

## INTRODUÇÃO

Verifica-se nos tempos atuais um crescimento do consumo de recursos naturais e de energia. Este fato tem motivado preocupações com relação à finitude de muitos destes recursos, a geração de resíduos e à carga de emissões de CO<sub>2</sub> no planeta. Há, a partir destas problemáticas, crescentes reflexões a respeito do consumo dos recursos de forma consciente, equilibrada e eficiente. Visando minimizar o impacto em relação ao consumo destes recursos, tem-se buscado alternativas às tecnologias tradicionais de produção e de descarte dos materiais e a substituição nos processos produtivos da utilização de recursos naturais por outros materiais de menor impacto ambiental.

Sabe-se que a construção civil é uma das maiores responsáveis pelo consumo de energia e de recursos naturais. Como passivo ambiental na construção civil, tem-se a geração de resíduos, impulsionada, dentre outras, pelo crescimento populacional, pela preferência nacional pela construção não racionalizada (maiores imprevisibilidades gerando desperdícios e refazimentos) e pela necessidade de reformas, adequações e a vida útil do material que, ao término, poderá ser descartado. Notam-se motivos para o crescimento do volume de resíduos gerados, o consumo de recursos naturais e energéticos e a emissão de CO<sub>2</sub> oriunda das atividades da construção civil.

Todos estes fatores têm conduzido a discussões a respeito de mitigar o impacto ambiental, favorecendo a sustentabilidade aliada à produção mais limpa; menor utilização de recursos naturais e menor ocupação de aterros (utilizando-se de planejamento para redução responsável ou a proibição de aterros), minimizando a contaminação de lençóis freáticos e impactos no ecossistema. Soma-se que a maioria das utilizações do concreto origina-se de cimento Portland com base no clínquer e que para a sua fabricação é necessário alto consumo de energia, além ainda da produção de grande quantidade de emissões de gases de efeito estufa, principalmente CO<sub>2</sub> resultante de sua liberação a partir do calcário no processamento do clínquer. Conforme Bernstein et al. (2007), a decomposição do calcário em fornos de altas temperaturas configura-se como uma relevante fonte de emissão de CO<sub>2</sub> na construção civil, pois cada tonelada de calcário libera 440 kg de CO<sub>2</sub> e gera apenas 560 kg de material.

Esta pesquisa visa contribuir com a mitigação do impacto ambiental ao buscar utilidade ao resíduo gerado no processo de lapidação de vidros planos (sodo-cálcicos). O referido processo de lapidação e polimento de vidros possui um sistema de tratamento de efluentes industriais e

de reaproveitamento da água do processo, que é necessário para o resfriamento das peças, assim como para a redução do atrito. O sistema de tratamento de efluentes obtém como resíduo final uma lama de cor acinzentada que não pode ser aproveitada na fabricação dos vidros e é, portanto, descartada.

São produzidos cerca de 290kg de resíduos por dia, em torno de 84 toneladas anuais. Por meio do sistema de tratamento, é possível reaproveitar até 97% da água para utilização no processo de lapidação e polimento dos vidros. Por meio do processo de reuso da água, o ciclo sustentável da cadeia se completa com a preservação de um dos principais recursos do planeta, a água.

A fim de fornecer utilidade ao resíduo gerado, buscou-se a sua incorporação como substituto parcial ao cimento em estruturas de concreto. Porém, as características atreladas ao desempenho do concreto necessitavam ser atendidas, como: propriedades mecânicas e as propriedades relacionadas com a durabilidade. Ou seja, estruturas que atendessem aos requisitos mínimos estruturais e que pudessem resistir ao ingresso de agentes agressivos (como os íons cloreto), evitando processos de corrosão das armaduras e outras manifestações patológicas, tais como a fissuração por processos expansivos por álcali-sílica. A substituição parcial do cimento colabora também para a redução da utilização de recursos naturais na fabricação deste material, além ainda na redução da carga de emissão de CO<sub>2</sub> em virtude das altas temperaturas para a queima do calcário na fabricação do cimento.

Sendo assim, ao se buscar soluções para o resíduo do processo de lapidação dos vidros tem-se benefícios ecológicos, por meio da redução da implantação de aterros e possibilidade de contaminação de solos e a redução da carga de emissão de CO<sub>2</sub> oriunda da indústria do cimento e tem-se benefícios econômicos pela redução da utilização do cimento (um dos materiais de maior valor agregado em relação aos componentes do concreto), redução dos gastos com deslocamento do resíduo até a sua deposição em aterros, mitigação de gastos com aterros controlados e a produção de concretos mais resistentes a agentes agressivos e, logo, mais duráveis, elevando a vida útil das construções, como constatado nesta pesquisa com relação à elevação de vida útil dos concretos com a incorporação do resíduo de vidro.

Sabe-se que visando elevar a vida útil das estruturas de concreto e reduzir o consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>, têm-se buscado novos materiais que possam substituir o cimento de forma parcial e produzir concretos de alto desempenho, como exemplo tem-se a utilização

de materiais cimentícios suplementares, tais como metacaulim, sílica ativa, pozolana natural e a utilização de resíduos e subprodutos industriais. Segundo Helene (1993), a incorporação de outros elementos no concreto, como aditivos, adições minerais e o uso de técnicas de execução diferenciadas, permitem a execução de concretos de última geração permitindo a execução de estruturas esbeltas, duráveis e seguras para o usuário final.

Uma alternativa para minimizar o uso de cimento em concretos é a substituição por resíduos que possam atuar desencadeando reações pozolânicas ou de preenchimento de vazios de forma a não comprometer as propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade. Visando também contribuir com o avanço do conhecimento sobre a potencialidade da incorporação de resíduos de vidro em concretos como substitutos parciais ao cimento (favorecendo o desempenho sob a ótica de suas propriedades mecânicas e de durabilidade), além de buscar destinação ao resíduo proveniente do sistema de tratamento de efluentes industriais, este trabalho avalia a resistência de concretos estruturais às solicitações de ingresso de cloretos (agentes de grande severidade em degradações de estruturas de concreto por corrosão de armaduras), a resistência a processos expansivos por reação álcali-sílica (em função do aparente elevado teor de álcalis do resíduo de vidro), a influência da resistência à compressão em função da substituição parcial do cimento e a elevação de vida útil com a incorporação do resíduo.

Será adotada, para avaliação comparativa do desempenho dos concretos em estudo, a incorporação de metacaulim de forma isolada nos mesmos percentuais de utilização que os resíduos de vidro, pois desponta como material suplementar consagrado de utilização em concretos como substituto parcial ao cimento e capaz de potencializar os ganhos com relação à resistência à penetração de cloretos e à resistência à compressão. A utilização combinada de metacaulim com resíduos de vidro também será adotada em função do estudo bibliográfico demonstrar que a incorporação em concretos de resíduos de vidro com materiais cimentícios suplementares pode mitigar efeitos de reação álcalis-sílica (MEYER *et al.*, 1996; SCHWARZ *et al.*, 2008; MATOS E SOUSA-COUTINHO, 2012; SHI, ZHENG, 2007).

## **1. JUSTIFICATIVAS**

A pesquisa pela incorporação do resíduo do processo de lapidação do vidro em estruturas de concreto propicia, além da avaliação da potencialidade deste resíduo como substituto parcial ao cimento Portland, a análise da utilização de resíduos de vidro classificados como vidros

sodo-cálcicos em geral, pois suas características químicas em muito se assemelham com os resíduos gerados no sistema de tratamento adotado pela empresa beneficiadora de vidro, conforme Tabela 1. Segundo Shi e Zheng (2007), dentre os diversos resíduos sólidos urbanos, o vidro pode ser considerado o mais adequado como substituição ao cimento, devido as suas características físicas e composição química. Pesquisas indicam que a utilização de resíduos de vidro em concretos são capazes de melhorar suas propriedades mecânicas e as propriedades relacionadas com a durabilidade - tais como resistência ao ingresso de agentes agressivos. Os vidros sodo-cálcicos correspondem a mais de 80% dos vidros fabricados, configurando-se vidros de construção civil, automotivos, embalagens, dentre outros.

