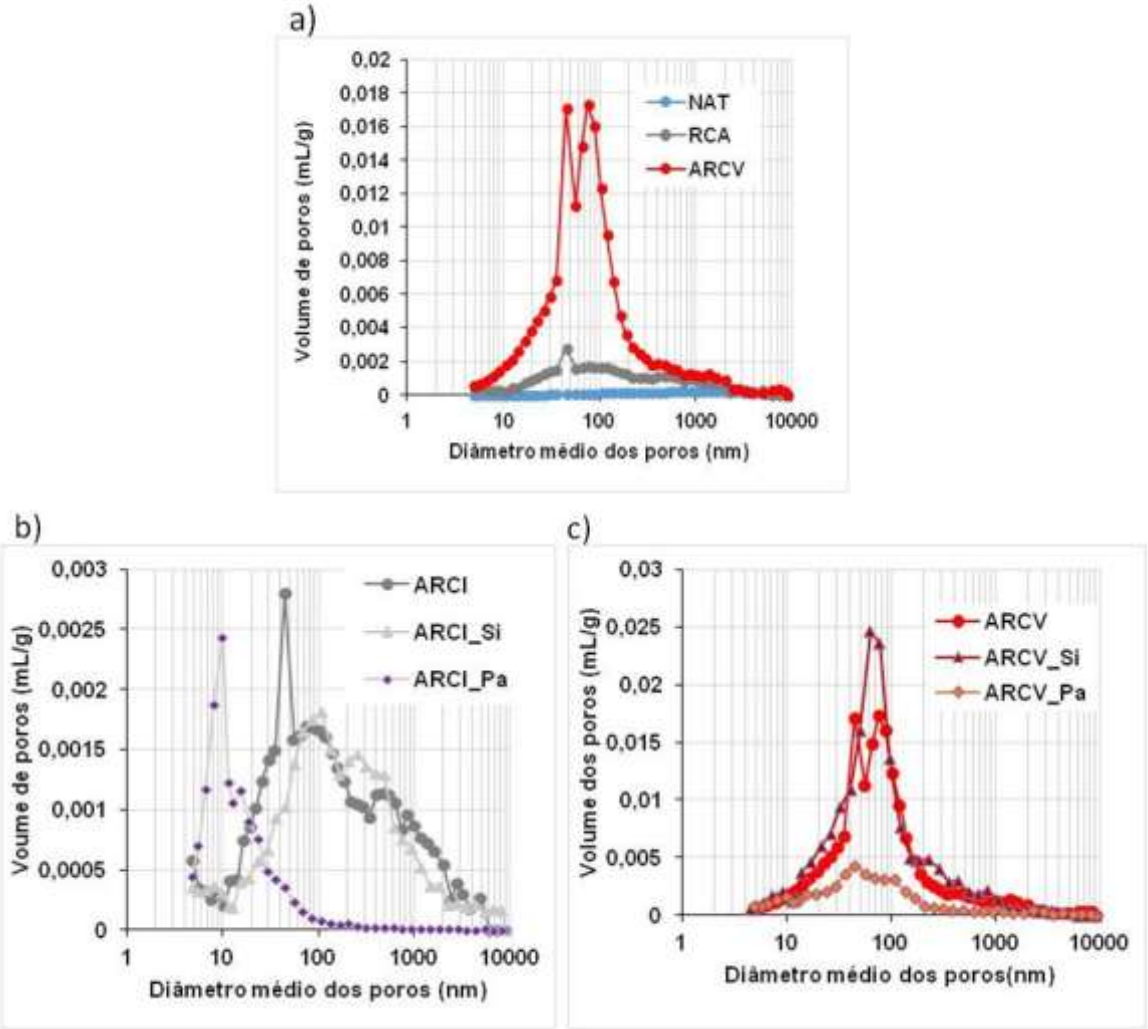


Figura 4-24 - Distribuiução de tamanho de poros para AN e agregados reciclados sem tratar (a), ARCIs(b) e ARCVs(c).

4.4.3 Ângulo de contato aparente

A Figura 4-25 apresenta os valores do ângulo de contato no tempo para ARCI e ARCV tratados pelas três técnicas com emulsão de silano (aspersão, gotejamento e imersão).

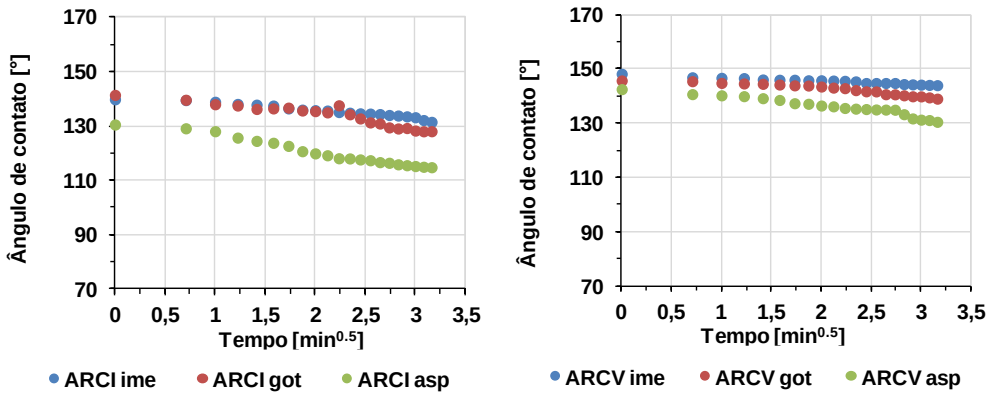


Figura 4-25 - Ângulo de contato dos agregados (a) ARCI e (b)ARCV tratados com as diferentes técnicas.

Devido à elevada velocidade de absorção de água, não foi possível executar a medida dos materiais não tratados. Os ângulos de contato foram inferiores a 90° caracterizando as superfícies como hidrofílicas. Nos agregados tratados, como esperado, a aplicação do hidrofugante altera a energia de superfície do material impedindo a absorção de água capilar, tornando a superfície hidrofóbica. A variação ao longo do tempo ocorre porque a gota tende a se acomodar ou reduzir de volume na superfície devido às características superficiais (rugosidade, além da evaporação).

Existe uma correlação entre a rugosidade e o ângulo de contato, explicada pelo modelo de Wenzel (QUÉRÉ, 2008). Devido a rugosidade superficial, o ângulo de contato θ terá pequeno deslocamento aparente da linha de contato da interface líquido/sólido. Para melhor acomodação da gota, assumindo que o líquido segue os acidentes da superfície sólida, quanto mais rugosa for a superfície, menor será o ângulo de contato aparente, aumentando a molhabilidade. O modelo explica o fato de ARCI_Si apresentar ângulo de contato aparente menor que ARCV_Si.

Este ensaio também contribuiu para a escolha da técnica de tratamento mais eficaz com emulsão de silano. Com a técnica escolhida (ver item 4.4.4) foram testados ensaios de medida de ângulo de contato em três concentrações distintas por 10 minutos para a emulsão IE6694 e comparadas à emulsão de 10% da emulsão IE6683 (Figura 4-26).

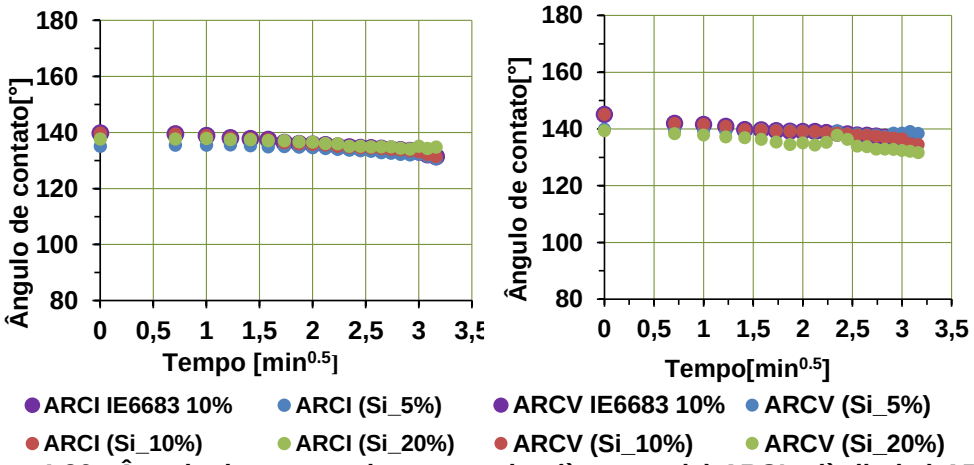


Figura 4-26 - Ângulo de contato dos agregados (à esquerda) ARCI e (à direita) ARCV tratados com emulsão de silano IE6694 nas concentrações de 5, 10 e 20%comparadas à IE6683.

Através dos gráficos é possível observar que as curvas apresentam similaridade tanto para os agregados ARCI como para os ARCV, também para os dois tipos de emulsão.

As diferenças entre os valores de ângulo de contato para cada concentração de IE6694 foram avaliadas estatisticamente por análise de variância e não apresentaram variação significativa pelo teste de Tukey. Logo, pelo ensaio de ângulo de contato aparente não foi possível determinar a melhor concentração, qual foi determinada na etapa 1.

As medidas de ângulo de contato ensaiadas nos agregados tratados com parafina comparadas à Placa _Pa podem ser observadas na Figura 4-27.

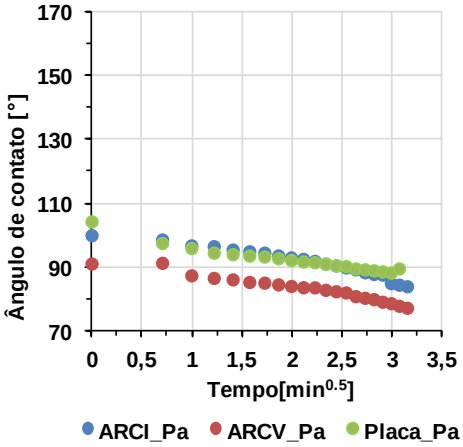


Figura 4-27- Ângulo de contato dos agregados ARCI_Pa e ARCV_Pa tratados com parafina comparadas à Placa_Pa.

Percebe-se que a o tratamento não mantém um ângulo maior que 90° por mais que 5 minutos em ARCI_Pa, e em ARCV_Pa, não resiste o primeiro minuto. As curvas dos dois materiais se assemelham à da Placa_Pa, principalmente ARCI_Pa. Há uma hipótese de que o tratamento com parafina modifica a superfície do material, levando qualquer superfície a ter as características da sua própria superfície independente do material tratado.

O ângulo de contato dos tratamentos com parafina pode ser comparado ao da concentração de silano mais eficaz na Figura 4-28.

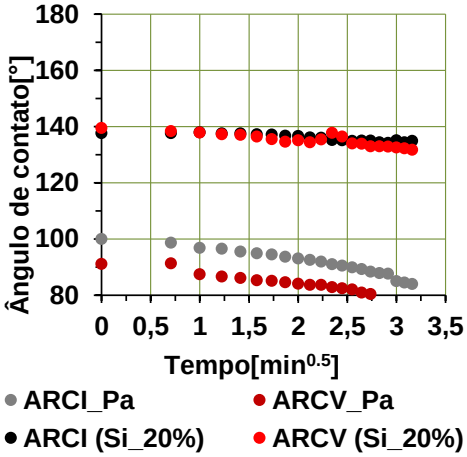


Figura 4-28 - Ângulo de contato dos agregados ARCI_Pa e ARCV_Pa comparados à aos agregados ARCI _Si 20% e ARCV_Si 20% tratados com a concentração de silano mais eficaz de IE6694

Além de apresentar um ângulo instável, os tratamentos com parafina apresentam ângulos 40% menores que os tratamentos com silano. Por apresentar maior molhabilidade, infere-se que a aderência do agregado tratado com parafina à pasta cimentícia pode ser maior. Isso será confirmado nos ensaios da etapa 2.

4.4.4 Absorção de água

Os valores de absorção da NBR NM 53 medidos para cada técnica de tratamento (aspersão, gotejamento e imersão) podem ser comparados com a absorção dos materiais sem tratar na Tabela 4-6. É possível perceber que a grande diferença

de porosidade dos materiais afeta coerentemente as medidas de absorção de água.

Tabela 4-6 - Absorção de água para as amostras sem tratar e tratadas com as três técnicas diferentes de silano pela norma NM53:2009.

Tipo de agregado	Tipo de tratamento	Absorção de água (% Kg/Kg)	Desvio-padrão (% Kg/Kg)
ARCI	Sem tratamento	5,25	0,04
	Aspersão	3,32	0,61
	Gotejamento	4,11	0,45
	Imersão	3,61	0,15
ARCV	Sem tratamento	19,05	0,11
	Aspersão	17,44	0,25
	Gotejamento	17,68	0,52
	Imersão	12,97	0,18

A absorção de água pelos métodos de aspersão e imersão demonstraram melhores resultados. Apesar da técnica por aspersão ter sido um pouco menor para o ARCI, a técnica por imersão nos dois tipos de materiais apresentou menor variabilidade e, por esse motivo, escolhida como melhor forma de tratamento.

Os ensaios de absorção ao longo do tempo, com os materiais ARCI e ARCV sem tratamento, precisaram ser corrigidos através dos resultados da NBR NM 53 (à 24 horas); uma vez que, já nos primeiros instantes são perdidas leituras de ganho de massa, devido à acentuada taxa de porosidade do material. Nos materiais tratados essa correção não foi necessária, já que o tratamento reduz a cinética de absorção de água; ou seja, essa velocidade.

As curvas da absorção acumulada de ARCI e ARCV estão apresentadas na Figura 4-29; após as correções dos valores de absorção ao longo do tempo, os resultados obtidos passam a coincidir com os resultados da NBR NM 53. Trata-se apenas de um procedimento de ajuste de resultados experimentais.

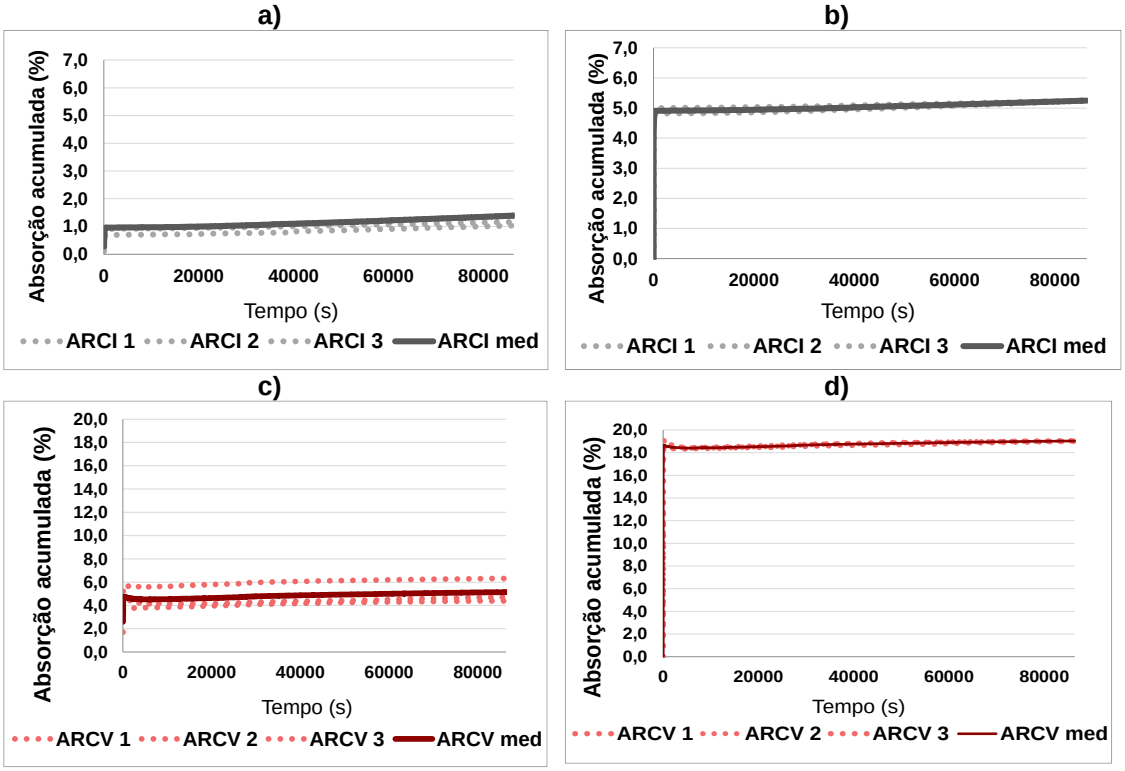


Figura 4-29 –Absorção de água acumulada ao longo do tempo para as amostras de (a)ARCI e (b) sua respectiva correção pelo valor de massa inicial; e (c)ARCV com (d) sua respectiva correção pelo valor de massa inicial. A média das três medidas de cada amostra está apresentada em linha contínua.

Os resultados dos ensaios de absorção ao longo do tempo para as amostras de ARCI e ARCV tratados através das três diferentes técnicas estão na Figura 4-30. Os gráficos mostram a variabilidade entre as medidas e a cinética de absorção. Os tratamentos por aspersão e gotejamento apresentaram os resultados mais variáveis.

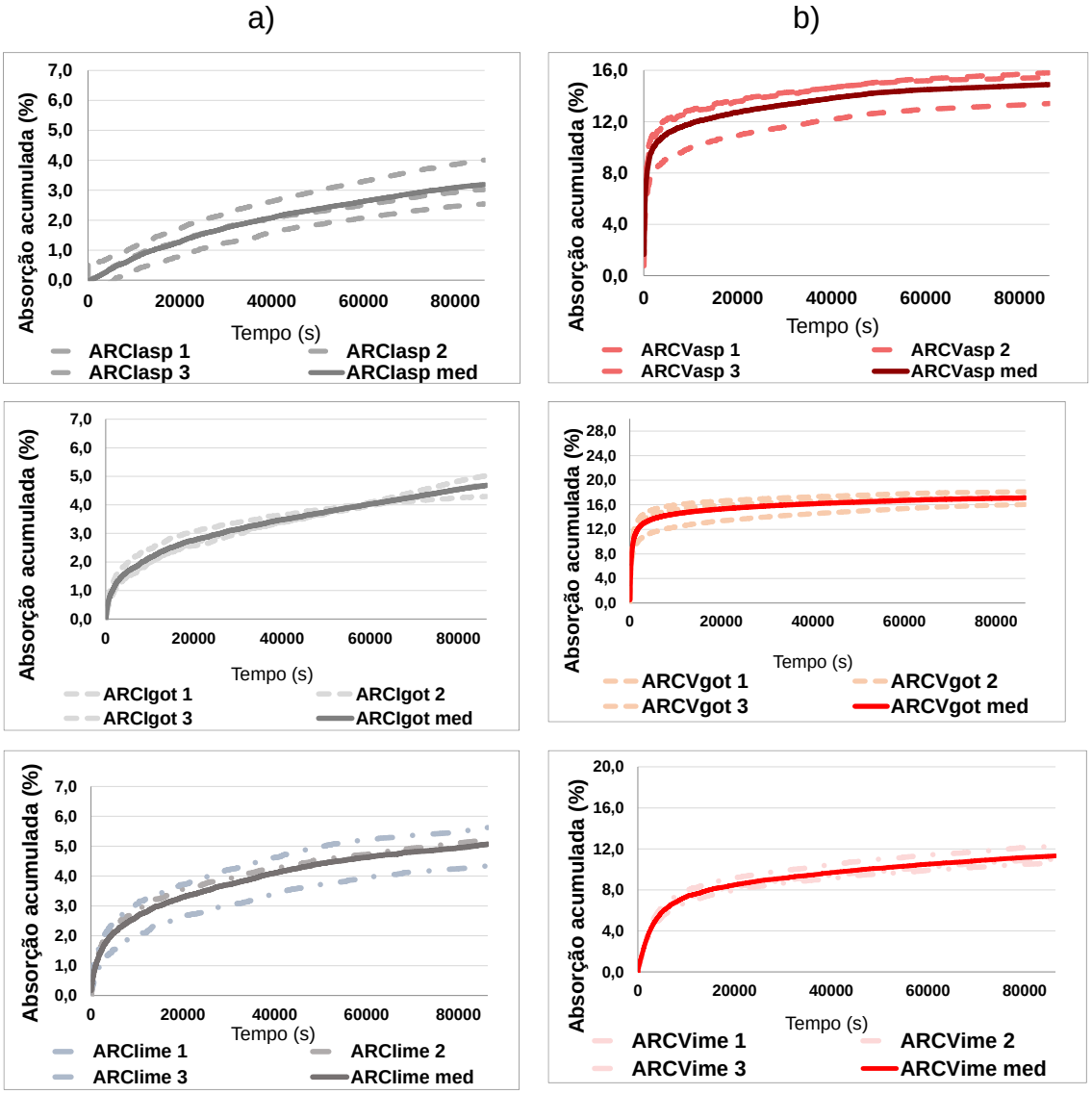


Figura 4-30- Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV ensaiados por cada uma das técnicas (aspersão, gotejamento e imersão) de tratamento com silano. A média das três medidas de cada amostra está apresentada em linha contínua.

É possível comparar as médias dos resultados das diferentes técnicas com o material sem tratar na Figura 4-31.

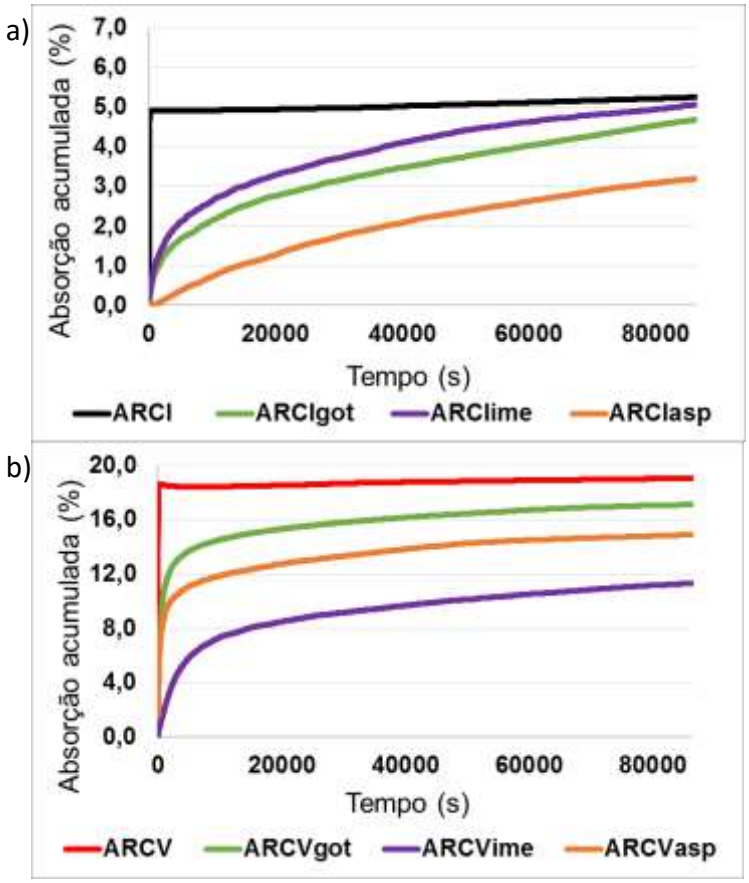


Figura 4-31 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV sem tratamento comparada à absorção das amostras ensaiados por cada uma das técnicas (aspersão, gotejamento e imersão) de tratamento com silano.

Os resultados apresentados mostram que ambos os agregados reciclados, quando tratados, apresentam absorção de água menor que a do agregado reciclado sem tratamento. Comparando os diferentes tratamentos, nota-se que, no caso do agregado reciclado cerâmico, o tratamento por imersão apresentou o melhor comportamento, diminuindo a absorção média em ~8%.

No agregado reciclado cimentício, o tratamento por aspersão obteve absorção de água média menor; porém, com maior variabilidade de resultados (algo indesejável) para o tratamento com aspersão. Para os dois tipos de agregados reciclados, os tratamentos por aspersão e gotejamento apresentaram variabilidade maior quando comparados com o tratamento por imersão. Por isso, o tratamento por imersão foi o mais indicado tanto em eficiência do tratamento quanto em confiabilidade (menor variabilidade).

Comparando os agregados tratados com o não tratado, nota-se que os

tratamentos influenciam a cinética de absorção de água. A absorção de água dos materiais não tratados é muito elevada nos primeiros 4 minutos; por outro lado, a ação do hidrofugante retarda a cinética de absorção de água.

As curvas normalizadas conforme procedimento de cálculo explicado na metodologia permite a comparação entre os diferentes tratamentos avaliando a eficácia do mesmo em função da absorção ao longo do tempo. Observa-se claramente que, em todos os casos, a hidrofugação da superfície reduz tanto a absorção de água medida conforme a norma NM 53:2009 quanto o ganho de massa durante o ensaio de massa submersa ao longo de 24 h.

Foram testados ensaios com a emulsão de silano IE6694 para entender como a absorção de massa submersa ao longo do tempo afeta as concentrações de 5%,10% e 20% de silano e podem ser observados na Figura 4-32. São apresentadas as medidas pontuais e as médias das três (em linha contínua cinza para ARCI e vermelha para ARCV).

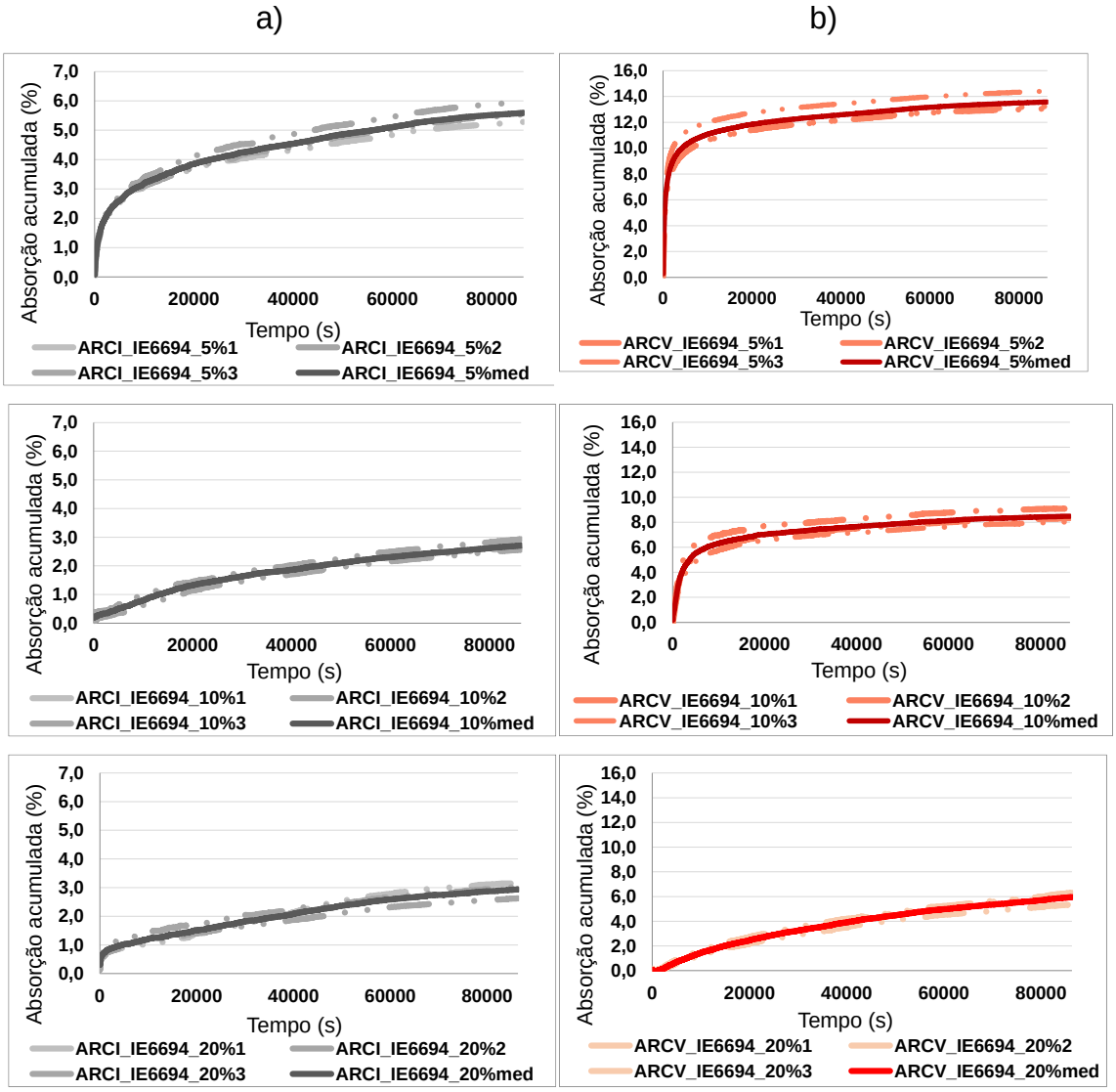


Figura 4-32 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV ensaiados para cada concentração de silano IE6694(5,10 e 20%). A média das três medidas de cada amostra está apresentada em linha contínua.

