

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO FELIX LIOTTO

**CONCRETO COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR
VIDRO RECICLADO**

MANAUS

2019

PEDRO FELIX LIOTTO

**CONCRETO COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR
VIDRO RECICLADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientador: Prof. Dr. Genilson Pereira Santana

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L763c Liotto, Pedro Felix
 Concreto com a substituição parcial de agregado miúdo por vidro
 reciclado / Pedro Felix Liotto. 2019
 45 f.: il. color; 31 cm.

 Orientador: Genilson Pereira Santana
 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
 Federal do Amazonas.

 1. Concreto convencional. 2. Reutilização de vidro. 3. Substituição
 parcial. 4. Agregado miúdo. I. Santana, Genilson Pereira II.
 Universidade Federal do Amazonas III. Título

Dedicatória

Aos meus pais, meu irmão, ao meu melhor amigo,
minha grande e fiel companheira

Agradecimento

Um grande amigo, certa vez, disse que nenhum trabalho é fruto de uma única pessoa, este portanto, não seria. Outro amigo também disse que é por meio da gratidão que alcançamos o Amor do Pai. Sendo assim praticarei a minha gratidão.

Ao Senhor, Deus, Pai eterno e todo poderoso que por muitas vezes desenha os planos para minha vida mas que sou muito cego e não tenho a capacidade de enxergar onde vão me levar: obrigado por ter me trazido até aqui!

Aos meu pai, minha mãe e ao meu irmão, que no dia em que precisei decidir entre o mestrado e continuar empregado, foram unânimes em me apoiar a seguir no mestrado e abdicar do emprego, mesmo sabendo que tempos difíceis viriam: muito obrigado!

A minha família que sempre ajudaram quando passei por condições difíceis, aos meus tios e minhas tias, meus primos e primas e em especial e em memória da minha falecida Avó Maria Félix por sempre apoiar e auxiliar desde os tempos de criança: muito obrigado!

Ao meu amigo de sempre, Laerte, por estar ao meu lado, cobrando, orientando, ajudando em todos os momentos desta e de outras jornadas, pelo direcionamento na formação acadêmica e profissional que ao longo de 13 anos vem me proporcionando: muito obrigado!

A minha companheira e amiga, Aurian, que não cansou de me dar forças, empurrar, cobrar e auxiliar dando suporte e recurso quando precisei: muito obrigado!

A Universidade Federal pela oportunidade de acesso aos estudos do mestrado, na figura dos Professores e Professora Lizandro, João Almeida, Vasconcelos, Virginia, Kenedy: muito obrigado.

Ao meu Orientador Professor Genilson que sempre muito atencioso nunca se recusou em me acolher e ouvir, sempre muito solícito deixando muitas das vezes suas atividades administrativas para me receber e dar direção ao trabalho: muito obrigado!

Ao Instituto Federal, Campus Manaus-Centro, na figura da coordenação de Pós-Graduação Professor Halefi, na figura da coordenação do departamento de infra-estrutura Professora Cristiane, que me proporcionaram a oportunidade de utilizar o Laboratório de Resistência dos Materiais para desenvolver a pesquisa.

E por fim, porém não menos importante, aos colegas de mestrado que sempre somaram forças para pular as fogueiras impostas pelo curso, Virlane, Elma, Ewerton, Frank Hudson (meu canguinha), Bruna, Daniele, Armires, Leonardo, Samuel e Alcides.

RESUMO

Na construção civil o material mais utilizado é, conseqüentemente, o de maior impacto ambiental é o concreto. Fabricar concreto, tendo a substituição parcial da areia por vidro moído, apresenta-se bastante vantajoso do ponto de vista de melhoria da resistência e da redução do impacto ambiental, gerado pela extração de matéria prima. Na literatura apresentada, pode-se perceber que essa preocupação é presente em muitos países e encontram-se diferentes resultados, deixando aberto outras variâncias de estudo. Este trabalho considerou para comparação, uma mistura de concreto convencional e outras quatro misturas com substituições de areia por vidro nas proporções de 20, 30, 40 e 50%. O vidro da construção civil utilizado passou por processo de moagem e de peneiramento até que alcançasse a faixa granulométrica do agregado miúdo. Foram observadas as características elementares do concreto em seu estado fresco e endurecido, onde pode ser percebido uma melhora de modo geral. As resistências que inicialmente alcançam patamares abaixo das de referência, em idade mais avançadas ultrapassam, mostrando de fato melhoramento na mistura de concreto.

Palavras-chave: Concreto convencional, reutilização de vidro, substituição parcial.

Abstract

In civil construction the most used material and, consequently, the one with the greatest environmental impact is concrete. Making concrete with the partial replacement of sand by ground glass is very advantageous from the viewpoint of improving strength and reducing the environmental impact generated by the extraction of raw materials. In the literature presented, it can be seen that this concern is present in many countries and different results are found, leaving open other study variances. This work considered for comparison one conventional concrete mix and four other mixtures with glass sand substitutions in the proportions of 20, 30, 40 and 50%. The glass used in the construction industry was grinded and sieved until it reached the fine particle size range. The elemental characteristics of the concrete in its fresh and hardened state were observed, where a general improvement can be noticed. The resistances that initially reach below the reference levels, in older age surpass actually showing improvement of the concrete mix.

Keywords: Conventional concrete, glass reuse, partial replacement.

Sumário

Lista de Figura	10
Lista de Tabela	11
Introdução Geral	12
Objetivos	15
CAPÍTULO 1 - O uso do vidro em concreto: revisão	16
RESUMO	16
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 METODOLOGIA	18
1.3 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE VIDRO E DO CIMENTO	19
1.4 FLUIDEZ DO CONCRETO <i>VERSUS</i> ADIÇÃO DE VIDRO	20
1.5 PROPRIEDADE DO CONCRETO ENDURECIDO	23
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
1.7 BIBLIOGRAFIA	25
CAPÍTULO 02 - Concreto com a substituição parcial de agregado miúdo por vidro reciclado: Produção	28
RESUMO	28
2.1 INTRODUÇÃO	29
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS	30
2.2.1 Obtenção e preparo das amostras	30
2.2.2 Produção dos corpos de prova de Concretos	32
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
2.3.1 Características dos materiais	32
2.3.2 Compressão diametral	34
2.3.3 Compressão diametral	37
2.3.4 Microscopia eletrônica de varredura - MEV	39
2.3.5 Análise estatística	41
2.4 CONCLUSÃO	44
2.5 BIBLIOGRAFIA	45

Lista de Figura

FIGURA 1.1 - DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE ARTIGOS PUBLICADOS EM FUNÇÃO DOS ANOS.	19
FIGURA 1.2 - DESENVOLVIMENTO DOS TESTES DE CONSISTÊNCIAS.....	22
FIGURA 1.3 - RESULTADO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DE DIFERENTES TIPOS DE VIDRO.....	24
FIGURA 2.1 - VIDRO COLETADO NA EMPRESA PORTAL VIDRO E ARMAZENADO ANTES DA LIMPEZA, TRITURAÇÃO E PENEIRAMENTO.	31
FIGURA 2.2 - COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA NATURAL E A DE VIDRO.....	33
FIGURA 2.3 - RELAÇÃO DE SLUMP DAS MISTURAS.....	34
FIGURA 2.4 – GRÁFICOS COMPARATIVOS DE RESISTÊNCIA DE COMPRESSÃO AXIAL.	36
FIGURA 2.5 – GRÁFICO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	38
FIGURA 2.6 - MEV DA SUPERFÍCIE FRATURADA DE AMOSTRA COM 7 DIAS DE IDADE	39
FIGURA 2.7 - INTERAÇÃO DA PASTA COM O AGREGADO DE VIDRO	39
FIGURA 2.8 - MEV DE SUPERFÍCIE FRATURA DE AMOSTRA DE 14 DIAS	40
FIGURA 2.9 - INTERAÇÃO DE AGREGADO E PASTA EM AMOSTRA DE 21 DIAS.....	40
FIGURA 2.7 – DISTRIBUIÇÃO DOS INTERVALOS DE CONFIANÇA DAS MÉDIAS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL.....	42
FIGURA 2.8 – EFEITO DAS MISTURAS NA RESISTÊNCIA.....	43
FIGURA 2.9 – VERIFICAÇÃO DE RESÍDUOS	44

Lista de Tabela

TABELA 1.1 - PALAVRAS CHAVES COM O NÚMERO DE TRABALHOS ENCONTRADAS DAS RESPECTIVAS BASES DE DADOS	19
TABELA 1.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS VIDROS UTILIZADOS	20
TABELA 1.3 - QUADRO RESUMO DE DADOS DOS ARTIGOS SELECIONADOS.	21
TABELA 1.4 – COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	22
TABELA 2.1 - MISTURAS DOS CONCRETOS.	32
TABELA 2.2 MASSA ESPECÍFICA E UNITÁRIA DOS MATERIAIS USADOS NESTE TRABALHO	33
TABELA 2.3 – INTERVALO DE CONFIANÇA DAS MÉDIAS OBTIDAS COM A RESISTÊNCIA AXIAL	41
TABELA 2.4 – RESULTADO DA ANOVA FEITO COM OS DADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL	42
TABELA 2.5 – EFEITO DAS RESISTÊNCIAS A COMPRESSÃO AXIAL.	42

Introdução Geral

Hoje a engenharia tem como seu maior desafio a avaliação do desempenho de cada material considerando o menor impacto ambiental na produção, sem que esse processo seja muito mais caro que os convencionais. Assim temos o concreto.

O concreto, para a construção civil, é o material de construção mais bem difundido sendo utilizado em pequenas obras ou grandes obras, seja em obras de infraestrutura ou habitacionais, seja em acabamentos ou em estruturas, do início ao final de qualquer obra. Tamanha popularidade se dá pelo seu método de confecção ser simples, por ser plástico perfeitamente moldável em qualquer forma e elementarmente seus componentes estarem acessível em todas as regiões do globo.

O cenário de utilização do concreto é imenso. São produzidas anualmente 12 bilhões de toneladas de concreto no mundo e fontes afirmam que a necessidade de concreto será maior em 2050 alcançando a casa de 18 bilhões toneladas de concreto por ano. O mundo evolui e com ele a necessidade de ligar cidades, a necessidade de construir habitações, indústrias e portos (Tiejun Liu, 2017).

Assim podemos inferir que a necessidade de consumo dos seus elementos constituintes também crescerá. Se considerarmos que cada m^3 de concreto é composto por aproximadamente 70% de agregados teremos anualmente a partir de 2050 uma necessidade de 84 mi m^3 de matéria prima areia e brita, tomando como referência 1.500 kg/m^3 .

Algumas cidades já sentem alguns impactos no custo unitário do concreto uma vez que os agregados necessitam ser buscado em outro município e até mesmo em outros estados. Com isso o valor da logística é aumentado encarecendo o m^3 do material ao consumidor final.

Os impactos ambientais da indústria do concreto gerados, principalmente, durante a produção de cimento podem ser locais, regionais ou globais. Nas jazidas de extração de agregado miúdo são deixadas crateras abertas obrigando ao ecossistema local arcar com altos custos de regeneração. Para que a jazida seja explorada é necessário que se realize antes a supressão vegetal em 100% da área a ser explorada e parcialmente das áreas de apoio e ou escoamento.

A atividade extrativista do agregado miúdo em leitos de rio impacta não apenas na ausência dos materiais no leito que gera assoreamentos a jusante, mas também,

derramamentos de óleos na água uma vez que essa prática é exercida por empresários pouco capacitados e preparados.

