

Influência do tipo de cimento Portland na consistência de pastas cimentícias

Flaviane Bernardino de Oliveira¹, Marília Pereira de Oliveira²

RESUMO

Ao estudar de perto o cimento Portland aprende-se quais fatores que influenciam diretamente na consistência: características físicas, composição química, relação água/ligante e outros. A consistência de pastas cimentícias é um importante parâmetro reológico indicativo da resistência o fluxo, ou seja, a mobilidade das partículas. Não existe um valor de consistência ‘correta’, na verdade têm-se uma consistência ideal que é função da aplicação desejada. Portanto, conhecer a consistência do material é fundamental para se ter sucesso em sua aplicação. Nesse sentido, este artigo teve como objetivo investigar o efeito dos diferentes tipos de cimentos brasileiros sobre a consistência de pastas cimentícias. Para atingir este objetivo foram produzidas pastas cimentícias com diferentes relações água/ligante e determinado a consistência em diferentes intervalos de tempo. A medida de consistência corresponde ao espalhamento atingido pela pasta cimentícia no ensaio de mesa de consistência, realizado conforme a ABNT NBR 13276/2016. Esta metodologia foi adotada para avaliar qual relação água/ligante propicia a consistência adequada a cada tipo de cimento Portland, segundo os parâmetros da ABNT NBR 16606:2018, e o tempo de manutenção. Os resultados encontrados mostraram que: a consistência é significativamente alterada ao longo do tempo, dado a natureza reativa do cimento Portland; a consistência é diretamente afetada pelo tipo de cimento Portland e as relações água/ligante.

Palavras-chave: Espalhamento; Relação água/cimento; Propriedades físicas e químicas; Trabalhabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, dado a sua versatilidade de aplicações e abundância de matérias-primas. Esse material está presente em concretos e argamassas e, estes são os principais materiais encontrados nas grandes obras de engenharia: ponte, viadutos, aeroportos, portos, arranha-céus, rodovias etc.

Os concretos e argamassas cimentícias devem apresentar trabalhabilidade adequada para cada tipo de aplicação. Por exemplo: concreto autonivelante deve ter alta fluidez, concreto projetado deve ter natureza altamente tixotrópico, concreto de Impressão 3D ter elevada viscosidade, argamassas de revestimento deve ter altas deformação plásticas.

A trabalhabilidade dos materiais cimentícios corresponde a um conjunto de parâmetros indicativos da capacidade de serem misturados, transportados e aplicados. A trabalhabilidade dos concretos e argamassas são, quase sempre, avaliadas por abatimento de tronco de cone e mesa de consistência. Em qualquer um dos dois é a consistência do material que irá governar o sistema.

A consistência corresponde a resistência do material quando submetido a taxas de cisalhamento, ou seja, é uma medida de facilidade de mobilidade das partículas. Nos concretos e argamassas é sempre a pasta cimentícia o fluido lubrificante das partículas, logo se a consistência a pasta cimentícia for alta, maior será a dificuldade das partículas maiores (agregado graúdo e miúdo) fluírem.

A consistência da pasta depende de vários fatores, tais como as características físicas (distribuição do tamanho de partículas, densidade, área superficial específica), características químicas, mineralógicas, histórico de cisalhamento, energia de mistura, relação água/sólidos, tipos de ligante etc.

Sabendo disso, este trabalho teve por objetivo investigar o efeito dos diferentes tipos de cimentos brasileiro sobre o espalhamento de pastas de cimento Portland realizado na mesa de consistência, de acordo com a NBR 13276/2016.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo a Norma Brasileira ABNT NBR 16697 o cimento Portland é definido como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos [1]. Ele pode ser classificado com vários termos e definições cada, como por exemplo: cimento Portland de alta resistência inicial e de alto forno. Os componentes químicos principais do cimento Portland são a cal (CaO) – de 60 % a 67 %,

sílica (SiO_2) – de 17 % a 25 %, alumina (Al_2O_3) – de 3 % a 8 % e óxido de ferro (Fe_2O_3) – de 0,5 % a 6 %. Estes componentes também são indicados pelas letras C, S, A e F para a cal, sílica, alumina e óxido de ferro, respectivamente [18].

2.1. Composição do Cimento Portland

O Cimento Portland possui uma notação própria em sua composição química que facilita o estudo e compreensão dos fenômenos referentes a este aglomerante. Assim, para os quatro componentes principais que governam as propriedades do cimento, temos a seguinte notação: C (Cal) conforme diz Petrucci (1970), é o componente essencial dos cimentos, figurando algo em torno de 60 a 67% na composição do cimento. Pode-se dizer que as propriedades mecânicas do cimento Portland aumentam com o teor de cal. Se o seu processo de fabricação não é perfeito, pode resultar uma certa quantidade de cal livre, cuja presença em estado anidro, acima de certos limites, prejudica a estabilidade de volume de concretos e argamassas. S (Sílica) o bióxido de silício é o constituinte básico de muitas rochas naturais, tais como arenitos, quartzitos, areias e argilas. Na sua forma natural cristalizada, a sílica é material praticamente inerte (FUSCO, 2011). A sua proporção no cimento varia na proporção de 17 a 25%. Durante a fabricação do cimento, a sílica reage com a cal, formando silicatos de cálcio. São estes silicatos que, por hidratação, conferem o efeito aglomerante ao cimento. Ou seja, é da combinação da sílica com a cal que se obtém os compostos mais importantes do cimento. A (Alumina) Também provida da argila, seu teor no cimento pode variar em uma média de 3 a 8%. Ela reage com a cal, formando aluminatos de cálcio, os quais, ao serem hidratados, também formam colóides rígidos. São os compostos formados pela combinação desse óxido com a cal que aceleram a pega do aglomerante e reduzem a resistência aos sulfatos. Logo, devem estar presentes em pequenas quantidades na composição do cimento.