É possível comparar as médias dos resultados das diferentes concentrações de IE6694, à concentração de 10% de IE6683 e com o material sem tratar na Figura 4-33.

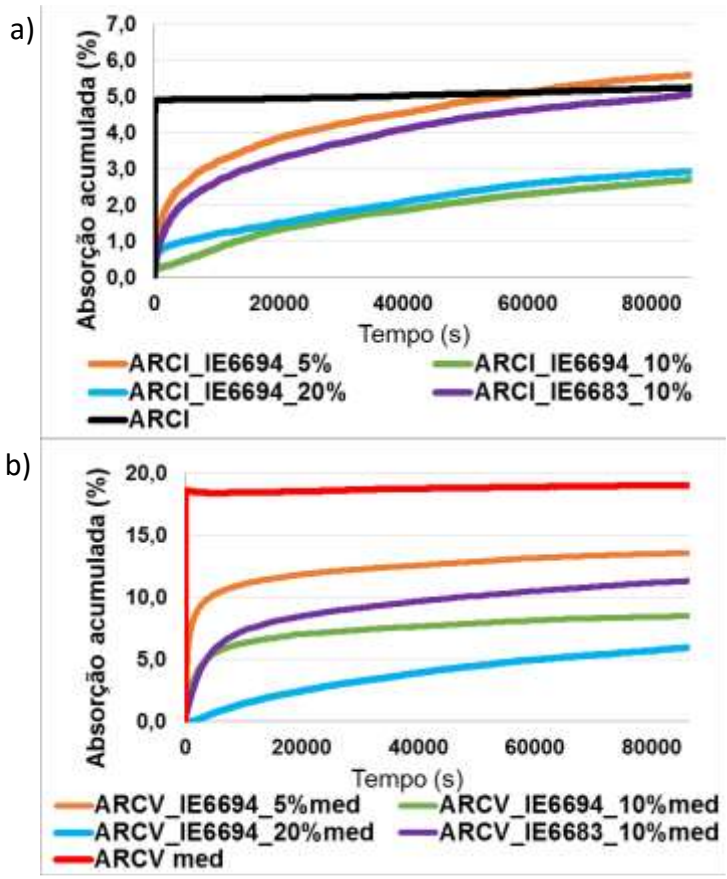


Figura 4-33- Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV sem tratamento comparada à absorção das amostras ensaiadas para cada concentração de silano IE6694(5,10 e 20%) e à concentração de silano IE6683(10%).

As diferenças entre os valores de absorção acumulada para cada concentração foram avaliadas estatisticamente por análise de variância e não apresentaram variação significativa pelo teste de Tukey. Os resultados de concentração de ARCI_IE6694_10% e ARCI_IE6694_20% atingiram curvas aproximadas e melhores resultados de absorção. Com ARCV_IE6694_20% apresentou melhor resultado de absorção nos materiais cerâmicos, essa concentração favoreceu os dois tipos de materiais. Logo, foi escolhida para os ensaios da etapa 2.

Para os agregados tratados com parafina e melhor condição do silano, a absorção de água de acordo com o método da NM53:2009 está apresentada na Tabela 4-7. Os resultados mostram que o tratamento com parafina apresenta absorção de água menor que o tratamento com emulsão de silano.

Tabela 4-7 - Absorção de água para as amostras de ARCI e ARCV tratadas com silano e parafina pela norma NM53:2009.

Tipo de agregado	Tipo de tratamento	Absorção de água (% Kg/Kg)	Desvio-padrão (% Kg/Kg)
ARCI	ARCI_Si	2,86	0,53
	ARCI_Pa	0,88	0,17
ARCV	ARCV_Si	6,74	0,80
	ARCV_Pa	4,06	0,09

As curvas de absorção acumulada ao longo do tempo dos materiais tratados com parafina podem ser observadas na Figura 4-34 junto às da concentração de silano selecionada.

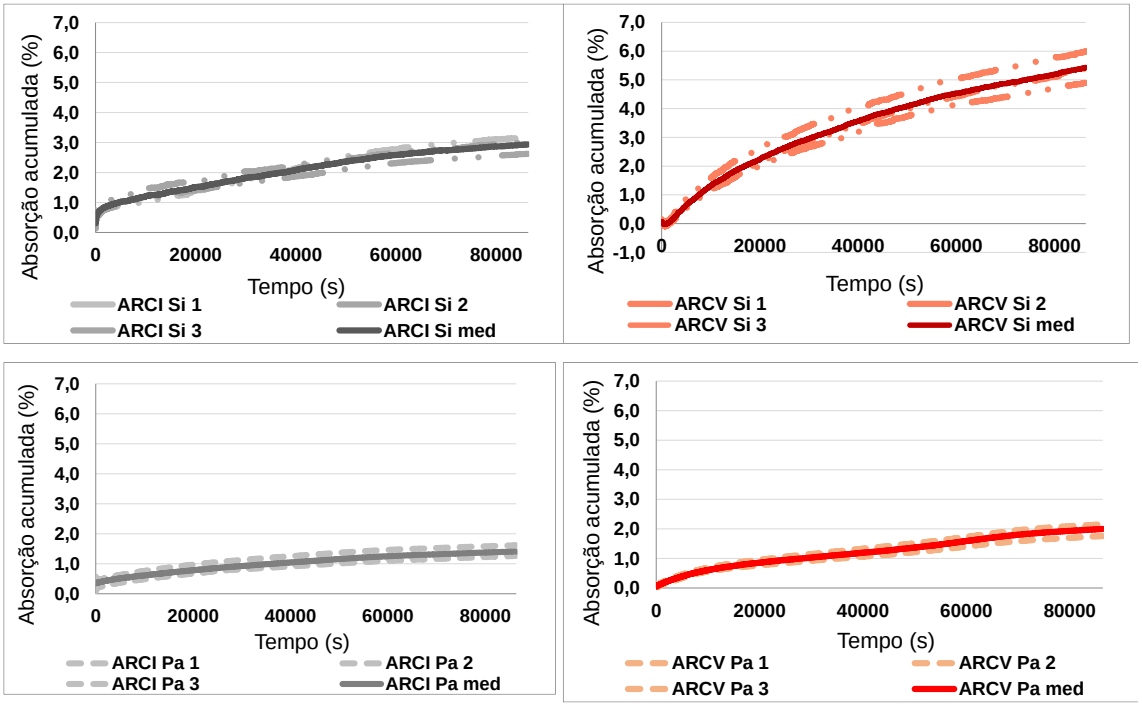


Figura 4-34 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV tratadas com silano e parafina.

O tratamento com parafina apresentou pouca variabilidade, se comparado ao tratamento com silano, além de menores valores de absorção de água (Figura 4-35).

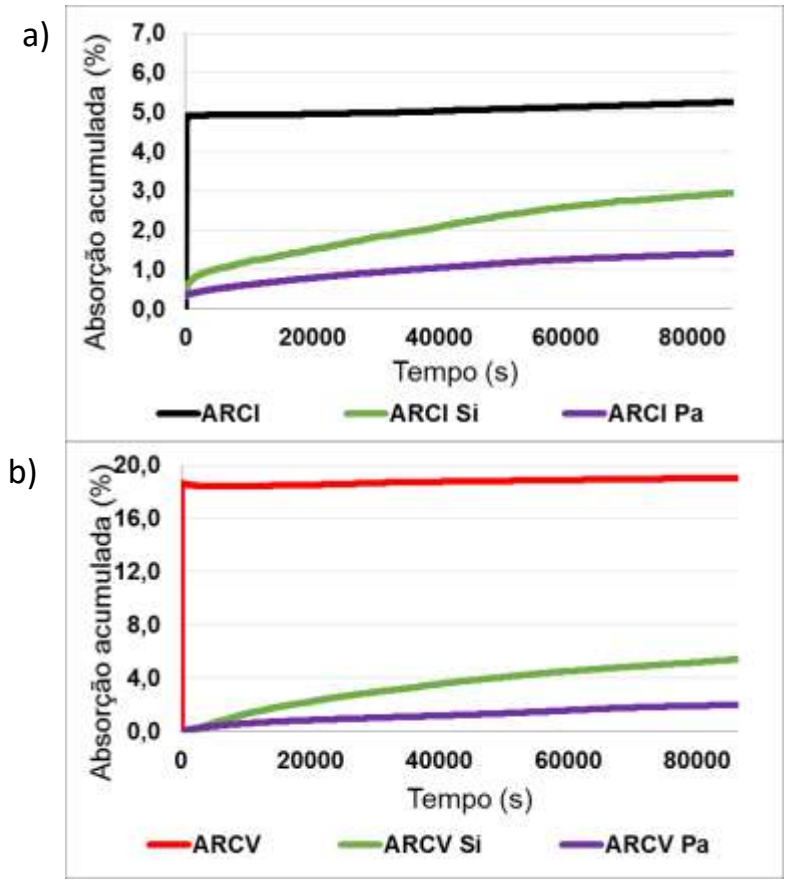


Figura 4-35 - Absorção de água acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV sem tratamento comparadas à absorção dos seus respectivos tratamentos com silano e parafina.

De acordo com os resultados acima, o ARCI_Pa também apresentou absorção de água menor que o ARCV_Pa. Os valores obtidos são ligeiramente superiores aos encontrados pelo método da massa submersa no tempo.

Comparando os diferentes tratamentos, nota-se que, no caso do agregado reciclado cerâmico, o tratamento por parafina, diminui a absorção média em ~19%. E no agregado reciclado cimentício, reduziu ~4 %.

4.4.1 Microscopia digital 3D Hirox KH-7700

Através do ensaio de microscopia óptica é possível observar nas imagens 3D da Figura 4-36 o formato mais angular dos grãos de ARCV. Também é visível que a partícula de ARCI não está totalmente coberta por pasta de cimento.

Após 24h do tratamento, foi observada uma camada esbranquiçada envolvendo a partícula ARCI_Si. Esse efeito pode estar associado à deposição do soluto da emulsão após um determinado tempo ou acoplamento sobre a pasta cimentícia, apesar da resistência à ambientes alcalinos. Para explicar o fato são necessários estudos mais aprofundados. Após o tratamento com silano, foi observada uma fina película transparente e coloração escura na superfície de ARCV_Si.

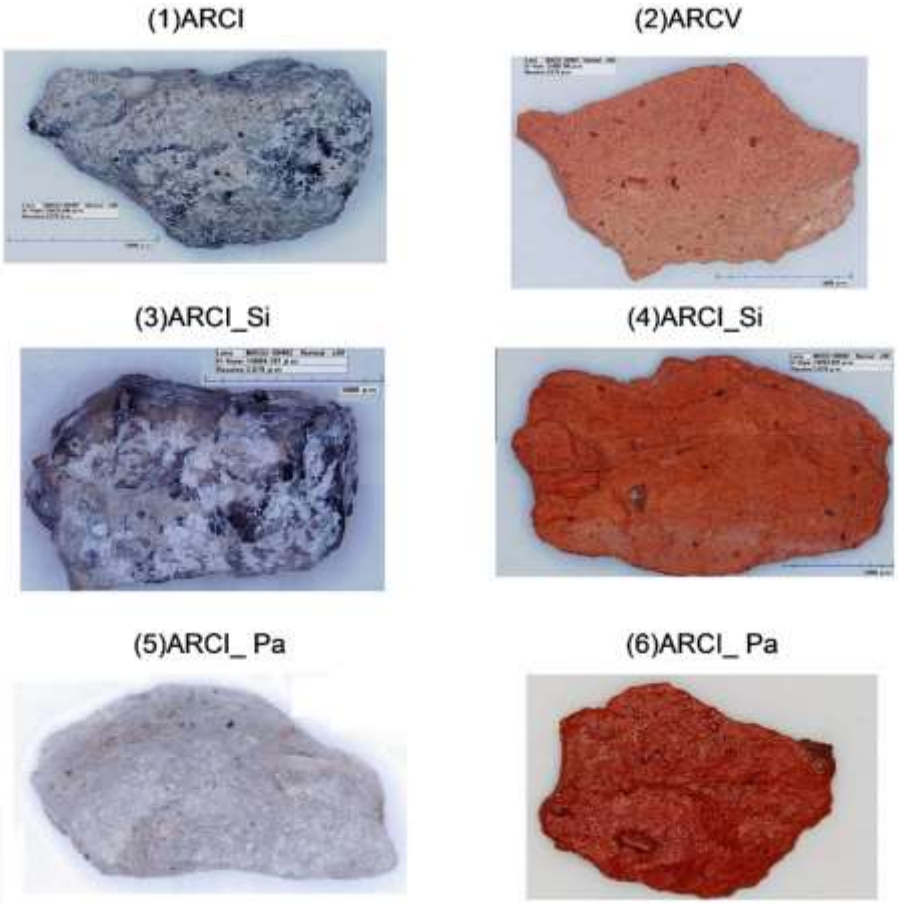


Figura 4-36 - Aspecto superficial de partículas de (1) ARCI e (2) ARCV em comparação às tratadas com emulsão de silano (3 e 4) e parafina (5 e 6) obtidas pelo microscópio digital (Hirox KH7700)- ampliação 50x, lente: MX(G)-5040Z e resolução: 3,68µm.

O tratamento com parafina, tanto em ARCI_Pa como ARCV_Pa apresenta uma camada espessa e textura parafínica envolvendo a partícula. Para medir a profundidade atingida com o tratamento por parafina, foram seccionadas partículas de cada tipo de material (Figura 4-37ab). Para uma resolução de 1000µm, em algumas áreas o tratamento atingiu 500 µm.

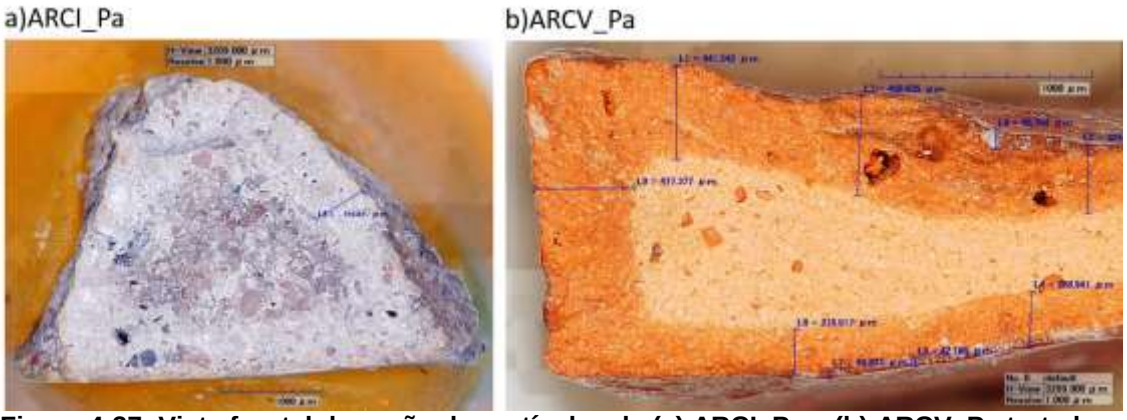


Figura 4-37- Vista frontal da seção de partículas de (a) ARCI_Pa e (b) ARCV_Pa tratadas com parafina obtidas pelo microscópio digital (Hirox KH7700)- ampliação 50x, lente: MX(G)-5040Z e resolução: 1000µm.

Para o tratamento com a emulsão de silano não foi possível medir a espessura da película devido ao limite de precisão do equipamento.

4.4.2 Análise da rugosidade superficial

Com os ensaios de interferometria óptica foi possível comparar a rugosidade dos três tipos de materiais diferentes e seus tratamentos. As medidas de Sq e Índice de Superfície (40 valores para cada tipo de agregado e tratamento) são apresentadas na Figura 4-38. Alguns resultados apresentaram valores atípicos que foram excluídos.

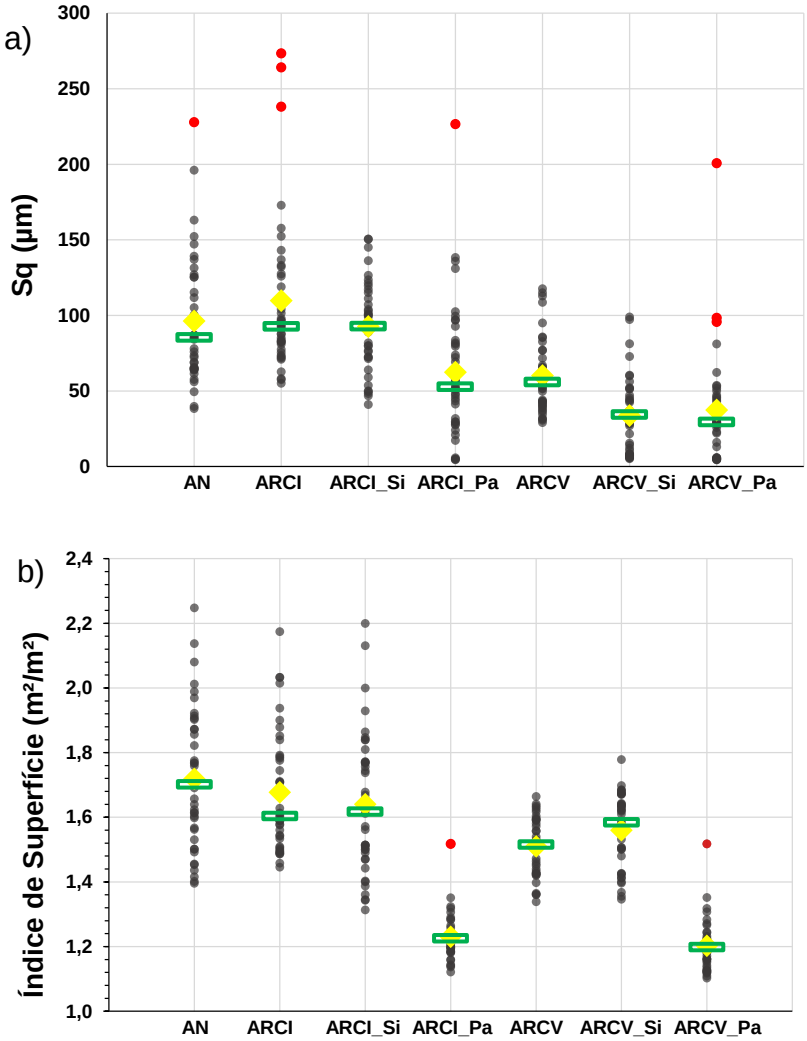


Figura 4-38 - Distribuição do parâmetro Raiz Quadrada da Rugosidade média (Sq) (a) e Índice de Superfície (b) dos agregados natural e reciclados medidos com o interferômetro óptico (NPFLEX – Bruker) 5x; losango amarelo representa a média; marcadores verdes são a mediana e marcadores vermelhos são valores atípicos ou inconsistentes[2].

Sq mostra a amplitude de variação de raiz quadrada da rugosidade média das amostras, onde AN é ligeiramente mais acidentado se comparado ao ARCI que, após o tratamento com silano tem medidas reduzidas. Os materiais cerâmicos não apresentam tanta irregularidade quanto os cimentícios e o natural. Os tratamentos com parafina permitiram reduzir os valores de Sq nos dois tipos de de agregados reciclados e apresentaram nos dois materiais menor Sq que os tratados com silano.

[2] Considerando que cada uma das 40 medidas em análise é ¼ da área escaneada de uma partícula, as medidas atípicas ocorrem em uma área mais acidentada, são picos de valores mais altos que os intervalos padrão entre as outras analisadas para AN e ARCI e tratamentos com parafina.

Analisando o Índice de Superfície, ambos ARCI e ARCV apresentam menores índices que AN. Os resultados de ARCV mostram menor variância na superfície do material cerâmico. Por ser mais plano, o mesmo apresenta menor valor de Índice de Superfície entre os materiais sem tratamento. Para o material tratado com solução de silano, não há mudança topográfica significativa na superfície, pois os ensaios de interferometria não apresentaram variações significantes. Por outro lado, o tratamento com parafina reduziu expressivamente a rugosidade da superfície. Os resultados de Sq podem ter se diferido do Índice de Superfície por serem analisados valores absolutos no primeiro.

Percebe-se que os agregados tratados com parafina apresentaram valores de índice de superfície mais próximo de 1 se comparados aos outros materiais e tratamentos, indicando que possuem superfície mais plana.

A superfície de AN (Figura 4-39 a) apresenta maiores variações entre picos e vales e também grandes diferenças de altura e inclinações na mesma partícula. Por ser formada pelo mesmo material que NA, com adesão de pasta cimentícia, ARCI (Figura 4-39 b) apresenta topografia similar. Já ARCV (Figura 4-39 c) exibe superfície aplainada, com algumas diferenças de altura devido á inclinação da partícula.

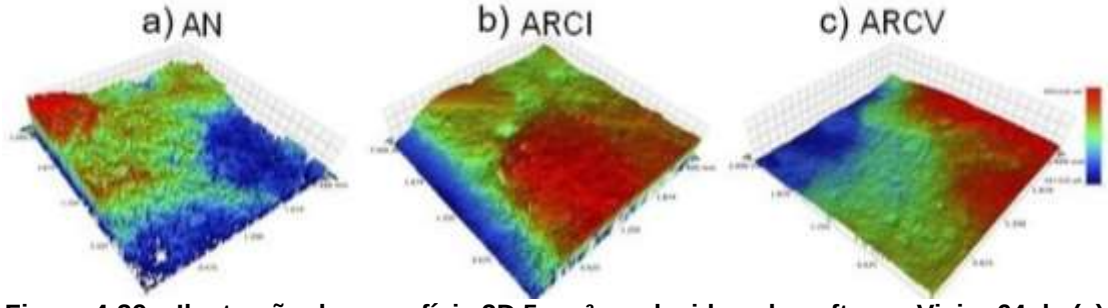


Figura 4-39 – Ilustração da superfície 3D 5mm² produzida pelo software Vision64 de (a) AN, (b) ARCI e c) ARCV. As áreas vermelhas representam a altura acima do plano médio, enquanto as áreas azuis as alturas abaixo do plano de acordo com a escala lateral.

Ao analisar o mesmo material sem tratar e os dois tipos de tratamento foi observado que o tratamento com silano não altera de maneira significativa a rugosidade do material (Figura 4-40 a,b e Figura 4-41 a,b), enquanto o tratamento com parafina deixa a superfície aplainada sem grandes variações de

picos e vales (Figura 4-40 c e Figura 4-41 c). Existe a possibilidade de haver a formação de um filme após o tratamento com parafina, qual padroniza a rugosidade de ARCI e ARCV, visto que seus índices de superfície resultaram similares.

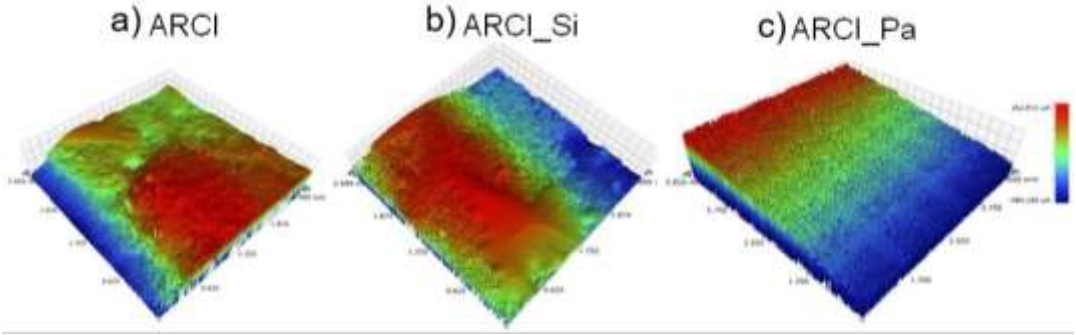


Figura 4-40 - Ilustração da superfície 3D 5mm² produzida pelo software Vision64 de (a) ARCI, (b) ARCI_Si e (c) ARCI_Pa. As áreas vermelhas representam a altura acima do plano médio, enquanto as áreas azuis as alturas abaixo do plano de acordo com a escala lateral.

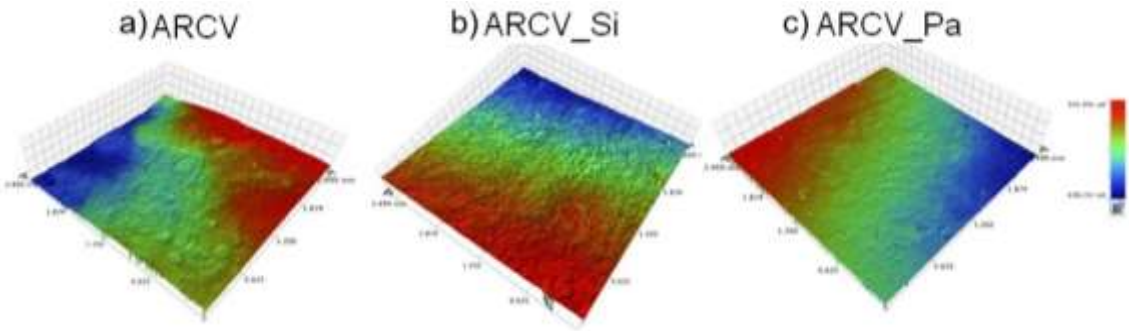


Figura 4-41 - Ilustração da superfície 3D 5mm² produzida pelo software Vision64 de (a) ARCV, (b) RCV_Si e (c) ARCV_Pa. As áreas vermelhas representam a altura acima do plano médio, enquanto as áreas azuis as alturas abaixo do plano de acordo com a escala lateral.

Os valores de máximo, mínimo, média e desvio padrão das leituras realizadas em cada partícula geradas pelo software Vision 64 podem ser observadas na em ANEXO B, assim como as exibições tridimensionais das leituras realizadas em cada partícula.

Em relação aos dados de absorção de água pela NM53:2009 e as médias de parâmetros de índice de superfície, não se pode correlacionar rugosidade dos agregados com absorção de água neste trabalho (Figura 4-42).

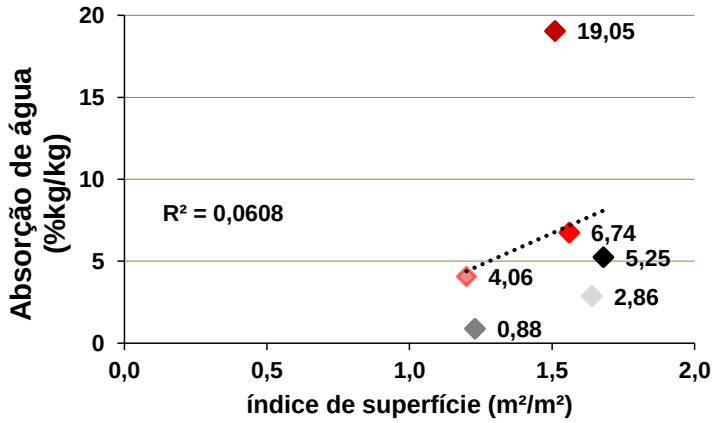


Figura 4-42 Relação entre os dados de Índice de superfície e Absorção de água pela NM53:2009 para os agregados reciclados sem tratamento e tratados com silano e parafina.