A redução do impacto da fabricação de concreto é possível não só por atividades relacionadas ao próprio concreto, mas também pela melhoria da produtividade de seus componentes. O reaproveitamento de resíduos de demolição, rejeitos das indústrias de beneficiamentos, reutilização de materiais descartados em outros processos de fabricação de outros materiais, melhorias na durabilidade das estruturas, uso de tecnologias de reduzem suas patologias a longo prazo, entre outros, são medidas que podem ser aplicadas com este propósito.

No quesito reaproveitamento de rejeitos oriundo do processo de fabricação de outros materiais, podemos destacar o vidro. O corte/recorte e a quebra do vidro nas empresas vidreiras fornecedores de vidro para a construção civil é um vetor de geração de resíduo que em muitas cidades além de não ser controlado é descartado de forma incorreta em aterros.

A indústria do vidro no Brasil experimenta um mercado rico de oportunidades com grandes concorrências impulsionado pelo alto consumo de vidro plano. Além disso houve nas últimas décadas uma deterioração da balança comercial, fato que reforça a ideia de que o mercado doméstico passa por um momento de expansão.

Essa indústria vidreira atua com três tipos de produto: o vidro plano, oco ou especial. O plano é produzido em forma de chapas e serão cortados nas vidraçarias no tamanho que o cliente solicitar. O vidro oco é utilizado na produção de copos, garrafas, embalagens e outros utilitários comum do dia a dia. Já os vidros especiais são utilizados em lentes, lâmpadas, fibras de vidro e vidraçarias de laboratório, tendo menos produção que os demais.

A produção do vidro de maneira resumida e genérica pode ser descrita da seguinte forma. Primeiramente, as matérias-primas são misturadas com precisão e fundidas em um forno de fusão. A seguir, dependendo do produto os processos de conformação e resfriamento são diferentes.

O vidro é composto basicamente de sílica (areia), barrilha (carbonato de sódio), calcário, feldspato e aditivos. A sílica detém a maior parte do volume da massa de vidro e não é a mais cara. Este título fica com a barrilha que é inserida no processo para diminuição da temperatura de fusão, que pode chegar a 1.600 °C. A barrilha não é produzida no Brasil,

o que torna necessária sua importação. Outro insumo que não pode ser passado despercebido é o combustível para o forno, que atualmente o gás natural toma mais espaço em substituição a outros.

A construção civil absorve boa parte do vidro produzido pela indústria vidreira. O produto de maior utilização é o vidro plano que pode ser incorporado em fachadas, portas e janelas e no interior dos prédios residenciais e comerciais, seja para a construção de unidades novas ou reformas. Impulsionado pelo aspecto de modernidade, a tendência da construção civil utilizar vidro é crescente, pois além das questões estéticas podem ser destacadas questões econômicas e ambientais.

Nas vidraçarias o vidro é cortado atendendo as dimensões solicitadas pelo cliente. Nesse momento a chapa de vidro gerada pela indústria é aproveitada ao máximo em quantas porções forem possíveis. Mas ainda existe uma fração que não é aproveitada sendo descartada. A reciclagem se apresenta como melhor resposta a essa demanda, porém seu processo tem altos custos, o que muitas das vezes não se torna vantajoso.

Podemos fazer um paralelo e traçar semelhanças dos dois materiais descritos acima. Um dos materiais mais utilizados no concreto é a areia, que para a produção de vidro é a principal matéria-prima. As duas indústrias utilizam forno no processo produtivo para a fusão de elemento: o cimento, material aglomerante do concreto, tem em seu processo de produção a queima do clínquer e o vidro necessita de altas temperaturas para a fusão da sílica.

Assim temos que o impacto ambiental na produção dos dois materiais é evidenciado quando entendemos seus processos de fabricação. Os dois materiais possuem uma alta degradação ambiental do ponto de vista de extração das matérias-primas, apesar de serem em abundância no globo, mas para a sua exploração é necessário muitas das vezes altíssimos níveis de desmatamentos. Do ponto de vista da produção, as emissões de CO₂ que são liberadas nos processos de queima ou de fusão são altos.

Apesar de o vidro ser um material 100% reciclável, não é biodegradável e se acumula por vários anos em aterros e lixões se não for reciclado. Uma solução a este impacto é a incorporação deste resíduo no concreto, uma vez que esse material possui composição química similar. Esta substituição parcial dos elementos constituintes do concreto não apenas proporciona redução dos impactos ambientais provocados pela extração de matéria prima e acúmulo de vidro em aterros, como também, melhora as propriedades de resistência e durabilidade e tem potencial para redução de custos na produção de argamassas e concretos.

O presente trabalho está dividido em duas partes, formados por dois artigos. O primeiro artigo apresenta a revisão bibliográfica onde tem-se os principais efeitos da substituição de vidro em concreto além de apresentar as características dos materiais envolvidos como foco no vidro e no cimento. O segundo artigo, apresenta a produção de concreto com substituição de agregado miúdo por vidro e a verificação das propriedades elementares além da validação estatística dos valores de resistência encontrado.

Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal a produção de concreto convencional com a substituição parcial de agregado miúdo (areia) por vidro moído. Para isso foram fixados os objetivos específicos:

- Realizar reciclagem de vidro, por processo de moagem, para atingir granulometria semelhante da areia;
- Produzir concretos convencionais, a partir de matérias-primas amazônicas considerando as substituições de 20, 30, 40 e 50% de agregado miúdo por vidro reciclado; e
- Avaliar as propriedades elementares do concreto produzido com vidro reciclado em comparação com concreto de referência.

CAPÍTULO 1 - O uso do vidro em concreto: revisão

Artigo que será submetido a Scientia Amazonia

Pedro Felix Liotto¹, Genilson Pereira Santana²

RESUMO

A reutilização de resíduos sólidos provenientes da construção civil é considerada uma excelente alternativa para o desenvolvimento sustentável. Dentre os resíduos da construção civil está o vidro, um passivo ambiental raramente reciclado na construção civil. Assim a reutilização do vidro como agregado em concreto pode ser uma das formas de tornar o material de construção civil em sustentável. A substituição de agregado miúdo por vidro reciclado é estudada em diversos países como alternativa de redução do volume de resíduos sólidos em aterros sanitários. Esta revisão abrange a produção de concretos nos últimos anos considerando a incorporação de vidro como substituição parcial dos seus elementos constituintes.

Palavras-Chave: Concreto sustentável, vidro reciclado, substituição

Concrete with partial replacement of fine aggregate of recycled glass

Waste reuse is considered an excellent alternative for sustainable development. So the reuse of glass as an aggregate in concrete is one of the ways to make the construction material, which is the most used in the world, sustainable. The replacement of small aggregate by recycled glass is studied in several countries as an alternative for the reduction of glass discarded in landfills and as an outlet to reduce the extraction of natural aggregate. Several researchers around the world are looking for new methods and types of glass for this to be done in order to gain resistance and not impair its durability. This review covers the

¹Aluno: Mestrando em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM, Brasil, E-mail correspondência: pedro_639@hotmail.com

²Orientador: Professor Titular do Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM, Brasil, E-mail correspondência: gsantana2005@gmail.com

production of concrete in recent years considering the incorporation of glass as a partial replacement of its constituent elements.

1.1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, sendo fundamental em quase todas as estruturas e em quase todas as etapas de uma obra, seja ela de infraestrutura, edifícios, rodovias etc. (SUN et al, 2018). Essa ampla aplicação ocorre por causas das propriedades do concreto como alta resistência, durabilidade e facilidade de projeto, terem superioridade em relação a outros materiais e baixo custo (YEONG et al, 2018).

A alta demanda de utilização do concreto afeta diretamente as suas matérias primas, como cimento e todos os agregados extraídos diretamente da natureza. Geralmente, em uma mistura de concreto, os agregados naturais representam de 60 a 70% do seu volume, além de possuírem papel significativo nas propriedades mecânicas e durabilidade (LING et al., 2018; AL-KERTTANI, 2018). Em outras palavras, a indústria do concreto tem proporcionado ao planeta um grande impacto ambiental.

Em alguns locais do planeta já é possível observar grande escassez das matérias primas do concreto, o que eleva os custos de produção, dificultando o crescimento econômico da região. No Reino Unido, por exemplo, o consumo de agregado primário é estimado em cerca de 210 milhões de toneladas, sendo que o concreto detém o uso de 43% desse volume (CAN et al, 2016). Infelizmente, a literatura afirma que a necessidade de concreto aumentará ainda mais para quase 18 bilhões de toneladas por ano até 2050 (YEONG et al, 2018).

Por outro lado, a indústria da construção civil apresenta grandes volumes de materiais de construção e de atividades nos canteiros de obra, o que acaba gerando um elevado índice de resíduos produzidos nas áreas urbanas, depositados de maneira indistinta e desregrada em locais de fácil acesso, com em terrenos baldios. Somente, os Estados Unidos da América, por exemplo, geram cerca de 136 milhões de toneladas de resíduos de construção (RDC) e demolição por ano. Ao contrário do Brasil, existem cerca de 3.500 unidades de reciclagem de RDC nos Estados Unidos. Essas unidades reciclam cerca de 25% do total gerado (Karpinski, L. A., et al, 2016).

Da mesma forma que o concreto, o vidro também é amplamente utilizado em nossas vidas desde os tempos antigos. Como o concreto grandes quantidades de resíduos sólidos de vidros são descartadas. A cada ano, cerca de 10 milhões de toneladas de resíduos de vidro são produzidos em grandes cidades no mundo. Apenas para ilustrar, somente os resíduos de vidro gerados pela utilização de embalagens de produtos alimentícios, recipientes, copos e etc., compõem cerca de 3 a 5% dos resíduos domésticos no mundo (ZIARI et al., 2017).

Por ser inerte, o vidro tem a vantagem de ser ideal para a reciclagem, podendo ser reciclado várias vezes sem que suas propriedades químicas sejam alteradas. Nos EUA, a reciclagem de vidro corresponde a apenas por 2,99 milhões de toneladas de vidro contra uma produção de vidro da ordem de 11,5 milhões de toneladas (RASHIDIAN-DEZFOULI et al., 2018). Já o Brasil produz em média 980.000 toneladas de vidro em forma de embalagens e recicla 47% desse volume (JANSEN et al., 2014). A quantidade de resíduo de vidro reciclado vem aumentando ao longo dos anos, mas a maior parte é descartada em aterros sanitários. A desvantagem do vidro como um material de descarte é que ele não é biodegradável, sendo considerado um passivo ambiental inadequado ao ambiente.

Particularmente, a aplicação de resíduos de vidro como agregados ou suplementos cimentícios na construção civil significa dois benefícios ambientais: i) redução da exploração de grandes quantidades dos recursos naturais; e ii) destinação mais adequada dos resíduos de vidro (YEONG et al., 2018; ZIARI et al., 2017). Apesar desses benefícios a maior parte do mundo, inclusive o Brasil, ainda vem descartando o resíduo de vidro em aterros (JANSEN et al., 2014).

A literatura reporta que o vidro pode ser usado como agregado miúdo em concretos de cimento Portland. De modo geral, diferentes aspectos de utilização de agregados de vidro em misturas de concreto, seja como substitutos finos em cimentos, agregados miúdos ou agregados graúdos vem sendo estudado, principalmente sobre questões como redução da trabalhabilidade e propriedades mecânicas (LIU et al., 2018; RASHIDIAN-DEZFOULI et al., 2018).