Conforme assevera Fusco (2011), exceto nos cimentos aluminosos, que são usados quando se quer o endurecimento muito rápido, como em obras submarinas, a contribuição da alumina para a resistência dos cimentos é baixa, e F (Óxido de Ferro) é proveniente da argamassa utilizada na fabricação do cimento e aparece na composição do cimento Portland em quantidades relativamente pequenas, 0,5 a 6%, combinado com outros óxidos presentes. O óxido de ferro não deve estar presente na fabricação dos cimentos brancos, uma vez que o cimento com essa composição adquire uma coloração escura, com tonalidade de café. Além disso, esse componente possui um importante papel de fundente, desenvolvendo uma ação mais enérgica que a alumina.

Acredita-se que os teores relativamente altos de alumina e óxido de ferro na composição possam facilitar a produção comercial de um cimento com cal suficiente para converter toda a sílica em silicato tricálcio, se que resulte cal livre em quantidade inconveniente. Todas essas composições são acompanhadas de seus compostos fundamentais que determinam as suas propriedades [19]:

- Aluminato tricálcico (C3A) – reage rapidamente com a água e cristaliza-se em poucos minutos. É o constituinte do cimento que apresenta o maior calor de hidratação. Controla a pega inicial e o tempo de endurecimento da pasta, mas é o responsável pela baixa resistência aos sulfatos;
- Ferro-aluminato tetracálcico (C4AF) – é o componente que dará coloração cinzenta ao cimento, devido à presença de ferro. Este libera baixo calor de hidratação e reage menos rapidamente que o C3A. Controla a resistência a corrosão química do cimento;
- Silicato tricálcico (C3S) – é o principal componente do cimento e o que responde pela sua resistência mecânica inicial (1 a 28 dias). Sua hidratação começa em poucas horas e desprende quantidade de calor inferior ao C3A;
- Silicato dicálcico (C2S) – reage lentamente com a água e libera baixo calor de hidratação. Apresenta baixa resistência mecânica inicial, mas contribui significativamente com o aumento da resistência ao longo do tempo [18].

2.2. Classificação dos Cimentos

Existem vários tipos de cimento, que podem ser utilizados de acordo com a sua finalidade e fabricado para cada tipo de construção, temos o CP I: Cimento Portland Comum que possui uma fórmula mais simplificada, o único aditivo presente nele é o gesso, que retarda a rigidez e tem mais tempo para a aplicação, possui baixa resistência e é utilizado mais na área da indústria. O CP I-S: Cimento Portland Comum com Aditivo, é bastante parecido com o anterior, a única diferença é que possui material pozzolânico, proporcionando menos permeabilidade ao produto. O CP II-E: Cimento Portland Aditivado com Escória de Alto Forno é considerado um produto intermediário entre os modelos Comum e Aditivado. Seu uso se dá principalmente em obras nas quais seja requerida uma liberação de calor razoavelmente lenta. A escória de alto forno presente na composição deste cimento garante a ele menor calor para hidratação. Por isso, ele libera menos calor quando é colocado em contato com água [20].

O CP II-Z: Cimento Portland Composto com Material Pozzolânico, tem adição de pozolana e uma melhor impermeabilidade, ele é o mais recomendado para obras subterrâneas com alta umidade. O CP II-F: Cimento

Portland Composto com Material Carbonático é um dos mais eficientes para aplicação em obras simples que exigem resistência como concreto e possui em sua formulação uma concentração de filer carbonático de 6% a 10%. O CP III: Cimento Portland de Alto Forno tem como principais características o baixo calor de hidratação, alta durabilidade e impermeabilidade, uma boa resistência às variações de temperatura (expansão e contração), além de resistência a materiais à base de sulfato. Pode ter até 70% de teor de escória em sua composição. Dada as suas características de resistência aos mais diversos ambientes, este cimento é altamente recomendável para obras com grande agressividade – barragens, pontes, esgotos, fundação para máquinas, afluentes de esgoto, ou ainda obras mais simples e genéricas [20]. O CP IV: Cimento Portland Pozolânico, possui o maior índice de pozolana em sua composição, entre 15% e 50%, fazendo com que tenha uma alta impermeabilidade e durabilidade amplificada, possui uma ótima resistência a ambientes ácidos e em contato com sulfato. O CP V-ARI: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial é um tipo de cimento semelhante ao comum, pois não possui aditivos em sua fórmula. Entretanto, seu método de fabricação dosa a argila e o calcário de forma diferenciada, com moagem fina. Graças às suas características físicas, ele adquire resistência mais rapidamente – secagem rápida – e é um modelo ótimo para a fabricação de concreto [20]. E por último temos o CPB: Cimento Portland Branco que é fabricado com caulim em vez de argila e possui baixas concentrações de manganês que garante a coloração branca, podem ser customizadas e comercializadas em várias cores.

2.3. Características Físicas e Químicas do Cimento Portland

As propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos: propriedades do cimento puro (pó), propriedades da mistura do cimento com água (pasta) e propriedades da mistura da pasta de cimento com agregado padronizado (argamassa).