4.5 Viabilidade econômica

De acordo com as quantidades de emulsão de silano e parafina (Tabela 4-1), a Tabela 4-8 mostra os resultados de impactos ambientais causados pelos tratamentos. A produção de silano é um processo intenso com altos gastos de energia e emissão de CO_2. A alta concentração de silano requerida no tratamento faz com que seu uso seja inviável, assim como os tratamentos termomecânicos (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014). A produção de parafina tem gastos reduzidos, mas também não é viável quanto aos gastos com energia.

Tabela 4-8 - Resumo da análise ambiental dos tratamentos ambientais.

Tratamento	Material	Energia (MJ/kg)	Emissões (kgCO2eq./kg)	Custo ($/kg)
Silano	ARCI	31,63	1,70	0,42
	ARCV	42,63	2,28	0,57
Parafina	ARCI	6,06	0,02	0,21
	ARCV	19,19	0,05	0,67

Energia (MJ/kg): silano = 1146; parafina= 101.
Fatores de emissão (kgCO2 eq./kg): silano = 61,3; parafina = 0,25.
Custo(US $/kg): silano = 15,5; parafina = 3,5.
Dados de energia e emissões de (KREIGER; SHONNARD; PEARCE, 2013);(TUFVESSON; BÖRJESSON, 2008);
Para o tratamento com silano o cálculo considera a emulsão contendo 60% de silano

4.6 Conclusões Parciais

O estudo apresenta resultados preliminares sobre diferentes técnicas de tratamento superficial em ARCI e ARCV tendo como escopo principal a redução da absorção de água através da aplicação de hidrofugantes (emulsão à base de silano e parafina) sobre a superfície do material.

Os resultados do ângulo de contato mostram a eficácia das técnicas de tratamento em termos de molhabilidade; em todos os casos, os ângulos de contato até 10 minutos foram maiores que 90° para os tratamentos com emulsão de silano. Para os tratamentos com parafina, o ângulo de contato aparente não permaneceu maior que 90º, apesar das superfícies das partículas após os tratamentos serem hidrofóbicas nos primeiros instantes.

De acordo com os ensaios de absorção de água pela NM53:2009 e do ângulo de contato aparente, o tratamento com silano apresentou maior eficácia em ARCV, seja pela quantidade de hidrofugante utilizado ou pelo melhor acoplamento no material de superfície menos rugosa. Logo, para materiais cerâmicos, o tratamento com silano pode ser feito utilizando menores porcentagens de emulsão.

É proposta uma forma de corrigir os resultados de cinética do método de absorção de água no tempo calculado pela massa submersa usando o resultado obtido pelo ensaio da ABNT NBR NM 53 (2009). O novo método exibe em detalhes a cinética de absorção de água e auxiliou na escolha da técnica mais eficaz.

Os tratamentos por aspersão e gotejamento com emulsão de silano mostraram uma variabilidade maior que a registrada pelo tratamento de imersão. Com base nos resultados obtidos, este tratamento foi considerado o mais eficiente. Logo, o tratamento com parafina foi realizado somente por imersão, técnica escolhida para a etapa 2.

Os tratamentos com silano e parafina podem ser compreendidos como: o primeiro forma uma película que, apesar de alto valor do ângulo de contato, muda pouco sua superfície, e provavelmente permite que entre água em seus poros após as primeiras horas; o segundo forma uma camada de parafina ao redor do grão e bloqueia os poros, não permitindo a entrada de água. Esse último apresentou resultados menos variáveis e reduziu a absorção de água mais que o silano.

As análises por imagens permitiram visualizar os aspectos angulares das partículas de ARCV. Foi possível visualizar nitidamente a pasta cimentícia que envolve as partículas de ARCI, que implica em porosidade e absorção maior que o de um agregado natural. ARCV apresentou menor índice de rugosidade.

Nos tratamentos com parafina foi observada uma camada espessa envolvendo o agregado e lhe proporcionando superfície menos rugosa, apesar de não ter um ângulo de contato maior que 90°. Por outro lado, proporcionou melhores resultados de absorção ao longo do tempo do que o tratamento com silano.

O acoplamento do silano na superfície do material cimentício provocou uma redução discreta da rugosidade do material. Por outro lado, na superfície do material cerâmico, aumentou discretamente a rugosidade do material. A superfície se mantém hidrofóbica e a absorção de água não é totalmente bloqueada.

Embora a porcentagem utilizada para os tratamentos com agregados reciclados tenha sido restrita (<20% em massa), os resultados mostraram que os tratamentos não são viáveis em termos de impactos ambientais. Sendo a parafina o tratamento mais eficiente, melhorias são necessárias para viabilizar sua utilização.

5 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD TRATADOS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O objetivo desta etapa foi analisar como os agregados de RCD, com ou sem os tratamentos superficiais (com silano e parafina) influenciam as características dos materiais cimentícios, no estado fresco e endurecido.

5.1 Formulações das argamassas

Nesta primeira parte, foi realizado um estudo na típica argamassa dos concretos. Uma formulação básica em massa (25% cimento; 75% areia) foi adotada.

O cimento utilizado foi CP V- ARI com resistência média à compressão de 53 MPa aos 28 dias (ABNT NBR 5733, 1991), com distribuição entre 0,05 a 555 µm (Figura 5-1). A densidade real medida do cimento foi determinada pela picnometria de hélio e a e a área especifica pelo método BET (gás N_2). Os resultados obtidos foram 3,06 g/cm³ e 0,9 m²/g, respectivamente.

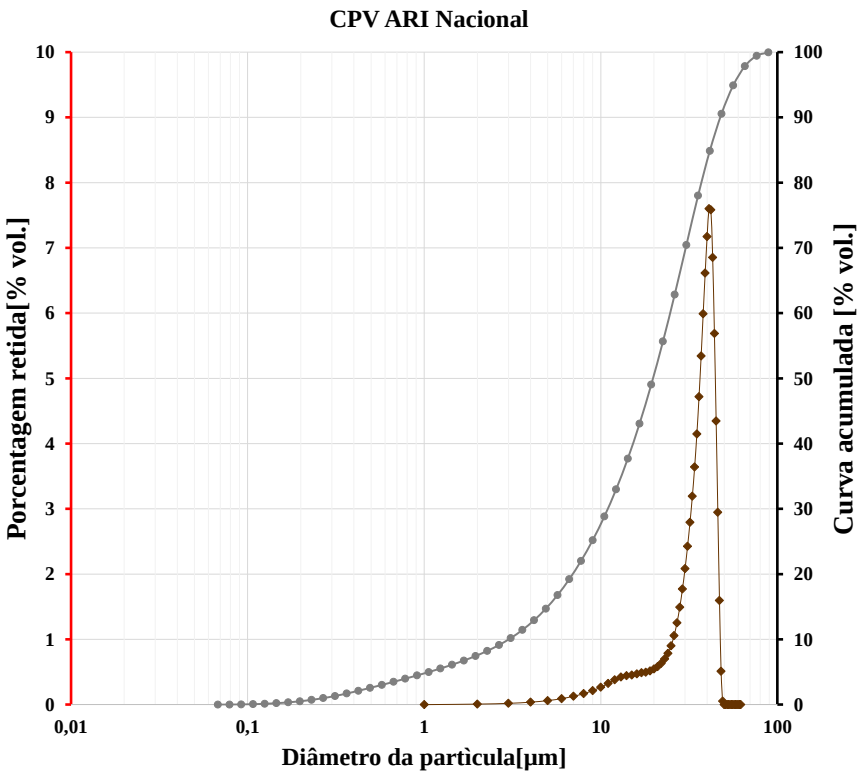


Figura 5-1 Distribuição granulométrica do cimento CPV ARI feita em granulômetro a laser, da marca Malvern, disperso em álcool.

Foram feitas sete formulações empregando-se os diferentes tipos de agregados:

- Agregado natural (AN)
- Agregado cimentício (ARCI)
- Agregado cimentício tratado com silano (ARCI_Si)
- Agregado cimentício tratado com parafina (ARCI_Pa)
- Agregado cerâmico (ARCV)
- Agregado cerâmico tratado com silano (ARCV_Si)
- Agregado cerâmico tratado com parafina (ARCV_Pa)

A areia de referência e os agregados reciclados (< 4,8 mm) foram compostos com mesma granulometria. Não foram utilizados os agregados graúdos reciclados nesta etapa do estudo.

Para se fixar a granulometria do estudo, foi necessária a separação dos agregados reciclados em frações granulométricas. As frações miúdas do ARCI e ARCV foram separadas nos seguintes intervalos granulométricos (Figura 5-2): 0,15 a 0,60 mm; 0,60 a 2,36mm e 2,36 a 4,75mm. A distribuição granulométrica

das frações dos agregados reciclados foi analisada pelo equipamento QicPic (método descrito na etapa anterior)

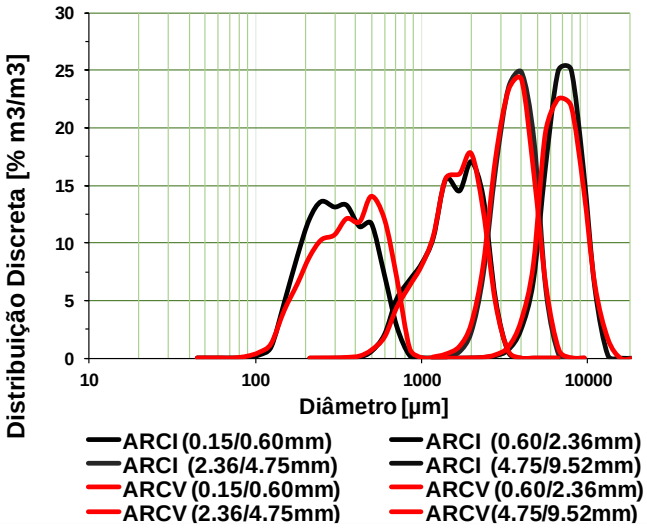


Figura 5-2- Distribuição granulométrica das frações do ARCI e do ARCV.

Após determinar as distribuições granulométricas de ARCI e ARCV, foi possível compor com as frações de areia natural disponíveis, de modo que as três areias apresentassem curvas semelhantes (Figura 5-3 e Tabela 5-1) viabilizando comparar o comportamento reológico das argamassas, sem a influência desta variável.

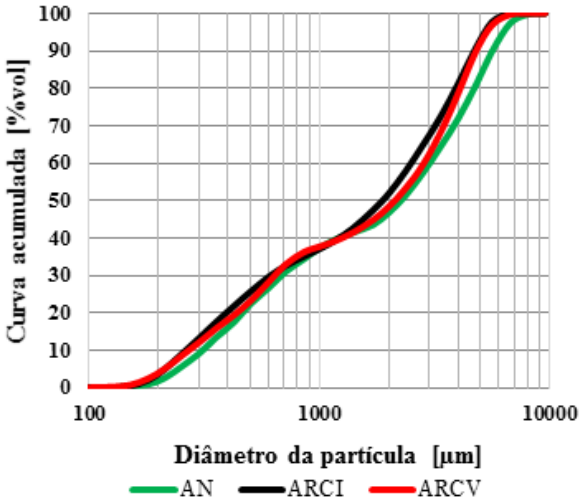


Figura 5-3 - Sobreposição das curvas acumuladas das composições de AN (verde), ARCI (preto) e ARCV (vermelho).

Tabela 5-1 - Composição das frações de AN, ARCI e ARCV com cimento para cada 2000g de material seco de argamassa.

AN			
Materiais	**%m³/m³**	**%kg/kg**	**Quantidade [g]**
Cimento	25	27,43	548,65
AN 0,60 – 1,18	2	1,88	37,64
AN 0,30 – 1,18	5	5,04	100,76
AN 1,18 – 3,35	24	23,67	473,35
AN 0,15 – 0,30	6	5,65	112,93
AN 0,30 – 0,60	8	7,53	150,58
AN 0,16 - 0,60	8	7,52	150,32
AN 2,36 – 4,75	19	18,46	369,28
AN 1,18 – 2,36	3	2,82	56,47
TOTAL	100	100	2000
ARCI			
Materiais	**%m³/m³**	**%kg/kg**	**Quantidade [g]**
Cimento	25	28,49	569,83
ARCI 0,15 – 0,60	24,5	23,36	467,19
ARCI 0,60 – 2,36	22,5	21,45	429,05
ARCI 2,36 – 4,75	28	26,70	533,92
Total	100	100	2000
ARCV			
Materiais	**%m³/m³**	**%kg/kg**	**Quantidade [g]**
Cimento	25	27,72	554,35
ARCV 0,15 - 0,30	14	13,49	269,85
ARCV 0,30 - 0,60	11	10,60	212,02
ARCV 0,60 – 2,36	21,5	20,72	414,42
ARCV 2,36 – 4,75	28,5	27,47	549,37
	100	100	2000

O tratamento superficial foi feito pela técnica de imersão para silano e parafina, que se apresentou mais eficaz (conforme discutido na etapa anterior).

Os tratamentos com silano em ARCI e ARCV foram feitos com o hidrofugante à base de emulsão de octiltrietoxisilano (Dow Corning IE6694), concentração em

água de 20% (em massa). O conteúdo ativo do produto adquirido que antes era a fase contínua (60%) passou a ser fase dispersa de 12% da nova emulsão.

Os tratamentos com parafina foram realizados de acordo com os procedimentos definidos na etapa 1. As frações abaixo de 0,60 utilizadas nas argamassas de ARCI_Pa e ARCV_Pa não foram tratadas devido à aglomeração dos grãos durante a secagem.

A quantidade de material seco utilizada em cada composição de argamassa pode ser observada na Tabela 5-2 com seus respectivos teores de hidrofugante.

Tabela 5-2 –Quantidade em massa dos materiais secos e hidrofugantes usados em cada composição.

Tipo de Agregado	Cimento (g)	Agregado (g)	Emulsão de silano (g)	Parafina sólida (g)
AN	548,65	1451,35		
ARCI	569,83	1430,17		
ARCI_Si	569,83	1430,17	65,22	
ARCI_Pa	569,83	1430,17		65,11
ARCV	554,35	1445,65		
ARCV_Si	554,35	1445,65	181,07	
ARCV_Pa	554,35	1445,65		264,37

Na Tabela 5-3 encontram-se os valores dos demais ensaios de caracterização do dos agregados utilizados. A densidade real, aparente, absorção de água e porosidade foram determinadas pela norma da ABNT NBR NM 30 (2001). A área específica foi determinada pelo método BET (gás N_2). A areia natural (AN) apresenta maior densidade real e aparente e valor de área superficial específica bem menor, se comparada aos agregados reciclados porosos (ARCI e ARCV).

Tabela 5-3 – Propriedades físicas da fração miúda dos agregados utilizados nas argamassas segundo a norma da ABNT NBR NM 30 (2001).

Propriedade	AN	ARCI	ARCI Si	ARCI Pa	ARCV	ARCV Si	ARCV Pa
Densidade real (g/cm³)	2,70	2,63	2,07	1,86	2,70	1,82	1,75
Densidade aparente (g/cm³)	2,66	2,21	1,89	1,83	1,79	1,60	1,67
Porosidade	1,4	16,66	8,85	1,54	32,03	11,97	4,52
BET N_2 - Área específica (m²/g)	0,60	8,5288	-	-	15,906	-	-
Absorção de água (%)	0,56	7,56	4,68	0,84	11,92	7,45	2,7

Por ser um material que apresenta baixos valores de porosidade, a absorção de água em AN é próxima à zero. Em decorrência do tratamento com emulsão de silano em ARCI_Si e ARCV_Si miúdos, a absorção reduziu em ~38%. A parafina reduziu ainda mais, fazendo com que a absorção de água de ARCI_Pa chegasse próximo a 0% e a do ARCV_Pa chegasse a 2,7%. Esses resultados se assemelham aos obtidos nos ensaios com o material graúdo apresentado na etapa 1.

5.2 Definição do teor de água (por reometria de mistura)

Para definir o teor de água das argamassas usando AN e os agregados reciclados de RCD sem tratar e tratados, foram realizados ensaios de reometria de mistura, mantendo a rotação constante de 500 rpm por 300s.

A Figura 5-4 apresenta a rotação de testes de reometria de mistura mostrando a adição de água (seta preta) iniciada 10s após o instante em que a velocidade de rotação se mantém constante.

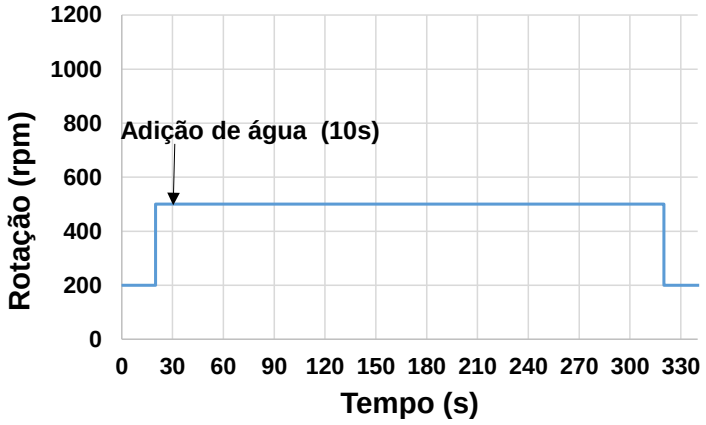


Figura 5-4 – Programa de rotação de testes de reometria de mistura.

Para a composição de referência com agregado natural foi determinado um teor de água adequado à aplicação, definindo um valor de torque de mistura igual a 1N.m como referência. Foram determinadas as curvas reológicas da mistura, sem saber ao certo a quantidade necessária de água para cada tipo de agregado reciclado de RCD. Com o equipamento em rotação constante, a quantidade total de água para cada mistura foi determinada através de adições sequenciais ao material seco de forma direta até atingir o valor de torque de referência.

Nas curvas de mistura foi avaliado o torque máximo atingido, torque final, tempo para atingir torque constante e a área sob a curva para indicar a energia envolvida no processo.

A reometria de mistura das argamassas (2 kg cada) foi realizado em um reômetro tipo planetário construído na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Durante os ensaios de curva de mistura as partículas de ARCV quebraram com a rotação da raquete do reômetro, o que aumentou a área superficial do material, fazendo com que necessitasse de uma quantidade de água ainda mais elevada. Por esse motivo, decidiu-se substituir o reômetro como equipamento de mistura para os agregados tratados.

Os materiais foram então misturados à baixa velocidade em argamassadeira, onde o valor total de água foi obtido de maneira análoga à curva de mistura. Para verificar a consistência obtida e confirmar o valor do torque estabelecido, a

mistura fresca foi colocada no reômetro entre 100 -500s à velocidade constante de 500 rpm. Logo, não foi possível obter curvas de mistura para as argamassas com tratamento.

5.3 Comportamento reológico (estado fresco)

Após a etapa de mistura das argamassas, foram realizados ciclos de cisalhamento no mesmo equipamento, para caracterização reológica e avaliação da eficiência da mistura. O procedimento referente aos ciclos de cisalhamento consiste em impor ao material diferentes velocidades de rotação da geometria de ensaio em torno de seu próprio eixo, variando a velocidade de 12,63 a 315,66 rpm e retornando a 12,63 rpm, permanecendo 5 segundos em cada patamar de rotação conforme Figura 5-5.

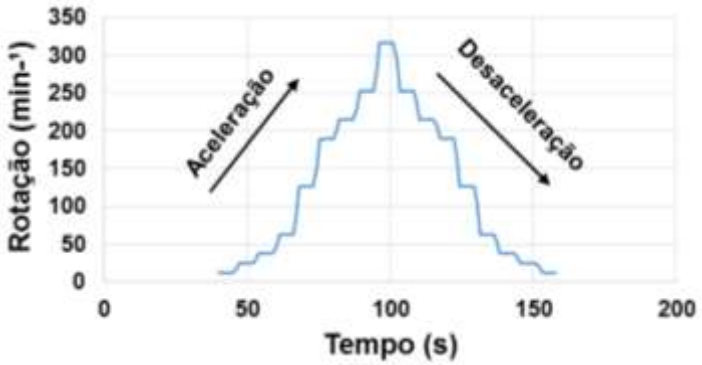


Figura 5-5 - Programa de rotação de testes de ciclo de cisalhamento.

Dos ensaios de fluxo contínuo (ciclo de cisalhamento), obtêm-se informações de viscosidade plástica aparente e de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento aplicada (PILEGGI; CARDOSO; ROMANO, 2011).

Os comportamentos reológicos das formulações foram avaliados com teores de água que conferiram a trabalhabilidade padrão das misturas. As argamassas fluidas foram encaminhadas para os demais ensaios de caracterização.

Após o ciclo de cisalhamento os teores de ar aprisionado das argamassas foram determinados conforme a (ABNT NBR 13278, 2005).

Para melhor entendimento dos gráficos, cada curva de mistura foi identificada pela sigla do tipo de agregado utilizado seguida do teor de água em porcentagem (Figura 5-6a) e cada curva do ciclo de cisalhamento foi identificada pela sigla do tipo de agregado seguida do tipo de tratamento, quando houver (Figura 5-6b).

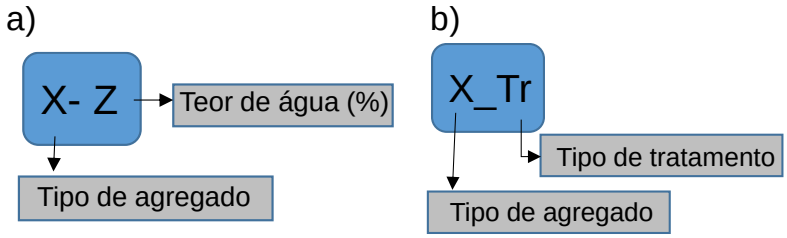


Figura 5-6 - Legenda para os gráficos de caracterização (a) das curvas de mistura e (b) do ciclo de cisalhamento das argamassas.

Para o cálculo da absorção de água dos agregados foi feita uma ponderação sobre o valor obtido pelo ensaio descrito na ABNT NBR NM 30 (2001).

A ponderação consistiu no produto da absorção obtida pelo método normatizado (24 horas) pelo valor relativo ao instante 3 horas do ensaio de absorção ao longo do tempo (apresentados na etapa anterior e obtido para os agregados graúdos).

5.4 Caracterização no estado endurecido

Para cada formulação de argamassa foram utilizados 6 corpos de prova no estado endurecido. A Tabela 5-4 apresenta os ensaios de caracterização realizados com as amostras para avaliar o desempenho do material.

Tabela 5-4 - Ensaios para avaliar o comportamento mecânico das argamassas.

Ensaios de caracterização	Número de CP(*)
Resistência à Compressão Uniaxial (ABNT NBR 5739:, 2007)	3
Módulo de elasticidade (ASTM C597, 2009)	3
Resistência à Compressão Diametral (ABNT NBR 7222, 2011)	3
Total	6

(*) três corpos de prova foram utilizados em dois ensaios diferentes.

Os ensaios dos corpos de prova foram realizados na seguinte sequência, como ilustra a Figura 5-7. Ao todo foram 49 corpos de prova distribuídos de acordo com a Tabela 5-5.

Figura 5-7 - Corpos de prova e ensaios de caracterização respectivos, onde Rc é a Resistência à compressão axial, E o Módulo de Elasticidade e Rt o ensaio de Resistência à compressão diametral.

Tabela 5-5 - Quantidade de corpos de prova utilizado em ensaios de caracterização para cada tipo de agregado.

Caracterização das argamassas no estado endurecido								
Ensaios de caracterização	**Quantidade de corpos de prova para cada tipo de agregado**							
	Agregados							Total
	AN	ARCI	ARCI Si	ARCI Pa	ARCV	ARCV Si	ARCV Pa	
Resistência à Compressão	3	3	3	3	3	3	3	27
Módulo de elasticidade	3	3	3	3	3	3	3	27
Resistência à tração por compressão diametral	3	3	3	3	3	3	3	27
Total	6	6	6	6	6	6	6	49

(*) Três corpos de prova foram utilizados em dois ensaios diferentes.

5.5 Resistência de aderência à tração pasta-agregado (prova de conceito)

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com o objetivo de confirmar se o tratamento interfere na resistência de aderência (medida por arrancamento) entre pasta e agregado. Pelo capitulo anterior, sabe-se que o silano mudou a molhabilidade da superfície, tornando-a hidrofóbica, e que a

parafina, apresenta maior molhabilidade, cobriu a superfície dos agregados, formando uma zona de transição (região potencialmente mais fraca) e tornando-a mais lisa.

Nesse caso, com base na (ABNT NBR 13528, 2010) o ensaio foi realizado moldando cilindros de pasta de cimento (a/c 0,45) de diâmetro 5cm e altura 2cm diretamente encima do substrato.

Os substratos utilizados foram os mesmos materiais que originaram ARCI e ARCV (ver etapa 1). Para representar a superfície de ARCI foi ensaiado o lado interno dos corpos de prova (CP) de concreto com agregado natural de dimensões 10x20cm rompidos à tração. Para representar a superfície de ARCV, foi ensaiado o lado de maior dimensão de blocos cerâmicos de 19 x 19cm.

Foram ensaiados substratos não tratadas e tratadas com silano e parafina. Sobre eles foram moldados manualmente 4 cilindros de pasta de cimento espaçados igualmente entre si e dos cantos de acordo com a Figura 5-8.

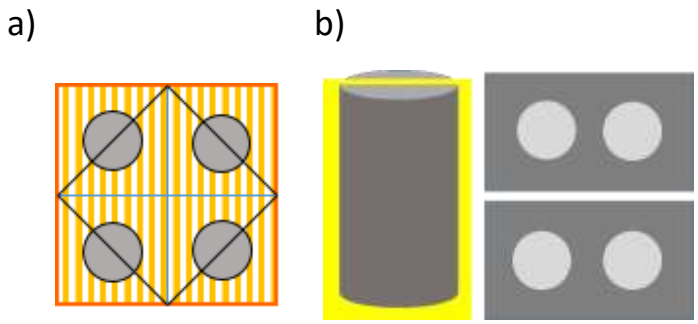


Figura 5-8 – Posições dos corpos de prova de pasta de cimento (a) na superfície do bloco cerâmico e (b) nas duas seções de rompimento à tração do CP de concreto com agregado natural (com superfície de fratura de CP's de concreto rompidos por compressão diametral).

Antes dos tratamentos os blocos e os CP's permaneceram em estufa à 100°C por 24 horas e depois resfriados em temperatura ambiente por 2 horas. Logo, foram tratados por absorção capilar cobrindo toda a superfície a ser tratada. Durante o tratamento dos blocos cerâmicos foi necessário tampar os furos laterais, havendo cuidado para que o tratamento não entrasse pelos furos, desperdiçando o material.

Após o tratamento com emulsão de silano (IE6694 20%), o material foi colocado em estufa por 24 horas. Após o tratamento com parafina o material foi resfriado em temperatura ambiente por 2 horas.

Os moldes cilíndricos para a pasta tiveram as mesmas dimensões das pastilhas. Após a moldagem os substratos e os corpos de prova foram colocados em sacos plásticos. Para garantir um nível adequado de umidade foram colocados recipientes com água dentro dos sacos plásticos, quais foram selados por 28 dias, quando foi realizado o ensaio.

5.6 Resultados e discussão

5.6.1 Definição do teor de água (por reometria de mistura)

O primeiro ensaio foi o de Reometria de Mistura, no qual, foi atingida consistência da primeira argamassa de referência com AN, para um torque equivalente a 1,2 Nm e quantidade de água igual a 11,89% do total de material.