Tabela 1. Caracterização química do resíduo de vidro em diferentes pesquisas

Composição química	Schwarz <i>et al.</i> (2008)	Limbachiya (2009)	Jain e Neithalath (2010)	Matos e Sousa-Coutinho (2012)	Nassar e Soroushian (2012)	Pignaton (2011)	Sauer (2013)	Média	Resíduo da lapidação do vidro
SiO <sub>2</sub>	72,5	70,13	72,5	70	68	64,29	56,77	67,74	64,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	1,76	0,4	1,2	7	4,25	6,07	3,01	2,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,37	0,2	0,65	<1	0,38	0,29	0,35	0,44
CaO	9,7	12,08	9,7	8,7	11	13,64	5,64	10,07	6,92
MgO	3,3	1,55	3,3	3,7	1	4,16	3,67	2,95	4,49
Na <sub>2</sub> O	13,7	14,56	13,7	16	12	11,49	15,41	13,84	19,36
K <sub>2</sub> O	0,1	0,55	0,1	0,35	<1	0,53	0,16	0,30	0,11

De acordo com Shi e Zheng (2007) a utilização do vidro reciclado na fabricação do vidro reduz o consumo de energia, matérias-primas e desgaste de máquinas. Entretanto, grande parte do material não é absorvida pelo processo de reciclagem e, em virtude de sua natureza não biodegradável, tende a potencializar poluições ambientais. Neste contexto, os resíduos de vidro apresentam um desafio para os sistemas de gestão de resíduos sólidos no mundo e a sua utilização em concretos configura-se como uma maneira adequada para preservar as matérias-primas naturais, poupar energia e reduzir espaços de aterros (RASHAD, 2014).

De acordo com EPA (2012), o vidro representa 2,4% de participação na composição gravimétrica média dos resíduos urbanos coletados no Brasil. No Brasil, o processo de reciclagem dos resíduos de vidro contempla apenas a parcela de 47% e a reutilização de 33% (ABVIDRO, 2012), logo, para os 20% dos 100%, necessita-se buscar soluções que estejam

comprometidas como o desenvolvimento sustentável. Conforme estimativas das nações unidas, em 2004 havia 200 milhões de toneladas de resíduos sólidos no mundo e 7% destes configuravam-se resíduos de vidro, ou seja, 14 milhões de toneladas (TOPÇU e CANBAZ, 2004). De acordo com Jani e Hogland (2014), a produção total de vidro mundial em 2007 era cerca de 89,4 milhões e espera-se que a sua produção venha a aumentar em virtude do aumento da industrialização e da melhoria do nível de vida.

A utilização de resíduos de vidro em estruturas de concretos, além de promover benefícios tecnológicos, promove benefícios ambientais, pois contribui para destinação deste resíduo que em grande parte seria descartado. Além disso, contribui para a redução da utilização de recursos naturais, da emissão de CO<sub>2</sub> e consumo energético em função da redução da utilização do cimento. Acrescenta-se ainda a elevação da vida útil de concretos, minimizando a degradação prematura das construções, elevando o tempo de utilização da edificação, evitando demolições, reparos e outras construções para o mesmo fim.

Logo, o aproveitamento do resíduo de vidro oriundo do processo de lapidação de vidros tende a favorecer a execução de concretos de alto desempenho (satisfazendo um produto final de maior qualidade) e a oferecer destinação ao resíduo. Assim, são gerados impactos positivos econômicos (em face da economia na deposição do resíduo, da elevação de vida útil das construções e da redução de reparos e manutenções prematuras); redução do impacto ambiental (em função da redução de aterros e passivos com a fabricação do cimento) e impactos positivos sociais (na medida em que são executadas edificações em concreto armado mais seguras e duráveis e é promovida a redução de gastos públicos em manutenções prematuras em obras públicas executadas em concretos estruturais não resistentes a ambientes agressivos, assim os recursos públicos podem ser direcionados também para outras áreas sensíveis aos anseios da coletividade).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O presente trabalho tem o objetivo geral de avaliar o desempenho de concretos produzidos com resíduos do processo de lapidação e polimento do vidro sodo-cálcico.

### **2.2. Objetivos específicos**

Analisar o comportamento do concreto no estado fresco em relação à consistência com a utilização do resíduo do processo de lapidação do vidro em substituição parcial ao cimento.

Analisar o comportamento do concreto no estado endurecido em relação à resistência à compressão com a utilização do resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento.

Comparar a resistência à penetração de íons cloreto em concretos estruturais (prevenção da corrosão das armaduras por íons cloreto) e a Vida Útil de Projeto com a utilização do resíduo de vidro com aqueles sem a substituição parcial ao cimento.

Comparar a suscetibilidade à expansão por reação álcali-sílica em concretos (fenômeno de reatividade do agregado com os álcalis presentes na mistura que podem vir a gerar processos deletérios expansivos no concreto endurecido, ocasionando fissuras) com a utilização de resíduo de vidro em diferentes dimensões de partículas e utilizando-se de materiais suplementares.

Verificar o desempenho de concretos com a utilização conjunta de resíduo de vidro e metacaulim (referência em relação ao efeito mitigador do ingresso de agentes agressivos) por meio de ensaios pertinentes às propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Processo de obtenção do resíduo de vidro aplicado neste estudo**

Em decorrência da utilização em larga escala de água proveniente da concessionária, utilizada no processo de lapidação de vidros planos, tornou-se necessário, do ponto de vista ambiental e econômico, o reaproveitamento deste insumo. Para efeito, a empresa fornecedora do resíduo utiliza-se de sistema de estação de tratamento visando o tratamento do efluente industrial da seguinte maneira: a água utilizada no processo de lapidação das chapas de vidro, acrescida do vidro desgastado é despejada em canais que circulam por todo o galpão de manufatura dos vidros. Esta água, juntamente com o resíduo do vidro desgastado, é conduzida por estes canais a tanques de bombas submersas que bombeiam a água até um reservatório, na porção externa do galpão de processamento de chapas de vidro. A água com resíduos é bombeada para um primeiro silo de capacidade igual a 106m<sup>3</sup>, onde a ela são adicionados produtos químicos para o processo de decantação, compostos de etanol, óxidos e solventes polares. No silo em que ocorre a decantação a água suja é acumulada até que transborde. Neste momento, a água que transborda já não contém flocos de vidro e é levada a um segundo silo. Deste silo,

é bombeada de volta para os galpões para ser utilizada no processo de lapidação das chapas de vidro. O resíduo que permanece no fundo do primeiro silo, onde ocorre a decantação, é sugado para um agitador, onde é constantemente misturado para que não endureça. Este material é gradativamente bombeado para o filtro prensa, que está localizado em uma plataforma mais alta. Em seguida, o material é prensado para que maior quantidade possível de água seja retirada do resíduo e reaproveitada. No entanto, a água resultante do processo de prensagem retorna ao primeiro tanque e passa novamente por todo o ciclo de purificação, para que se garanta que a água que retorna ao processo esteja efetivamente limpa. É possível recuperar entre 95 e 97% da água utilizada no processo (PIGNATON, 2011).

Figura 1. Fluxograma do processo de obtenção do resíduo, fonte: adequado de Pignaton (2011)



Figura 2. Panos de vidros a serem lapidados e ponto de captação de água residual, fonte: autor

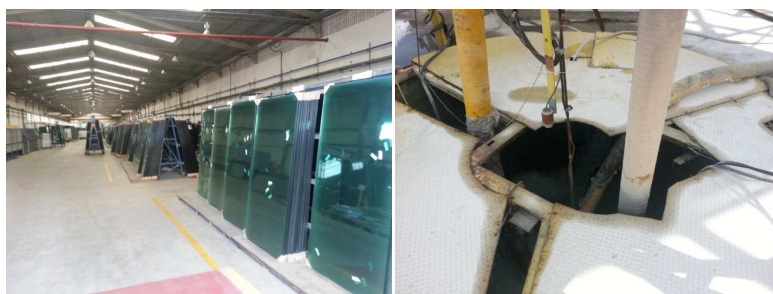


Figura 3. Água residual bombeada até o silo e filtro de decantação de resíduos, fonte: autor



O material resultante do filtro prensa é uma massa de aspecto acinzentado, levemente úmida, contendo entre 3 e 5% de água (Figura 4). Após a secagem, sua coloração é bem mais clara.

Figura 4. Armazenamento do resíduo final, fonte: autor



É realizada apenas uma prensagem ao dia, na qual são expelidos 290 kg deste resíduo e, anualmente, 84 toneladas. Parte deste material era recolhido por uma empresa de reciclagem, que utilizava para manufaturar tijolos, atualmente, não há mais o interesse.

O resíduo de vidro foi recolhido e seco a temperatura ambiente. Entretanto, verificou-se que após a secagem por 24 horas o material ainda apresentava regiões com pequena umidade, em função disto optou-se por levar o material em estufa a 100° C até que sua massa tornar-se constante. Em seguida, efetuou-se o destorroamento do mesmo.