A densidade pode atingir, em 24 horas, cerca de 7mm por metro na pasta pura, 4,5 mm por metro na argamassa-padrão e 2 mm por metro em concretos dosados a 350 kg de cimento por metro cúbico de concreto. Já a finura é usualmente definida de duas maneiras distintas: pelo tamanho máximo do grão ou pelo valor da superfície específica (soma das superfícies dos grãos contidos em um grama de cimento). A finura é o fator que governa a velocidade das reações de hidratação do cimento e tem também sua influência comprovada em muitas qualidades da pasta, das argamassas e dos concretos. A Exsudação é o fenômeno que consiste na separação espontânea da água da mistura, que naturalmente aflora pelo efeito conjunto da diferença de densidades entre o cimento e a água e o grau de permeabilidade que prevalece na pasta. É um tipo de segregação, fenômeno mais geral, entendido como separação dos diversos constituintes das argamassas e dos concretos por via de ação de diferentes causas, conduzindo, finalmente, a uma indesejável heterogeneidade da mistura.

No caso da trabalhabilidade temos como defini-la como a propriedade de oferecer maior ou menor facilidade nas operações de manuseio com as argamassas e concretos frescos. No caso da pega, definimos com um fenômeno do cimento que compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, consequente de um processo químico de hidratação. No processo de hidratação, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão vão se aglutinando paulatinamente uns aos outros, por efeito de floculação, conduzindo à construção de um esqueleto sólido, finalmente responsável pela estabilidade da estrutura geral. O prosseguimento da hidratação em subseqüentes idades conduz ao endurecimento responsável pela aquisição permanente de qualidades mecânicas, características do produto acabado, pega e o endurecimento onde estes são dois aspectos do mesmo processo de hidratação do cimento, vistos em períodos diferentes - a pega na primeira fase do processo e o endurecimento na segunda e última fase do mesmo, partir de certo tempo após a mistura, quando o processo de pega alcança determinado estágio, a pasta não é mais trabalhável, não admite operação de remistura. Este intervalo de tempo é o período disponível para as operações de manuseio das argamassas e concretos, após o qual esses materiais devem permanecer em repouso, em sua posição definitiva, para permitir o desenvolvimento do endurecimento. A caracterização da pega dos cimentos é feita pela determinação de dois tempos distintos: o tempo de início de pega e o tempo de fim de pega. Ocorrência da pega do cimento deve ser regulada tendo-se em vista os tipos de aplicação do material, devendo se processar ordinariamente em períodos superiores a uma hora após o início da mistura.

Já os aceleradores e retardadores nas aplicações em que se deseja uma pega rápida, como no caso de obturações de vazamentos, são empregados aditivos ao cimento, conhecidos com o nome de aceleradores de pega, tais como cloreto de sódio (NaCl) e silicato de sódio. Em outros processos tecnológicos, há a necessidade de um tempo de pega mais longo, como no caso de operações de injeção de pastas e argamassas e nos lançamentos de concretos sob água, quando então se empregam aditivos denominados retardadores de pega, como açúcar, celulose e outros produtos orgânicos. A pasta de consistência normal tem o seu tempo de pega determinado por ensaio no aparelho de Vicat, utilizando a pasta de cimento misturada em proporção que conduz a uma consistência denominada normal. A consistência normal é verificada no mesmo aparelho de Vicat, utilizando-se a chamada sonda de Tetmajer, um corpo cilíndrico, metálico, liso, de 10 mm de diâmetro e com extremidade em seção reta. A pasta, preparada para ensaios de pega, deve ter uma consistência normal de 6 mm, isto é, a sonda de Tetmajer deve estacionar à distância de 6 mm do fundo da amostra.

No tempo de pega da pasta de consistência normal é ensaiada no mesmo aparelho à penetração da agulha de

Vicat: um corpo metálico com formato cilíndrico, com área da seção transversal de 1 mm² (diâmetro de 1,13 mm) e terminado em seção reta. A pasta é ensaiada periodicamente à penetração pela agulha de Vicat, determinando-se o tempo de início da pega quando esta deixa de penetrar até o fundo da amostra, parando a uma distância de 1 mm do fundo. Os ensaios à penetração são prosseguidos até a determinação do tempo de fim de pega, quando a agulha não penetra na amostra, deixando apenas uma imperceptível marca superficial. Em obra, quando necessário, pode-se fazer um ensaio grosseiro (expedito), que consiste na moldagem de uma série de pequenas bolas com pasta de consistência semelhante à normal de laboratório. Submetendo-se a posteriores esmagamentos das bolas, com os dedos, em uma sequência cronometrada, quando o esmagamento deixa de ser plástico, tem-se grosseiramente, o início da pega.

A resistência mecânica dos cimentos é determinada pela ruptura à compressão de corpos-de-prova realizados com argamassa. No Brasil, empregam-se corpos-de-prova de forma cilíndrica, com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, feitos com argamassa de consistência normal. Para obter essa consistência normal da argamassa é feito o ensaio de acordo com a ABNT NBR 13276 [13]. E como última característica física temos o rompimento que os corpos-de-prova (cp) moldados são conservados em câmara úmida por 24 horas e então imersos em água até a data do rompimento. O rompimento por compressão é realizado nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, contados desde a moldagem dos corpos-de-prova.

As propriedades químicas do cimento Portland estão ligadas diretamente pelo processo de endurecimento por hidratação, temos o endurecimento, a instabilidade, o calor de hidratação e a resistência dos agentes agressivos. Em relação ao endurecimento, ainda não são completamente conhecidas com precisão as reações e os compostos envolvidos nesse processo. Para entender algumas situações que ocorrem, o silicato bicálcico existente e o resultante da hidrólise, combinam-se com a água no processo de hidratação, adquirindo duas moléculas de água e depositando-se, a temperaturas ordinárias, no estado de gel. Os dois últimos constituintes principais do cimento, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio, se hidratam, resultando, do primeiro, cristais de variado conteúdo de água e, do segundo, uma fase amorfa gelatinosa. No caso da instabilidade do cimento é uma característica ligada à ocorrência eventual de indesejáveis expansões volumétricas posteriores ao endurecimento do concreto e resulta da hidratação de cal e magnésia livre nele presentes. Quando o cimento contém apreciáveis proporções de cal livre (CaO), esse óxido, ao se hidratar posteriormente ao endurecimento, aumenta de volume, criando tensões internas que conduzem à microfissuração e pode terminar na desagregação mais ou menos completa do material. O fenômeno ocorre de modo ainda mais acentuado com o óxido de magnésio, motivo pelo qual as especificações do cimento limitam a proporção da presença destes constituintes no cimento.