A partir dos dados da mistura de referência com agregados miúdos de granulometria entre 0,150 e 4,75 foi determinado o teor de água inicial para as argamassas com os outros agregados.

As curvas de mistura para cada tipo de agregado sem tratar foram analisadas de acordo com a Figura 5-9 entre 0 a 300s com suas respectivas quantidades de água necessárias.

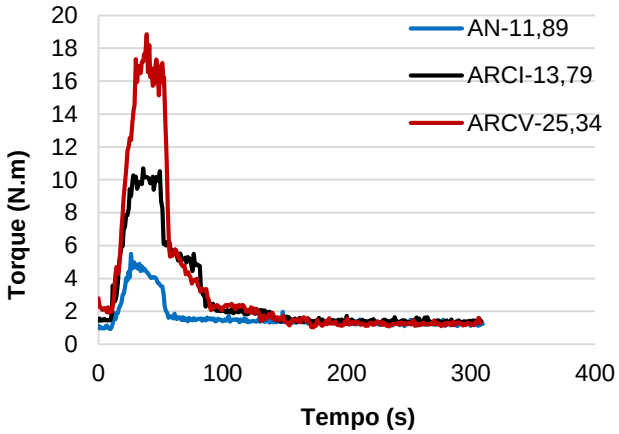


Figura 5-9 - Curvas de mistura das argamassas ensaiadas com os agregados AN, ARCI e ARCV e porcentagem final de água necessária para a mistura no intervalo de 0 a 180 s.

Como esperado, a consistência para as argamassas com agregados reciclados de RCD não foram atingidas com a mesma quantidade de água do agregado natural. Logo, para alcançá-las, com o mesmo procedimento experimental, tentou-se corrigir adicionando quantidades de 20ml de água a cada 30s. Esse intervalo entre uma adição e outra foi necessário para que fosse possível visualizar se havia alguma alteração na curva de mistura.

Com as curvas de mistura das três argamassas juntas pôde-se observar com mais detalhes os torques iniciais, quando as curvas se diferem. Após o intervalo de 0 a 180s as curvas se mantêm constantes.

A energia de mistura requerida no processo (área de cada curva de mistura) envolvida no processo, de acordo com o gráfico da Figura 5-10, se relaciona diretamente com a área superficial, granulometria e porosidade do material.

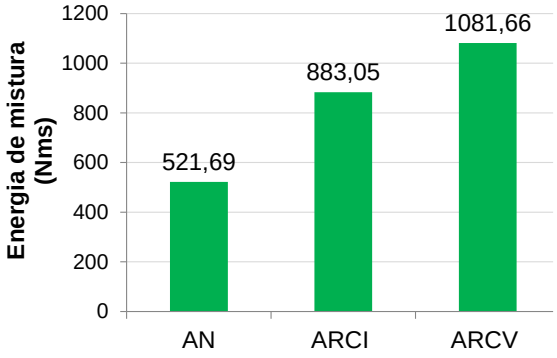


Figura 5-10 - Energia de mistura requerida para cada argamassa.

O ARCI necessitou de mais água que o AN por apresentar maior porosidade, devido à pasta cimentícia porosa o envolvendo. Pode-se observar que ARCV necessitou de grande energia de mistura (mais que 1000 Nms) e torque de quase 20 Nm para quantidade de água superior a AN e ARCI, por possuir maior volume de poros de acordo com os ensaios de caracterização. Assim, quando se adiciona a mesma quantidade de água utilizada em AN para os materiais reciclados, falta água para que haja o molhamento das superfícies, não sobrando água para afastar e dispersar as partículas. Por isso, foi necessário fornecer mais água.

A consistência da argamassa com ARCV apresentou grande diferença das misturas com ARCI e AN, tendo aspecto ‘argiloso’ a ponto de chegar ao valor de torque limite do equipamento.

Como os componentes estão secos, ao serem molhados, a água é aprisionada no interior dos aglomerados que se formam, disponibilizando menos água livre para o sistema. Se o agregado é pouco poroso, será disperso com menor quantidade de água, como ocorreu em AN. Porém, se o agregado é muito poroso como ARCI e ainda mais em ARCV, terá absorção instantânea de água, não permitindo essa boa dispersão. A maioria dos poros são interconectados, faciliando a rápida molhagem pelas forças capilares.

5.6.2 Comportamento reológico (estado fresco)

Os ensaios de ciclo de cisalhamento (Figura 5-11) foram realizados após todas as misturas atingirem o mesmo torque. Apesar disso, os agregados reciclados, comparados ao natural apresentam torque, tensão de escoamento, e viscosidade aparente maiores. No entanto, como os ciclos de cisalhamento se iniciam após terem atingido a consistência para o valor de torque de mistura pré-configurado, as argamassas apresentam torques próximos em diferentes condições de rotação.

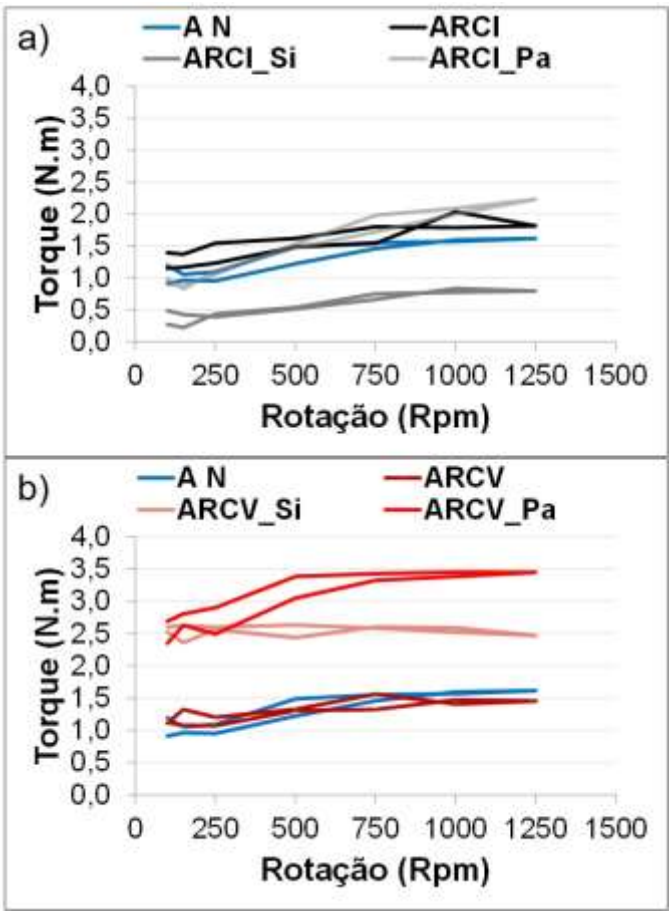


Figura 5-11 - Perfil de cisalhamento das argamassas ensaiadas comparando (a) AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) AN, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa.

Comparado a ARCI, o ARCI_Si, apesar de ter uma relação água/sólidos 5% menor (Figura 5-12), apresentou torque de escoamento reduzido, semelhante ao obtidos por Klein et al. (2012), onde os autores hidrofugaram com silano a superfície da areia e obteve melhor trabalhabilidade da argamassa.

Já o ARCV_Si apresentou torque de escoamento e viscosidade aparente maiores que ARCV, porém sua relação água/sólidos foi 40% menor que ARCV.

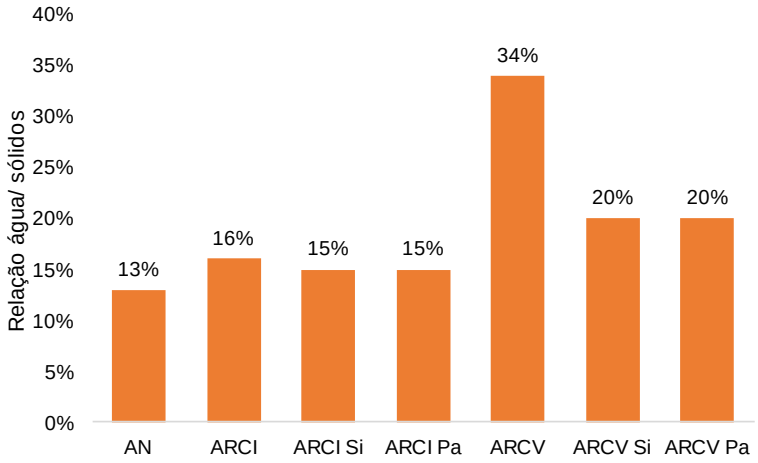


Figura 5-12 – Relação água/sólidos (% g/g) das argamassas.

Através do ensaio do ciclo de cisalhamento foi possível obter dados de viscosidade plástica aparente e torque de escoamento das argamassas ensaiadas. As curvas de viscosidade aparente podem ser observadas na Figura 5-13. A viscosidade para os materiais cimentícios tratados e sem tratar foram similares, destacando a curva de ARCI_Si, onde o tratamento com silano reduziu a viscosidade.

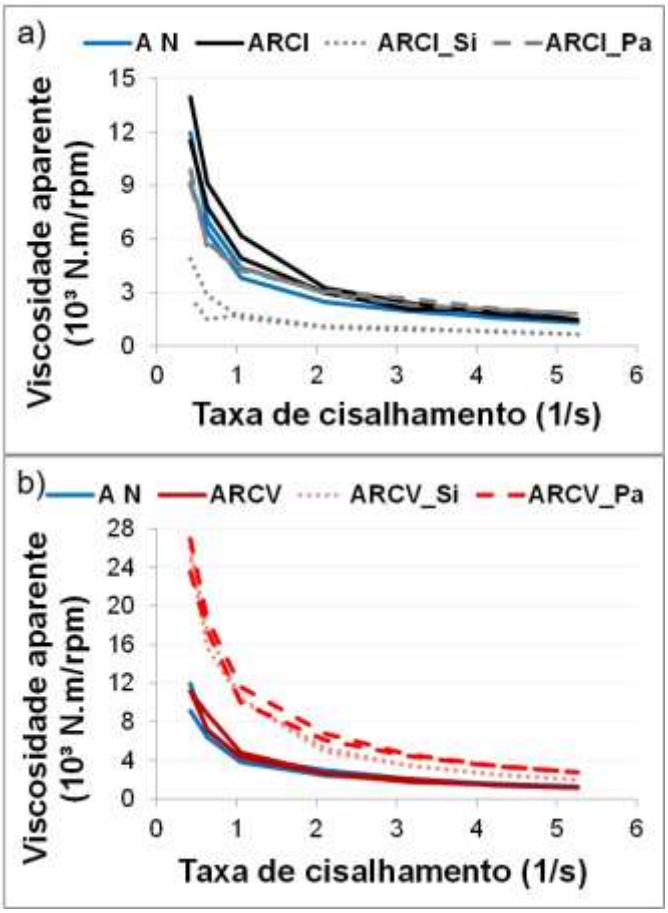


Figura 5-13 - Viscosidade aparente das argamassas ensaiadas comparando (a) AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) AN, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa.[3]

A maior demanda de água pode ter contribuído para o valor de viscosidade em ARCV, similar à AN. Já os tratamentos com silano e parafina nos materiais cerâmicos reduziram o teor de água da mistura aumentando a viscosidade em ARCV_Si e ARCV_Pa.

Os dados de tensão de escoamento de todas as misturas podem ser comparados no gráfico da Figura 5-14. Os tratamentos com silano e parafina reduziram o valor do torque em ARCI, com mais desempenho em ARCI_SI. Já os tratamentos no material cerâmico apresentaram torque de escoamento duas vezes maior que o material sem tratar.

[3]A viscosidade aparente são dados de torque/ taxa cisalhamento medidos pelo reômetro, qual não calcula valores de tensão e taxa de cisalhamento nas unidades SI. No entanto, apesar da geometria do reômetro não estar resolvida, trabalhando com os dados de torque e rotação, convém admitir a 'viscosidade' como a relação torque /rotação chamando-a de viscosidade aparente.

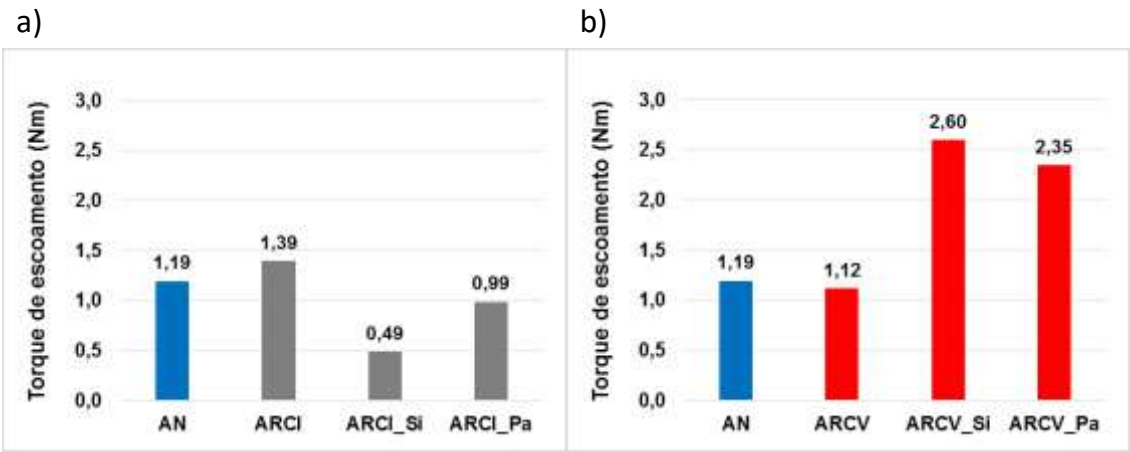


Figura 5-14 - Torque de escoamento das misturas comparando (a) AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) AN, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa.

Os teores de ar incorporado nas argamassas estão apresentados na Figura 5-15. Como os agregados reciclados são porosos, ocorre sempre um aumento no teor de ar presente nas misturas, em relação à mistura de referência (AN).

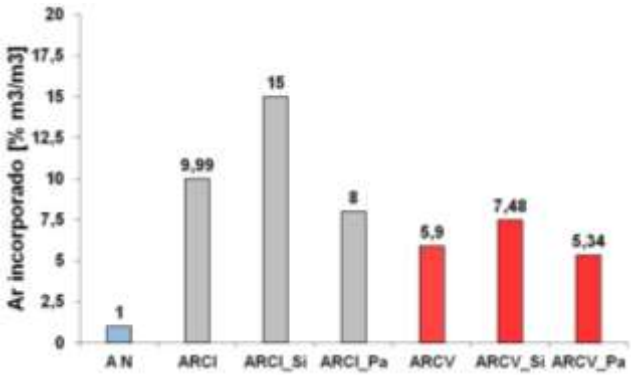


Figura 5-15 Valores de ar incorporado nas argamassas ensaiadas para AN, ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa, ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa.

Os tratamentos superficiais não permitem a saturação dos poros dos agregados reciclados. Ao ter a entrada de água bloqueada, certa quantidade de ar permanece no interior do material.

Para os agregados cimentícios, apesar do teor água/sólidos similar, as argamassas tratadas com silano apresentaram teores de ar mais elevados. Uma possível causa é a viscosidade reduzida, que favorece a incorporação de bolhas de ar no processo de mistura.

Nos agregados tratados com parafina o fato de a fração abaixo de 0,6 mm estar sem tratamento também pode ter influenciado esses valores de ar incorporado.

5.6.3 Caracterização no estado endurecido

5.6.3.1 Resistência à compressão

As resistências médias à compressão aos 28 dias de todas as argamassas são apresentadas na Figura 5-16. Também é possível observar o desvio padrão (em linha) para cada resultado. Como esperado, a argamassa de ARCI atingiu resistência à compressão (20,58 N/mm²) um pouco inferior à de AN, seguida de ARCV (9,85 N/mm²).

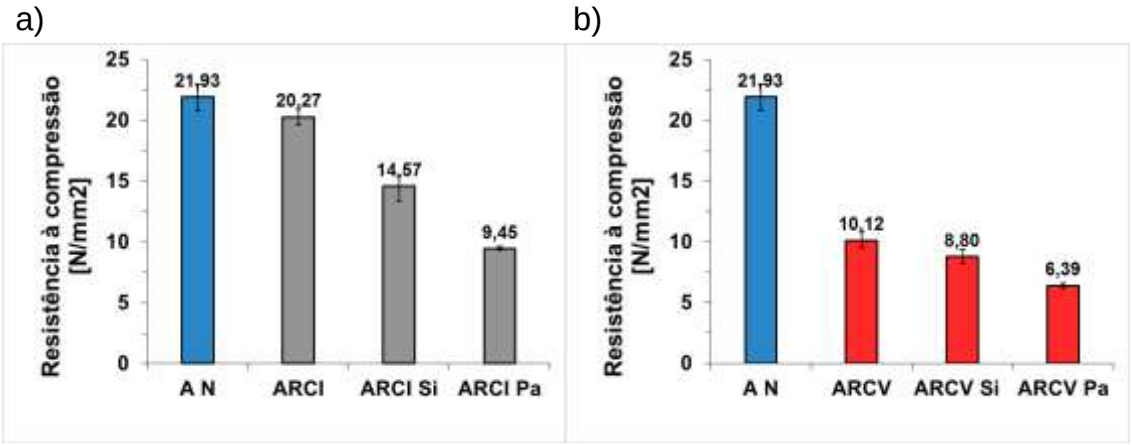


Figura 5-16 - Resistência à compressão para as argamassas ensaiadas (a) AN e ARCIs e (b) AN e ARCVs.

Os três materiais cerâmicos, mais porosos que os cimentícios, demonstraram menor resistência. Os tratamentos para materiais de mesma porosidade influenciaram a resistência: ambos os tratamentos afetaram a resistência à compressão em relação aos materiais sem tratamento. Todos os resultados obtidos foram abaixo do material de referência AN.

A resistência à compressão da argamassa reduziu após os tratamentos dos agregados reciclados. ARCI_Pa e ARCV_Pa apresentaram as resistências mais baixas, houve uma redução significativa: 53% menor que ARCI e 37% menor que ARCV. ARCI_Si e ARCV_Si apresentaram resistências 28% e 24% menores que os respectivos agregados sem tratamento. O tratamento com parafina foi o

de menor eficiência em termos de resistência, apesar de reduzir a absorção de água e a relação água/sólidos.

5.6.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 5-17 apresenta os resultados ensaios de resistência à tração (por compressão diametral) para todas as misturas. Da mesma forma, a argamassa de ARCI atingiu resistência à tração (3,27 N/mm²), menor que a de AN (4,23 N/mm²) e seguido da argamassa de ARCV (1,72 N/mm²).

As resistências das argamassas reduziram com os agregados tratados. O tratamento dos agregados reciclados com parafina reduziu cerca de 30% da resistência à tração das argamassas, se comparadas as não tratadas. O silano reduziu cerca de 20% da resistência à tração das argamassas.

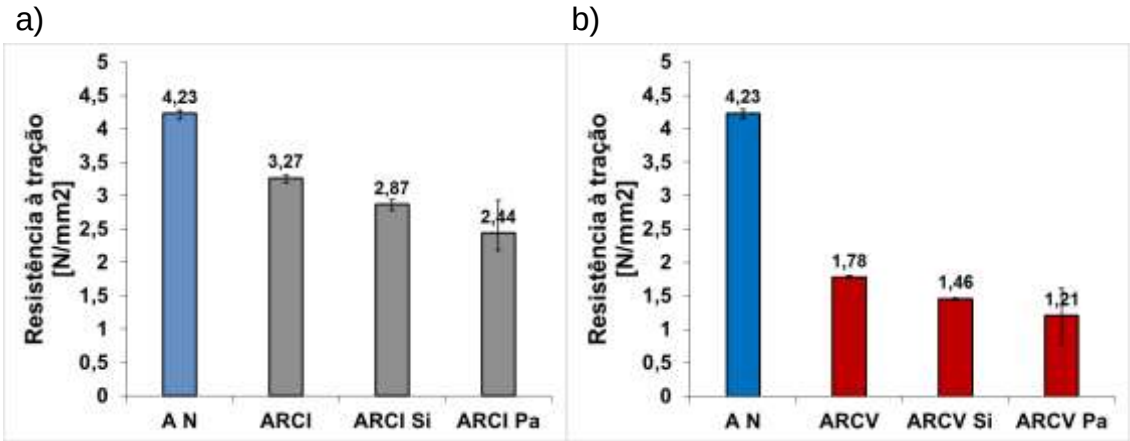


Figura 5-17 - Resistência à tração (compressão diametral) dos corpos de prova das argamassas ensaiadas (a) AN e ARCIs e (b) AN e ARCVs.

Correlacionando os dados de resistência à compressão e tração (por compressão diametral) das argamassas ensaiadas (Figura 5-18) é possível afirmar que os resultados são diretamente proporcionais, quanto maior a resistência à compressão, maior a resistência à tração. Assim, são observados os mesmos efeitos do tratamento na resistência à compressão e à tração.

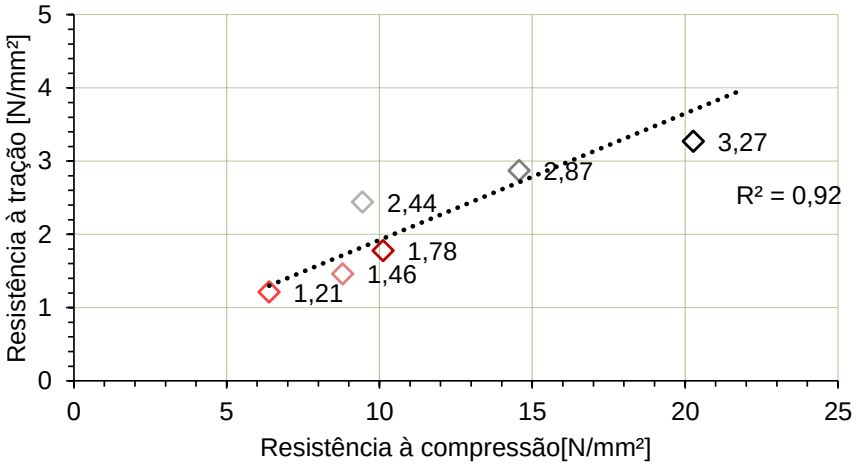


Figura 5-18 –Relação entre média da resistência à compressão pela resistência à tração (compressão diametral) pela dos corpos de prova das argamassas ensaiadas.

5.6.3.3 Módulo de Elasticidade

Os módulos de elasticidade para os corpos de prova das argamassas estão apresentados nos gráficos da Figura 5-19. Para os agregados tratados ARCI_Si e ARCI_Pa, o módulo de elasticidade foi ~25% menor que em ARCI. ARCV também apresenta valor maior que as misturas com tratamentos.

O tratamento com parafina resulta em maior módulo de elasticidade da argamassa, se comparada ao tratamento com silano. O preenchimento de poro por parafina contribui para essa propriedade.

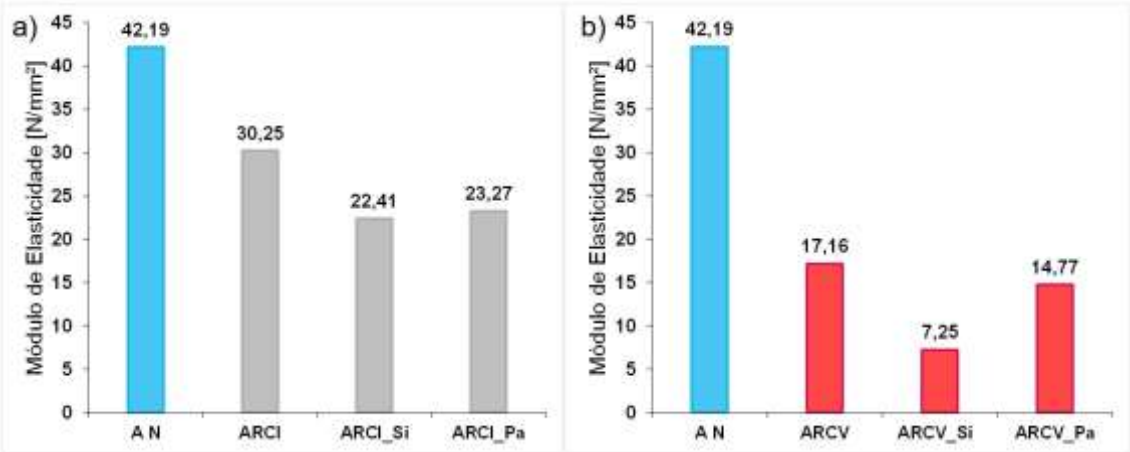


Figura 5-19 - Módulo elástico médio das argamassas NA, ARCIs e ARCVs.

.

Correlacionando os dados de resistência à compressão com módulo de elasticidade das argamassas ensaiadas não é possível confirmar proporcionalidade para os materiais tratados com silano.

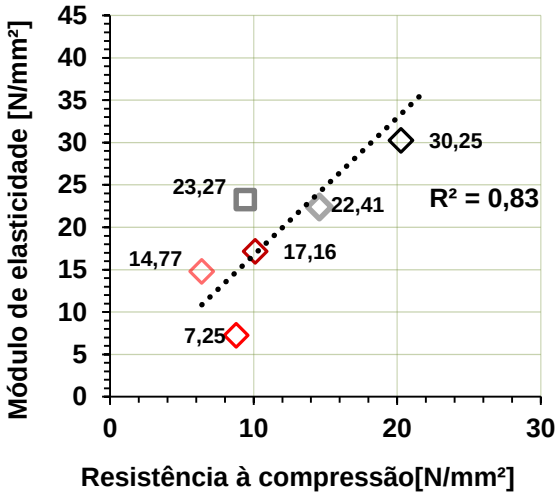


Figura 5-20 - Relação entre média da resistência à compressão pelo módulo de elasticidade dos corpos de prova das argamassas ensaiadas para ARCIs e ARCVs.

5.6.3.4 Tipo de fratura

Os mecanismos de ruptura ocorreram de forma diferente para cada tipo de material: para os materiais cimentícios, a ruptura dos corpos de prova de argamassa é intergranular; ou seja, a linha de ruptura segue os limites da superfície das partículas de ARCI. Assim, a ruptura ocorreu na pasta de cimento, e não no agregado reciclado. No ARCV a ruptura é transgranular; ou seja, as partículas do agregado cerâmico se rompem devido à sua baixa resistência.

As imagens das vistas frontais das rupturas para cada material e tratamento podem ser observadas na Figura 5-21. Para melhor compreensão a Figura 5-22 ilustra como segue a linha de ruptura para cada tipo de material.