Figura 5. Resíduo recolhido e submetido a secagem natural, Fonte: Autor



### 3.2. Métodos de ensaio

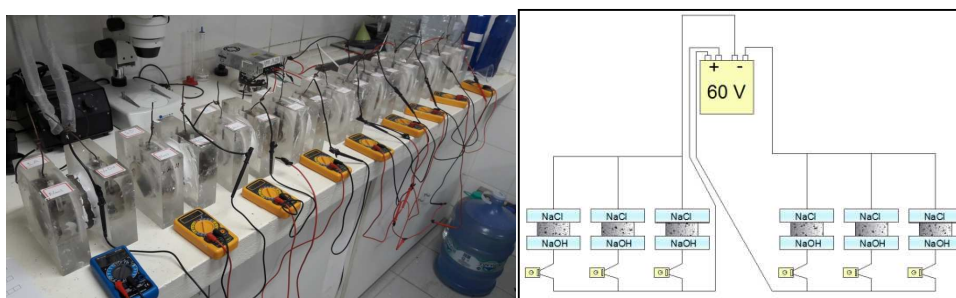
#### 3.2.1. Avaliação qualitativa da resistência à penetração de cloretos (ASMT C 1202, 2012).

Realizou-se a determinação da penetrabilidade de cloretos por meio de mecanismo acelerado de migração de cloretos (utilização de corrente elétrica) de acordo com o prescrito na norma ASMT C 1202 (ASMT, 2012). Por meio desta norma, torna-se possível classificar os concretos com relação à maior ou menor resistência ao ataque de cloretos. Após procedimento



de condicionamento, as amostras de concreto foram acopladas em células de acrílico onde se faz presente espaços internos para inclusão de um lado hidróxido de sódio (NaOH), pólo positivo, cátion, e do outro cloreto de sódio (NaCl), polo negativo, ânion. Montadas as células, é realizada a montagem do circuito de maneira que passe pelas amostras uma diferença de potencial de  $60 \pm 0,1V$ . São realizadas leituras da corrente que passam pelas amostras a cada 30 minutos durante seis horas. Por meio da corrente passante total no período de 6 horas e a fórmula estipulada pela norma, tornou-se possível a classificação dos concretos.

Figura 6. Ensaio ASTM C 1202 em execução e representação do aparato de ensaio, fonte: autor



### 3.2.2. Ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário (NT BUILD 492, 1999)

O ensaio baseia-se na passagem de diferença de potencial nas amostras e o resultado é a obtenção do coeficiente de difusão de cloretos, medida necessária para a estimativa de Vida Útil de Projeto de estruturas de concreto. O aparato recomendado pelo ensaio assemelha-se com o estipulado pela norma ASTM C1202 (ASTM,12012), com a exceção do procedimento, posterior ao processo de aplicação de diferença de potencial, de rompimento dos corpos de prova e aspersão de nitrato de prata para leitura da camada contaminada por cloretos. A partir dos valores de profundidade de penetração de cloretos e por meio de equação apresentada na norma é possível obter o coeficiente de difusão de cloretos.

### 3.2.3. Ensaio de difusão de cloretos por imersão (NT BUILD 443, 1995)

O ensaio baseia-se na imersão de corpos de prova em solução salina (165g de NaCl por litro de solução) por um período determinado. A sua adoção foi necessária para avaliar também a penetração de cloretos por mecanismos de difusão, diferentemente da utilização de corrente elétrica, conforme os métodos anteriormente apresentados. Para efeito, os concretos foram curados por período de 28 dias e idades de exposição a cloretos de 60, 120 e 180 dias. As faces laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas a fim de que o ingresso de

cloretos ocorresse apenas em sua face superior. Para cada idade, os concretos foram rompidos diametralmente e aspergido nitrato de prata para leitura da camada contaminada por cloretos.

Figura 7. Ensaio de difusão por imersão, fonte: autor



### 3.2.4. Ensaio de álcali sílica pelo método de barras (ASTM C1260/14)

Este método de ensaio proporciona um meio para detectar o potencial de reatividade álcali-silica em concretos, o que pode resultar numa prejudicial expansão interna e processos de manifestações patológicas, tais como fissuração. Foram moldadas 3 barras de argamassas para cada mistura e submersas em água de solução de NaOH. Os recipientes devem ser feitos de um material que resista a uma exposição a 80 °C e que seja resistente e inerte em relação à solução. As barras devem ser apoiadas de modo que a solução tenha acesso a toda a superfície das barras; portanto, deve-se assegurar que as amostras não toquem os lados do recipiente e não se toquem. Foram realizadas leituras a cada 3 dias durante período de 30 dias.

Figura 8. Processo de execução do ensaio de reação álcali-silica (a: amostras em estufa; b: retirada de amostras de solução; c: processo de secagem e d: leitura da expansibilidade), fonte: autor



### 3.3. Planejamento dos Experimentos

Os ensaios de laboratório foram conduzidos de forma a investigar como a substituição de cimento Portland por resíduo do processo de lapidação do vidro influenciam no desempenho (resistência mecânica, resistência à penetração de cloretos, elevação da vida útil e mitigação de reação álcali-sílica) dos concretos analisados. As variáveis dependentes (aquelas cujo comportamento se quer avaliar em função das variáveis independentes, correspondem àquilo que se deseja prever e/ou obter como resultado) foram: consistência pelo abatimento do tronco de cone; resistência à compressão axial; carga total passante; coeficiente de difusão de cloretos; profundidade de penetração de cloretos e expansibilidade por reação álcali-sílica. As variáveis independentes (são introduzidas de maneira intencional a fim de verificar a relação entre suas variações e a influência que produzem nas variáveis dependentes) foram: idade: 28, 56 e 91 dias; utilização de resíduo de vidro em percentuais de 10% e 20% em substituição ao cimento; utilização de metacaulim em substituição ao cimento nos percentuais de 10% e 20%; utilização conjunta de resíduo de vidro e de metacaulim nos percentuais de 5% (resíduo de vidro) + 5% (metacaulim) e 10% (resíduo de vidro) + 10% (metacaulim), em substituição ao cimento e utilização de resíduo de lapidação do vidro contemplando moagem e sem moagem.

#### 3.3.1. Resíduo do processo de lapidação dos vidros

O resíduo utilizado nas misturas de concreto foi coletado em estação de reaproveitamento de água localizada no CIVIT II, município da Serra, região metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil. A secagem do resíduo foi realizada em área coberta e ventilada, efetuando-se, em seguida, o primeiro processo de destorroamento. Após isso, foi seco o material em estufa a 105° C e novamente procedeu-se o destorroamento. Após este processo, o resíduo foi armazenado em reservatórios vedados. O resíduo foi submetido a ensaio de granulometria a laser (granulometro Symaptech) e apresentou 90% das partículas abaixo de 73 µm e partícula média de 42,17 µm. Em função do constatado nos ensaios de índices de pozolanicidade (IAP cal e IAP cimento, ABNT NBR 5752:2014 e ABNT NBR 5751:2015), considerou necessária a moagem do resíduo de vidro objetivando a redução da dimensão da partícula e o aumento da área específica a fim de buscar atendimento aos requisitos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014), pertinente à classificação de materiais pozolânicos. Neste contexto, realizou-se a moagem em moinho de bolas e em cada 1 hora de moagem realizava-se o ensaio de dimensão de partícula na peneira 325, podendo-se constatar

que após 2 horas de moagem não há maiores efeitos de redução das dimensões das partículas, sendo possível obter um tamanho de dimensão média de partícula com a moagem de 35  $\mu\text{m}$ .

Tabela 2. Distribuição granulométrica do resíduo e outros materiais, fonte: autor

Tipo	D(0,1)	D(0,5)	D(0,9)	Dm ( $\mu\text{m}$ )
Cimento	2,489	13,75	32,98	16,06
Resíduo de vidro sem moagem	2,411	16,06	73,05	<b>42,17</b>
Resíduo de vidro moído por 2 horas	1,612	10,28	84,56	<b>35,02</b>
Metacaulim	2,624	16,65	56,16	23,80

### 3.4. Programa Experimental

A pesquisa objetivou analisar corpos de provas compondo relações a/c de 0,60. Esta relação foi escolhida por ser a maior relação permitida em ambientes urbanos e não submersos (classe de agressividade II, segundo a ABNT NBR 6118:2014) com diferentes situações de agentes contaminantes, inclusive cloretos. A opção pela utilização de metacaulim refere-se, primeiramente, por configurar-se como um parâmetro do efeito da utilização de pozolanas em concretos. A segunda questão corresponde a verificar o desempenho de concretos com a utilização conjunta de resíduo de vidro e metacaulim, tendo em vista que o estudo bibliográfico apresentou aconselhável a utilização conjunta a fim de mitigar reações álcali-sílica. A Tabela 3 apresenta os tipos de concretos da pesquisa.