A partir desse direcionamento é que se pode fixar os objetivos desta pesquisa. Portanto, a presente revisão tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e reológicas elementares do concreto, em seu estado fresco e endurecido, contendo a adição de vidro moído como substituição parcial do agregado miúdo que o compõe. É também objetivo desta revisão elencar os materiais utilizados pelas pesquisas, observando quantidades e composições químicas.

1.2 METODOLOGIA

As fontes bibliográficas utilizadas nesta revisão foram obtidas das bases de dados Google acadêmico, Periódicos Capes, Science Direct, correspondendo ao período de 2009-2018. Tais fontes foram pesquisadas no dia 21 de Agosto de 2018. As palavras-chaves usadas foram: *Replacement Of Sand By Glass In Concrete*, *“Replacement Of Sand By Glass In Concrete”*, *Recycled Glass Aggregate*, *“Recycled Glass Aggregate”*, *Glass Aggregate In Concrete*, *“Glass Aggregate In Concrete”*, *Milled Glass Recycled Aggregate Concrete*, *“Milled Glass Recycled Aggregate Concrete”*, *Glass As Aggregate*, *“Glass As Aggregate”* (Tabela 1.1).

O total de referências publicadas referente ao tema de incorporação de vidro em concretos foi de 9.685 trabalhos. Como critério de exclusão utilizou-se frequência de mesmos trabalhos em determinadas bases de dados, publicações em congresso exceto uma, trabalhos em outros idiomas

diferentes da língua inglesa, capítulos de livro, teses dissertações e títulos que não correspondiam com o tema deste trabalho. Como critério de inclusão foi adicionado as seguintes palavras *glass*, *concrete*, *aggregate* e *ASR* para selecionar artigos específicos da utilização de vidro moído em matrizes cimentícias. Como seleção de trabalhos, foi feita ainda uma separação considerando pesquisas que diversificaram o uso do vidro ou que tenham incorporado ao concreto diferentes formas e diferentes teores. Essa seleção proporciona um melhor entendimento do cenário geral sobre a incorporação de vidro em concreto por substituição parcial, sendo esta revisão escrita com os artigos apresentados na Figura 1.1.

Tabela 1.1 - Palavras chaves com o número de trabalhos encontradas das respectivas bases de dados

Palavra-chave	Google Acadêmico	Periódicos Capes	Science Direct
<i>Replacement of Sand By Glass In Concrete</i>	46400	6069	4887
<i>"Replacement of Sand By Glass In Concrete"</i>	0	0	0
<i>Recycled Glass Aggregate</i>	74400	7557	18126
<i>"Recycled Glass Aggregate"</i>	22447	1544	3842
<i>Glass Aggregate In Concrete</i>	10400	18680	15770
<i>"Glass Aggregate In Concrete"</i>	4176	4105	5822
<i>Milled Glass Recycled Aggregate Concrete</i>	7680	354	1594
<i>"Milled Glass Recycled Aggregate Concrete"</i>	124	21	44
<i>Glass As Aggregate</i>	3522	1458	2322
<i>"Glass As Aggregate"</i>	652	53	362

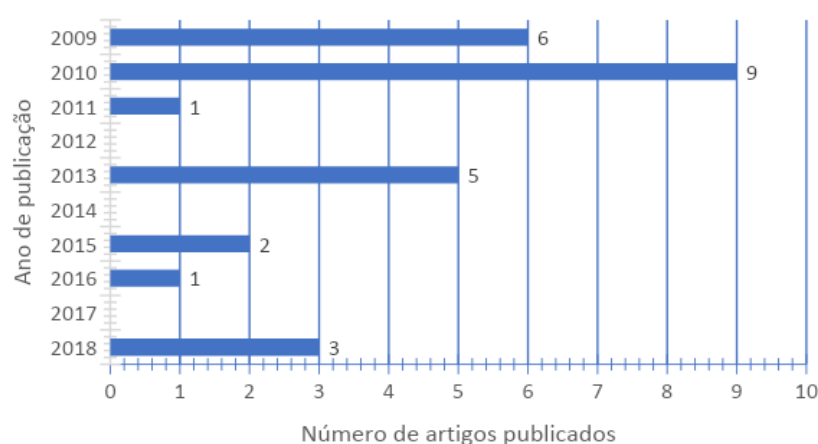


Figura 1.1 - Distribuição da quantidade de artigos publicados em função dos anos.

1.3 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE VIDRO E DO CIMENTO

Como o vidro é um produto da fundição de areia, soda e cálcio a Tabela 1.2 as composições químicas encontradas nas referências desta revisão. Nota-se que dependendo do tipo de vidro a concentração dos outros componentes variam com destaque para o SiO_2 , principal constituinte da areia. Outro fator decisivo para usar o vidro como agregado na indústria civil é a granulometria que segundo a literatura determinam o seu uso. A Tabela 1.3 sugere que há uma relação direta na quantidade de vidro sendo usado como agregado no concreto.

Tabela 1.2 – Composição química dos vidros utilizados

Tipos de Vidro	Óxidos							Ref
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	
Cacos de garrafa	71,91	2,20	0,01	15,60*		9,58*		(AL-KERTTANI, 2018)
Fibra de vidro	47,72	10,36	0,34	19,62	2,27	0,67	0,10	(RASHIDIAN-DEZFOULI et al., 2018)
Cacos de Garrafa	69,60	2,20	0,90	11,60	0,40	12,03	0,40	
Vidro Marrom	57,41	1,68	0,86	4,88	2,75	6,38	6,23	(AL-ZUBAID et al., 2017)
Vidro Verde	64,03	1,6	0,52	12,41	3,31	3,22	2,71	
Vidro neon	68,22	-	2,87	22,55	-	-	0,06	(ISMAIL e AL-HASHMI, 2009)
Garrafas, Jarras, Janelas	67,72	3,40*		6,90	6,00	-	0,48	
Garrafas, Jarras, Janelas	68,00	7,00	<1,00	11,00	1,00	-	-	(NASSAR, Roz Ud Din e SOROUSIAN, 2012)

*Soma dos dois elementos.

Nota-se que a substituição de agregados por vidro moído mais comumente usada é da ordem de 20%, embora as substituições ótimas sejam mais indicadas é de cerca de 10%. Pode-se observar uma variedade no tipo de vidro utilizado. Outro fator bastante evidente é o fato de que não há uma granulometria ideal para o uso do vidro como agregado grosso e/ou fino.

A Tabela 1.4 mostra que nos artigos usados nesta revisão a existência de três grupos de cimento segundo a quantidade de SiO_2 : i) 19%, ii) 21% e iii) 67%. Outra característica observada é que a maioria dos cimentos usadas têm teores de CaO maior que 61%.

1.4 FLUIDEZ DO CONCRETO VERSUS ADIÇÃO DE VIDRO

A literatura reporta diversos resultados sobre o efeito da adição de vidro sobre a fluidez do concreto. O teste de slump que testa a fluidez do concreto apresenta diversos comportamentos com a adição de diferentes quantidades de vidro. Para AL-ZUBAID (2017), os resultados demonstram uma

diminuição do slump a medida que o vidro é adicionado. Segundo esses autores, a redução do valor de Slump pode estar relacionado a granulometria do vidro. NASSAR, Roz Ud Din e SOROUSHIAN (2012) afirmam que como os grãos de vidro são mais finos que a areia, pode ocorrer o preenchimento melhor da porosidade dos agregados graúdos. Dessa forma, a literatura mostra que uma adição por $\frac{1}{4}$ pode melhorar a trabalhabilidade do concreto misturado com o vidro (LING et al., 2018). Essa afirmação tem como base a associação superfície lisa, baixa absorção de água e a menor coesão do agregado de vidro com o cimento. A Figura 1.2 mostra a tendência dos valores de Slump em função da quantidade de vidro adicionada em que se observa uma redução da fluidez com o acréscimo de vidro na mistura.

Tabela 1.3 - Quadro resumo de dados dos artigos selecionados.

País	Tipo de vidro	% de substituição	Tamanho da partícula	% ótima de substituição	Referência
Malásia	Vidro Plano	25, 50, 75 e 100	Agregado fino: 1 mm	25%	(LING et al., 2018)
Coreia	Resíduo industrial	25, 50, 75 e 100	Agregado fino: 5,00 mm	50%	(YEONG et al., 2018)
Turquia	Vidro de garrafas verde	20, 40, 60, 80 e 100	Agregado Grosso: 4 a 11,2 mm; Agregado Fino: 0 a 4 mm	80% e 100%	(AL-KERTTANI, 2018)
Portugal	Não mencionado	25% graúdo e 15% miúdo	Agregado Grosso: 20 a 5mm; Agregado miúdo: 20 a 5mm	Não mencionado	(CAN et al., 2016)
USA	Fibra de vidro e Vidro de Garrafa	10, 20 e 30	Pó de fibras de vidro: 4 μ m; Pó de vidro de garrafa: 14 μ m	Não mencionado	(RASHIDIAN-DEZFOULI et al., 2018)
Iran	Não informado	5, 10 e 15	Agregado Grosso 0,15 a 9,5 mm	10%	(ZIARI et al., 2017)
Brasil	Vidro Plano Temperado	5, 10 e 20	Agregado miúdo: 300 μ m a 4,75mm; Pó de vidro: 600 μ m a 300 μ m	Não mencionado	(JANSEN et al., 2014)
Iraque	Garrafas, jarros e janelas planas	10, 15 e 20	Agregado fino: 0,15 a 4,75 mm	20%	(ISMAIL e AL-HASHMI, 2009)
Iraque	Garrafas marrom e verde, e neon	11, 13 e 15	Marrom: 25-90 μ m; verde: 18-80 μ m; neon: 25-90	13% de neon	(AL-ZUBAID et al., 2017)
Coreia	Tubo de raio catódico	50 e 100%	Agregado fino: 5,00 mm	Não mencionado	(SUN et al., 2018)
China	Tubo de raio catódico	30, 60 e 100	Módulo finura: 2,13	Não mencionado	(LIU et al., 2018)
Japão	Garrafas de bebidas	100	Módulo de finura: 3,44	Não mencionado	(YANG et al., 2018)

Por outro lado, a trabalhabilidade do concreto pode ser melhorada consideravelmente quando o vidro é misturado como fibra de vidro moída, principalmente se for utilizado vidro cal-soda. Para RASHIDIAN-DEZFOULI (2018) atribuem a melhoria na trababilidade do concreto a textura superficial lisa das partículas ao aumento da absorção de água provocado pela adição de fibra de

vidros. O mesmo sucesso não pode ser atribuído à adição de materiais cimentícios suplementares. CAN et al. (2016) observaram a necessidade da adição de maiores teores de aditivo nas misturas contendo o vidro reciclado para melhorar trabalhabilidade do concreto. AL-KERTTANI (2018) demonstraram que o vidro reciclado, mesmo sendo aumentada a área superficial das partículas, apresenta baixa absorção de água, o que pode ser solucionado pela adição de aditivos superplastificantes. Novamente, foi constatada a relação da capacidade de absorção de água com requisito para a obtenção de uma melhor trabalhabilidade do concreto.