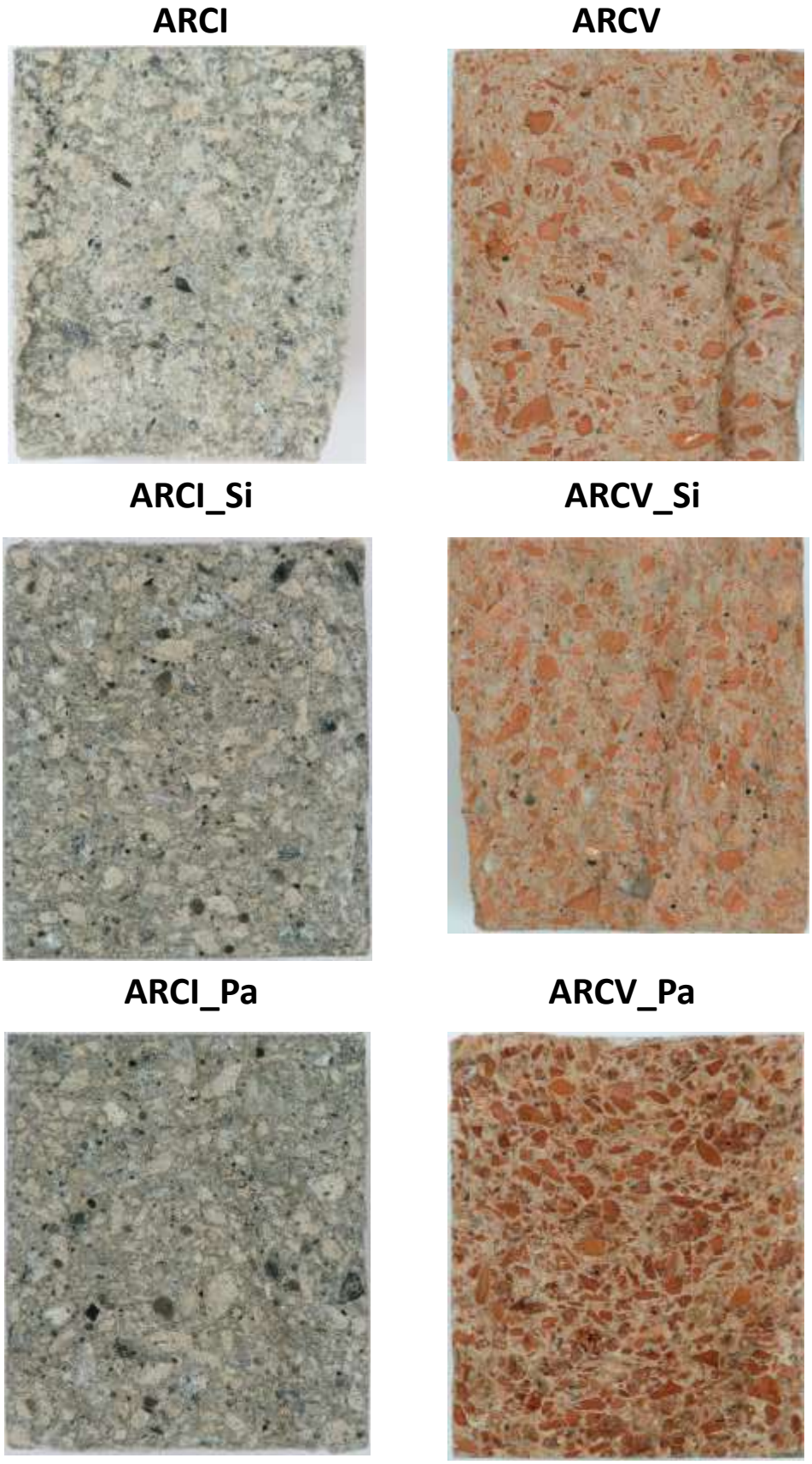


Figura 5-21 Fraturas dos corpos de prova das argamassas ensaiadas à tração por compressão diametral.

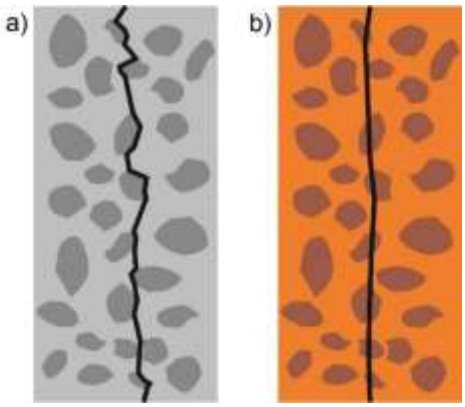


Figura 5-22 Esquema indicando como ocorreu a ruptura (a) intergranular para ARCIs e (b) transgranular para ARCVs.

5.6.4 Porosidade e a influência na resistência

As medidas de porosidade das argamassas foram obtidas por ensaio de intrusão de mercúrio, permitindo a distinção entre porosidade da pasta e porosidade do agregado (Figura 5-23).

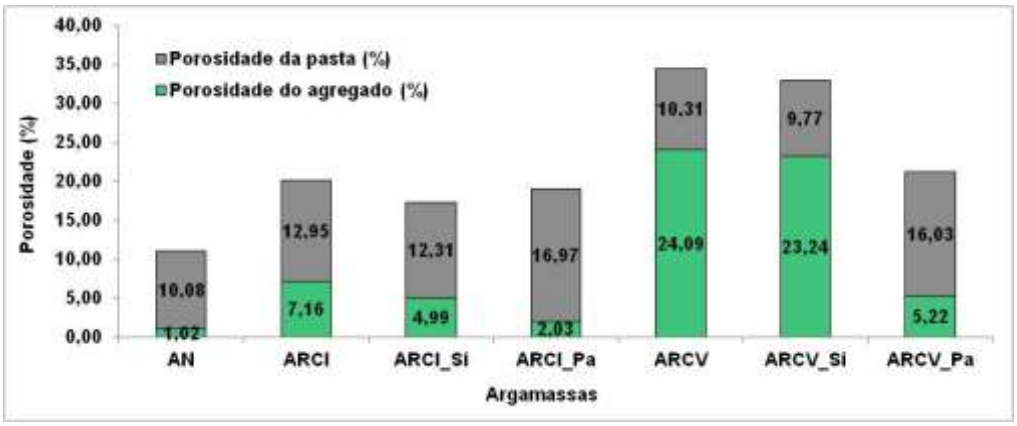


Figura 5-23 - Porosidade das argamassas AN, ARCIs e ARCVs.

As argamassas com os agregados reciclados sem tratamento foram mais porosas que as argamassas com agregados reciclados tratados, consequência da maior porosidade apresentada pelos agregados.

No tratamento com silano, a porosidade de ARCI (agregado) reduziu ~2%, a redução da porosidade da pasta é menor, pois o tratamento não bloqueia os poros dos agregados reciclados, como ocorre com a parafina, houve redução de ~5% de porosidade do agregado. Quando a água é impedida de entrar nos poros, pelo tratamento com parafina, permanece em maior quantidade na pasta de cimento, fazendo com que a porosidade da pasta em ARCI_Pa e ARCV_Pa

seja maior (16,97% e 16,03% respectivamente) que a porosidade da pasta nas outras argamassas.

Em relação aos parâmetros de resistência mecânica (resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade), não se pode relacionar a redução da porosidade dos agregados estudados com a queda de resistência (Figura 5-24). O volume de poros preenchidos com silano e parafina não contribuíram para a resistência da argamassa.

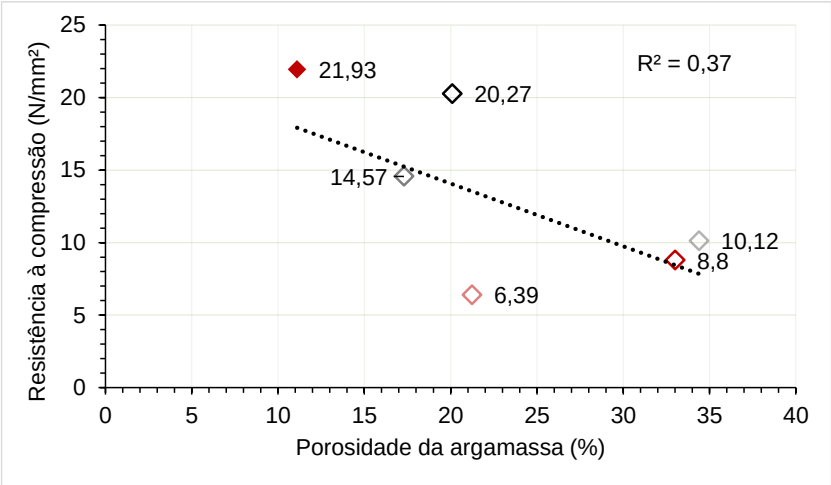


Figura 5-24 Relação entre a porosidade das argamassas ensaiadas e as médias de resistência à compressão.

5.6.5 Zona de transição interna (ITZ) e sua influência na resistência

Foi observado que a queda da resistência não se relacionou com a porosidade; logo essa redução na resistência pode ter ocorrido devido zona de transição mais fraca entre os agregados tratados e pasta cimentícia. Para comprovar são apresentados resultados da prova de conceito.

Os resultados de resistência de aderência à tração confirmaram a existência de perda de resistência de aderência na interface entre a pasta de cimento e as superfícies tratadas (com silano e parafina). As resistências de aderência nas superfícies tratadas com silano foram menores que as das superfícies sem tratamento, provavelmente devido à natureza hidrofóbica das mesmas nos agregados. Os tratamentos com parafina sólida apresentaram valores ainda menores (Figura 5-25); neste caso, o efeito foi mais influenciado pela camada de

parafina presente na superfície dos agregados do que pela existência de uma superfície hidrofóbica.

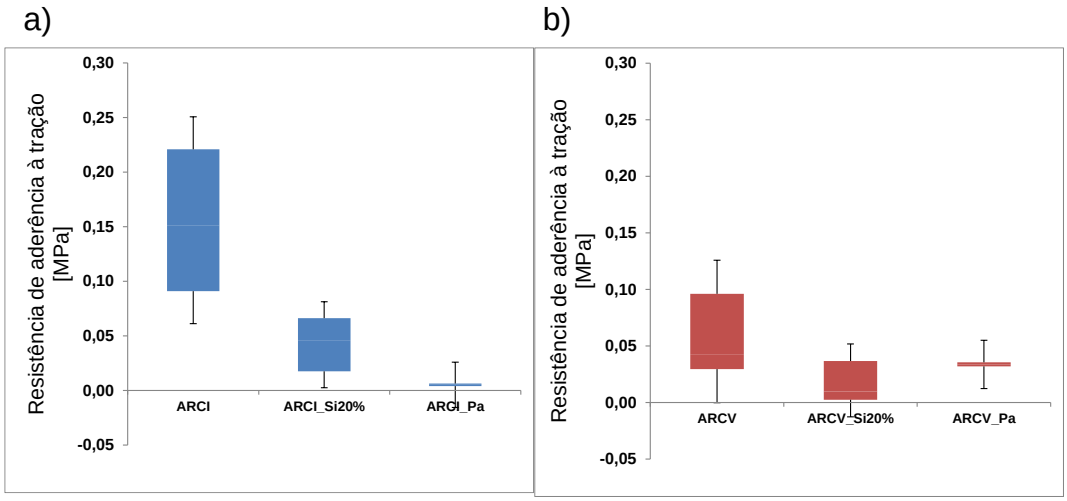


Figura 5-25 - Resistência de aderência à tração para superfícies de: ARCI, ARCI Si20% e ARCI_Pa (a); ARCV, ARCV Si20% e ARCV_Pa (b).

Os substratos utilizados nos ensaios de aderência à tração podem ser observados na Figura 5-26. Com exceção de ARCI, que rompeu na pasta de cimento, todos os outros ensaios foram não coesivos: romperam na interface entre o substrato e a pasta.

Para o agregado reciclado cimentício, foi possível estabelecer uma relação significante da resistência de aderência entre a pasta e o agregado com a resistência à tração das argamassas (Figura 5-27). Quanto maior a resistência à tração da argamassa, maior a aderência entre a pasta e a superfície do agregado (de natureza igual ao substrato testado).

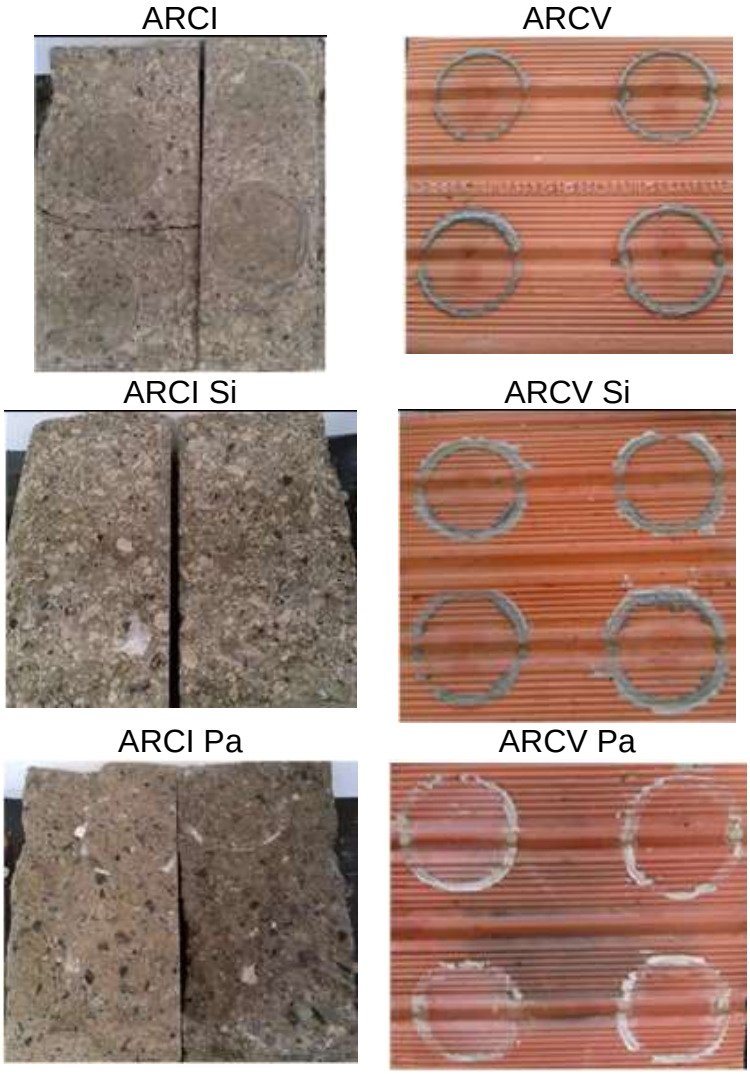


Figura 5-26 - Superfície dos substratos após ensaio de resistência de aderência à tração. Os substratos de ARCIs foram gerados a partir do ensaio de ruptura à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de concreto.

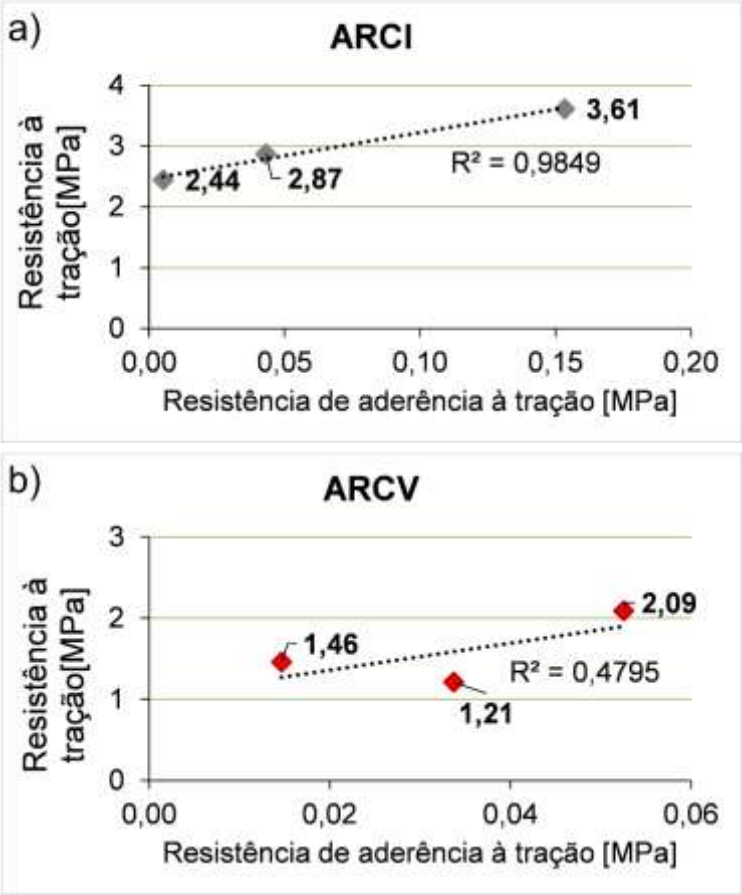


Figura 5-27 - Comparação entre resistência à tração (por compressão diametral) da argamassa e resistência de aderência à tração da pasta de cimento ao substrato (a) para ARCI, ARCI_Si, e ARCI_Pa e (b) ARCV, ARCV_Si e ARCV_Pa.

A perda de resistência mecânica associada aos tratamentos dos agregados pode ser atribuída à falta de aderência entre pasta e agregado causada pela interface criada com os tratamentos.

No caso do ARCV o tratamento afetou menos a resistência a tração porque a interface do agregado cerâmico é menos importante na ruptura da argamassa. No ARCV a ruptura é transgranular, independe da interface, porque os agregados reciclados cerâmicos possuem resistência reduzida.

5.7 Conclusões parciais

O estudo apresentou como ARCI e ARCV tratados com silano e parafina influenciaram nas características dos materiais cimentícios, no estado fresco e endurecido.

O teor de água demandado na argamassa foi reduzido, ocasionando em uma melhoria no comportamento reológico. No entanto, a maior parte de água não foi absorvida pelo agregado, ficando na pasta, ficando na pasta de cimento que ocasionou o aumento da porosidade da argamassa.

Os tratamentos criaram uma interface entre a pasta e o agregado, que levou à redução da resistência de aderência e, consequentemente, à redução da resistência a compressão e a tração. Não houve relação entre os parâmetros de resistência mecânica com a porosidade.

A falta de adesão foi causada pela alteração dos valores de ângulo de contato, confirmando a hidrofobicidade na superfície, consequentemente não houve molhabilidade nos dois tipos de tratamento. O excesso de parafina na superfície e a dificuldade de controlar o tamanho da espessura durante tratamento além do hidrofugante ser à base de óleo criaram uma zona fraca de interface entre pasta e agregado.

Em ARCI a queda de resistência se deve a ruptura intergranular, enquanto que em ARCV a ruptura foi transgranular, independente do tratamento. Os agregados reciclados cerâmicos possuem resistência reduzida. A interface teve menor influência nos agregados cerâmicos.

6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo caracterizar e analisar agregados reciclados (miúdo e graúdo) de RCD com o fim de observar eventuais melhorias por tratamentos superficiais. Foi estudado o efeito de tratamentos hidrofugantes (silano e parafina) aplicados em materiais de origem conhecida (resíduo de concreto e resíduo cerâmico) por meio de diferentes técnicas de aplicação.

Entre as técnicas de tratamento avaliadas (gotejamento, aspersão e imersão) foi escolhida a mais eficiente através de ensaios de ângulo de contato e absorção no tempo. O ângulo de contato mostrou que por todas as técnicas as partículas ficam hidrofóbicas (ângulos maiores que 90°) durante 10 minutos. Apesar dos tratamentos com parafina apresentaram hidrofobicidade, o ângulo de contato aparente foi menor que 90º.

No ensaio de absorção ao longo do tempo proposto, o tratamento por imersão se mostrou o mais eficiente (redução de 2% em ARCI 12% em ARCV) e, portanto, foi escolhido para tratar os agregados. O tratamento com parafina apresentou, em termos de absorção de agua, resultados inferiores e menos variáveis que o silano.

Em termos de rugosidade superficial foi constatado que, em ambos os materiais, o tratamento à base de emulsão de silano não modifica significativamente a superfície das partículas, porém elas perdem seu perfil topográfico original quando tratados com parafina, devido a formação de uma camada superficial lisa.

Na segunda etapa do estudo (avaliação do comportamento no estado fresco e endurecido) foi possível confirmar que os tratamentos reduziram a absorção e o consumo de água de mistura.

Os resultados obtidos, permitem concluir que os tratamentos promovem benefícios pequenos (redução do consumo de água) porem afeta negativamente as propriedades mecânicas.

O tratamento interferiu no contato entre agregado e pasta e gerou uma região superficial mais espessa e pouco resistente (no caso da parafina).

Considerando custos e impactos ambientais, os tratamentos são inviáveis: os gastos energéticos para a produção de silano são 11 vezes maiores do que para produzir parafina, além de emitir 50 vezes mais CO_2 que a produção de parafina e 300 vezes mais que os tratamentos térmicos, sendo, no caso do silano, também mais impactante que os processos de reciclagem convencionais.

6.1 Sugestões para futuras pesquisas

Como a interface afetou o desempenho mecânico uma sugestão seria tratar somente a fração graúda do agregado reciclado e testar técnicas de mistura alternativas, por exemplo*: double mixing* (misturar a pasta de cimento antes e adicionar o agregado reciclado tratado diretamente na pasta).

Constatando as deficiências do trabalho é sugerido testar parafina líquida, em emulsão, como tratamento superficial, existindo a possibilidade de penetrar os poros e não formar película superficial na interface das partículas ou alterar a molhabilidade da superfície. No entanto, como a parafina não contribui para a resistência, outra alternativa seria um produto hidrofílico, qual além de penetrar os poros (controlando a demanda de água) promova aderência do agregado reciclado à pasta, assim como viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5733. **Cimento Portland de alta resistência inicial**, 1991.

ABNT NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, 2007.

ABNT NBR 7222. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, 2011.

ABNT NBR 13278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**, 2005.

ABNT NBR 13528. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração**, 2010.

ABNT NBR NM 30. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**, 2001.

ABNT NBR NM 53. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**, 2009.

ABNT NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**, 2003.

ADAMSON, A. W. **Physical chemistry of surfaces**. [s.l.] Wiley, 1990.

AGRELA, F. et al. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3950–3955, 2011.

ALLEN, T. **Powder Sampling and Particle Size Determination**. [s.l.] Elsevier, 2003.

ALONSO, C.; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 9, p. 3015–3024, maio 2004.

ALSHIBLI, K. A.; ALSALEH, M. I. Characterizing Surface Roughness and Shape of Sands Using Digital Microscopy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 18, n. 1, p. 36–45, 2004.

ANGULO, S. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. et al. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. **Materials and Structures**, v. 43, n. 4, p. 519–528, 1 maio 2010.

ANGULO, S.; FIGUEIREDO, A. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2011. v. 2

ARKLES, B. Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silanes. In: Paint Coat Ind. [s.l: s.n.]. v. 22p. 114–124.

ASTM C597. **Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**, 2009.

BAETENS, R.; JELLE, B.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. n. Energy and Buildings 42: 1361–1368, 2010.

BARBOSA, W. S. **Alteração do Comportamento Reológico da suspensão Cimentícia Aplicada sobre substratos Porosos**. Dissertação (Mestrado)— São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

BARNES, G.; GENTLE, I. **Interfacial Science: An Introduction**. [s.l.] OUP Oxford, 2011.

BELIN, P. et al. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. **Materials and Structures**, v. 47, n. 9, p. 1451–1465, 1 set. 2014.

BLENGINI, G. A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. **Building and Environment**, v. 44, n. 2, p. 319–330, Fevereiro 2009.

BLOTT, S. J.; PYE, K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. **Sedimentology**, v. 55, n. 1, p. 31–63, 1 fev. 2008.

BORMASHENKO, E. Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces. **Advances in Colloid and Interface Science**, Reinhard Miller, Honorary Issue. v. 222, p. 92–103, ago. 2015.

BRACCO, G.; HOLST, B. (EDS.). **Surface Science Techniques**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 51

BRITO, J. DE; SAIKIA, N. **Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. London: Springer Science, 2013.

BRITO, J. D.; GONÇALVES, P. Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 5, p. 339–346, 5 jan. 2010.

BRUKER. **Large-Sample, Non-Contact Measurement & Analysis. Products. NPFLEXBruker**, 2015. Disponível em: <https://www.bruker.com/products/surface-analysis/3d-industrial-optical-microscopy/npflex/overview.html>

BRUNDLE, C. R.; EVANS, C. A.; WILSON, S. **Encyclopedia of Materials Characterization: Surfaces, Interfaces, Thin Films**. [s.l.] Gulf Professional Publishing, 1992.

BS 8500-1. **Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Method of specifying and guidance for the specifie**, 2006.

CABEZA, L. F. et al. Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes. **Contributions to Science**, v. 3, n. 4, p. 501–510, 2007a.

CABEZA, L. F. et al. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 2, p. 113–119, fev. 2007b.

CARNEIRO ET AL. **Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado**. ANTAC. **Anais**... In: VIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUIDO. Salvador - BA: 2000

CASSIE, A. B. D.; BAXTER, S. Wettability of porous surfaces. **Transactions of the Faraday Society**, v. 40, p. 546–551, 1944.

CASTELLÓN, C. et al. Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels. **Renewable Energy**, v. 35, n. 10, p. 2370–2374, out. 2010.

CERVO, T. C. et al. Influence of curing procedures and porosity in the flexural resistance of concretes for paving. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, p. 391–395, dez. 2010.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307. . 2002.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução nº 348. . 2004.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução nº 431. . 2011.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 448. . 2012.

DJERBI TEGGUER, A. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 112–116, 2012.

DORSET, D. L. Chain length and the cosolubility of n-paraffins in the solid state. **Macromolecules**, v. 23, n. 2, p. 623–633, 1 jan. 1990.

EUROPEAN COMMISSION. **CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE MANAGEMENT PRACTICES, AND THEIR ECONOMIC IMPACTS**Symonds Group Ltd, , 1999. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter7-10.pdf>

EXTRAND, C. W. Work of Wetting Associated with the Spreading of Sessile Drops. In: **Contact Angle, Wettability and Adhesion, Volume 6**. [s.l.] CRC Press, 2009. p. 81–93.

FRANÇA, M. **Comportamento de mistura de sistemas cimentícios multifásicos reativos**. Dissertação (Mestrado)—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

GELEST. **Silane Coupling Agents: Connecting Across Boundaries**Gelest. Inc. (Catalog), , 2006.

GENNES, P.-G. DE; BROCHARD-WYART, F.; QUERE, D. **Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2004.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 255–259, 2005.

HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. **Materials and Structures**, v. 19, n. 3, p. 201–246, 1 maio 1986.

HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. [s.l.] Taylor & Francis, 1992.

HAWLITSCHEK, G. **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS E A INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ARGAMASSAS**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

HIMRAN, S.; SUWONO, A.; MANSOORI, G. A. Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium. **Energy Sources**, v. 16, n. 1, p. 117–128, 1 jan. 1994.

HIROX. **Hirox Co Ltd. Products. Digital Microscope KH-7700. Specification.** Disponível em: <http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700_05.html>. Acesso em: 31 ago. 2015.

ISO 4287. **Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters**, 1997.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.

KASAI, Y. Development and Subjects of Recycled Aggregate Concrete in Japan. **Key Engineering Materials**, v. 302-303, p. 288–300, 2006.

KISSA, E. **Fluorinated Surfactants and Repellents, Second Edition,**. [s.l.] CRC Press, 2001.

KLEIN, N. S. et al. Evaluation of the wettability of mortar component granular materials through contact angle measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1611–1620, Dezembro 2012.

KOLASINSKI, K. W. **Surface Science: Foundations of Catalysis and Nanoscience**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

KOLESKE, J.; SPRINGATE, R.; BREZINSKI, D. The Use of Wax Emusions in Coatings and Inks. **Paint and Coatings Industry**, abr. 2015.

KREIGER, M. A.; SHONNARD, D. R.; PEARCE, J. M. Life cycle analysis of silane recycling in amorphous silicon-based solar photovoltaic manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 70, p. 44–49, jan. 2013.

LARBI, J. A. et al. Preliminary laboratory investigation of thermally treated recycled concrete aggregate for general use in concrete. In: G.R. WOOLLEY, J. J. J. M. G. AND P. J. W. (Ed.). . **Waste Management Series**. Waste Materials in Construction Wascon 2000Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1–2 June 2000. [s.l.] Elsevier, 2000. v. 1p. 129–139.

LAWRENCE RADIATION LABORATORY. **Treating concrete surfaces with paraffin**. [s.l.] Berkeley, CA : University of California Radiation Laboratory, 1955.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38–48, mar. 2016.

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009.

LING, T.-C.; POON, C.-S. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 55–62, set. 2013.