O calor de hidratação durante o processo de endurecimento do cimento, considerável quantidade de calor se desenvolve nas reações de hidratação. Essa energia térmica produzida é de grande interesse para as aplicações técnicas, principalmente pela elevação de temperatura, resultante nas obras volumosas, a qual conduz ao aparecimento de trincas de contração ao fim do resfriamento da massa [21]. Como última característica química, temos a resistência dos agentes agressivos, onde o hidróxido de cálcio, presente na proporção de 15 a 20% do peso do cimento original constitui o ponto mais vulnerável. Águas puras correntes acabam lavando toda a cal existente no cimento hidratado, após o que começam, com menor intensidade, a dissolver os próprios silicatos e aluminatos. As águas ácidas, como a água de chuva em centros urbanos, com certa proporção de gás carbônico dissolvido, agem sobre a cal do cimento hidratado segundo um processo que varia em função da concentração do gás. Se a concentração de gás carbônico é baixa, o sal formado é o carbonato de cálcio, pouco solúvel, que obstrui os poros, constituindo proteção a ataques posteriores. Se a concentração é relativamente alta, o carbonato formado é dissolvido como bicarbonato, prosseguindo o ataque até a completa exaustão da cal presente. As águas podem ser igualmente agressivas quando contêm outros ácidos, como acontece com os resíduos industriais e águas provenientes de charcos contendo ácidos orgânicos. Um ataque posterior dos sais constituintes do cimento hidratado deixa no concreto um esqueleto sem coesão e inteiramente prejudicado nas suas características mecânicas. Essa expansão interna é responsável pelo fissuramento que, por sua vez, facilita o ataque, conduzindo o processo à completa deterioração do material. Já os sulfatos, principalmente os de cálcio, agem da maneira já descrita, resultando no final em ataque progressivo dos cimentos ricos em cal pelas águas do mar.

2.4. Pastas de Cimento Portland

Existem vários tipos de cimento Portland que são adequados para cada tipo de construção, dependendo das suas especificações e características. Assim, o ensaio de consistência do cimento é mais um parâmetro que auxilia na hora da escolha e determina qual relação água/cimento é necessária para seguir os requisitos da norma ABNT NBR 16606:2018 e em qual tempo é mais viável a utilização da consistência certa. Nesse caso, o fator principal que influencia na consistência, é o teor água/cimento.

Nesse caso, é por intermédio desse teor, que se verifica a influência direta da relação água/cimento na consistência [2].

Quando se adiciona água ao cimento, ocorre uma formação de aglomerados que é conhecido por forças

capilares de Van der Walls [3], esse fenômeno ocorre quando aglomerados de partículas se formam aleatoriamente, alterando a distribuição granulométrica efetiva e incorporando água no seu interior, modificando a reologia do sistema, então quando as partículas do cimento entram em contato com a água, apresentam uma grande tendência a aglomeração, conforme a Figura 1.

Assumir tal estrutura aglomerada pode implicar na retenção de certa quantidade da água de mistura e, com isso, implica na geração de uma rede aberta de canais entre as partículas. Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água que, por essa razão, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura [4].

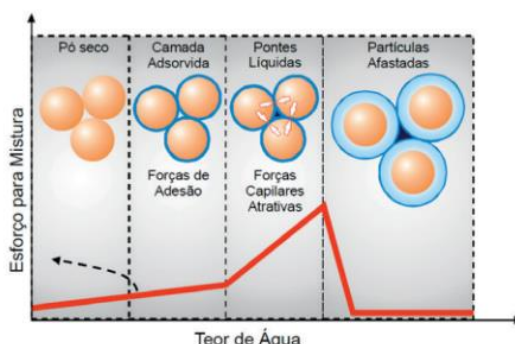


Figura 1: Representação das Forças Capilares de Van der Walls na Relação Água/Cimento (PANDOLFELLI et al., 2000).

Segundo alguns artigos e monografias (DE LIMA et al, 2006) e (CAMPOS et al, 2018) tais fenômenos aumentam a viscosidade da mistura e reduzem a área específica dos grãos de cimento disponível para as reações de hidratação. Em princípio, a hidratação inicia-se logo que os grãos de cimento entram em contato com a água. Devido à elevada finura das partículas, uma grande superfície das fases reativas está em contato com a água. Para a distribuição homogênea da água na mistura e para a adsorção dela pela superfície de todos os grãos, as partículas de cimento devem estar defloculadas e manter-se em um alto grau de dispersão [18].

No caso de pastas a água é o fluido que atua dando mobilidade às partículas de cimento Portland e adições minerais, de modo que um empacotamento eficiente das partículas finas resultará na redução do consumo de água das misturas, podendo também colaborar para que as pastas se tornem mais fluidas [22].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O seguinte tópico irá apresentar toda a metodologia do trabalho para a efetuação do ensaio que foi executado no laboratório de materiais de construção do prédio de engenharias na Ufersa Campus Mossoró.