Tabela 1.4 – Composição do Cimento Portland

Fonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
(NASSAR, Roz Ud Din e SOROUSHIAN, 2012)	68,00	7,00	<1,00	11,00	1,00	12,00	<1,00	-
(EMAM e AL-TERSAWY, 2012)	67,72	3,40	6,90	6,00	10,75	0,17	-	-
(LIU et al., 2018)	21,82	6,12	3,92	61,88	1,92	-	-	1,36
(SUN et al., 2018)	21,36	5,03	3,31	63,18	2,89	-	-	2,30
(AL-ZUBAID et al., 2017)	21,93	4,98	3,10	66,11	2,00	-	-	2,25
(ISMAIL e AL-HASHMI, 2009)	21,14	5,78	3,59	64,43	1,52	-	-	2,35
(AL-KERTTANI, 2018)	19,79	3,85	4,15	63,84	3,22	-	-	-
(RASHIDIAN-DEZFOULI et al., 2018)	19,93	4,77	3,13	62,27	2,71	0,06	0,48	-
(YANG et al., 2018)	19,61	7,33	3,32	63,15	2,54	0,13	0,39	2,13
(CAN et al., 2016)	19,77	4,90	2,33	62,56	2,64	0,17	0,66	3,08

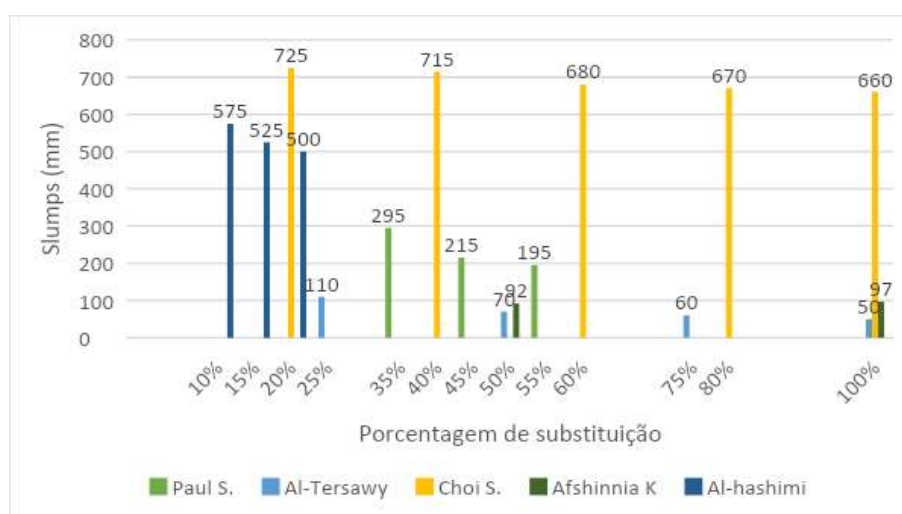


Figura 1.2 - Desenvolvimento dos testes de consistências.

Um aspecto importante a ser considerado é a densidade do vidro a ser reciclado, pois conforme é aumentado o teor de vidro, aumenta-se a queda no abatimento independentemente do fator água/cimento. A alta densidade pode aumentar a plasticidade, e as propriedades físicas dos resíduos de vidro usados como agregados finos, incluindo superfície lisa e a baixa absorção de água, também podem ter afetado a queda do concreto (SUN et al., 2018). Para NASSAR, Roz-Ud-Din e SOROUSHIAN (2012) a densidade do concreto é ligeiramente diminuída com a adição de agregados de vidro reciclado devido ao menor peso específico quando comparado ao peso específico do cimento. Esses autores também consideram que o aumento ou redução do Slump está relacionado a baixa densidade e absorção de água do vidro moído finamente, bem como maior teor de incorporação de ar no concreto. Outro fator preponderante na fluidez do concreto é a viscosidade do Slump. Por exemplo, os autores EMAM e AL-TERSAWY (2012) observam que o aumento da viscosidade aumenta a ligação entre a argamassa e agregado graúdo de vidro minimizando o risco de segregação.

1.5 PROPRIEDADE DO CONCRETO ENDURECIDO

De modo geral, a incorporação de resíduo de vidro reduz a resistência à compressão quando esta medida é realizada até 28 dias. A literatura argumenta alguns aspectos relacionados às características do agregado de vidro. EMAM e AL-TERSAWY (2012) e SUN et al. (2018) atribuíram a redução a alta lisura do vidro que não proporciona adesão completa entre o agregado e a pasta de cimento. Além disso, a falta de distribuição homogênea do agregado causa a existência da baixa geometria. LING et al. (2018) apontam que a redução causa a formação de uma ligação fraca entre a superfície do vidro lisa e a pasta de cimento na zona de transição, bem como o enfraquecimento provoca microfissuração gerada no processo de moagem para reduzir os tamanhos dos grãos vidro. EMAM e AL-TERSAWY (2012) afirmam que essas características do vidro usado na incorporação também diminui a elasticidade.

A Figura 1.3 mostra os resultados do estudo de AL-ZUBAID et al. (2017) cujo principal resultado é que a resistência mecânica do concreto depende da coloração do vidro utilizada. Percebe-se que para uma mistura entre 11% de adição de vidro obtém-se uma boa resistência mecânica, com destaque para o vidro de néon cujo resultado foi muito próximo do controle.

É interessante citar que um aumento da quantidade de carbonato de cálcio; ou seja, um aumento do valor de pH, melhora a resistência mecânica do concreto tendo agregado de vidro da ordem de 13% (AL-ZUBAID et al., 2017). O aumento da resistência também é observado para medidas de resistências mecânicas para concretos acima de 28 dias. Segundo ISMAIL e AL-HASHMI (2009) a partir dessa idade ocorre no concreto a reação pozolânica que ajuda a melhorar a resistência mecânica. O efeito pozolânico também foi observado por NASSAR, Roz Ud Din e SOROUSHIAN (2012).

Esses autores sustentam que o efeito pozolânico atua no vidro moído para formar uma microestrutura mais densa responsável pelo aumento da resistência mecânica. Os autores EMAM e AL-TERSAWY (2012), LING et al. (2018) e ISMAIL e AL-HASHMI (2009) também atribuem o aumento da resistência à tração no concreto com mais de 28 dias ao efeito pozolânico. A resistência à tração também depende da coloração do vidro. Dessa vez, o vidro verde tem maior resistência à tração, segundo AL-ZUBAID et al. (2017).

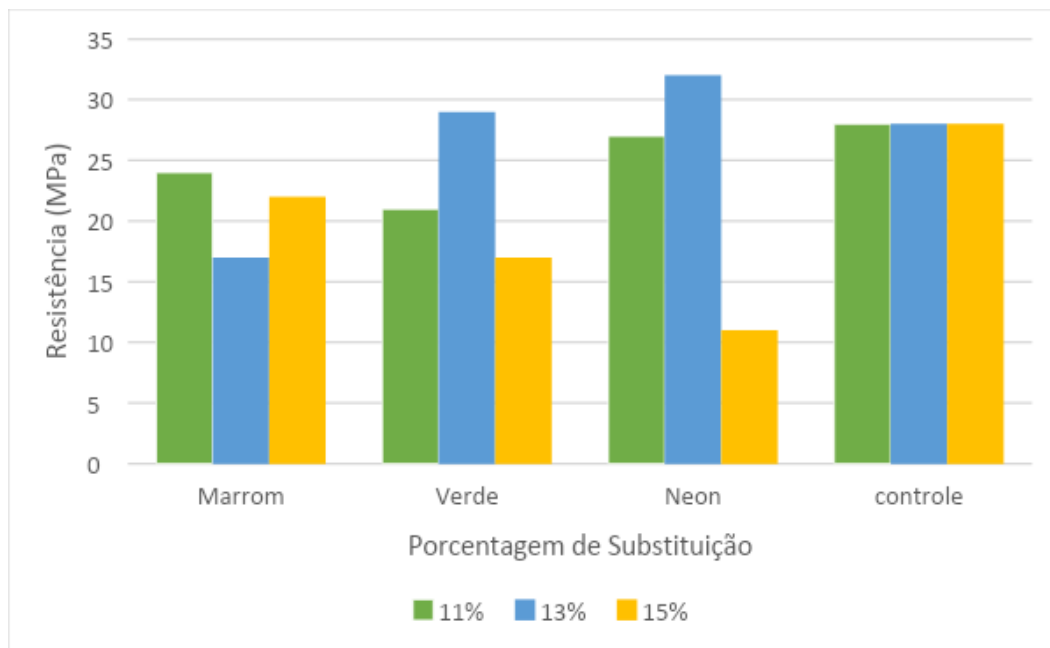


Figura 1.3 - Resultado das resistências à compressão de diferentes tipos de vidro

Fonte: (AL-ZUBAID et al., 2017)

O efeito pozolânico remetido pelos autores acima é explicado por FUSCO (2008). Para ele as pozolanas são materiais naturais ou artificiais contendo sílica (SiO_2) ativa, isto é, sílica capaz de participar na reação que no cimento é produzida um gel rígido de silicato de cálcio hidratado. Essa ação pode ser descrita em dois momentos: o primeiro, exerce-se uma ação física, semelhante a um agregado bem fino que impede a penetração do gel formado pelos produtos de hidratação do cimento; o segundo, ocorre próximo aos 90 dias, trata-se de uma ação química, com a formação do silicato hidratado que mais uma vez tem o efeito impermeabilizante e atua dentro dos poros do gel formado inicialmente pela hidratação do cimento.

Em termos de resistência à flexão, EMAM e AL-TERSAWY (2012) também constataram um aumento após 56 dias. Eles atribuíram a melhoria ao efeito pozolânico causado pela adição de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2); ou seja, um aumento do valor de pH. Adicionalmente, LING et al. (2018) apontam que a causa da melhoria é atribuída a misturas de partículas de vidro que contribuem para formar um gel de silicato de cálcio-hidratado.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de reduzir os valores de algumas propriedades como resistências e fluidez nos primeiros 14 dias, a literatura mostra que é possível usar o vidro como agregado pois após 56 dias ocorre o efeito pozolânico. Esse efeito reverte os efeitos negativos da adição de agregados de vidro para positivo, sugerindo assim a viabilidade do uso desse passivo ambiental.

1.7 BIBLIOGRAFIA

ABNT. **ABNT NBR NM 248:2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** [S.l: s.n.], 2003. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABNT. **ABNT NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** [S.l: s.n.], 2007a.

ABNT. **Nbr 5739 :2007 Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l: s.n.], , 2007b

ABNT. **NBR 9776:1987 Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro: ABNT, p. 5–7, 1987.

AL-KERTTANI, Osamah Mohammed Ghazi. **Fresh and shrinkage properties of self-compacted concrete when using recycled glass as aggregate.** n. August 2017, p. 1–10, 2018.

AL-ZUBAID, Aseel B e ALI, Aynoor Ibrahim e SHABEEB, Kadum Muttar. **Study The Effect of Recycled Glass Mechanical Properties Concrete of Green Concrete.** Energy Procedia, v. 119, p. 680–692, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.095>>.

BIRCHALL, J. D. e HOWARD, A. J. e BAILEY, J. E. **On the Hydration of Portland Cement.** The Journal of the Society of Chemical Industry, Japan, v. 360, n. 1, p. 445–453, 1978.

CAN, Sevkett e LIMBACHIYA, Mukesh e KEW, Hsein. **Portland-composite and composite cement concretes made with coarse recycled and recycled glass sand aggregates : Engineering and durability properties.** Construction and Building Materials, v. 128, p. 324–340, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.095>>.

EMAM, Esraa e AL-TERSAWY, Sherif H. **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete.** Construction and Building Materials, v. 35, p. 785–791, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>>.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** Editora PINI. São Paulo, 2008.

ISMAIL, Zainab Z e AL-HASHMI, Enas A. **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.** Waste Management, v. 29, n. 2, p. 655–659, 2009. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>>.

JANSEN, Edson e colab. **Increasing the Compressive Strength of Portland Cement Concrete Using Flat Glass Powder**. v. 17, p. 45–50, 2014.