LIST, J.; KOHLKER, U.; WITT, W. **Inovations in Dynamic Image Analysis: down to 1 µm In: World Congress on Particle Technology (WCPT6)**. . In: PROEEDINGS. Nuremberg, Germany: Nuremberg, Germany:SPE, 2010

MARANHÃO, F. **MÉTODO PARA REDUÇÃO DE MANCHA NAS VEDAÇÕES EXTERNAS DE EDIFÍCIOS**. Doutorado—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

MARMUR, A. A Guide to the Equilibrium Contact Angles Maze. In: **Contact Angle, Wettability and Adhesion, Volume 6**. [s.l.] CRC Press, 2009. p. 3–18.

MEDEIROS, M.; GOMES, T.; HELENE, P. Hidrofugantes de superfície: Estudo da capacidade de barrar o ingresso de água. v. Teoria e prática na engenharia civil, p. 8, 2006.

MEDEIROS, M.; HELENE, P. R. DO L. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. **Materials and Structures**, v. 41, n. 1, p. 59–71, 2008.

METSO. Nordberg NP Series impact crushers. n. Mining and Construction (Catalog), 2005.

METSO. Nordberg C Series jaw cushers. n. Mining and Construction (Catalog), 2013.

METSO. Nordberg NP Series impact crushers. n. Mining and Construction (Catalog), 2015.

MING, W. et al. Toward Superlyophobic Surfaces. In: **Contact Angle, Wettability and Adhesion, Volume 6**. [s.l.] CRC Press, 2009. p. 191–205.

MITTAL, K.; PIZZI, A. **Handbook of Sealant Technology**. [s.l.] CRC Press, 2009.

MÓZES, G. **Paraffin Products**. [s.l.] Elsevier, 1983.

MULDER, E.; JONG, T. P. R.; FEENSTRA, L. Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1408–1415, 2007.

NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 965–971, jun. 2004.

NASCIMENTO, A. E. G. et al. Wettability of paraffin surfaces by nonionic surfactants: Evaluation of surface roughness and nonylphenol ethoxylation degree. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 2014.

NEWTON, I. **Opticks : or, A treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light**. . Acesso em: 24 abr. 2015.

OLIVEIRA, I. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas- Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. 18ª ed ed. [s.l.] Fazendo Arte, 2000.

OLIVEIRA, M. et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Generation and composition diagnosis of C&D waste of Fortaleza/CE**, p. 6, 2010.

OLIVEIRA, M.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**, Bulk Inert Waste: an Opportunity for Use. v. 16, n. 1–3, p. 113–117, 1996.

OLYMPUS. **OLYMPUS CORPORATION. Optical Metrology.Roughness (3D) parameter.**, 2015. Disponível em: <http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/>

ONDA, T. et al. Super-Water-Repellent Fractal Surfaces. **Langmuir**, v. 12, n. 9, p. 2125–2127, 1 jan. 1996.

OR, D.; TULLER, M. CAPILLARITY. In: HILLEL, D. (Ed.). . **Encyclopedia of Soils in the Environment**. Oxford: Elsevier, 2005. p. 155–164.

PACHECO-TORGAL, F. et al. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 1. ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013a.

PACHECO-TORGAL, F. et al. **Eco-Efficient Concrete**. 1. ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013b.

PETERSEN, L.; MINKKINEN, P.; ESBENSEN, K. H. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 77, n. 1–2, p. 261–277, 28 maio 2005.

PICKOVER, C. **Archimedes to Hawking: Laws of Science and the Great Minds Behind Them**. [s.l.] Oxford University Press, 2008.

PILEGGI, R.; CARDOSO, F.; ROMANO, R. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2011. v. 1

PINTO, T. P. P. **Utilização de Resíduos de Construção: estudo do uso em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos—São Carlos: Universidade de São Paulo, 1986.

PLUEDDEMANN, E. **Silane Coupling Agents**. 2nd. ed. New York: Springer, 1991.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31–36, 2004.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 40, n. 9, p. 981–988, 2007.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461–468, jul. 2004.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S.; JOHN, V. M. Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation and Recycling**, p. 21–33, set. 2014.

QUÉRÉ, D. Wetting and Roughness. The Annual Review of Materials Research. p. 32, 2008.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707–712, maio 2001.

SATO, N.; AGOPYAN, V. ANÁLISE DA POROSIDADE E DE PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE MASSA EM CONCRETOS. 1998.

SCHMIT, J. **An Introduction to non-contact metrology**, 2013. Disponível em: <https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/3D-OpticalMicroscopy/Webinars/An_introduction_to_non-contact_surface_metrology-Jun_2013.pdf>

SHIBUICHI, S. et al. Super Water- and Oil-Repellent Surfaces Resulting from Fractal Structure. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 208, n. 1, p. 287–294, 1 dez. 1998.

SHIMA, H. et al. An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 1, p. 53–67, 2005.

SHIRTCLIFFE, N. J. et al. Superhydrophobic to superhydrophilic transitions of sol-gel films for temperature, alcohol or surfactant measurement. **Materials Chemistry and Physics**, v. 103, n. 1, p. 112–117, 2007.

SPAETH, V.; DJERBI TEGGUER, A. Polymer based treatments applied on recycled concrete aggregates. **Advanced Material Research**, Advanced Materials Research. v. 687, p. 514–519, 2013a.

SPAETH, V.; DJERBI TEGGUER, A. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 2, n. 2, p. 143–152, dez. 2013b.

SYMPATEC MANUAL, P. T. **Particle Size and Shape Calculation by Image Analysis - Fundamentals**, 2014. Disponível em: <https://www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/QICPIC.html>. Acesso em: 28 ago. 2014

TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T.; TAMURA, M. The way concrete recycling should be. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 1, p. 3–16, 2005.

TORKITTIKUL, P.; CHAIPANICH, A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 6, p. 440–449, jul. 2010.

TUFVESSON, L. M.; BÖRJESSON, P. Wax production from renewable feedstock using biocatalysts instead of fossil feedstock and conventional methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 4, p. 328–338, 2008.

TURNER, W. R.; BROWN, D. S.; HARRISON, D. V. Properties of Paraffin Waxes. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 47, n. 6, p. 1219–1226, 1955.

ULSEN, C. **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

ULSEN, C. **CARACTERIZAÇÃO E SEPARABILIDADE DE AGREGADOS MIÚDOS PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

ULSEN, C. et al. **Production of recycled sand from construction and demolition waste**. 2012.

ULSEN, C. et al. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168–1173, mar. 2013.

VALIPOUR; BIRJANDI; SARGOLZAEI. Super-non-wettable surfaces: A review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 448, p. 93–106, 2014.

VAN BRAKEL, J.; MODRÝ, S.; SVATÁ, M. Mercury porosimetry: state of the art. **Powder Technology**, v. 29, n. 1, p. 1–12, 1 maio 1981.

VENKATESWARA RAO, A.; HEGDE, N. D.; HIRASHIMA, H. Absorption and desorption of organic liquids in elastic superhydrophobic silica aerogels. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 305, n. 1, p. 124–132, 1 jan. 2007.

VIEIRA, J. P. B.; CORREIA, J. R.; BRITO, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 5, p. 533–541, maio 2011.

WASHBURN, E. W. Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 7, n. 4, p. 115–116, abr. 1921.

WEBB, P. Volume and Density Determinations for Particle Technologists. Micromeritics Instrument Corp. 2001a.

WEBB, P. An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data. n. Micromeritics Instrument Corp., p. 23, jan. 2001b.

WENZEL, R. N. RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER. Industrial & Engineering Chemistry. 1936.

WHYMAN, G.; BORMASHENKO, E.; STEIN, T. The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon. **Chemical Physics Letters**, v. 450, n. 4–6, p. 355–359, 4 jan. 2008.

YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact Angle and Wetting Properties. In: BRACCO, G.; HOLST, B. (Eds.). . **Surface Science Techniques**. Springer Series in Surface Sciences. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 3–34.

ZALBA, B. et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n. 3, p. 251–283, 2003.

ZECCHINO, M. **Characterizing Surface Quality: Why Average Roughness is Not Enough**. . Acesso em: 7 out. 2015.

ZHU, Y.-G. et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 32–38, jan. 2013.

A. ANEXO A - CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROFUGANTES

1 Espectro no infravermelho e ph

1.1 Emulsão de silano IE6683

O espectro no infravermelho indica que o material é octiltrietoxisilano. O espectro pode ser observado na Figura A 1 e em Figura A 2. No espectro, foram observadas as seguintes bandas de comprimento de onda:

- 2964-2956 cm^{-1} - Deformação axial assimétrica de CH2 e CH3;
- 2932-2924 cm^{-1} - Deformação axial simétrica de CH2;
- 1472-1376 cm^{-1} - Estiramento dos grupos CH2 e CH3;
- 1300-900 cm^{-1} - Deformação axial de C – O;
- 1280-814 cm^{-1} - Bandas intensas atribuídas a Si – O;
- 580-800 cm^{-1} - Vibrações axiais de C – C.

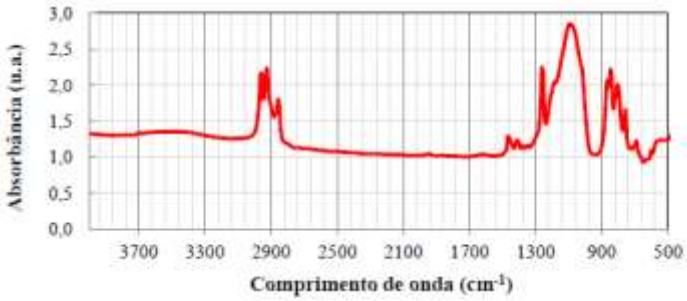


Figura A 1 Espectro no infravermelho do octiltrietoxisilano

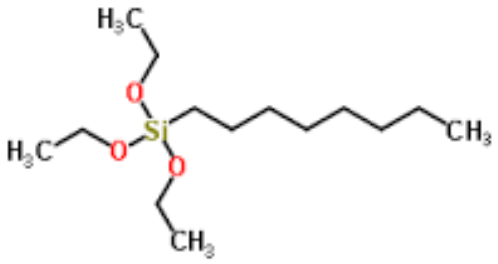


Figura A 2 - Fórmula estrutural do octiltrietoxisilano

1.2 Emulsão de silano IE6694

O espectro no infravermelho indica que o material é também octiltrietoxisilano e como solvente álcool laurílico etoxilado. No espectro (Figura A 3), foram observadas as seguintes bandas de comprimento de onda para o octiltrietoxisilano:

- 2964-2956 cm^{-1} - Deformação axial assimétrica de CH2 e CH3;
- 2932-2924 cm^{-1} - Deformação axial simétrica de CH2;
- 1472-1376 cm^{-1} - Estiramento dos grupos CH2 e CH3;
- 1300-900 cm^{-1} - Deformação axial de C – O;
- 1280-814 cm^{-1} - Bandas intensas atribuídas a Si – O;
- 800-580 cm^{-1} - Vibrações axiais de C – C.

E para o solvente álcool laurílico etoxilado:

- 3500-3300 cm^{-1} - Estiramento de ligações O-H;
- 1400-1260 cm^{-1} - Ligações O-H do plano de curvatura;
- 1205-1125 cm^{-1} - Estiramento de C-O terciário;
- 1125-1085 cm^{-1} - Estiramento de C-O secundário;
- 1085-1030 cm^{-1} - Estiramento de C-O primário;
- 700-600 cm^{-1} - Ligações O-H fora do plano de curvatura.

Figura A 3 - Espectro no infravermelho do octiltrietoxisilano com álcool laurílico etoxilado.

1.3 Parafina

O espectro no infravermelho indica que o material é triacontano. Alguns dados são apresentados na Tabela A-1.

Tabela A 1- Dados do composto triacontano.

Composto	Ponto de fusão	Ponto de ebulição	Densidade a 20°C	Pureza	PH
n-triacontano	66°C	304°C	0,81	99%	8 a 10

Fonte:(DORSET, 1990; MÓZES, 1983)

Na Figura A 4 é apresentado seu infravermelho e sua fórmula molecular $C_{30}H_{62}$ é apresentada na Figura A 5. No espectro, foram observadas as seguintes bandas de comprimento de onda:

3000 - 2800 cm^{-1} - Vibrações de estiramento de C-H;
2927 cm^{-1} - Estiramento axial assimétrico dos grupos C-H (CH_3);
2852 cm^{-1} - Estiramento axial simétrico dos grupos C-H (CH_2);
1463 cm^{-1} - Estiramento angular de hidrocarbonetos simétricos de C-H;
1460 - 1380 cm^{-1} - Deformações axiais C-H e CH_3;
730 - 720 cm^{-1} – Vibrações de estiramento de CH_2.

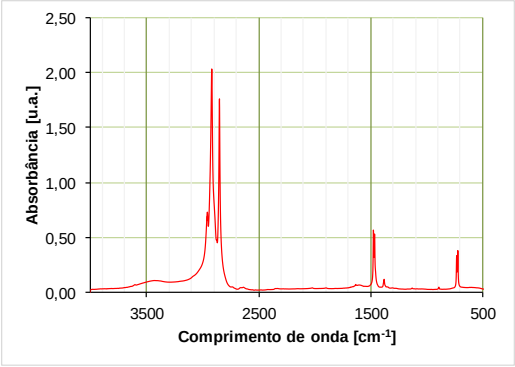


Figura A 4 - Espectro no infravermelho do triacontano

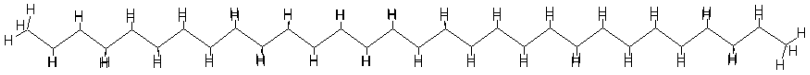


Figura A 5 - Fórmula estrutural do triacontano

2 Viscosidade

A comparação da viscosidade dos hidrofugantes com a da água pode ser observada no gráfico da Figura A 6.

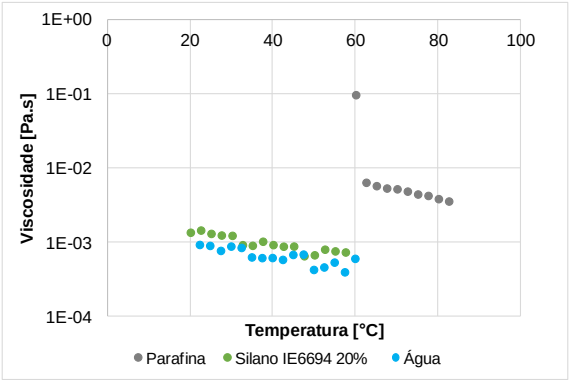


Figura A 6- Viscosidade dinâmica dos hidrofugantes parafina e silano IE6694 (com teor de 20% em emulsão) comparados à água.

As três medidas exibem viscosidade linear e à medida que a temperatura aumenta a viscosidade diminui. Como a emulsão de silano foi medida com 80% de água, sua viscosidade é próxima à da água, o que facilita sua penetração nos poros. À 25° a emulsão de silano apresenta viscosidade igual a 0,0013 Pa.s, enquanto a água apresenta 0,0009 Pa.s. A parafina apresenta viscosidade um

pouco maior e em temperaturas mais altas, pois só foi possível medir sua viscosidade após atingir temperatura de fusão. À 60 °C a parafina teve viscosidade de 0,0974 Pa.s. Os valores altos de viscosidade dificultam a entrada do hidrofugante nos poros do substrato, pois quanto menor a viscosidade, maior a ascensão capilar.

B. ANEXO B - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DE RCD

1 Distribuição de tamanho e forma das partículas

É possível observar na Figura B 1 as curvas de (a) distribuição granulométrica e (b) análise morfológica (medida em triplicata) de ARCV e ARCI antes e após o tratamento por gotejamento.

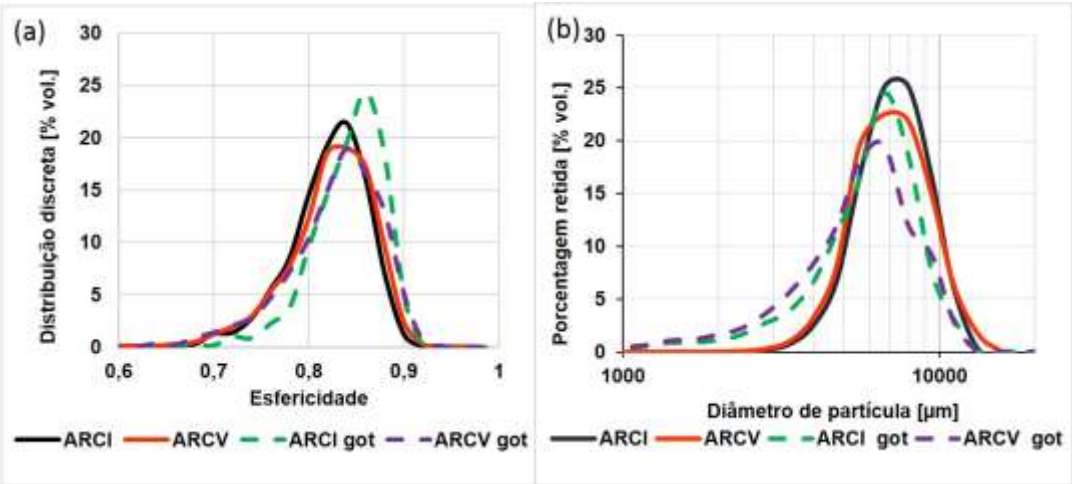


Figura B 1- Distribuição granulométrica dos materiais (a) e análise morfológica (b) antes dos tratamentos e após tratamento de gotejamento

2 Análise de rugosidade superficial por interferometria óptica

Os valores de máximo, mínimo, média e desvio padrão das leituras realizadas em cada partícula geradas pelo software Vision 64 podem ser observadas na Tabela B1.

Tabela B 1- Rugosidade superficial e índice de superfície s agregados reciclados e natural obtidos por interferometria óptica.

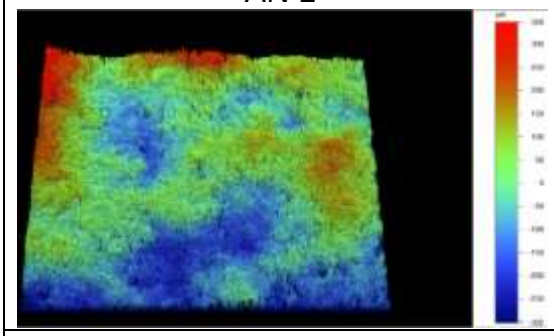
Amostra	Raiz quadrada media da rugosidade - Sq (µm)				Índice de superfície			
	Média	Max	Min	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão	Max	Min
AN_1	66,86	87,18	49,49	15,48	1,51	1,62	1,45	0,08
AN_2	159,16	227,84	73,43	67,90	2,11	2,25	1,99	0,11
AN_3	112,15	152,22	65,18	39,82	1,65	1,77	1,60	0,08
AN_4	82,27	115,28	68,90	22,26	1,68	1,77	1,56	0,10
AN_5	126,47	163,15	84,24	32,43	1,91	2,01	1,82	0,08
AN_6	77,69	100,42	61,48	18,50	1,80	1,87	1,71	0,07

AN_7	73,44	125,36	38,45	37,28	1,54	1,66	1,44	0,09
AN_8	81,32	125,39	39,79	37,26	1,43	1,50	1,40	0,05
AN_9	94,95	147,17	56,13	42,55	1,92	1,97	1,87	0,04
AN_10	89,02	105,14	78,03	11,47	1,64	1,71	1,53	0,08
ARCI_1	166,51	238,23	132,22	48,52	1,87	2,03	1,71	0,15
ARCI_2	75,99	92,23	58,32	14,62	1,57	1,63	1,46	0,07
ARCI_3	136,42	273,45	87,62	91,45	1,82	2,03	1,71	0,15
ARCI_4	84,03	104,11	57,57	20,00	1,57	1,71	1,50	0,10
ARCI_5	137,74	172,96	94,17	35,03	1,87	2,01	1,78	0,10
ARCI_6	161,91	264,11	118,95	68,53	1,93	2,17	1,78	0,17
ARCI_7	88,51	101,50	71,85	13,80	1,53	1,56	1,49	0,03
ARCI_8	99,65	133,11	83,87	23,01	1,59	1,61	1,54	0,03
ARCI_9	72,34	77,53	62,73	6,60	1,49	1,51	1,45	0,03
ARCI_10	75,51	91,04	55,23	15,46	1,54	1,59	1,49	0,05
ARCI Si_1	113,19	126,58	91,31	16,02	1,80	1,86	1,74	0,05
ARCI Si_2	49,82	53,82	46,88	2,98	1,38	1,44	1,34	0,05
ARCI Si_3	96,49	102,89	89,05	6,29	1,51	1,56	1,47	0,04
ARCI Si_4	73,28	81,81	59,08	10,30	1,42	1,51	1,31	0,10
ARCI Si_5	124,97	150,60	91,51	25,27	1,58	1,66	1,47	0,08
ARCI Si_6	100,96	145,18	71,42	33,19	1,55	1,68	1,40	0,12
ARCI Si_7	67,03	101,33	41,10	27,28	1,60	2,00	1,40	0,27
ARCI Si_8	85,17	99,15	72,60	12,52	1,91	2,20	1,74	0,21
ARCI Si_9	90,87	103,99	63,98	18,29	1,76	1,84	1,67	0,07
ARCI Si_10	125,60	150,40	115,16	16,64	1,90	2,13	1,77	0,16
ARCI Pa_1	57,82	73,81	43,46	12,45	1,18	1,19	1,16	0,01
ARCI Pa_2	79,24	135,95	48,44	40,78	1,20	1,22	1,16	0,03
ARCI Pa_3	98,29	131,13	72,11	24,46	1,27	1,32	1,23	0,05
ARCI Pa_4	61,06	97,11	41,41	24,65	1,14	1,14	1,12	0,01
ARCI Pa_5	105,41	138,43	81,08	23,98	1,25	1,28	1,23	0,02
ARCI Pa_6	109,15	226,64	57,05	79,07	1,23	1,26	1,20	0,02
ARCI Pa_7	35,49	79,57	17,38	29,51	1,22	1,24	1,19	0,02
ARCI Pa_8	5,09	5,81	4,55	0,53	1,20	1,21	1,18	0,01
ARCI Pa_9	32,96	45,12	27,60	8,16	1,33	1,52	1,22	0,13
ARCI Pa_10	39,76	51,89	28,23	11,51	1,29	1,32	1,26	0,02
ARCV_1	72,40	85,74	61,04	11,18	1,55	1,59	1,51	0,04
ARCV _2	37,57	42,81	31,60	5,33	1,63	1,66	1,60	0,03
ARCV _3	80,72	115,06	43,37	38,56	1,48	1,64	1,36	0,12
ARCV _4	45,73	58,23	32,03	13,40	1,43	1,53	1,34	0,08
ARCV _5	59,19	82,69	40,99	18,13	1,45	1,47	1,43	0,02
ARCV _6	75,35	108,69	39,74	31,99	1,53	1,62	1,43	0,08
ARCV _7	86,40	117,67	65,64	22,35	1,57	1,63	1,51	0,06
ARCV _8	41,16	52,12	30,64	8,93	1,57	1,59	1,52	0,04
ARCV _9	52,54	56,78	44,03	5,82	1,39	1,42	1,36	0,03

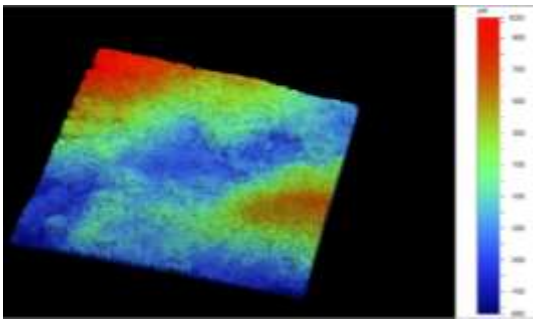
ARCV _10	51,28	71,70	29,12	21,20	1,50	1,56	1,43	0,06
ARCV Si_1	57,90	99,04	35,41	29,78	1,70	1,78	1,67	0,05
ARCV Si_2	39,26	51,35	28,34	9,92	1,63	1,68	1,58	0,04
ARCV Si_3	12,11	21,75	7,68	6,55	1,50	1,57	1,43	0,06
ARCV Si_4	59,17	97,28	43,56	25,67	1,63	1,67	1,61	0,03
ARCV Si_5	6,16	6,94	5,32	0,71	1,40	1,42	1,37	0,02
ARCV Si_6	34,04	45,48	27,08	8,34	1,54	1,64	1,48	0,07
ARCV Si_7	10,43	14,26	7,28	3,30	1,51	1,57	1,41	0,07
ARCV Si_8	62,07	81,36	33,90	20,71	1,64	1,70	1,59	0,05
ARCV Si_9	48,17	56,25	37,13	8,26	1,66	1,68	1,63	0,02
ARCV Si_10	9,31	15,55	5,79	4,31	1,38	1,43	1,35	0,04
ARCV Pa_1	34,02	46,03	22,17	9,89	1,12	1,13	1,11	0,01
ARCV Pa_2	41,33	50,12	28,37	9,21	1,12	1,15	1,10	0,02
ARCV Pa_3	110,02	200,84	62,30	62,08	1,17	1,22	1,13	0,04
ARCV Pa_4	21,74	53,16	4,51	21,52	1,18	1,21	1,16	0,02
ARCV Pa_5	5,55	5,92	5,12	0,39	1,18	1,21	1,16	0,02
ARCV Pa_6	26,69	29,04	22,93	2,89	1,22	1,27	1,16	0,04
ARCV Pa_7	57,51	98,47	37,32	28,23	1,21	1,24	1,14	0,05
ARCV Pa_8	5,10	5,81	4,55	0,53	1,20	1,21	1,18	0,01
ARCV Pa_9	32,97	45,17	27,60	8,19	1,33	1,52	1,22	0,13
ARCV Pa_10	39,69	51,76	28,15	11,50	1,29	1,32	1,27	0,02

As exibições tridimensionais das leituras realizadas em cada partícula geradas pelo software Vision 64 podem ser observadas na Figura B 2.