Tabela 3. Tipos de concretos da pesquisa, fonte: autor

LEGENDA*	(RV1= resíduo de vidro sem moagem) (%)	(RV2= resíduo de vidro moído) (%)	(ME= metacaulim) (%)	Consumo de cimento ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Traço (cimento, areia, brita)
REF	0	0	0	302,85	1:2,89:3,74
RV1-10	10	0	0	272,57	0,9:2,89:3,74
RV1-20	20	0	0	242,28	0,8:2,89:3,74
RV2-10	0	10	0	272,57	0,9:2,89:3,74
RV2-20	0	20	0	242,28	0,8:2,89:3,74
ME-10	0	0	10	272,57	0,9:2,89:3,74
ME-20	0	0	20	242,28	0,8:2,89:3,74
RV1ME-10	5	0	5	272,57	0,9:2,89:3,74
RV1ME-20	10	0	10	242,28	0,8:2,89:3,74
RV2ME-10	0	5	5	272,57	0,9:2,89:3,74
RV2ME-20	0	10	10	242,28	0,8:2,89:3,74

**\*Legenda:** REF (concreto de referência); RV1-10 (concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem); RV1-20 (concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem); RV2-10 (concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem); RV2-20 (concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem); ME-10 (concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim); ME-20 (concreto com 20% de substituição do cimento por metacaulim); RV1ME-10 (concreto com 5% de substituição do cimento por metacaulim e mais 5% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem); RV1ME-20 (concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim e mais 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem); RV2ME-10 (concreto com 5% de substituição do cimento por metacaulim e mais 5% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem); RV2ME-20 (concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim e mais 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem)

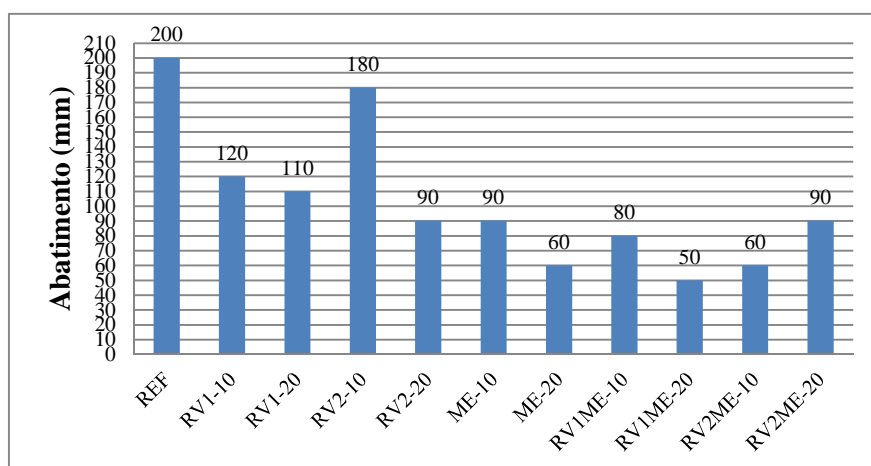
### 3.5. Resultados dos Ensaios em Concretos

#### 3.5.1. Concreto no estado fresco

##### 3.5.1.1. Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi executado conforme recomenda a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Foi fixado o abatimento em  $200 \pm 10$  mm. A Figura 9 apresenta o comportamento dos concretos produzidos com relação à consistência.

Figura 9. Resultados abatimento, fonte: autor

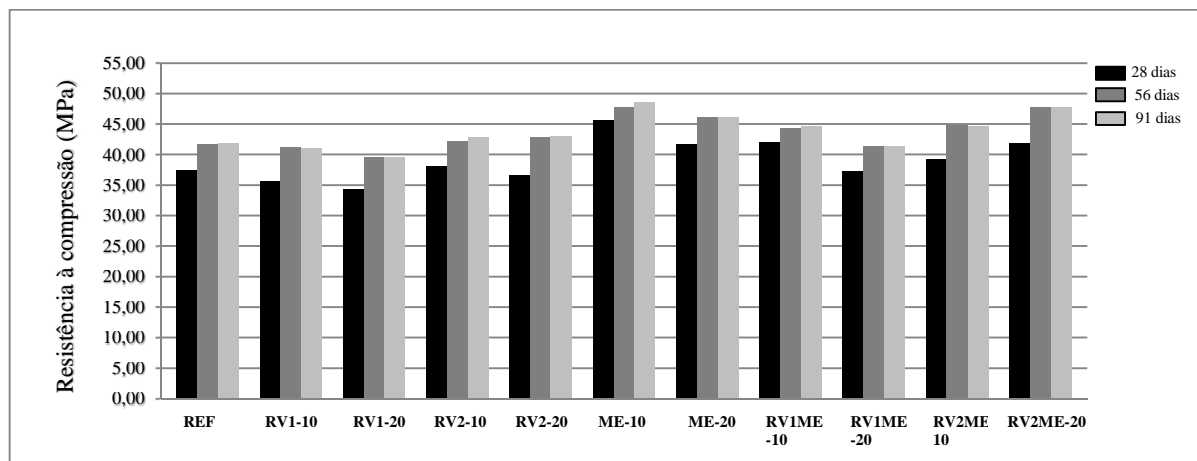


Nota-se que com a utilização do resíduo de vidro com ou sem moagem há uma redução do abatimento em relação ao concreto de referência. Entretanto, eles ainda mantiveram uma adequada trabalhabilidade variando entre  $100 \pm 20$  mm. Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2014) afirmam que para determinada consistência do concreto a utilização de materiais com elevada área superficial - e que não reagem com outros materiais na mistura elevando o teor de finos - aumenta a demanda de água no concreto fresco. Logo, a utilização de materiais muito finos, como é o caso dos resíduos de vidro, contemplando dimensões médias de partículas entre  $35\mu\text{m}$  e  $45\mu\text{m}$ , corroboram com o mencionado efeito.

### 3.5.1.2. Resistência à compressão axial

É possível também identificar o gráfico com os valores médios de resistência à compressão pertinentes aos diferentes concretos investigados, conforme Figura 10.

Figura 10. Resultados de resistência à compressão, fonte: autor



Por meio da Figura 10, verifica-se que aos 28 dias, no geral, há perda de resistência com a substituição por resíduo de vidro, conforme constatado por Nassar e Soroushian (2012), Matos e Coutinho (2012), Schwarz e Cam (2008) e Kamali *et al.* (2015). Entretanto, o concreto com resíduo de vidro moído em substituição parcial ao cimento em 10% (RV2-10) promoveu a manutenção da resistência ainda em 28 dias. Constata-se ainda que a combinação de resíduos de vidro com metacaulim apresentou valores de resistência à compressão superiores ao referência, podendo-se utilizar o resíduo de vidro moído com substituição ao cimento de 10% e metacaulim, também com 10%, promovendo ganhos de resistência ainda em 28 dias de 12%.

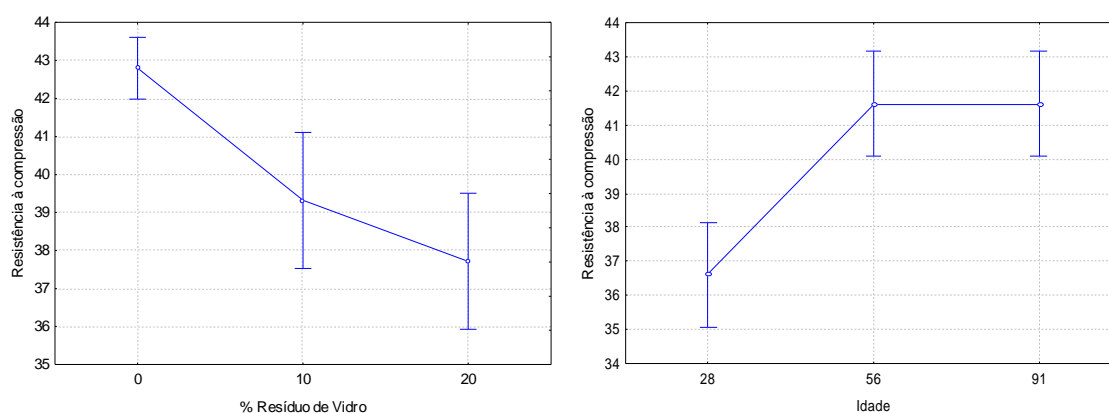
Constata-se também que aos 56 dias concretos com resíduo de vidro moído com 20% de substituição parcial ao cimento superam os concretos de referência. O efeito físico pode ter contribuído devido ao pequeno tamanho das partículas de vidro que ocupam os espaços vazios deixados pela pasta de cimento, reduzindo a porosidade e contribuindo para a retenção de água utilizada na mistura, melhorando a hidratação do cimento. Soma-se ainda a hipótese do efeito químico (atividade pozolânica), devido à reação química entre o resíduo de vidro e o cimento em função da formação de compostos mais estáveis (como a produção de C-S-H originário da reação com o hidróxido de cálcio e a água) e à diminuição dos vazios na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado graúdo.