KARPINSKI, L. A., Pandolfo, A., Reineher, R., Guimarães, J. C. B., Pandolfo, L. M., Kurek, J. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil : uma abordagem ambiental**. Porto Alegre:Edipucrs, 2009, 163p

LING, Philip Chie Hui e YONG, Ee Ling e TAN, Cher Siang. **Utilization of glass waste as fine aggregate in construction materials**. n. January, p. 36–42, 2018.

LIU, Tiejun e colab. **Experimental investigation on the durability performances of concrete using cathode ray tube glass as fine aggregate under chloride ion penetration or sulfate attack**. Construction and Building Materials, v. 163, p. 634–642, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.135>>.

MOHAJERANI, Abbas e colab. **Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials : A review**. Construction and Building Materials, v. 156, p. 443–467, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>>.

NASSAR, Roz-ud-din e SOROUSHIAN, Parviz. **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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>>.

NASSAR, Roz Ud Din e SOROUSHIAN, Parviz. **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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>>.

RASHIDIAN-DEZFOULI, Hassan e AFSHINNIA, Kaveh e RAO, Prasada. **Efficiency of Ground Glass Fiber as a cementitious material , in mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete**. Journal of Building Engineering, v. 15, n. July 2017, p. 171–180, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.018>>.

SUN, Il e YEONG, So e IK, Eun. **Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate**. Construction and Building Materials, v. 184, p. 269–277, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.221>>.

TOPÇU, İlker Bekir e CANBAZ, Mehmet. **Properties of concrete containing waste glass**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 2, p. 267–274, 1 Feb 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888460300262X>>. Acesso em: 19 maio 2019.

YANG, Shuqing e CUI, Hongzhi e SUN, Chi. **Assessment of in-situ alkali-silica reaction (ASR) development of glass aggregate concrete prepared with dry-mix and conventional wet-mix methods by X-ray computed micro-tomography**. Cement and Concrete Composites, v. 90, n. April, p. 266–276, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.027>>.

YEONG, So e SUK, Yoon e IK, Eun. **Characteristics of volume change and heavy metal leaching in mortar**

specimens recycled heavyweight waste glass as fine aggregate. Construction and Building Materials, v. 165, p. 424–433, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.050>>.

ZIARI, Hassan e TEYMOORI, Alireza e MONIRI, Ali. **Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass.** International Journal of Pavement Research and Technology, v. 10, n. 4, p. 297–303, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.04.006>>.

CAPÍTULO 02 - Concreto com a substituição parcial de agregado miúdo por vidro reciclado: Produção

Pedro Felix Liotto³, Genilson Pereira Santana⁴

RESUMO

O concreto é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, seus impactos no meio ambiente vão desde a fabricação do cimento até a extração dos agregados miúdos e graúdos necessários para a sua confecção. Tem-se também o vidro, material de uso amplamente difundido que quando descartado no meio ambiente necessita de grande tempo para a sua completa degradação. O vidro é um material 100% reciclável, porém ainda é um processo caro o que acaba sendo mais vantajoso é o descarte em aterros sanitários. Por ter excelentes características, o vidro é amplamente estudado como elemento possível de ser inserido no concreto como substituição de algum dos seus elementos, por exemplo, cimento, agregado miúdo e agregado graúdo. Vários resultados foram encontrados não deixando claro qual é o real potencial dessa substituição e qual seria a melhor proporção. Esta pesquisa, portanto, buscou testar o vidro como agregado miúdo com materiais naturais amazônicos. Para isso o vidro foi captado na indústria da construção civil e em empresas vidreiras, triturado e inserido no concreto em porcentagem sobre o peso do agregado miúdo nas faixas de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Foram realizadas comparações com concreto convencional de mesma mistura sem a adição de vidro. As análises comparativas foram as propriedades mecânicas de resistência à compressão e tração por compressão diametral aos 7, 14, 21, 28 e 90 dias.

Concrete with the partial substitution of recycled glass: Production

Concrete is the most widely used construction material in the world, its impacts on the environment range from cement manufacturing to extraction of the small and large aggregates required for its manufacture. There is also glass, a widely used material that when discarded in the environment requires great time for its complete degradation. Glass is a 100% recyclable material however it is still an expensive process which ends up being more advantageous is the disposal in landfills. Due to its excellent characteristics, glass is widely

³Aluno: Mestrando em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM, Brasil, E-mail correspondência: pedro_639@hotmail.com

⁴Orientador: Professor Titular do Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM, Brasil, E-mail correspondência: gsantana2005@gmail.com

studied as a possible element to be inserted in the concrete as a substitution of some of its elements, for example, cement, small aggregate and large aggregate. Several results were found not making clear what the real potential of this substitution is and what would be the best proportion. This research, therefore, sought to test glass as a small aggregate with natural Amazonian materials. For this, the glass was captured in the construction industry and in glassware companies, crushed and inserted in the concrete in percentage on the weight of the small aggregate in the bands of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. Comparisons were made with conventional concrete of the same mixture without the addition of glass. The comparative analyzes were the mechanical properties of compression strength and diametral compression traction at 7, 14, 21, 28 and 90 days.

2.1 INTRODUÇÃO

A indústria do concreto é uma das principais consumidoras de recursos naturais não renováveis (a brita, a areia e o calcário), pois o concreto é o material de construção mais utilizado nas obras em todo o mundo. O concreto tem seu uso amplamente difundido devido a sua facilidade de ser trabalhado e moldado, o que o torna interessante para modelagem de diversas peças estruturais. Porém o uso em larga escala dessas matérias primas é incompatível com o modelo sustentável que os países vêm adotando progressivamente ao longo dos últimos anos com os diversos acordos firmados nas conferências internacionais de clima e meio ambiente.

Dados apresentados no Panorama do Setor do Vidro em 2015 da Confederação do Ramo Químico (CNQ), a produção de vidro soda-cal correspondeu, em 2011, a cerca de 87% da produção de vidro no Brasil. O vidro soda-cal, mais conhecido como o vidro comum, é basicamente uma massa de areia natural, correspondendo a 70% da matéria prima do vidro, fundida em altas temperaturas e submetida em seguida ao resfriamento rápido, impedindo que aconteça a cristalização. Esse vidro é o responsável pela fabricação de vidros planos para janelas, embalagens para bebidas e alimentos, embalagens para produtos farmacêuticos etc.

O vidro é um material 100% reciclável, na teoria 1 kg de vidro pode ser reciclado gerando outro 1 kg de vidro diversas vezes. Mesmo com esse enorme potencial para reciclagem, no entanto ainda é mais barato produzir do que reciclar. A reciclagem exige procedimentos como coleta, seleção, limpeza, e pré-acondicionamento antes de ser triturado, isso encarece o processo fazendo com que grande parte do vidro produzido seja encaminhado ao aterro sanitário das cidades.

Em Manaus, no Estado do Amazonas, a maioria do vidro pós-consumo é depositado em aterros sanitários juntamente com outros tipos de resíduos. Embora não sejam biodegradáveis e não gerem

resíduos tóxicos, a disposição de resíduos de vidro em aterros sanitários não é uma solução ambientalmente correta, o que representa desperdício de matéria prima e energia e aumenta a necessidade de espaço para sua disposição. De acordo com o Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), no seu recente relatório de pesquisa sobre o Diagnóstico de Resíduos Urbanos, a concentração gravimétrica média estimada de vidro nos resíduos coletados nas cidades brasileiras é de 2,4% e segundo a Secretária Municipal de Limpeza Pública (SEMULSP), a entrada diária de resíduos sólidos no aterro sanitário correspondeu a 2.654,5 toneladas/mês em 2014, ou seja, é um desperdício de aproximadamente de 23.253 toneladas de vidro por ano em Manaus.

Os resíduos quando adequadamente triturados e peneirados para assumirem uma granulometria apropriada, dentro das classificações de norma, pode apresentar características semelhantes às dos agregados naturais. Além de que os resíduos de vidro quando empregados na fabricação de concretos reduzem os custos de produção (TOPÇU e CANBAZ, 2004).

O objetivo principal da pesquisa é substituir, tanto quanto possível, em percentual, a quantidade de agregados naturais areia e brita por resíduos de vidro com a mesma granulometria, como forma de diminuir custos financeiros, reduzir a utilização de matérias-primas e reduzir a quantidade de resíduos sólidos dispostos de forma inadequada em aterros sanitários.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Obtenção e preparo das amostras

Os resíduos de vidro deste trabalho foram cedidos pela empresa Portal Vidros, na forma de sobras do corte de vidros planos empregados principalmente na construção civil em Manaus, na composição de fachadas de prédios comerciais e residenciais, esquadrias e sacadas, além de movelarias em geral. Em todos os experimentos com agregados de vidro deste trabalho foram empregados vidros de uma mesma espécie, para minimizar as variações não controladas das formulações de concretos, conforme apresentado na Figura 2.1.

Após coleta os fragmentos de vidro foram lavados em água para retirada de impurezas, secos ao ar e moídos em moinho de bolas. No moinho de bolas foram realizadas séries consecutivas de 04 minutos com 12 esferas. No intervalo de cada série o material moído foi passado nas peneiras 4,75 mm e retido na de abertura 0,15 mm. O material retido na peneira 4,75 mm retornava para mais séries de 04 minutos de moagem enquanto o material passante na peneira de 0,15 era descartado, pois ficou abaixo da faixa granulométrica do agregado miúdo.



Figura 2.1 - Vidro coletado na Empresa Portal Vidro e armazenado antes da limpeza, trituração e peneiramento.

O cimento utilizado nas formulações das amostras de concreto foi o Portland, denominado CP IV-32, de fabricação da empresa Mizu, bastante comercializado em Manaus. O cimento foi fracionado e armazenado em pequenas quantidades em ambiente seco, além de ser utilizado dentro do prazo de validade, para que suas propriedades originais não fossem alteradas.

Os agregados empregados na produção de concretos estudados são de natureza mineral e comercializados em Manaus. O agregado miúdo utilizado foi a areia de terra firme e o agregado graúdo escolhido foi a brita 01. O agregado miúdo foi uma areia natural adquirida na Jazida Arco Iris. O agregado graúdo teve como origem a Jazida Figueiredo a 150 km de Manaus. Todos os agregados passaram por ensaio de granulometria e suas características físicas, a saber, massa unitária, massa específica, módulo de finura e diâmetro máximo, foram determinados experimentalmente.

Os materiais cimentos, da areia natural, resíduo de vidro moído e brita 01 foram caracterizados em triplicata e o valor médio de granulometria, massa unitária e massa específica, de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003); NBR NM 45/2006 (ABNT, 2007a); e NBR 9776/1988(ABNT, 1987), respectivamente.

Para o preparo dos corpos de provas de concreto deste trabalho foi utilizado Glenium 51, um aditivo superplastificante, recomendado para a fabricação de todos os tipos de concreto quando se necessita de baixo fator água/cimento (a/c) e alta fluidez, sendo compatível com todos os tipos de cimento Portland. Barros (2016), explica que os superplastificantes, após cuidadosa compatibilização com o cimento, reduzem a quantidade de água de amassamento diminuindo a relação água/cimento e ainda assim obtêm um excelente nível de abatimento inicial (slump), entre 100 mm e 200 mm. Após fazer abrangente explicação do princípio ativo por repulsão, do aditivo Glenium 51, o autor recomenda seu uso em concretos que necessitem de menores teores de água/aglomerante.