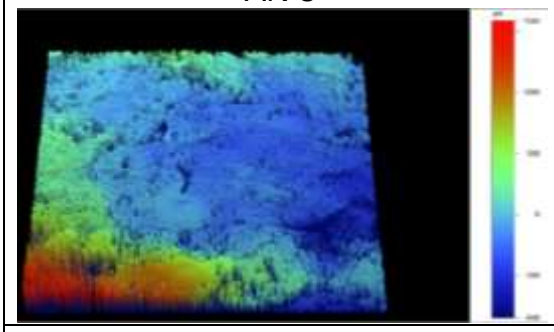
AN 1



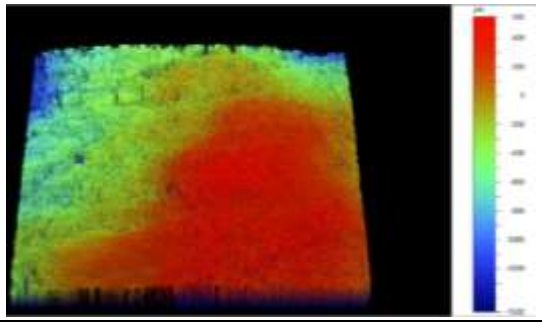
AN 2



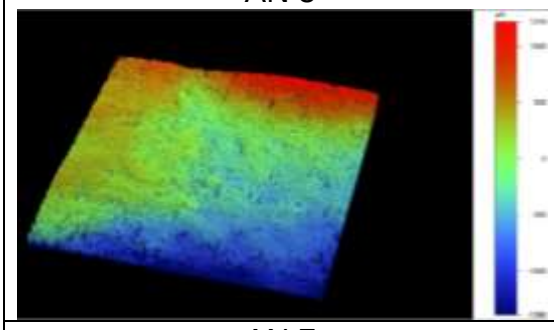
AN 3



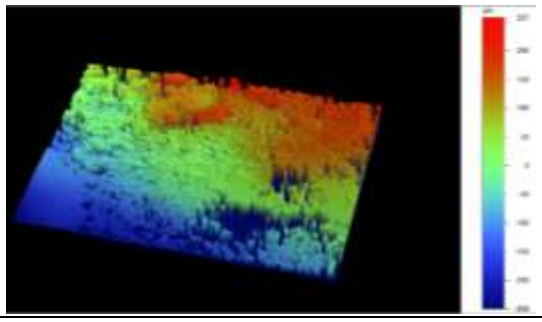
AN 4



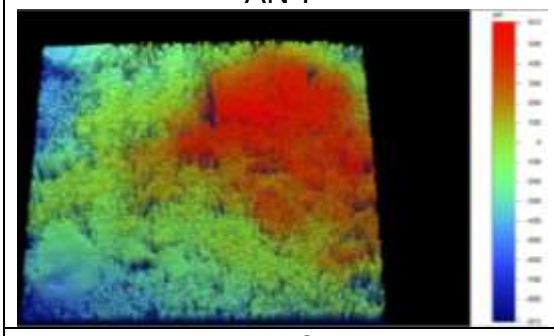
AN 5



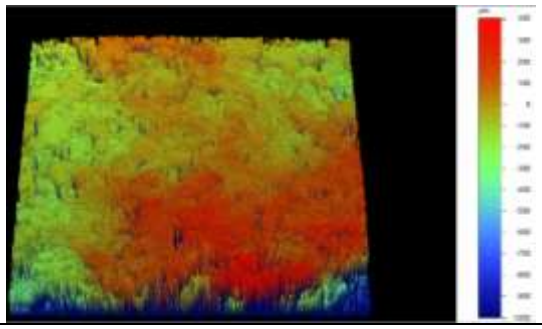
AN 6



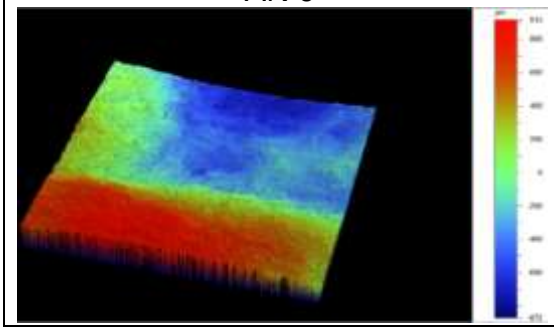
AN 7



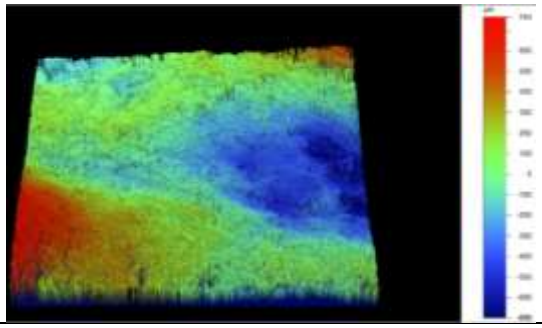
AN 8



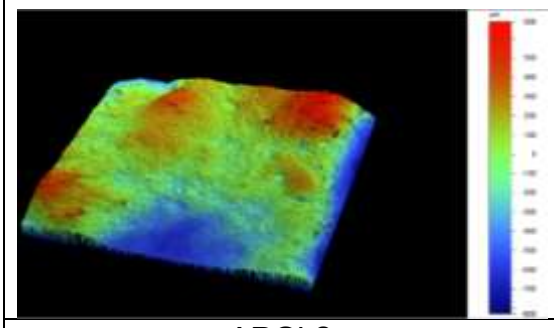
AN 9



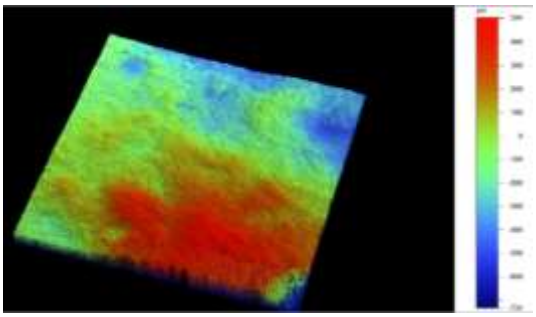
NA 10



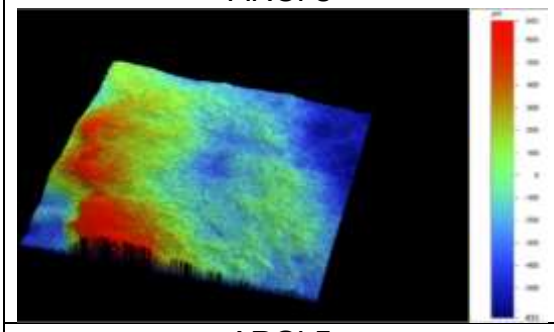
ARCI 1



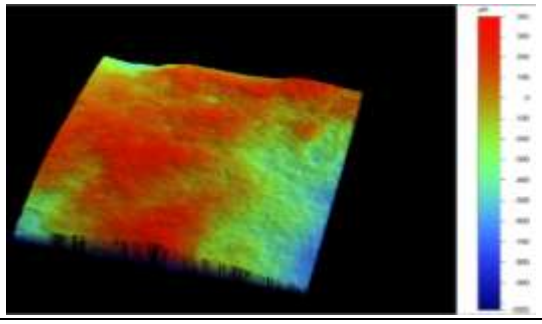
ARCI 2



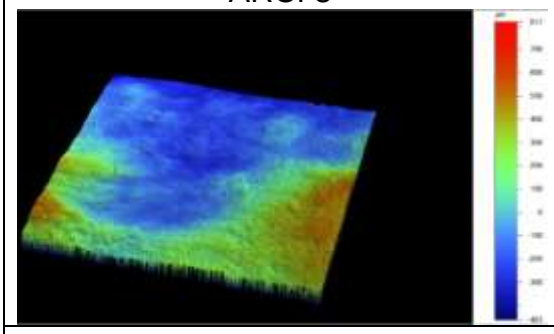
ARCI 3



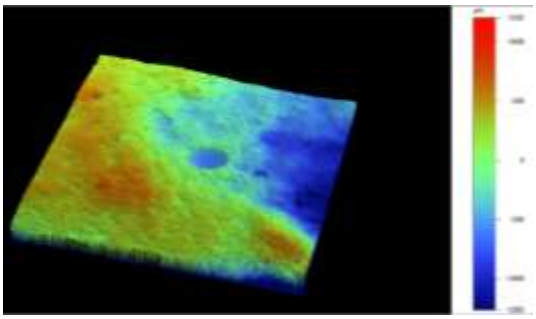
ARCI 4



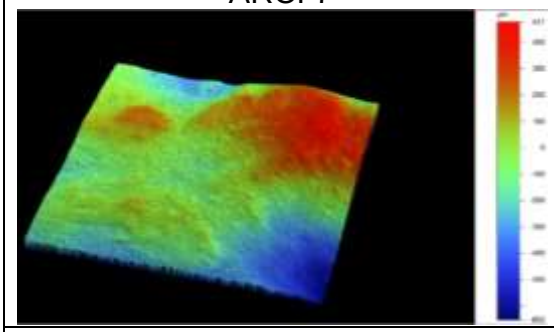
ARCI 5



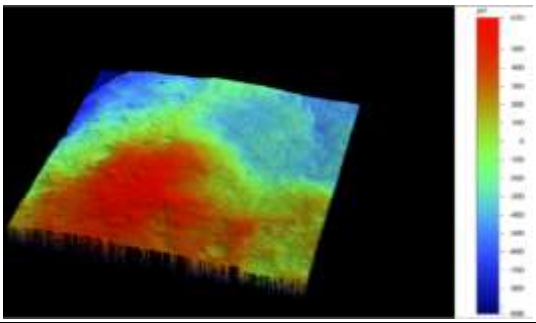
ARCI 6



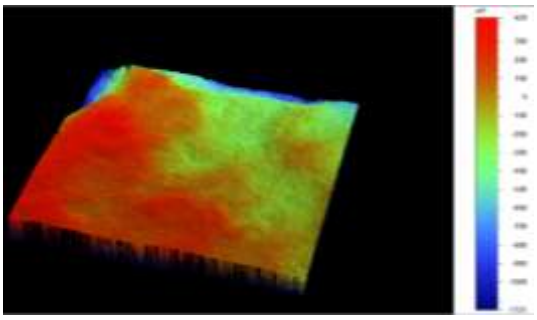
ARCI 7



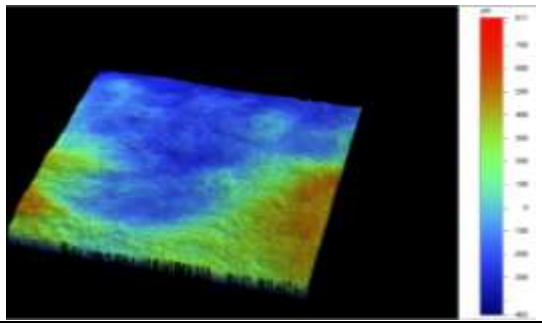
ARCI 8



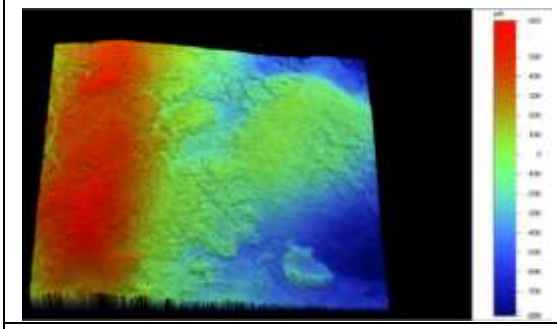
ARCI 9



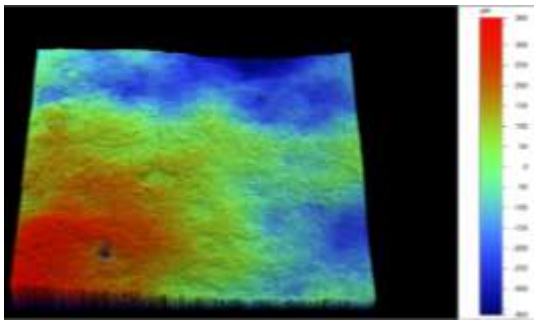
ARCI 10



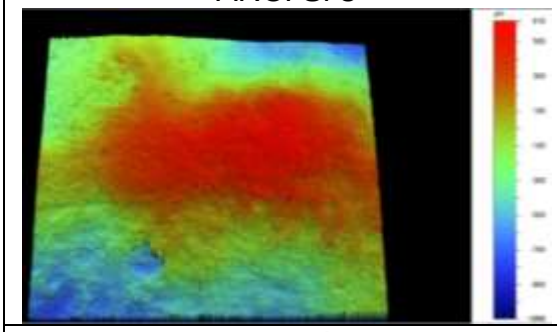
ARCI Si 1



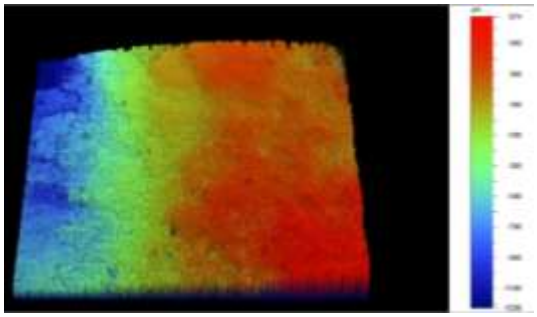
ARCI Si 2



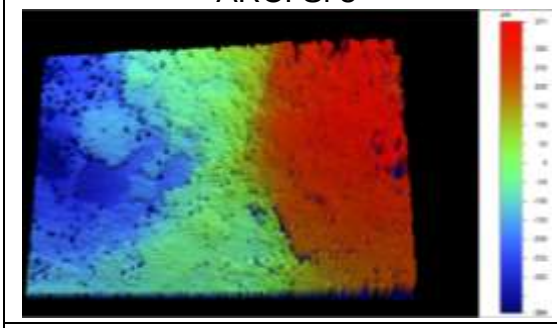
ARCI Si 3



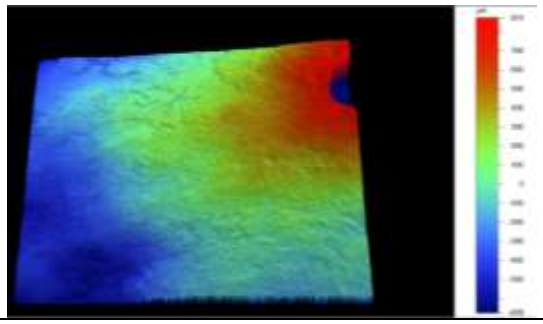
ARCI Si 4



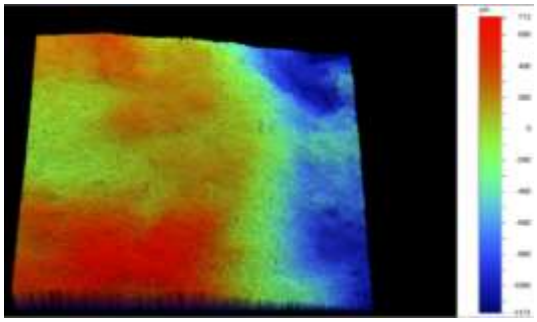
ARCI Si 5



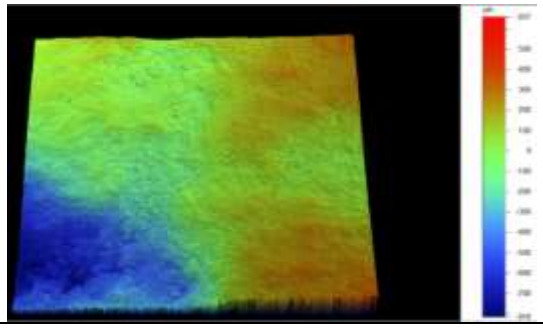
ARCI Si 6



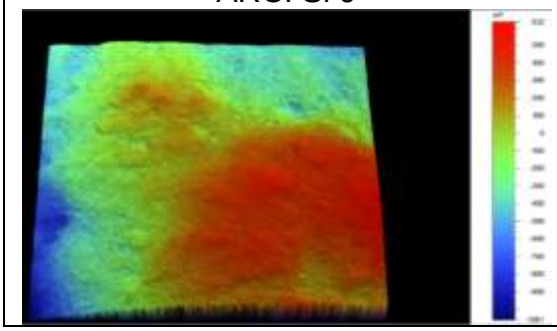
ARCI Si 7



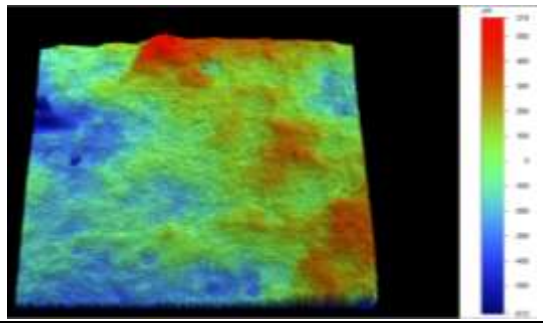
ARCI Si 8



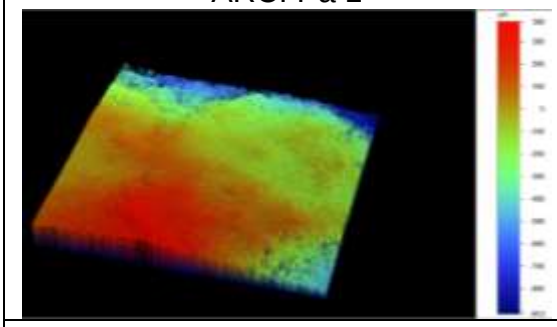
ARCI Si 9



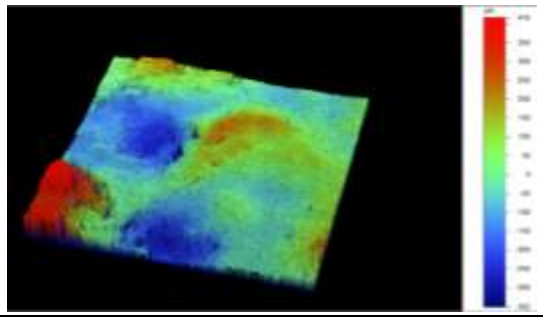
ARCI Si 10



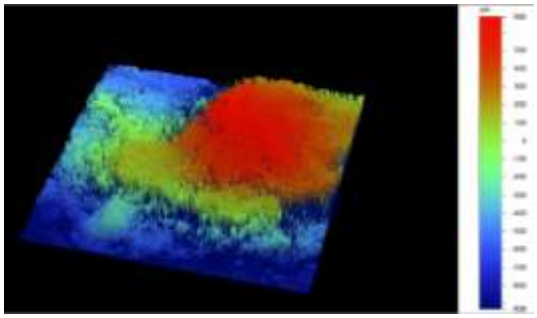
ARCI Pa 1



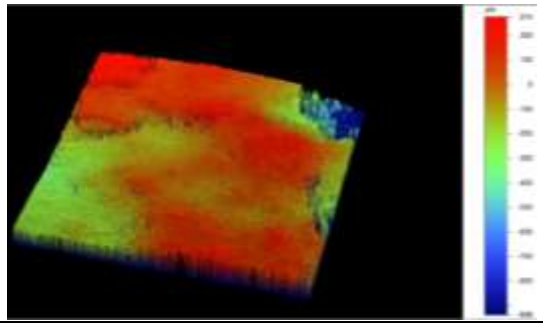
ARCI Pa 2



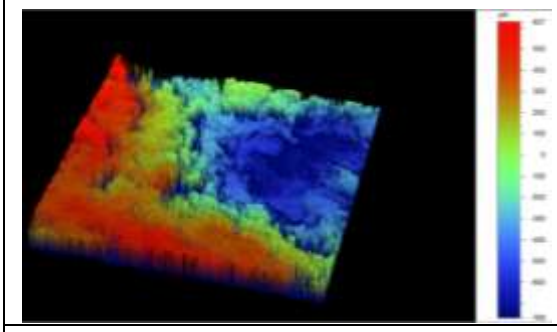
ARCI Pa 3



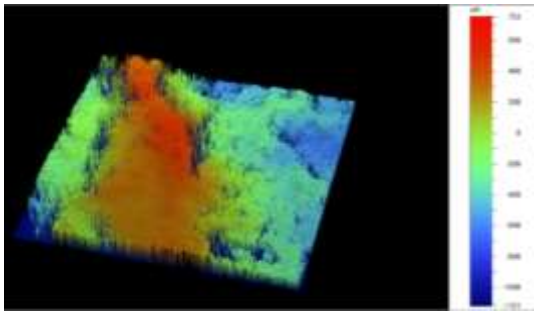
ARCI Pa 4



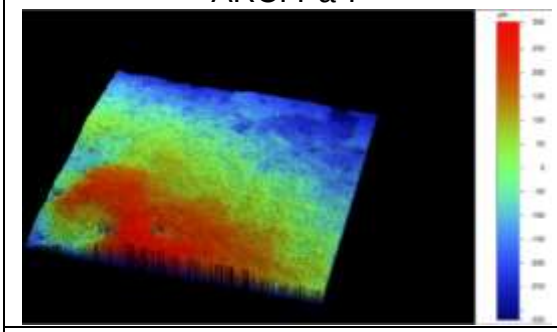
ARCI Pa 5



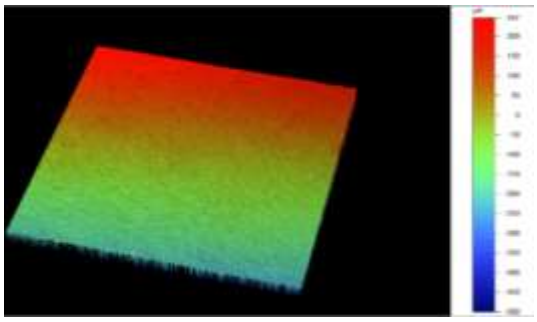
ARCI Pa 6



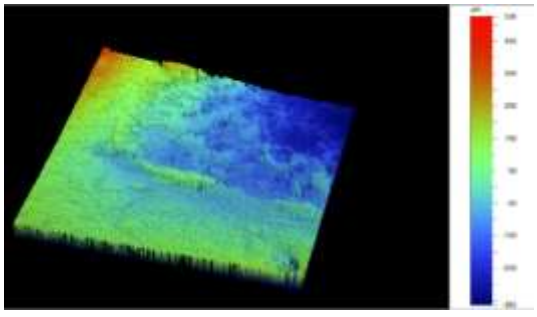
ARCI Pa 7



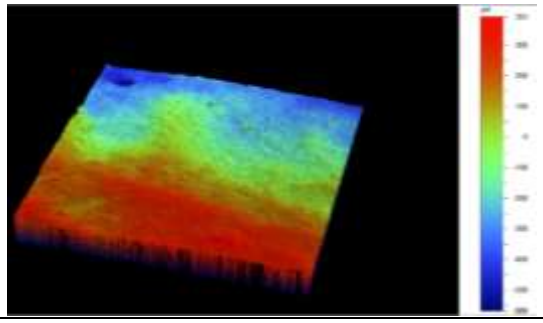
ARCI Pa 8



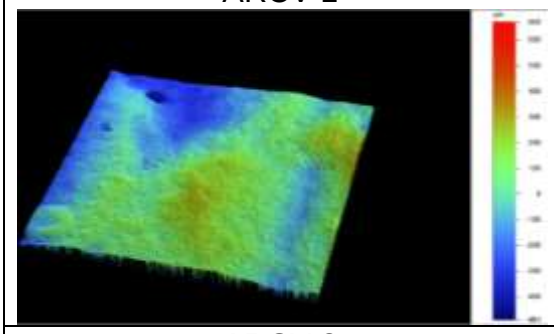
ARCI Pa 9



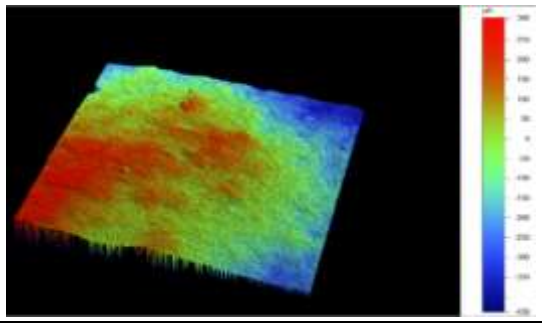
ARCI Pa 10



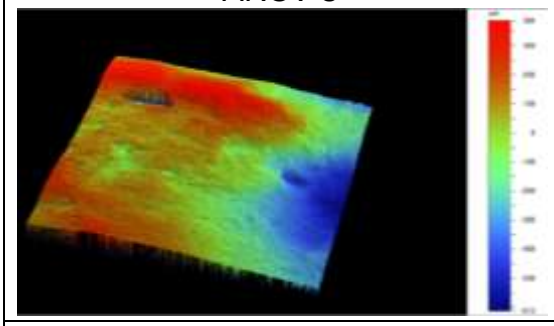
ARCV 1



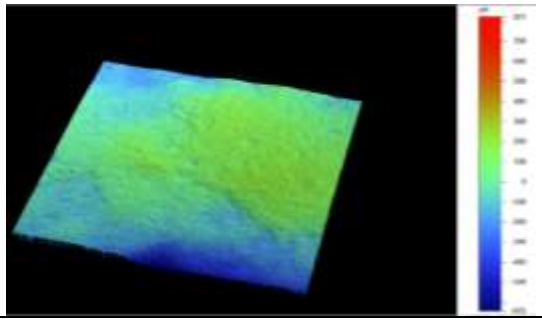
ARCV 2



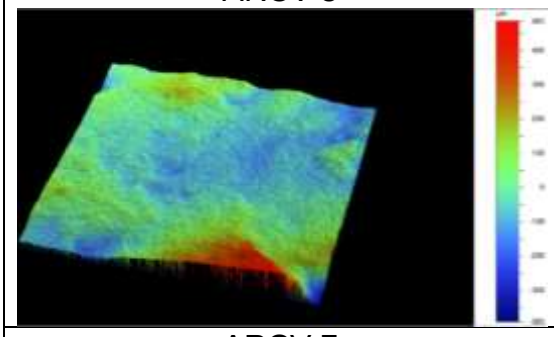
ARCV 3



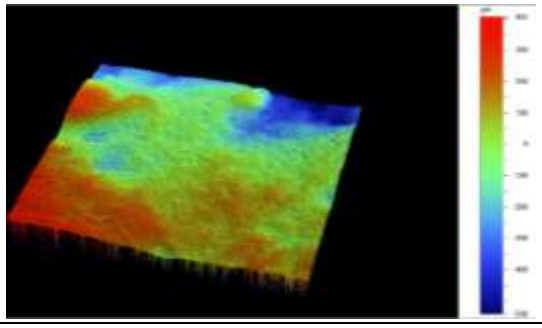
ARCV 4



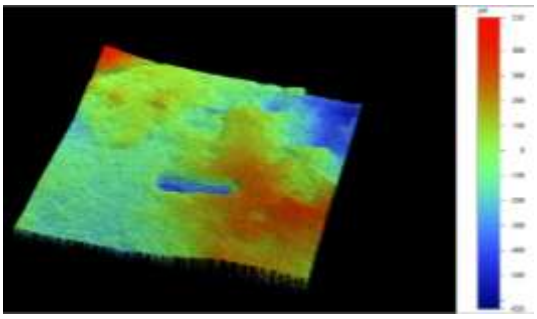
ARCV 5



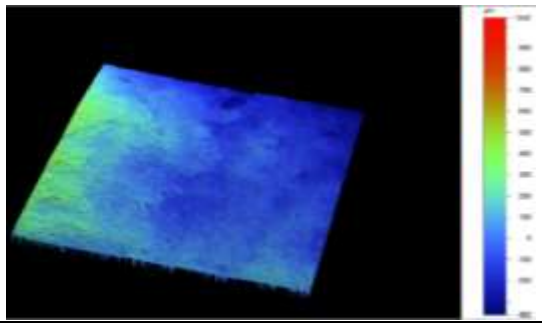
ARCV 6



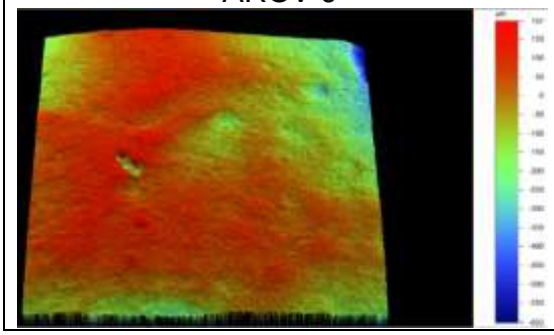
ARCV 7



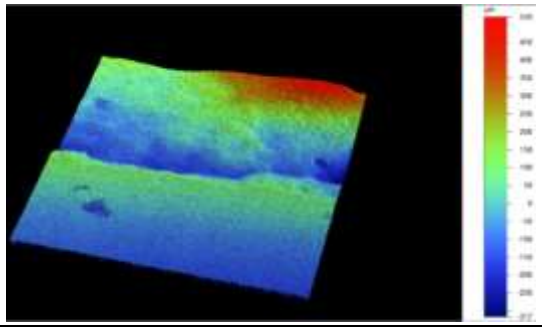
ARCV 8



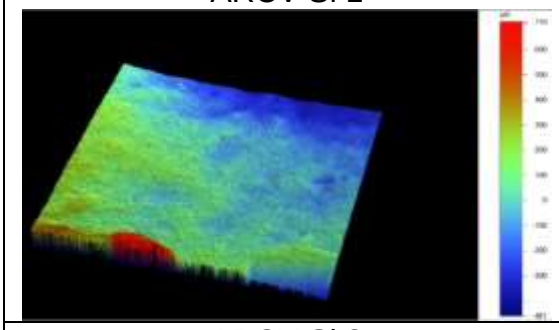
ARCV 9



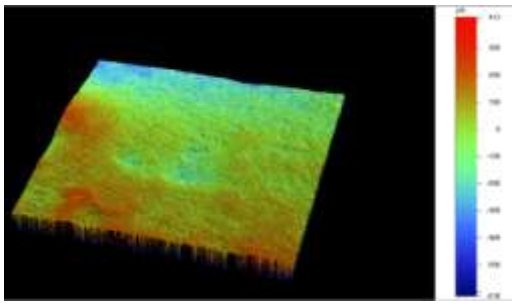
ARCV 10



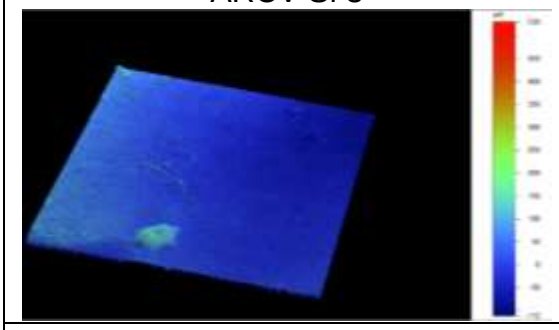
ARCV Si 1



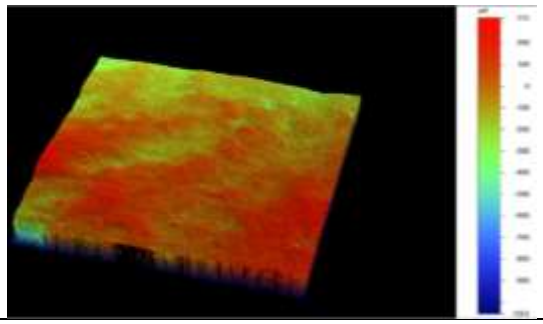
ARCV Si 2



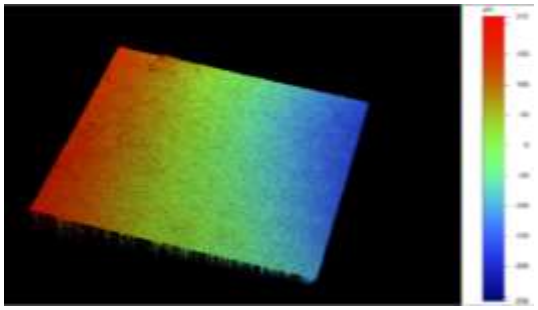
ARCV Si 3



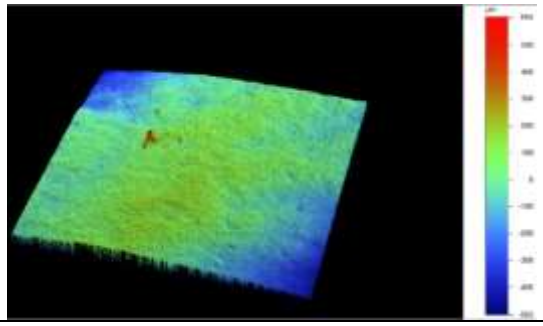
ARCV Si 4



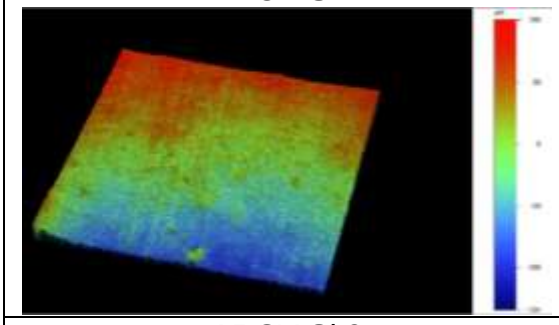
ARCV Si 5



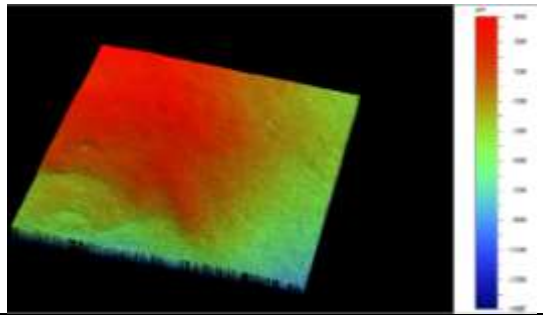
ARCV Si 6



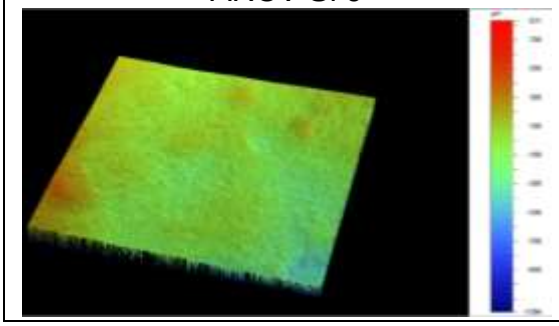
ARCV Si 7



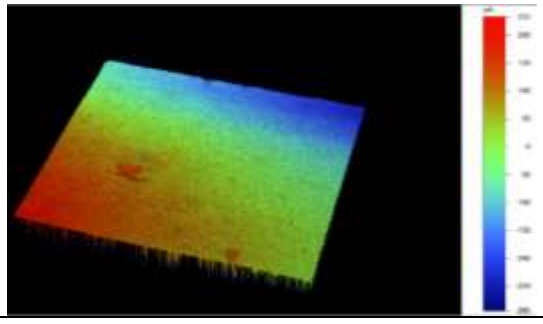
ARCV Si 8



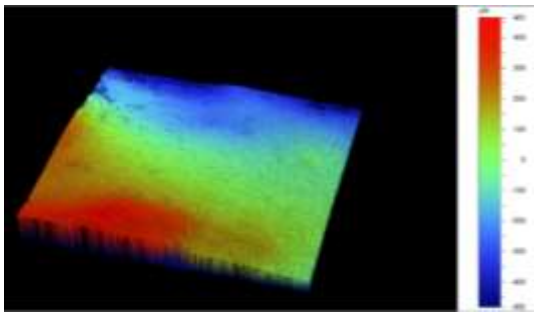
ARCV Si 9



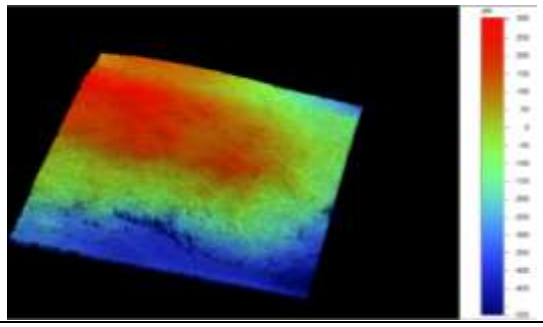
ARCV Si 10



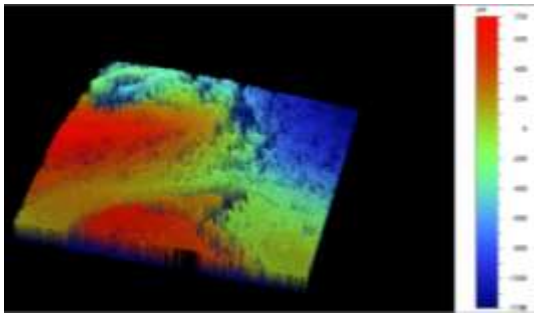
ARCV Pa 1



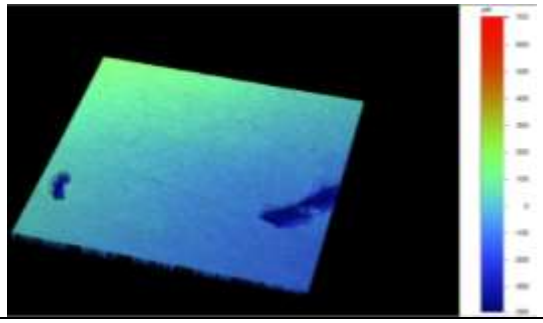
ARCV Pa 2



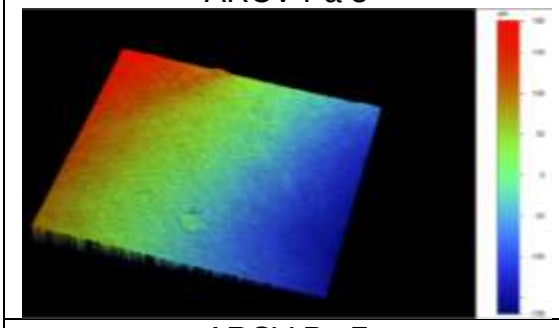
ARCV Pa 3



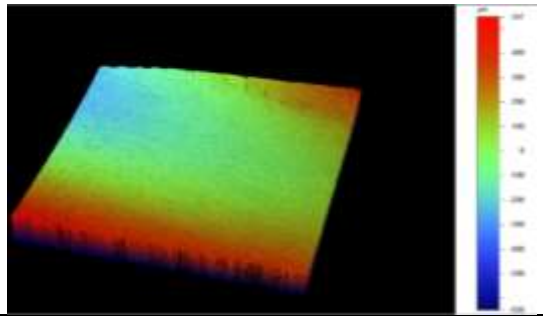
ARCV Pa 4



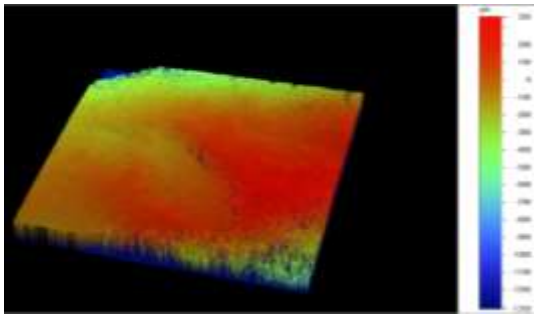
ARCV Pa 5



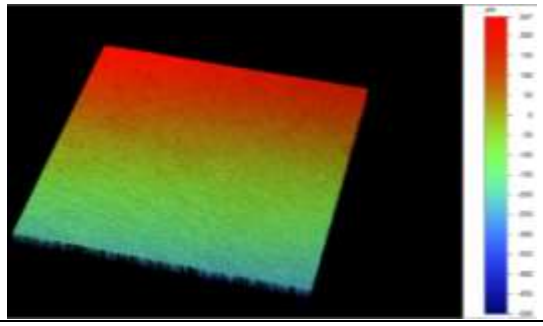
ARCV Pa 6



ARCV Pa 7



ARCV Pa 8



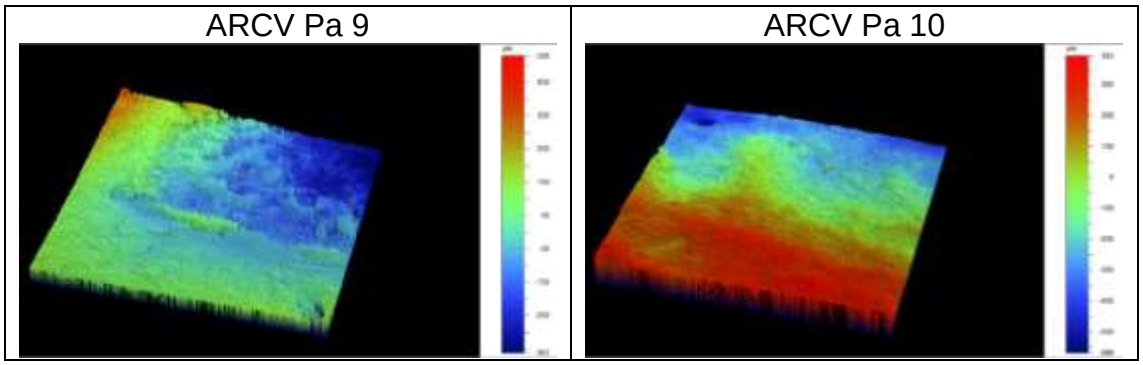


Figura B 2 - Superfícies em 3D geradas pelo software Vision 64 de 10 partículas de cada material: NA, ARCI, ARCI Si, ARCI Pa, ARCV, ARCV Si e ARCV Pa

3 Absorção de água

3.1 Comparação entre as técnicas de tratamento com silano

Os resultados de absorção de água pela NBR NM53 (ABNT:2009) referentes às amostras de ARCI e ARCV sem tratar e com as três técnicas de tratamento por silano estão apresentados na Tabela B 1.

Tabela B 1- Absorção de água para as amostras sem tratar e tratadas com as três técnicas diferentes de silano pela norma NM53:2009

Absorção agregado graúdo pela ABNT NBR 53				
	ARCI 1	**ARCI 2**	**ARCI 3**	**média**
Mseca (g)	894,56	901,29	951,93	915,93
Msss (g)	941	948,91	1002,18	964,03
Abs (%)	5,19	5,28	5,28	5,25