3.1. Materiais e Aparelhagem

Para a realização deste trabalho foram utilizados três tipos de cimento: o CP II-E-40 Cimento Portland com escória de alto forno, o CP IV-40 Cimento Portland pozolânico e o CP V-ARI Cimento Portland de alta resistência inicial. De acordo com a ABNT NBR 16697/2018 estes cimentos podem conter adições minerais cujos valores percentuais respeitem os limites apresentados na Tabela 1. A água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Mossoró-RN.

Tabela 1: Limites de composição dos cimentos Portland (% em massa).

Designação	Sigla	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland composto com escória	CP II-E-40	51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland Pozolânico	CP IV-40	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de Alta Resistência	CP V-ARI	90 – 100	0	0	0 – 10

3.2. Preparação Das Pastas Cimentícias

Para a preparação das pastas cimentícias foi utilizado 1000g de cada tipo de cimento, com relação água/cimento de 0,25/0,30/0,35/0,40/0,45 e 0,50. A quantidade de água foi calculada pela Equação (1) para cada relação água cimento.

$$A = \frac{m_a}{m_c} \times 100 \quad (1)$$

Onde: A = é a quantidade de água expressa em porcentagem (%)

m_a = massa de água (g)

m_c = massa de cimento (g)

Foram preparadas 6 pastas para cada tipo de cimento Portland, totalizando 18 pastas. Com a quantidade de cimento pesado na balança e água medida na proveta, ambos foram adicionados em um recipiente de plástico e misturados por aproximadamente 2 minutos com o auxílio de uma espátula até ficar com consistência homogênea para serem submetidas ao ensaio de consistência na referida mesa de consistência (Figura 2).



Figura 2: Aparelho para determinação da consistência (Autora Própria, 2021).

Durante o ensaio as pastas eram analisadas em intervalos de 15 minutos, contabilizando os seguintes intervalos de tempo: 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 min. Para cada tipo de cimento foram realizados 9 ensaios de consistência com as respectivas relações relação água/ligante. A Figura 3 e a Figura 4 exemplificam as misturas dos cimentos CP V-ARI e o CP IV-40 com relação água/ligante de 0,45 e 0,35 respectivamente.



Figura 3: Pasta Cimentícia Relação água/cimento 0,45 CPV-ARI (Autora própria, 2021).



Figura 4: Pasta Cimentícia Relação água/cimento 0,35 CP IV-40 (Autora Própria, 2021).

3.3. Ensaio de Mesa Consistência (flow table)

Antes de iniciar a execução do ensaio, a mesa para índice de consistência e a parede do molde troncônico

foram limpados com um pano seco. O ensaio de consistência foi realizado segundo a NBR 13276/2016, a pasta homogeneizada foi inserida no molde do tronco cônico que estava posto no centro da mesa e segurando firmemente para que o material não venha ser posto em excesso ou chegue a derramar pela lateral. Preencheu-se uma camada no molde com aproximadamente 1/3 do total, e com o soquete aplicou-se 15 golpes para que a pasta fique distribuída uniformemente, depois preenchemos 2/3 com 10 golpes e 3/3 com 5 golpes para completar o volume inteiro do molde. Terminada esta operação, removeu-se o material que excedente na base superior com uma régua, tomando o cuidado de limpar a mesa em volta do molde, sem remover o desmoldante.

O molde é retirado verticalmente com cuidado (Figura 5 e 6), e em seguida é aplicado 30 golpes por aproximadamente 30 segundos para forçar o espalhamento da pasta, conforme mostra a Figura 7. Logo após este processo é feito 3 medidas de diâmetro e o espalhamento é a média destas medidas.



Figura 5: Pasta do CP II-E-40 com $a/c = 0,30$ após a retirada do molde com 75 min (Autora Própria, 2021).



Figura 6: Pasta do CP IV-40 com $a/c = 0,50$ após a retirada do molde com 75 min (Autora Própria, 2021).



Figura 7: Pasta do CP V-ARI pronta para a medição de espalhamento com $a/c = 0,35$ após 15 min (Autora Própria, 2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultado de mesa de consistência (*flow table*)

Segundo a norma ABNT NBR 16606:2018 as argamassas possuem consistência normal quando o espalhamento medido é de 260 ± 10 mm. Este valor de referência foi igualmente adotado para avaliar a consistência das pastas cimentícias. Na Figura 8 é apresentado os resultados do ensaio de mesa de consistência dos Cimentos Portland CP II-E-40, CP IV-40 e CPV-ARI para todas a relações água/ligantes. As linhas em vermelho correspondem aos limites superior e inferior de consistência estabelecidos pela norma ABNT NBR 16606:2018.

Ao analisar os dados do CP II-E-40, observou-se que os valores de espalhamento mínimo e máximo foram 125 e 440 mm, respectivamente. Comparando os valores obtidos com o estabelecido pela norma é possível afirmar que das 6 relações a/c testadas apenas as relações de 0,30 e 0,35 apresentaram valores dentro do intervalo normatizado.

Os dados do CP IV-40 mostram que os valores de espalhamento mínimo e máximo foram 148 e 410 mm, respectivamente. O espalhamento das pastas cimentícia com relação a/c de 0,25 não foi possível ser determinado, pois não se obteve a formação da pasta para a realização do ensaio (ver Figura 9). Comparando os valores obtidos com o estabelecido pela norma é possível afirmar que das 5 relações a/c testadas apenas as relações 0,35 e 0,40 apresentaram valores dentro do intervalo normatizado.