2.2.2 Produção dos corpos de prova de Concretos

Os corpos de prova de concreto foram produzidos com traços em massa 1:1,60:2,40 com a/c de 0,40 e 0,8% de aditivo com substituição de agregados fino de areia por vidro moído nos teores de 0%, 20%, 30%, 40%, e 50%, conforme Tabela 2.1. Sendo que a adição dos seguintes componentes se manteve constante em: cimento-12 kg; brita 01-28.80 kg; água-4.80 kg; e, Glenium-0.096 kg.

Tabela 2.1 - Misturas dos concretos.

Amostra	% Substit.	Areia*	Vidro*
REF	0	19,20	0,00
CV20	20	15,36	3,40
CV30	30	13,44	5,76
CV40	40	11,52	7,68
CV50	50	9,60	9,60

*Materiais em Kg.

Os materiais foram misturados em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 150 litros de concreto por 5 min e com velocidade igual 70 rpm. A produção seguiu as seguintes etapas de execução:

- 1) Para que não houvesse necessidade de controle da umidade dos materiais, principalmente da areia, os agregados graúdos e miúdos foram anteriormente secos em estufa para posteriormente serem pesados;
- 2) Finalizada a homogeneização, os concretos eram avaliados quanto à trabalhabilidade, que é energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade do material, pelo teste de abatimento do tronco de cone, Slump test;

Os ensaios foram moldados em cinco lotes de concreto, com verificações das resistências nas idades 7, 14, 21, 28 e 90 dias. O rompimento dos corpos de provas foi realizado em duplicata. Os ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos foram realizados de acordo com a NBR 5739/2007 (ABNT, 2007b). Quinze corpos de prova cilíndrico de 10 x 20 cm por mistura foram moldado e capeados com enxofre antes de serem ensaiados.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Características dos materiais

A Figura 2.2 exibe as curvas de distribuição de partículas das frações de areia e vidro apresentando dois comportamentos distintos. Nota-se que a curva de distribuição de partículas do

vidro moído é maior. É possível observar ainda na parte mais abaixo da curva que os finos se apresentam em quantidade significativa. Isso é possível devido ao processo de moagem. Um resultado esperado, devido a uma pequena diferença granulométrica dos dois materiais. Essa afirmação fica mais evidente nos valores de massa específica da Tabela 2.2.

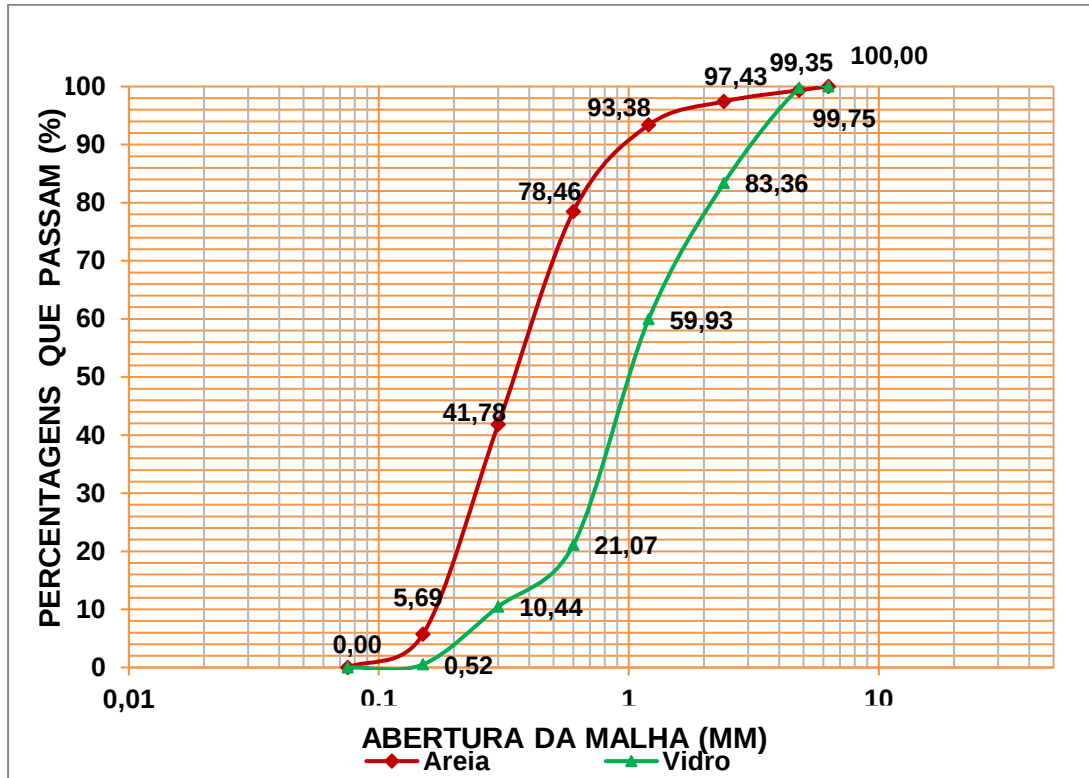


Figura 2.2 - Comparação da distribuição granulométrica da areia natural e a de vidro.

Tabela 2.2 Massa específica e unitária dos materiais usados neste trabalho

Caracter. (kg/dm³)	Método de Ensaio	Cimento	Método de Ensaio	Agregado Miúdo Areia Natural	Método de Ensaio	Agregado Miúdo Areia de vidro	Método de Ensaio	Agregado Graúdo
Massa Específica	NBR 16605	3,15	NBR 9776	2,60	NBR 9776	2,49	NBR 9937	2,63
Massa Unitária	NBR 16605	1,65	NBR 7251	2,49	NBR 7251	1,42	NBR 7251	1,54

A tabela 2.2 apresenta os valores das massas unitárias e específica dos materiais envolvidos na mistura. Tais características dependem dos tipos de materiais e seus processos produtivos, podemos destacar o caso do vidro que o tipo de vidro e de moagem são determinantes para diferentes valores. O processo de moagem utilizado, como dito acima, foi por moinho de bolas, o que gerou um resultado 5% menor em comparação com o agregado natural. Quanto aos demais valores de cimento e agregados graúdos, pode-se afirmar que se encontram dentro dos limites preconizados por norma.

Os resultados de ensaio de consistência são apresentados na Figura 2.3, em que se observa um aumento nos valores de *Slump* à medida que mais agregado de vidro é adicionado ao agregado natural. O aumento do *Slump* observado está relacionado a superfície lisa do agregado miúdo, o que resulta em maior fluidez de tais misturas, tendo em vista que foram utilizadas as mesmas relações água e aglomerante para todas as misturas assim como foi observado por LING (2018).

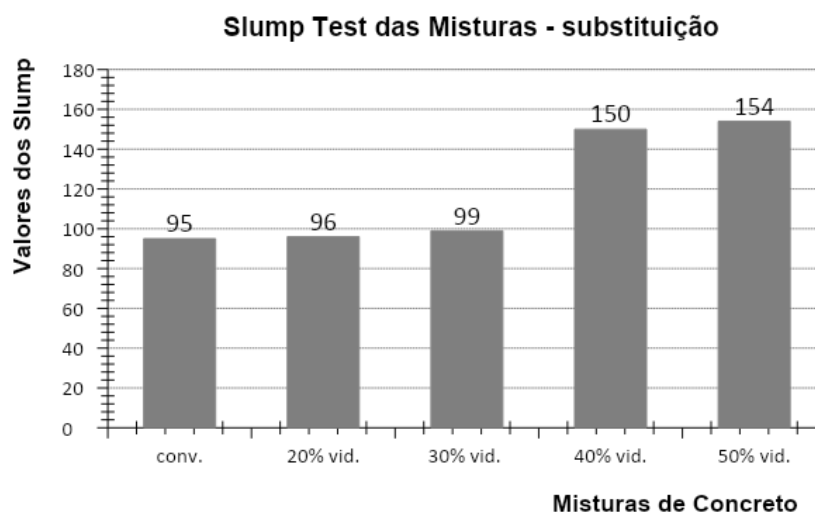


Figura 2.3 - Relação de Slump das misturas

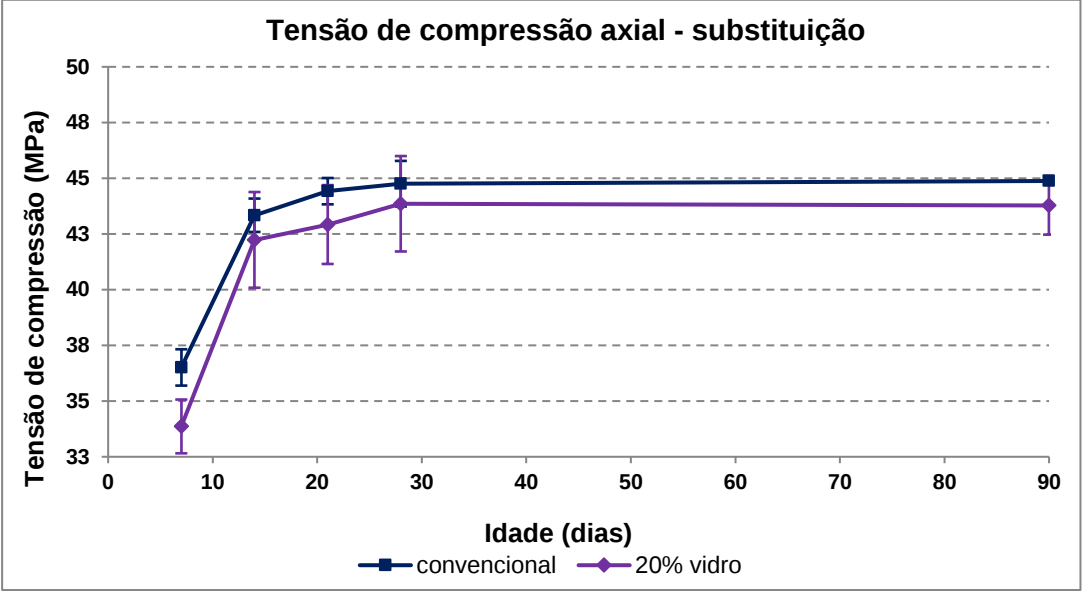
2.3.2 Compressão axial

Os resultados médios de compressão axial são expressos na Figura 2.4. Esta mostra a variação na resistência à compressão axial com substituição de agregado natural por agregado de vidro, em comparação com os resultados da mistura de controle. Verifica-se que as resistências apresentaram evolução a compressão axial com o aumento da idade, além de desenvolvimento normal até a resistência da mistura de controle. Nota-se que nos concretos produzidos com 20 e 30% de substituição não são observadas diferença significativa nos valores de resistência.