	ARClasp 1	**ARClasp 2**	**ARClasp 3**	**média**
Mseca (g)	527,99	547,87	543,67	539,84
Msss (g)	541,2	567	565,3	557,83
Abs (%)	2,50	3,49	3,98	3,32
	ARClgot 1	**ARClgot 2**	**ARClgot 3**	**média**
Mseca (g)	408,11	520,03	464,58	464,24
Msss (g)	423,6	539,7	486,6	483,30
Abs (%)	3,80	3,78	4,74	4,11
	ARClime 1	**ARClime 2**	**ARClime 3**	**média**
Mseca (g)	503,64	502	504,71	503,45
Msss (g)	521,4	521,14	522,26	521,60
Abs (%)	3,53	3,81	3,48	3,61
	ARCV 1	**ARCV 2**	**ARCV 3**	**média**
Mseca (g)	905,8	1044,28	950,75	966,94
Msss (g)	1078,4	1241,74	1133,11	1151,08
Abs (%)	19,05	18,91	19,18	19,05
	ARCVasp 1	**ARCVasp 2**	**ARCVasp 3**	**média**
Mseca (g)	492,97	494,22	495,02	494,07
Msss (g)	580,5	579	581,2	580,23
Abs (%)	17,76	17,15	17,41	17,44

	ARCVgot 1	ARCVgot 2	ARCVgot 3	média
Mseca (g)	522,89	496,95	442,43	487,42
Msss (g)	613,7	582,7	523,9	573,43
Abs (%)	17,37	17,26	18,41	17,68
	ARCVime 1	**ARCVime 2**	**ARCVime 3**	**média**
Mseca (g)	397,7	399,96	399,22	398,96
Msss (g)	449,61	450,83	451,69	450,71
Abs (%)	13,05	12,72	13,14	12,97
Mseca (g)	894,56	901,29	951,93	915,93

Mseca= massa seca; Msss= massa saturada com superfície seca; Abs= absorção de água

As curvas de massa submersa medida para cálculo de absorção acumulada ao longo do tempo para ARCI e ARCV ensaiados por cada uma das técnicas (aspersão, gotejamento e imersão) de tratamento com silano podem ser observadas na Figura B 3. A média das três medidas está apresentada em linha cinza para ARCI e vermelha para ARCV.

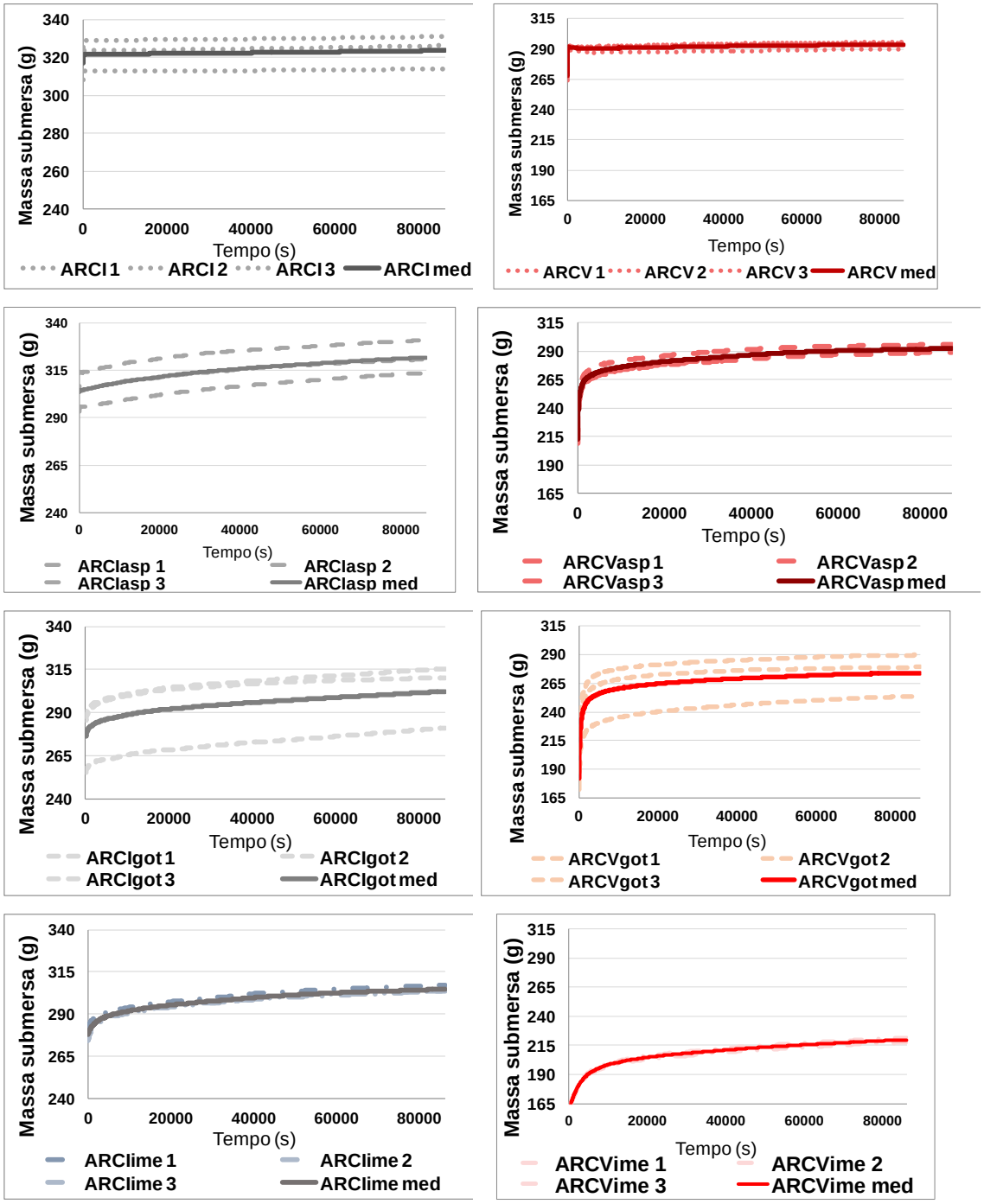


Figura B 3- Massa submersa medida para cálculo de absorção acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV ensaiados por cada uma das técnicas (aspersão, gotejamento e imersão) de tratamento com silano. A média das três medidas das três medidas está apresentada em linha contínua cinza para ARCI e vermelha para ARCV.

3.2 Comparação entre concentrações de silano

Para avaliar as diferentes concentrações (5.10 e 20%) da emulsão de silano IE6694, foram realizados somente ensaios de absorção no tempo para acompanhar a cinética. As curvas das massas submersas para os tratamentos podem ser observadas na Figura B 4. A média das três medidas está apresentada em linha cinza para ARCI e vermelha para ARCV.

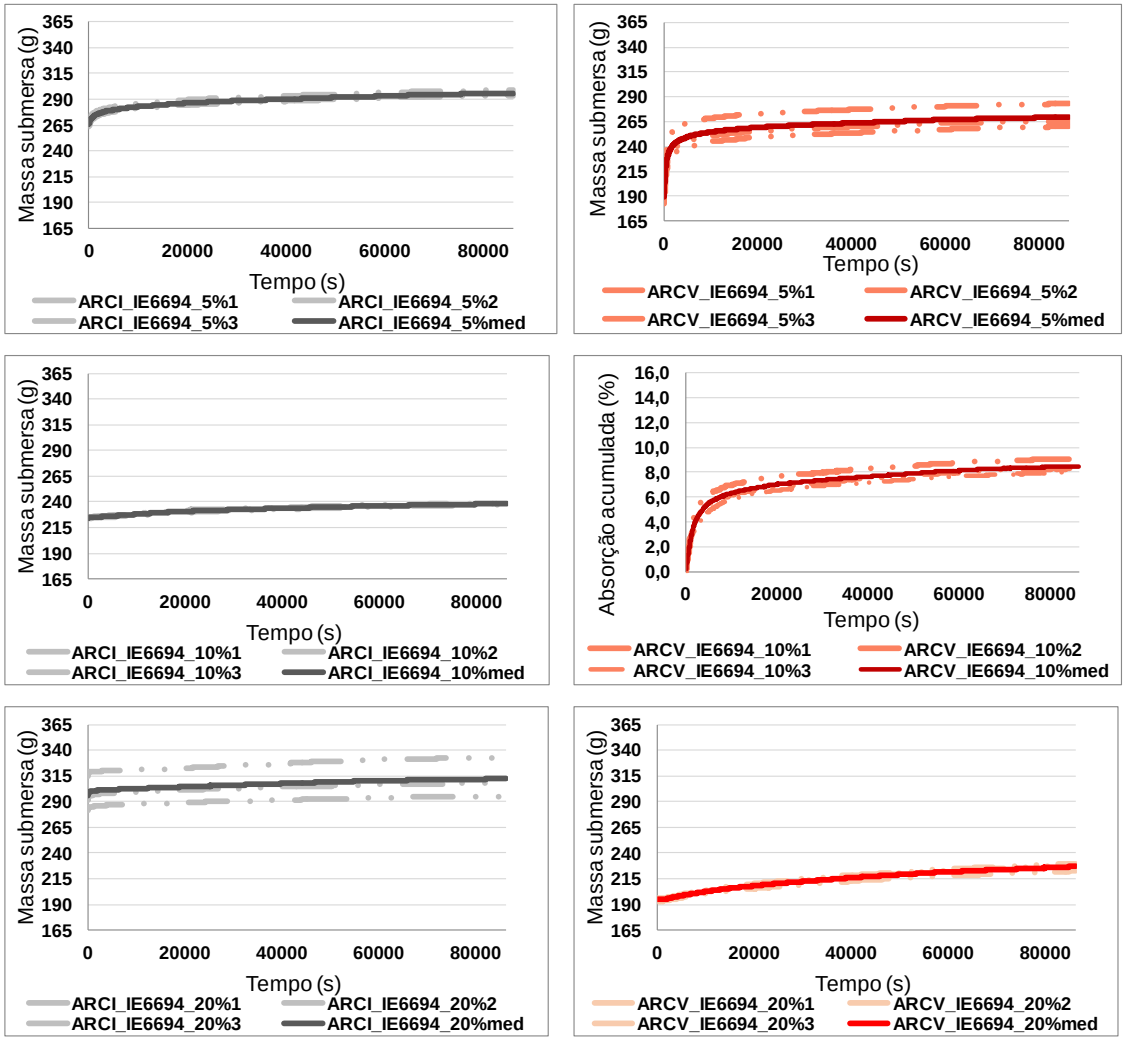


Figura B 4 - Massa submersa medida para cálculo de absorção acumulada ao longo do tempo para (a) ARCI e (b) ARCV ensaiados por cada concentração (5,10 e 20%) de emulsão de silano IE6694. A média das três medidas das três medidas está apresentada em linha contínua.

3.3 Comparação entre hidrofugantes silano e parafina

Os resultados de absorção de água pela NBR NM53 (ABNT:2009) referentes às amostras de ARCI e ARCV tratadas com silano (após técnica e concentração determinadas) e parafina são apresentados na Tabela B 2.

Tabela B 2- Absorção de água para as amostras de ARCI e ARCV tratadas com silano e parafina pela norma NM53:2009

Absorção agregado graúdo pela ABNT NBR 53				
	ARCI SI 1	ARCI SI 2	ARCI SI 3	média
Mseca (g)	553,35	539,13	507,14	533,21
Msss (g)	572,77	554,53	518,34	548,55
Abs (%)	3,50	2,85	2,20	2,86
	ARCI PA 1	ARCI PA 2	ARCI PA 3	média
Mseca (g)	398,8	437,1	380,7	405,53
Msss(g)	401,4	441,6	384,4	409,13
Abs (%)	0,65	1,02	0,97	0,88
	ARCV SI 1	ARCV SI 2	ARCV SI 3	média
Mseca (g)	487,2	493	481,8	487,33
Msss (g)	525,5	523,1	511,9	520,17
Abs (%)	7,86	6,10	6,24	6,74
	ARCV PA 1	ARCV PA 2	ARCV PA 3	média
Mseca (g)	1010,43	877,13	962,35	949,97
Msss (g)	1050,4	912,55	1002,53	988,49
Abs (%)	3,95	4,03	4,17	4,06

Mseca= massa seca; Msss= massa saturada com superfície seca; Abs= absorção de água

As curvas de massa submersa medida para cálculo de absorção acumulada ao longo do tempo para ARCI_Si, ARCV_Si,ARCI_Pa e ARCV_Pa tratadas com silano e parafina podem ser observadas na Figura B 5. A média das três medidas está apresentada em linha cinza para ARCI e vermelha para ARCV.

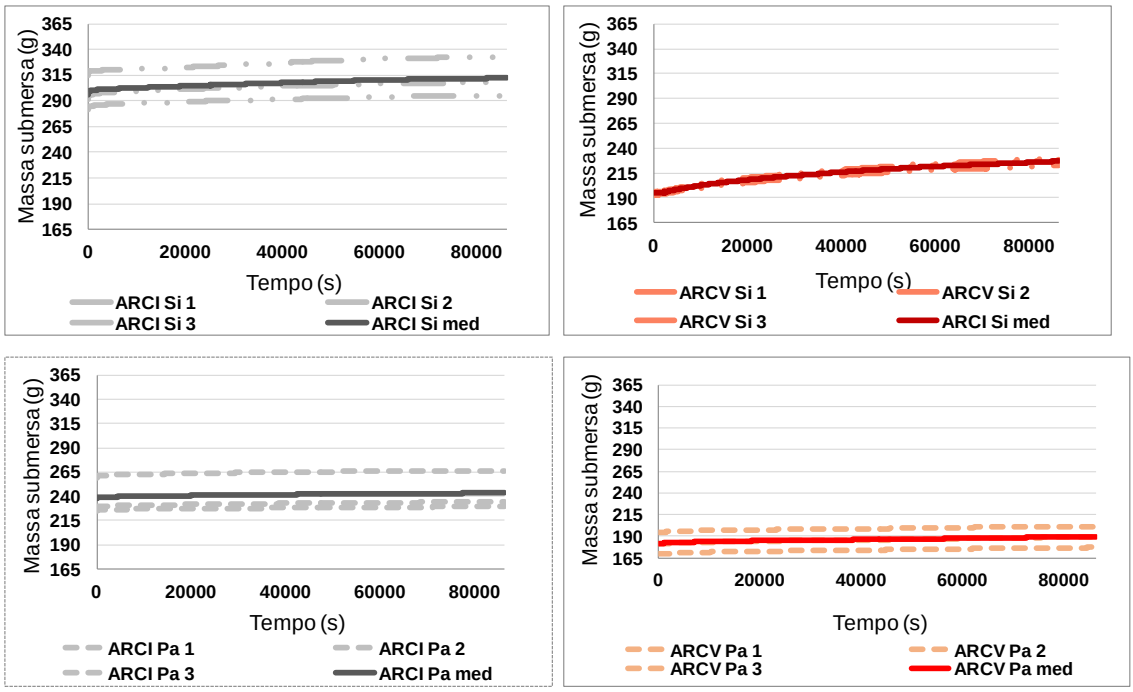


Figura B 5 - Massa submersa medida para cálculo de absorção de água acumulada ao longo do tempo para ARCI_Si, ARCI_Pa (esquerda), ARCV_Si e ARCV_Pa (direita) tratadas com silano e parafina. . A média das três medidas das três medidas está apresentada em linha contínua cinza para ARCI e vermelha para ARCV.