Verificam-se, conforme Tabela 4 e Figura 11, os resultados da análise de variância referente à resistência à compressão dos concretos com a utilização de resíduo de vidro sem moagem.

Tabela 4. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro sem moagem, fonte: autor

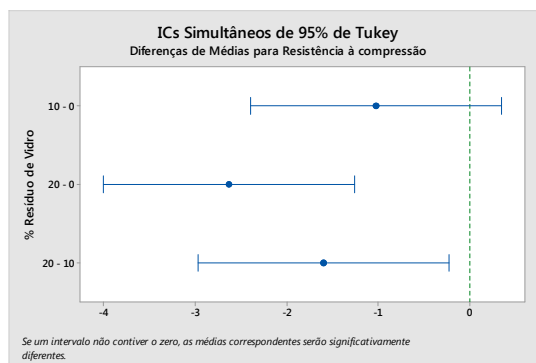
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	245,32	2	122,66	17,095	0,000002	Significativo
Idade	204,82	2	102,41	14,273	0,000011	Significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	2,86	4	0,71	0,100	0,982124	Não significativo
Error	380,28	53	7,18			

Figura 11. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre a resistência à compressão, fonte: autor



Conforme identificado na Figura 11, à medida que aumenta o percentual de resíduo de vidro sem moagem constata-se redução da resistência à compressão com significância estatística, pois  $p\text{-valor} < 0,05$ . Logo, segundo os gráficos, a substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem nestes percentuais não favoreceu a manutenção da resistência à compressão, possivelmente isto tenha ocorrido em função da não pozolânicidade do material e que o efeito de preenchimento dos poros do concreto pelo resíduo de vidro não foi suficiente para compensar a substituição parcial do cimento. Tornou-se também necessário identificar entre quais tratamentos apresentaram-se as diferenças, sendo assim, o Teste de Tukey identificou que a utilização com 10% de substituição por resíduo de vidro sem moagem apresentou similariedade com o concreto de referência, (segundo o método, contemplando o intervalo de zero) conforme Figura 12. Assim, é possível substituir até 10% do cimento por resíduo de vidro sem moagem sem perda da resistência. Para a substituição de 20% de cimento por resíduo de vidro sem moagem, o efeito de preenchimento de poros, proporcionado pelo resíduo de vidro, não foi suficiente para manter a resistência do concreto.

Figura 12. Teste de Tukey: resistência à compressão - concretos com resíduo de vidro, Fonte: Autor

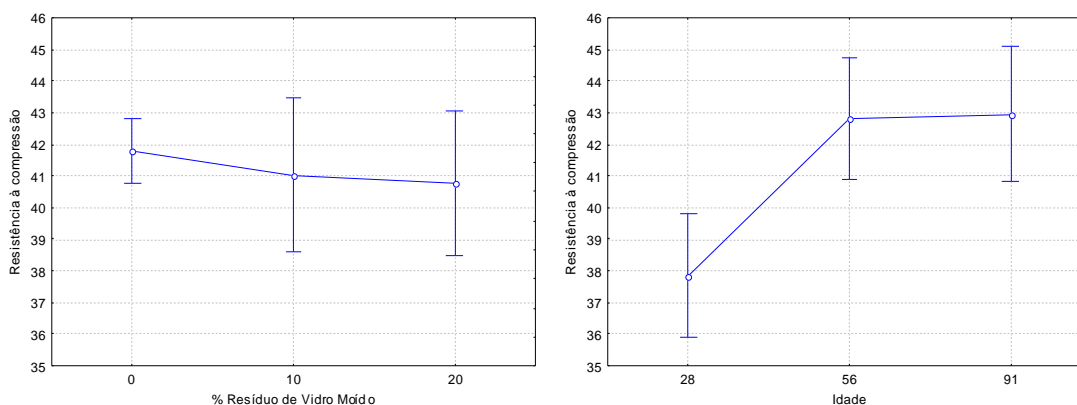


Verificam-se, conforme Tabela 5 e Figura 13 os resultados da análise de variância referente à resistência à compressão dos concretos com a utilização de resíduo de vidro com moagem.

Tabela 5. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro com moagem, fonte: autor

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	10,30	2	5,15	0,447	0,641849	Não significativo
Idade	199,92	2	99,96	8,676	0,000550	Significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	7,34	4	1,83	0,159	0,957963	Não significativo
Error	610,66	53	11,52			

Figura 13. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a resistência à compressão, fonte: autor



A partir da Figura 13, verifica-se que a utilização de resíduo de vidro moído ocasionou redução da resistência à compressão, porém sem significância estatística, pois o efeito do percentual de resíduo moído na resistência apresentou p-valor de 0,6418, logo maior que o índice de significância de 0,05. Sendo assim, é possível substituir o cimento em até 20% por resíduo de vidro moído sem perda de resistência à compressão.

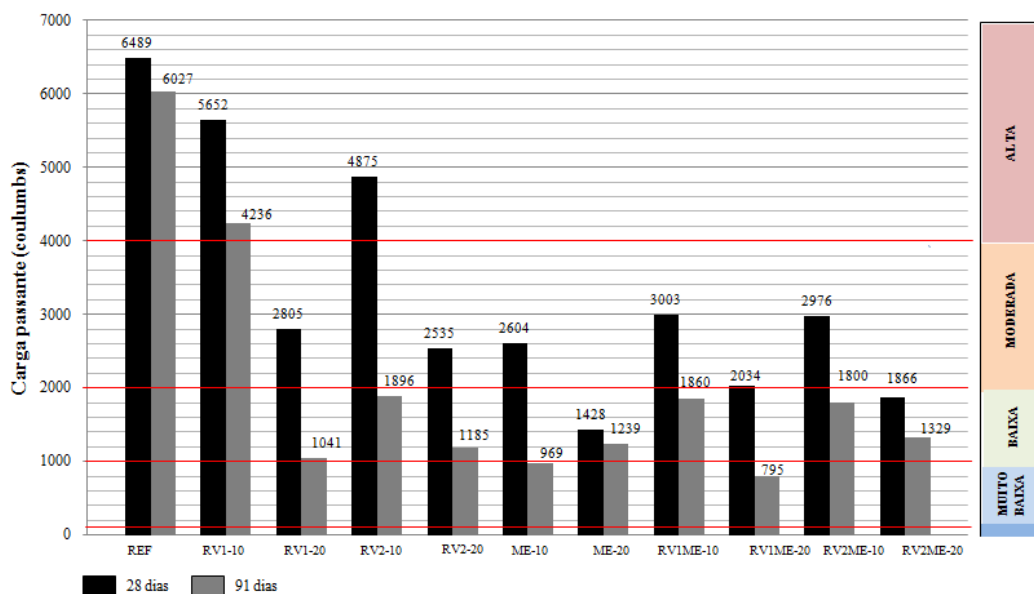


Este comportamento pode ter ocorrido em função das reações pozolânicas com os compostos hidratados do cimento (reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas de resíduo de vidro moído que provocaram o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente do silicato de cálcio hidratado - C-S-H), conforme identificado o potencial de atividade pozolânica nos ensaios de caracterização do resíduo de vidro com moagem. Provavelmente a moagem elevou a área específica e a finura do material elevando a sua reatividade. As reações pozolânicas com a utilização do resíduo de vidro moído compensaram a retirada do cimento, mantendo a resistência do concreto em função, possivelmente, de melhorar a homogeneização da microestrutura tanto da matriz como da zona de transição do concreto. Com a zona de transição melhorada, em função das alterações em sua microestrutura, melhora-se o comportamento do concreto à compressão.