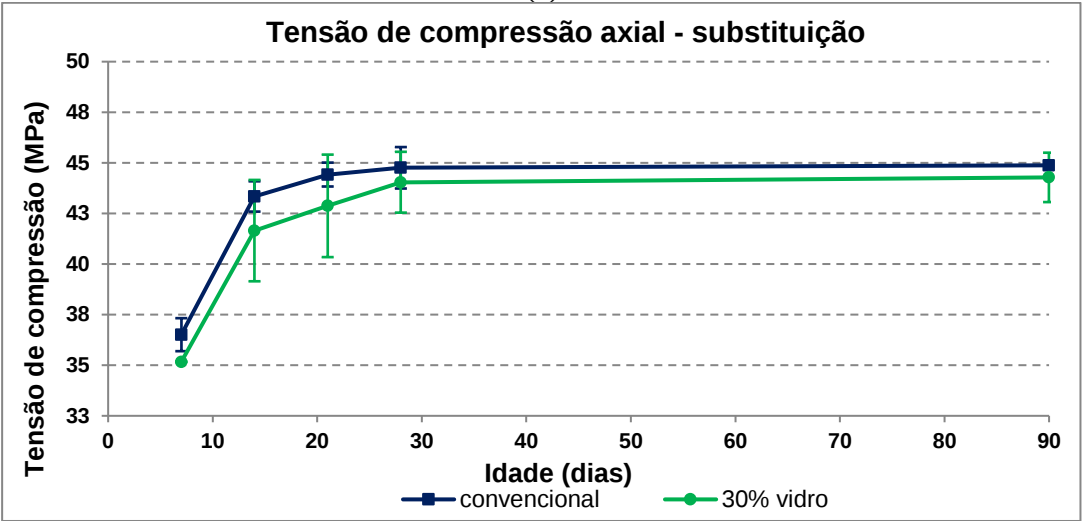
No gráfico “a” da Figura 2.4, as resistências do concreto com 20% de substituição de areia por vidro alcançam valores abaixo dos valores da mistura de referência. Destaca-se que nos dias 14 e 28 observa-se valores de típicos do concreto convencional. Outro destaque importante está na taxa de ganho da resistência nos dias iniciais, observa-se que a inclinação desenhada na mistura com vidro exprime um ganho de resistência maior que o da mistura de referência, mesmo alcançando valor mais baixo que a mistura convencional. Nota-se ainda, um “berço” se formando entre os dias 14 e 28. No concreto convencional esse período é conhecido como uma desaceleração no ganho de resistência. Mas quando olhamos as linhas referente ao mesmo período no gráfico da mistura com vidro, observa-se que essa desaceleração é considerável.

No desenho do gráfico “b” da Figura 2.4, as resistências da mistura com vidro não ultrapassaram a da referência. É importante descrever alguns aspectos, por exemplo nos 14 dias

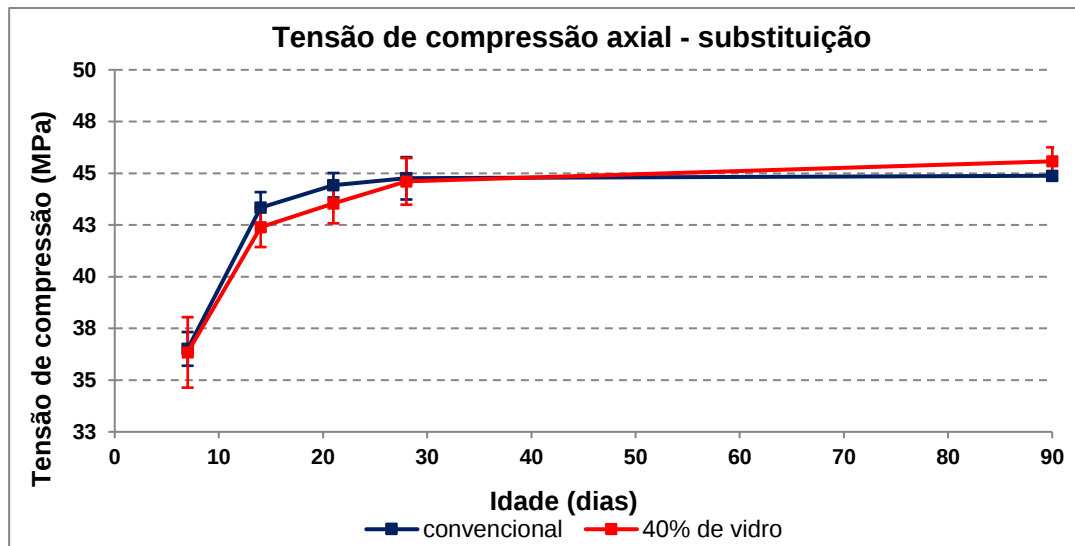
iniciais a taxa de ganho de resistência é a mesma do concreto de referência. Outro detalhe observado é que após esses 14 dias iniciais os dois concretos reduzem a taxa de ganho de resistência, mas o concreto da mistura de vidro a redução é menor que o concreto convencional. Ao final de 90 dias a resistência está muito próxima do concreto convencional.



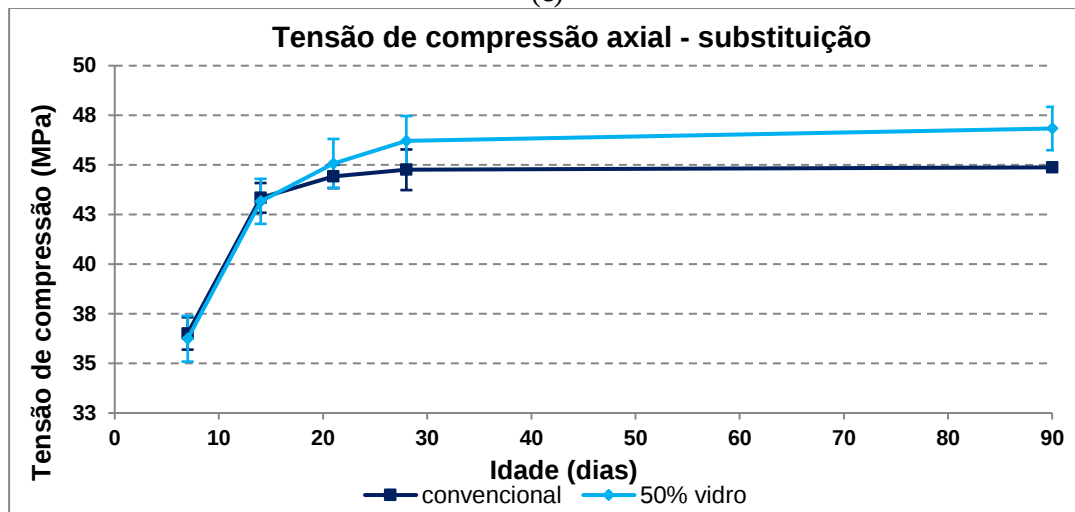
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.4 – Gráficos comparativos de resistência de compressão axial.

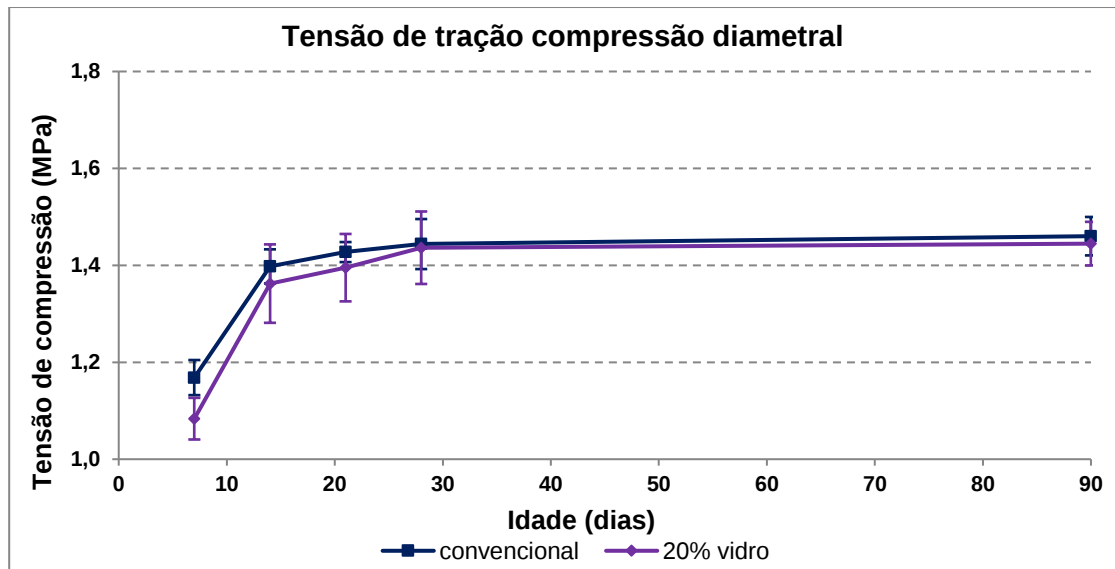
No gráfico “c” da Figura 2.4, percebe-se um padrão no ganho de resistência em relação ao concreto de referência. Nos 14 dias iniciais essa taxa é muito próxima ao concreto de referência, porém a resistência, mas ainda permanece abaixo da resistência do concreto convencional. Aos 14 dias, nota-se uma taxa de ganho de resistência que se mantém constante diferentemente da mistura de referência. A resistência final da mistura com vidro, alcança nível mais alto que o concreto de referência ultrapassando a mistura de referência no dia 35. Após o 28º dias a mistura de concreto com substituição de 40% de areia por vidro moído continua ganhando resistência em uma taxa de ganho maior que a mistura sem vidro.

No gráfico “d” da Figura 2.4, as resistências quase todas as medidas são melhores que as da mistura convencional. Nos 14 dias iniciais o concreto com vidro ganha resistência na mesma proporção que o concreto convencional. Ao final dessa primeira etapa vemos o que gráfico do

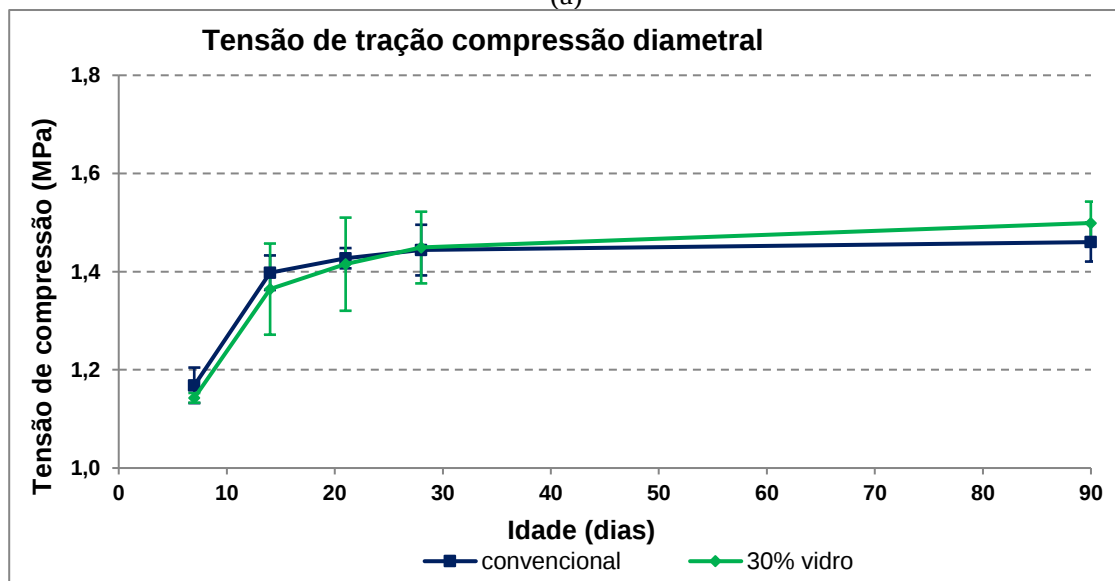
concreto com vidro ultrapassa o concreto convencional. No período de 14 até 28 dias ocorre um ganho na taxa de resistência em relação ao concreto de referência.