Por último, os resultados obtidos para cimento CP V-ARI, mostram que os espalhamentos mínimos e máximo foram 140 e 400 mm, respectivamente. Tal como ocorreu para o cimento CP IV-40, não foi possível obter formação de pasta para relação $a/c = 0,25$, inviabilizando a obtenção do espalhamento (ver Figura 10). Comparando os valores obtidos com o estabelecido pela norma é possível afirmar que das 5 relações a/c testadas apenas as relações 0,35 e 0,40 apresentaram valores dentro do intervalo normatizado.

De modo geral é possível inferir três conclusões imediatas, a saber: (i) observa-se que os espalhamentos variaram dentro do intervalo de 125 a 440 m; (ii) o espalhamento aumentou com o aumento da relação água ligante, (iii) em todos os casos o espalhamento reduziu ao longo do tempo.

A variação na consistência para os diferentes tipos de cimentos analisados ocorreu em virtude das diferenças nas características físicas (granulometria, massa específica) e na composição. A consistência foi maior a medida em que aumentou as relações a/c porque aumentou a quantidade de água presente no sistema. Quanto mais água

disponível, maior será a distância de separação das partículas e menor será a resistência ao fluxo, consequentemente maior será o espalhamento. Em outras palavras, maior quantidade de água, maior fluidez, maior espalhamento, menor consistência. Por fim, a espalhamento diminuiu com o tempo em virtude da reatividade dos materiais cimentícios. No primeiro momento a água presente na pasta cimentícia solubiliza o clínquer gerando uma solução de íons. Ao atingir o ponto de saturação estes íons começam a se unir e formar uma instrutura interna irreversível, causando uma maior resistência ao fluxo.

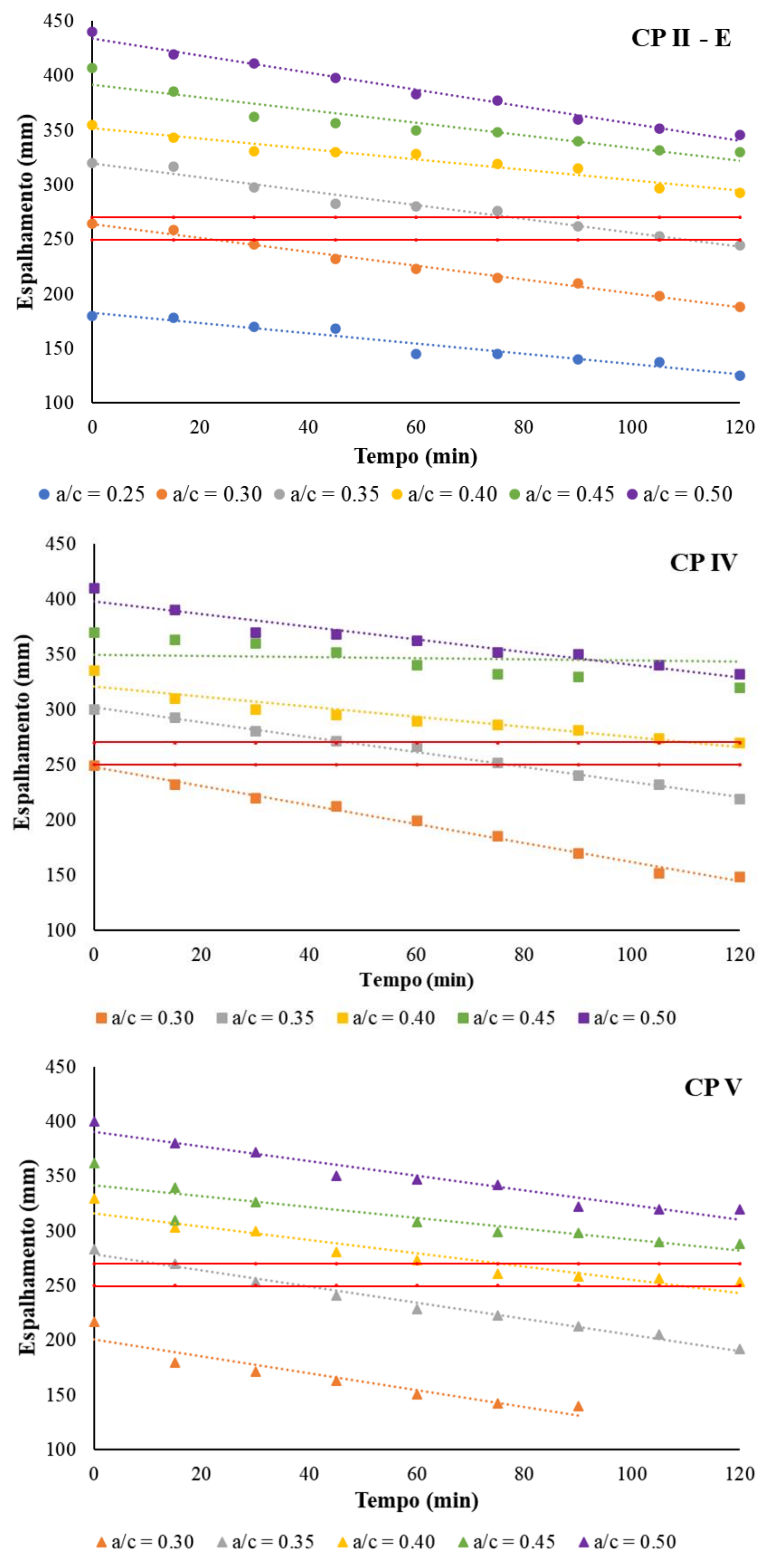


Figura 8: Resultado do ensaio de mesa de consistência dos cimentos CP II-E-40, CP IV-40 e CP V-ARI ao longo do tempo.



Figura 9: Pasta Cimentícia Relação água/cimento 0,25 CP IV-40 (Autora Própria, 2021).