### 3.5.1.3. Ensaio acelerado de migração de cloretos - ASTM C1202 (ASTM, 2012)

É possível verificar os resultados de cargas passantes no tocante à classificação qualitativa da resistência à penetração de cloretos contemplada na ASTM C1202, conforme Figura 14.

Figura 14. Resultados de resistência à penetração de cloretos, fonte: autor



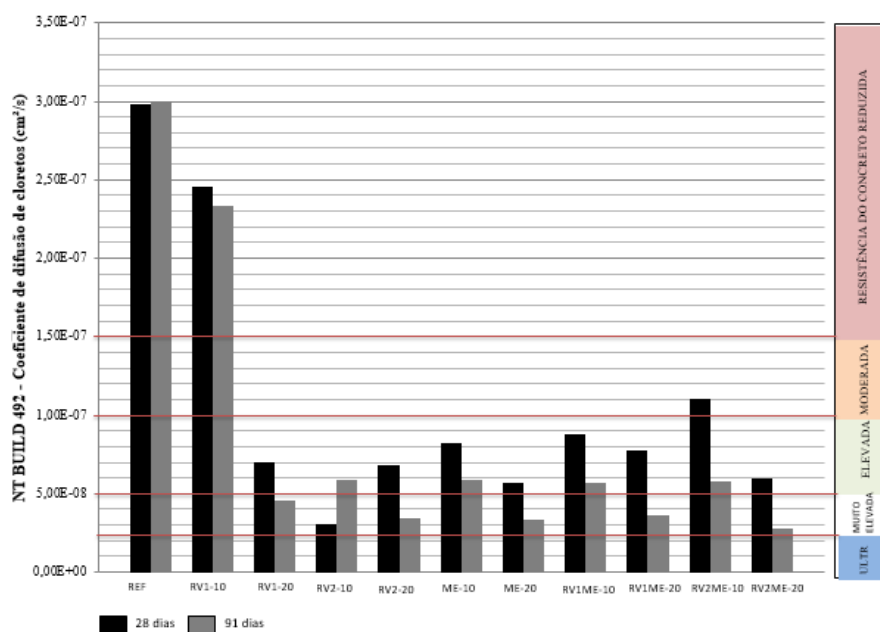
Por meio da Figura 14, torna-se possível constatar que a utilização de resíduo de vidro sem moagem, 10%, não foi suficiente para atingir a classificação de moderada penetrabilidade de íons cloretos, promovendo uma redução de apenas 13% aos 28 dias e de 30% aos 91 dias. Verifica-se, entretanto, que ao se adotar o mesmo resíduo de vidro sem moagem, porém com o percentual de 20% obtém-se aos 91 dias uma redução de 83%, equivalente à utilização de

resíduo de vidro moído (84%) e de metacaulim, com 10% (84%) e com 20% (79%). Constatase que, conforme classificação qualitativa contemplada na norma do ensaio, a utilização de resíduo de vidro sem moagem com 20% de substituição (RV1-20) e de metacaulim com 10% de substituição (ME-10) atingiram patamares de muito baixa penetrabilidade aos íons cloretos, logo reduzindo a penetração aos íons cloretos em relação ao concreto de referência de alta para muito baixa. Destacam-se também os concretos com 10% de metacaulim e 10% de resíduo de vidro sem moagem como os mais eficientes com relação à resistência à penetração aos íons cloretos (RV1ME-20). Este comportamento pode ter ocorrido em função da combinação da atuação da pozolanicidade do metacaulim com o efeito de preenchimento de poros do resíduo sem moagem. Sendo assim, substituiu-se até 20% do cimento promovendo benefícios nos aspectos tecnológicos, econômicos e sustentáveis.

#### 3.5.1.4. Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário (NT BUILD 492, 1999)

É possível verificar os resultados de coeficiente de difusão de cloretos no tocante à classificação qualitativa segundo Gjorv (2001), conforme Figura 15.

Figura 15. Coeficiente de difusão de cloretos não estacionário, fonte: autor



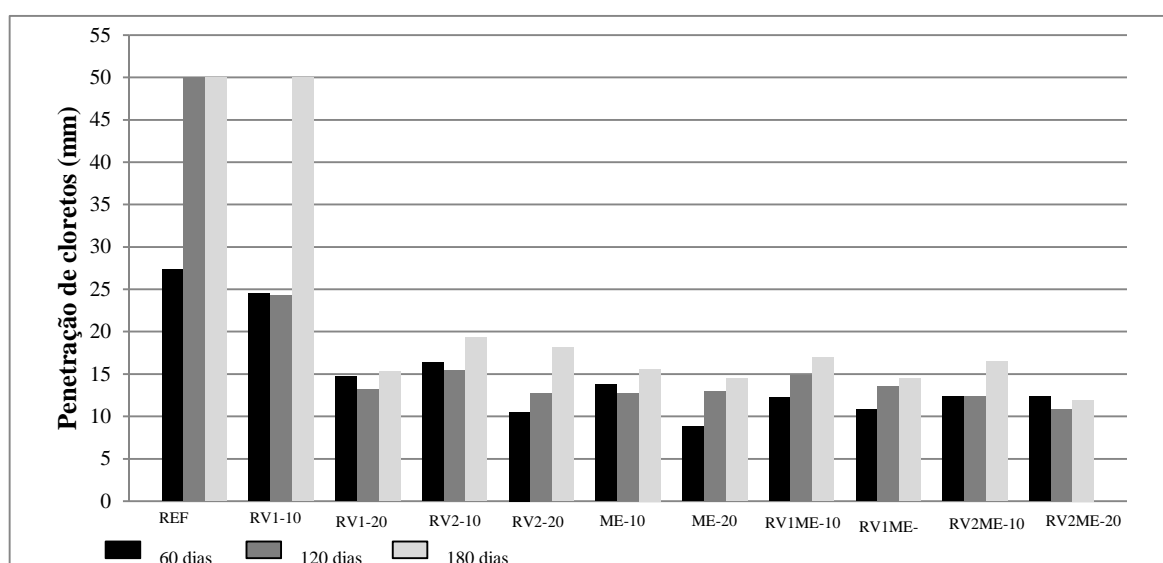
Verifica-se, conforme classificação qualitativa proposta por Gjorv (2001), que o resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição ao cimento (RV1-10), assim como no ensaio de penetração de carga passante, ASTM C 1202 (ABNT, 2012), não foi suficiente para atingir a classificação de moderada resistência à penetração de cloretos. Consolida-se assim o

entendimento que para uma efetiva resistência à penetração de cloretos em percentuais de substituição de 10% torna-se interessante a moagem do resíduo de vidro ou a utilização combinada com o metacaulim como se notam nos concretos com 10% de resíduo sem moagem e 10% de metacaulim (RV1ME-20), sendo possível substituir até 20% do cimento com ganho em desempenho. O aumento do percentual de resíduo de vidro sem moagem para 20% promoveu ganhos, avançando para elevada aos 28 dias e ultraelevada aos 91 dias a resistência à penetração de cloretos. Este comportamento pode ser atribuído ao mecanismo de preenchimento dos poros do concreto. Ressalta-se também a utilização de resíduo de vidro moído nos percentuais de 10% e de 20% promovendo ganhos equivalentes à pozolana metacaulim.

### 3.5.1.5. Ensaio de difusão de cloretos por imersão (NT BUILD 443, 1993)

Podem ser identificados os resultados médios pertinentes ao ensaio de difusão de cloretos por imersão conforme Figura 16.