Figura 10: Pasta Cimentícia Relação água/cimento 0,25 CP V-ARI (Autora Própria, 2021).

Depois de todas as relações terem sido submetidas ao ensaio, foi observado que 13 consistências das 141 realizadas atingiram a consistência normal de 260 ± 10 mm (Tabela 2). Assim percebe-se que o excesso de água no cimento afeta em uma grande proporção a sua consistência. Como os cimentos utilizados possuem características distintas, a relação água/cimento diferiram de uma para outra em alguns aspectos, que nesse caso seria o tempo e a própria a/c. Para o cimento CP II-E-40, o ideal se iniciou na relação de 0,30 enquanto o CP IV-40 e o CP V-ARI em 0,35 percebendo assim que ambos precisam de uma quantidade de água maior para que possa atingir a consistência estabelecida por norma para ser utilizada. Em outras palavras, os aditivos e características químicas, físicas e mecânicas então interligados diretamente na realização do ensaio, que por ser manual, pode afetar diretamente na consistência ideal do cimento.

Tabela 2: Consistências que atingiram o valor normal em relação ao tempo e água/cimento (Autora Própria).

Sigla	Relação (a/c)	Tempo (min)	Consistência (mm)
CP II-E-40	0,30	0	264,3
		15	259
	0,35	90	262
		105	253
CP IV-40	0,35	60	266,6
		75	252
	0,40	120	270
CP V-ARI	0,35	15	270
		30	253,3
	0,40	75	261
		90	258
		105	257
		120	253

4.2. Efeito do cimento Portland

Os gráficos da figura 11 demonstram o efeito do tipo de cimento Portland no espalhamento das pastas cimentícias, através dos mesmos é possível observar que para todas as relações água/cimento o cimento CP V-ARI teve o mesmo comportamento, obtendo menor valor de espalhamento em relação ao CP II-E-40 e o CP IV-40, isto pode ser explicado pelo fato do CP V-ARI ter menor finura que os demais, pois demandaria uma maior quantidade de água para obter um espalhamento equivalente ao do CP IV-40. Comparando o CP IV-40 com o CP II-E-40 verificou-se que o CP IV-40 obteve menor espalhamento, possivelmente uma maior finura da pozolana, ou ainda pode ser explicado pelo fato das adições pozolânicas promoverem uma maior aglomeração da pasta.

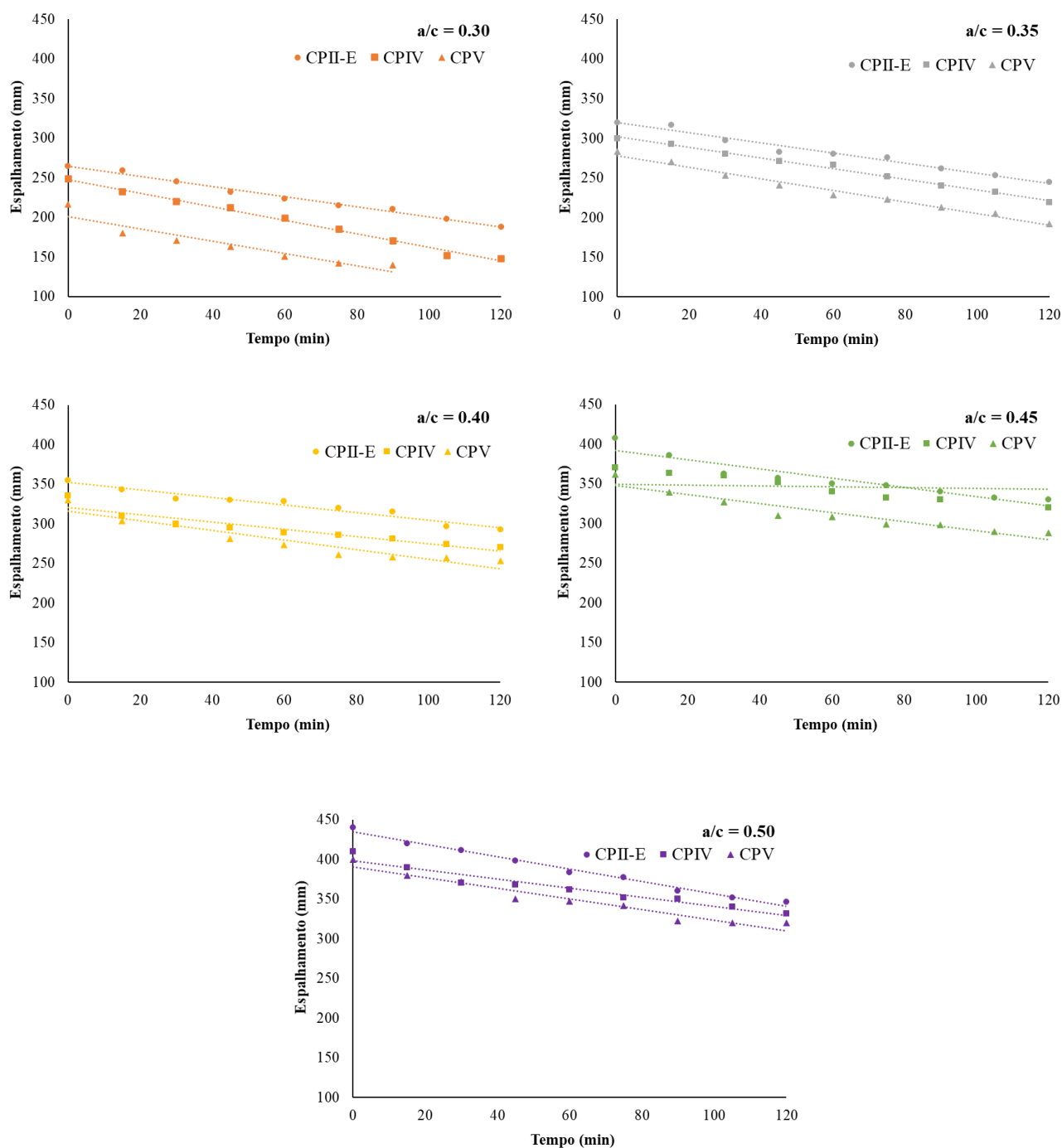


Figura 11: Efeito do cimento Portland no espalhamento de pastas cimentícias.