Figura 16. Penetração de cloretos em ensaio de difusão por imersão, fonte: autor



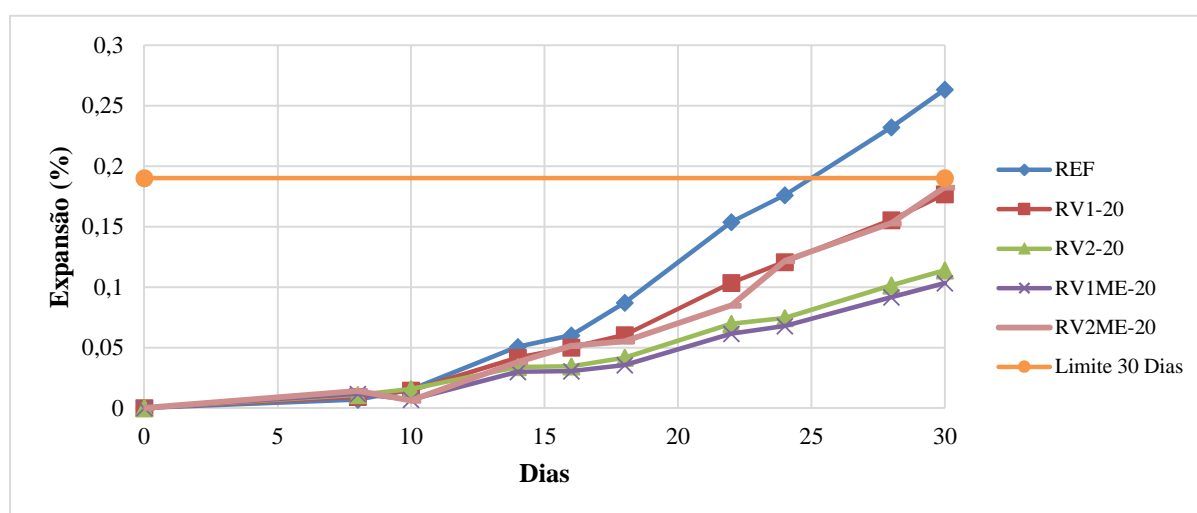
Por meio da Figura 16, torna-se possível constatar que os valores de penetração de cloretos com a utilização de resíduos de vidro e de metacaulim contemplados nesta pesquisa favoreceram a resistência à penetração de cloretos, com exceção dos concretos com a substituição de 10% do cimento por resíduo de vidro sem moagem. Concretos com resíduos de vidro com moagem responderam muito bem com relação à proteção ao avanço de cloretos, configurando-se em valores similares aos concretos que utilizaram metacaulim. É importante destacar a redução de 69% da profundidade da camada contaminada por cloretos em

concretos com 20% de resíduo de vidro sem moagem aos 180 dias. A partir da comparação dos resultados de penetração por difusão com os resultados obtidos por ensaio de migração (adoção de corrente elétrica), verifica-se que ao se adotar um percentual de substituição ao cimento de 20% o resíduo de lapidação de vidro pode ser utilizado sem beneficiamento (moagem) obtendo ganhos com relação à resistência à penetração de cloretos, comparando-se à resistência obtida em concretos que se utilizam de metacaulim.

### 3.5.1.6. Reação por expansão álcali-sílica, ASMT C 1260 (ASMT, 2014)

O ensaio de reação álcali sílica visa verificar se a quantidade de álcalis apontada pelo ensaio de composição química pode ocasionar reatividade entre os resíduos de vidro e os componentes do concreto (agregado miúdo) e, ainda, se a redução das dimensões das partículas de resíduo de vidro e a utilização combinada com outras pozolânas podem mitigar a ocorrência desta reação. Foram consideradas as misturas do concreto de referência (REF), resíduo de vidro sem moagem com o percentual de 20% (RV1-20), resíduo de vidro com moagem com o percentual de 20% (RV2-20), resíduo de vidro sem moagem com o percentual de 10% e metacaulim com 10% (RV1ME-20) e resíduo de vidro com moagem com o percentual de 10% e metacaulim com 10% (RV2ME-20). Os resultados da expansibilidade das barras imersas por período de 30 dias podem ser verificados na Figura 17.

Figura 17. Resultados de expansão por reação álcali-sílica, fonte: autor



A classificação do resíduo quanto à potencialidade reativa é feita considerando-se um limite de expansão de 0,19% em 30 dias. Para resultados inferiores a 0,19% aos 30 dias o resíduo poderá ser considerado potencialmente inócuo e superiores reativo. Nota-se que apesar do

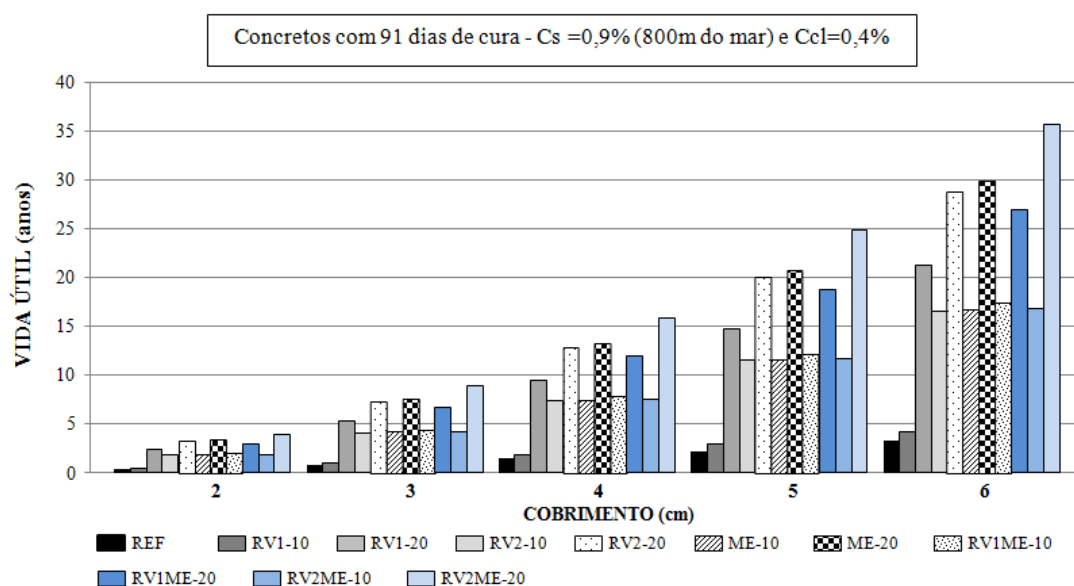
resíduo de vidro apresentar quantidade de álcalis superiores aos requisitos para materiais pozolânicos, não há elevação da expansão por reação álcali-sílica. Ao contrário do que se esperava, houve uma redução nos valores principalmente com a utilização de resíduo moído. Este comportamento corrobora com o constatado em Matos e Coutinho (2012) e Hwee e Hongjjian (2013) que em função da dimensão da partícula do resíduo de vidro poderá ocorrer a mitigação da reação álcali-sílica em concretos. Ressalta-se também que a utilização do resíduo de vidro sem moagem, em percentual de 10%, combinada com o metacaulim, também no percentual de 10%, favoreceu a redução do potencial expansivo pelo efeito de reação álcali-sílica, corroborando com a literatura a respeito dos benefícios da utilização conjunta de resíduos de vidro e outros materiais cimentícios suplementares.

### 3.5.2. Estimativa de vida útil dos concretos

A fim de estimar a vida útil de projeto (VUP) dos concretos desta pesquisa, realizou-se análise por meio de Leis de Fick utilizando-se dos coeficientes de difusão de cloretos do ensaio acelerado conforme NT BUILD 492. A Vida Útil de Projeto corresponde ao tempo em que os íons cloretos avançam sobre o cobrimento do concreto e alcançam a armadura em concentrações capazes de despassivá-la. Conforme Helene (1993), a concentração de cloretos com possibilidade de favorecer o início da corrosão de armaduras é de 0,4% em relação ao cimento em massa (concentração crítica de cloretos –  $C_{Cl}$ ).

A fim de adotar o modelo da equação, é necessário também definir a concentração superficial de cloretos ( $C_s$ ) e, para efeito, foi considerado 0,9%. Trata-se de percentual recomendado por Helene (1993) como referencial ou orientativo para concretos com relação água/cimento de 0,48 a 0,68, consumo de cimento de 280 a 400kg/m<sup>3</sup>, submetidos à névoa salina. Este trabalho considerou o percentual de 0,9% para uma estrutura localizada a 800 metros do mar. Conforme a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), que orienta a classificação de agressividade que os elementos estruturais estão expostos e o cobrimento a se adotar, é possível analisar os resultados considerando as premissas de edificação a 800 metros do mar como classe de agressividade III (agressividade forte, ambiente marinho e com risco grande de deterioração). A Figura 18 apresenta a vida útil de concretos localizados a 800 metros do mar.

Figura 18. Vida útil de projeto de concretos localizados a 800 metros do mar, fonte: autor



Considerando o cobrimento recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade III e a concentração superficial de cloretos recomendada por Helene (1993) de edificação exposta à névoa salina de 0,9%, tem-se com o cobrimento de 4 cm por volta de 1,5 anos até que os íons cloretos atinjam a armadura em concentrações capazes de despasiá-la. Utilizando-se de resíduo de vidro sem moagem com 20% de substituição tem-se em torno de 9,5 anos. Com o resíduo de vidro moído, com 20% de substituição, tem-se mais de 12 anos, correspondendo um aumento em torno de 600% e de 800%, respectivamente. O resíduo de vidro moído apresenta patamares similares aos ganhos da pozolana metacaulim, considerada mundialmente uma pozolana de alta reatividade e com grandes ganhos referentes à resistência ao ingresso de cloretos. Caso seja adotado cobrimento de 5 cm, a Vida Útil de Projeto (VUP) de concretos com 20% de resíduo de vidro moído alcançaria 20 anos. É importante ainda ressaltar que a corrosão da armadura, além da concentração de cloretos, dependerá de outros fatores, tais como a disponibilidade de oxigênio, a diferença de potencial e o processo de propagação da corrosão, que envolve um período, considerado por alguns autores por volta de 6 anos.

#### 4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

##### 4.1. Conclusão geral

Por meio da pesquisa, constatou-se que a incorporação em concretos de resíduos do processo de lapidação do vidro, com moagem ( $D_m = 35\mu m$ ), é justificada com a utilização de até 20% em substituição ao cimento, promovendo conservação da resistência à compressão, ganhos

com relação à resistência ao ingresso de cloretos e produzindo efeito mitigador da expansão por reação álcali-sílica. Neste percentual de utilização há perdas de abatimento inferiores à pozolana de referência metacaulim, que podem ser compensadas adotando-se a dosagem de um concreto com maior trabalhabilidade. Destacam-se também, os concretos com resíduo de vidro, com ou sem moagem, com 10% de substituição ao cimento combinado com 10% de utilização de metacaulim, proporcionando redução de 20% do consumo do cimento, pautando-se por uma opção de melhoria em relação aos concretos de referência em todos os parâmetros analisados do concreto endurecido e fornecendo opção sustentável.

## 4.2. Conclusões específicas

### 4.2.1. Quanto à caracterização do resíduo do processo de lapidação do vidro

A caracterização física possibilitou concluir que o resíduo da lapidação do vidro sem moagem, contemplando apenas sua secagem, apresenta dimensões de partículas que atendam aos requisitos pertinentes às propriedades físicas para materiais pozolânicos, apresentando material retido com diâmetro maior que 45  $\mu\text{m}$  com quantidade inferior a 20%. Entretanto, os ensaios de atividade pozolânica indicaram que o resíduo de vidro sem moagem não atendeu aos requisitos mínimos da NBR 12653 (ABNT, 2014), necessitando assim a moagem para o atendimento à norma. Com relação aos aspectos químicos, o resíduo de vidro se enquadrou nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) com exceção da quantidade de álcalis disponíveis. Entretanto, este parâmetro, que poderia ser prejudicial ao desempenho dos concretos, foi avaliado quanto ao seu potencial de expansão por reação álcali-silica, utilizando o método de barras de argamassas, concebido pela ASTM C 1260 (ASTM, 1260).

### 4.2.2. Conclusões relativas ao concreto no estado fresco

As misturas de concreto com a utilização de resíduo de vidro apresentaram aumento da consistência na medida em que se aumentava a porcentagem de resíduo. As misturas com metacaulim apresentaram o mesmo efeito. Isto se justifica pelas dimensões reduzidas das partículas destes materiais, aumentando os materiais finos e não cimentantes. Entretanto, como apresentado na pesquisa, ao se adotar uma maior consistência na dosagem experimental, abatimento em torno de  $200\text{m}\pm 10$ , obtém-se trabalhabilidade adequada para os usos convencionais relacionados às utilizações de concreto armado na construção civil.

### 4.2.3. Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido

A incorporação em concretos de resíduos de vidro com moagem, nos percentuais desta pesquisa, não proporcionou perda de resistência à compressão com significância estatística e obteve-se ganhos de durabilidade. Houve ganhos com relação à resistência à penetração aos íons cloretos e elevação da resistência a reações por álcali-sílica.

Constatou-se o benefício da utilização do resíduo de vidro moído com a substituição de até 20% do cimento, apresentando conservação da resistência e ganhos frente à resistência ao ataque de cloretos com reduções de 409% em cargas passantes, 292% de penetração de cloretos e 780% de coeficiente de difusão. Soma-se ainda, redução da ocorrência de reações álcali-sílica em função das dimensões das partículas de vidro moído, em torno de  $D_m = 35 \mu m$ . Constatou-se também que a utilização conjunta de metacaulim e de resíduo de vidro moído nos percentuais de 10% de metacaulim e 10% de resíduo de vidro pode ser uma alternativa para se obter os mesmos ganhos de resistência à compressão com a utilização de 10% de metacaulim isoladamente, porém com menor consumo de cimento, promovendo economia e mitigação do impacto ambiental pela utilização do resíduo de vidro e pela redução da produção do cimento e seus impactos ambientais correlatos, tais como utilização de recursos não renováveis e emissão de  $CO_2$ .

A análise da Vida Útil de Projeto (VUP), pautada na resistência ao ingresso de íons cloreto, demonstrou que a utilização de resíduo de vidro moído com 20% de substituição ao cimento pode elevar a vida útil de concretos em até 800%, patamares superiores à utilização de 10% de metacaulim, percentual próximo ao recomendado pelo fabricante. Sabe-se que o metacaulim constitui-se em uma pozolana de conhecido potencial de resistência ao ingresso de íons cloretos, porém a utilização do resíduo de vidro moído em detrimento desta, tende a promover ganhos econômicos e comprometimento com o desenvolvimento sustentável.

Sendo assim, esta pesquisa concluiu que a incorporação do resíduo do processo de lapidação do vidro pode ser adotado em estruturas de concreto sem prejuízos nas propriedades mecânicas e de durabilidade em até 10%. Entretanto, com a simples moagem deste material por período de 2 horas é possível substituir até 20% da utilização do cimento, conservando a resistência à compressão e elevando em até 800% a resistência ao ataque de cloretos, além de proporcionar elevação da resistência à reatividade álcali-sílica. Neste contexto, tem-se solução ao resíduo gerado pelo processo de lapidação de vidros e a produção de concretos duráveis resistentes a ambientes onde a névoa salina se faz presente, ideais para aplicações em cidades litorâneas, como é o caso de Vitória-ES.



## 5. REFERÊNCIAS

ABIVIDRO (Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro). Índice de Reciclagem do Vidro. Disponível em: <[www.abividro.org.br](http://www.abividro.org.br)>. Acessado em: 28 abr. 2016.

BERNSTEIN, L. et al. Chapter 7: Industry. In: Metz et al. (ed). *Climate Change 2007: Mitigation-Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. pp. 447-496. 2007.

GJØRV, O. E. Service life of concrete structures and performance-base quality control. In: *Inter. Workshop on Innovations in Concrete Materials*, Whistler, Canada 2001, pp. 13. 2001.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HWEE, K; DU, H. Use of waste glass as sand in mortar: Part II –Alkali-silica reaction and mitigation methods. *Cement & Concrete Composites*, v. 35, p. 118-126, 2013.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 1078-1083, 2009.

JAIN, A. J.; A.; NEITHALATH, N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 148-156, 2010.

JANI, Y.; HOGGLAND, W. Waste glass in the production of cement and concrete – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.2, p. 1767–1775, 2014.

KAMALI, M.; GHahremaninezhad, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Const. and Building Materials*, v.98, p. 407-416, 2015.

MATOS, A. M.; SOUZA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 205-215, 2012.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, 2ª Ed., IBRACON, São Paulo, 2014.

MEYER, C.; BAXTER, S.; JIN, W. Alkali–silica reaction in concrete with waste glass as aggregate. In: ASCE MATERIALS ENGINEERING CONFERENCE, 1996, Washington. Anais... Materials for a new millennium, Washington, Chong KP, p. 1388–1394.

NASSAR, R; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. Construction and Building Materials, v. 29, p. 368-377, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 448p. 2010.

PIGNATON, A. A. Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo - cálcico na produção de concretos. 2012. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

RASHAD, A. M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. Const. and Building Materials, v. 72, p. 340-357, 2014.

SAUER, A. S. Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, UFES, Vitória, 2013.

SHI, C; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation & Recycling, v. 52, p. 234-247, 2007.

SCHWARZ, N; CAM, H. Influence of fine glass powder on the durability characteristics of concrete and comparison to fly ash. Const. and Building Materials, v. 30, p. 486-496, 2008.

STATE, U. Environmental Protection Agency report, 2012. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/conserves/materials/glass.htm>>. Acesso em: 03 mai. 2016.

TOPÇU, B. I.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research, v.34, p. 267–274, 2004.