5. CONCLUSÃO

Foi possível obter através do ensaio várias consistências que atingiram a sua normalidade, sendo assim as relações água/cimento de 0,30, 0,35 e 0,40 realizadas no CP II-E-40, CP IV-40 e CP V-ARI foram as que possuíram um índice maior de aprovação, onde podem ser usadas para suas determinadas aplicações dentro dos seus respectivos tempos analisados no (Tabela 2). Assim, as interações físicas e químicas presente na composição de cada cimento influência de forma direta na hora da produção da pasta cimentícia quando

adicionado a água, que quanto maior for essa relação, mais fluida a pasta fica e a interação entre as moléculas se torna mais homogênea.

Portanto, a consistência é de alta importância para ser estudada, pois ela precisa ser utilizada de forma correta para que não haja nenhum problema na obra, assim é de grande ressalva que todo o procedimento seja realizado de acordo com a norma NBR 13276/2016, que especifica passo a passo do que deve ser feito.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, p.1-12. 2018.
- [2] SOBRAL, Hernani. Propriedades do Concreto Fresco: Engenharia Civil. **Fatores que Afetam a Trabalhabilidade: Teor de água/Mistura, Associação Brasileira de Cimento Portland**, Revista, v. 1, ed. 6, p. 10-21, 2000.
- [3] RAUCCI, J. S.; CECEL, R. T.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; JHON, V. M. **Effect of mixing method on the mini-slump spread of Portland cement pastes**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 11; n. 2, p. 410-431, 2018.
- [4] P.-C. Aïtcin, C. Jolicoeur, J. G. MacGregor, Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, Concrete Int. 16, 5 (1994) 45-52.
- [5] MEDEIROS, Marcelo; DRANKA, Francielle; MATTANA, Alécio; COSTA, Marienne. Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. **Revista Matéria**, Revista, v. 20, n. 1, ed. 1, p. 127-144, 2015.
- [6] CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico**. Orientador: Prof. Dr. Associado Vanderley Moarcy John. 2009. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, 2009.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, p.1-12. 2019.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual — Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, p.1-5. 2017.
- [9] DHIR, R.K; MCCARTHY, M.J; ZHOU, S.; TITTLE, P.A.J. Role of cement content in specifications for concrete durability: cement type influences. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, UK, v. 1, n. 1, 20 abr. 2004. Structures & Buildings, p. 113-127.
- [10] DE CASTRO, A.L; PANDOLFELLI, V.C. Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, Revista, v. 1, ed. 1, p. 18-32, 2009.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, p.1-8. 2018.
- [12] BOUVET, Adrien; GHORBEL, Elthem; BENNACER, Rachid. Cement and Concrete Research. **The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study**, France, v. 1, ed. 40, p. 1517-1523, 2010.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, p.1-2. 2016.
- [14] WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Materials and Structures. **Minimum cement content requirements: a must or a myth?** Israel, v. 1, ed. 42, p. 973-982, 25 out. 2008.
- [15] TAY, Yi Wei Daniel; QIAN, Ye Qian; TAN, Ming Jen. Composites Part B: Engineering. **Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test**, Singapore, v. 174, 31 Maio 2019.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura para a realização de ensaios**. Rio de Janeiro, p.1-2. 2016.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, p.1-4. 2017.
- [18] DE LIMA, F.M. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS DE CIMENTO PARA POÇOS DE PETRÓLEO COM ADIÇÃO DE PLASTIFICANTES**. Orientador: Antonio Eduardo Martinelli. 2006. 142 p. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- [19] VICTOR, João. **Cimento Portland: composição, definição e propriedades**. [S. l.]: Guia da Engenharia, 27 jun. 2020. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/composicao-cimento-portland/>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- [20] FASCIO, Antônio. **Construção Civil Tipos de cimento: confira suas aplicações e as variedades de produtos**. [S. l.]: Papo de Engenheiro, 5 out. 2021. Disponível em: <https://www.orcafascio.com/papodeengenheiro/venha-conhecer-os-diferentes-tipos-de-cimento-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

- [21] MOLINARI, Moarcy. Aglomerantes: Cimento Portland. *In*: MOLINARI, Moarcy. **Materiais de Construção: Cimento Portland**. 1-7. ed. Curitiba: Airton Maria, S/N. Disponível em: <http://www.airtonmaria.com/materiais-de-construcao/cimento-portland>. Acesso em: 13 nov. 2021.
- [22] CAMPOS, H.F; ROCHA, T.M.S; REUS, G.C; KLEIN, N.S; MARQUES FILHO, J. Estruturas e Materiais. **Determinação do teor ótimo de substituição do cimento Portland por pó de pedra usando métodos de empacotamento de partículas e análise do excesso de água na consistência de pastas**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 221-232, 2018.
- [23] GONÇALVES, J.P; FILHO, R.D.T; FAIRBAIRN, E.M.R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, 18 dez. 2006. Ambiente Construído, p. 83-94.