2.3.3 Compressão diametral

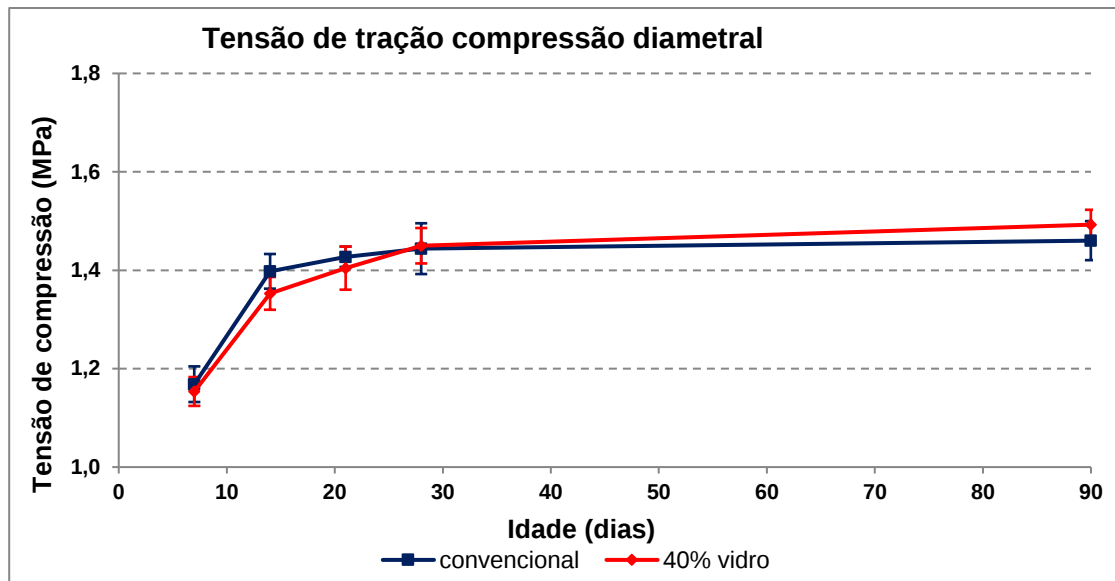
Os gráficos da Figura 2.5 descrevem os resultados dos ensaios de compressão diametral ou de tração indireta sempre sendo referenciado pela mistura de concreto convencional.



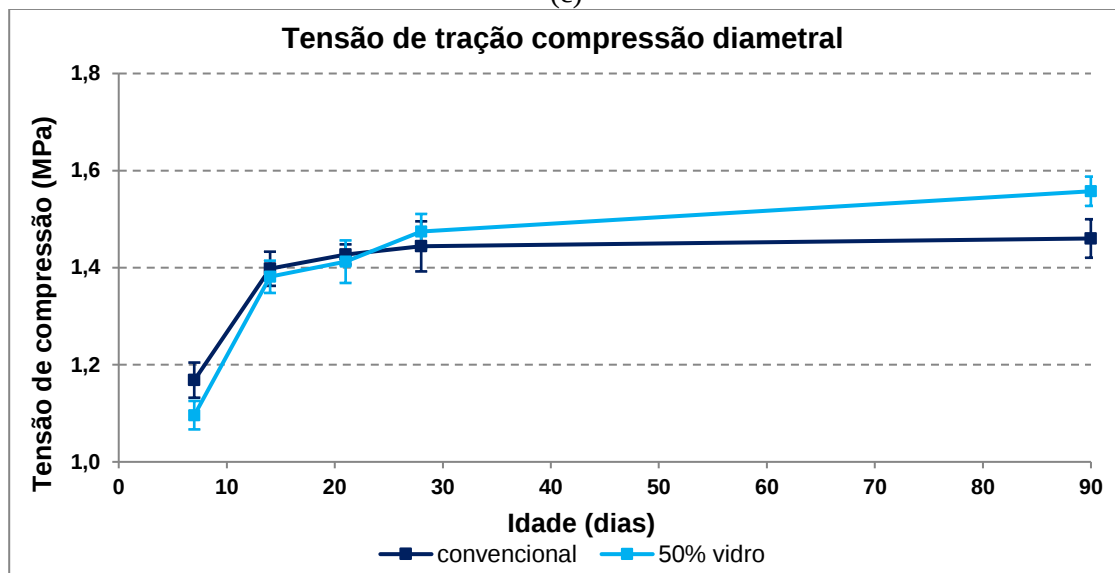
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.5 – Gráfico de resistência a compressão diametral

Os gráficos de compressão diametral da Figura 2.5 mostram pequenas diferenças em relação concreto referência; ou seja, o comportamento das misturas com vidro se assemelha muito com o concreto de referência não sendo observado mudanças bruscas ou aleatórias. Outra observação que pode ser feita é quanto a resistência na idade de 90 dias que as misturas com vidro alcançam. Tem-se que três das misturas ultrapassam os valores da mistura de referência, enquanto na resistência à compressão axial apenas duas ultrapassavam. Assim o vidro tende a melhorar a resistência à tração.

2.3.4 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

Foram realizadas imagens com MEV das superfícies fraturadas dos concretos dos respectivos dias, onde pode ser observada uma microestrutura comum para concretos, com presença de trincas entre a pasta e agregados, porosidade, fases anidras e hidratadas e a zona de transição interfacial.

Nos dias iniciais, como apresentado na Figura 2.6, a alta porosidade do concreto com a superfície de transição fissurada ainda enfraquecida é evidenciada no MEV. Observa-se que a pasta possui muitas fissuras e que o agregado no centro não apresenta deformações superficiais.

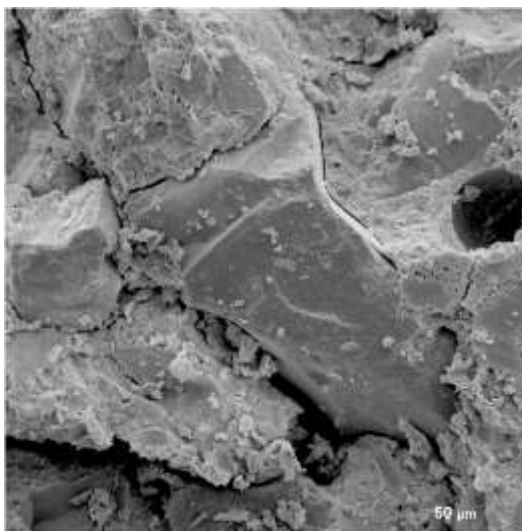


Figura 2.6 - MEV da superfície fraturada de amostra com 7 dias de idade

A Figura 2.7 com 14 dias de idade, apresenta uma matriz menos porosa com uma zona de transição que aumenta sua aderência. É possível observar ao longo da superfície do agregado a interação da pasta com o agregado buscando uma solidificação.

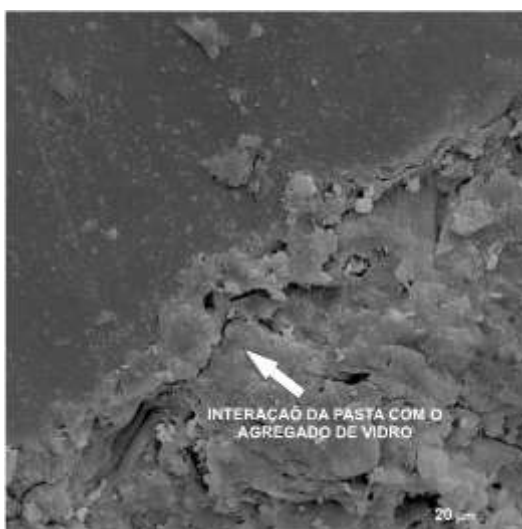


Figura 2.7 - Interação da pasta com o agregado de vidro

Com 21 e 28 dias de idade, como é apresentado na Figura 2.8 e 2.9, respectivamente, a matriz mais sólida se caracteriza por ter menos poros e na superfície do agregado fraturado as interações dos produtos do cimento com o vidro.

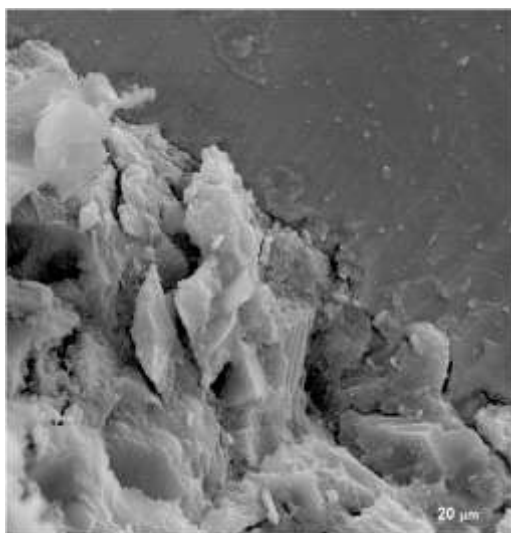


Figura 2.8 - MEV de superfície fratura de amostra de 14 dias

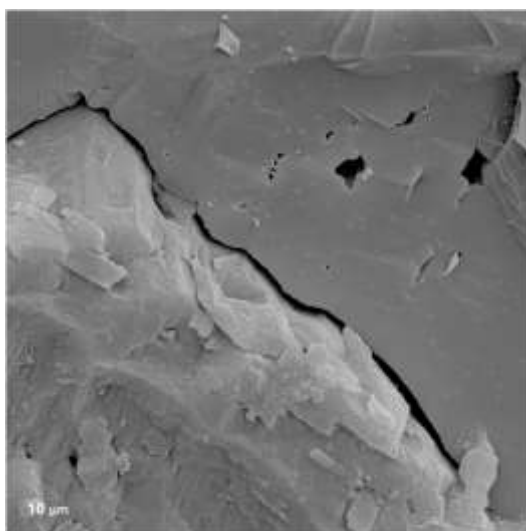


Figura 2.9 - Interação de agregado e pasta em amostra de 21 dias

As diferenças na microestrutura, principalmente ao efeito de compactação que o agregado de vidro e a produção de CSH adicional são produtos da reação de neutralização que ocorre do hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento. Com o processo de endurecimento do cimento, ocorre a formação de Ca(OH)_2 que atua no sentido de dissolver o silicato do vidro. Esse efeito é mais acentuado quanto menor for o tamanho médio da partícula do vidro. Durante o endurecimento do cimento é possível observar um processo de repolimerização do silicato do vidro cujo efeito principal

é o preenchimento dos poros existentes no concreto. Esse efeito é mais significativo a partir do 15º dia, etapa em que ocorre um aumento significativo na resistência. Segundo BIRCHALL et al. (1978) esse processo ocorre quando o cimento entra em contato com a água. O íon de cálcio, presente no cimento, é lixiviado formando uma solução de hidróxido de cálcio, com vestígios de sílica em fase aquosa, essa superfície exaurida de grãos de cálcio são os ácidos salicílicos de baixa massa molecular interagindo com modelos de cálcio hidroxilados dissolvidos (tendo como principal o $\text{Ca}(\text{OH})_2$), sendo produzido uma membrana semipermeável de hidrato de silicato de cálcio na superfície do grão. Os autores ainda explicam que a pressão osmótica dentro da tal membrana provoca a ruptura e o surgimento de saliências ao passo que o conteúdo é extrudado na solução de hidróxido de cálcio circundante.

2.3.5 Análise estatística

A análise estatística buscou compreender a normalidade dos dados e suas interferências além de classificar estatisticamente qual a melhor proporção de substituição de areia por vidro. Para isso foi realizado primeiramente a análise do intervalo de confiança das médias. Na sequência foi realizada a análise de variância – ANOVA - com o intuito de validação dos dados.

Tabela 2.3 – Intervalo de Confiança das médias obtidas com a resistência axial

	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
20% (0,2)	41,331	3,760	39,394	43,267
30% (0,3)	41,603	3,760	39,666	43,539
40% (0,4)	42,491	3,760	40,554	44,427
50% (0,5)	43,504	3,760	41,567	45,440
Conv	42,780	3,760	40,844	44,717

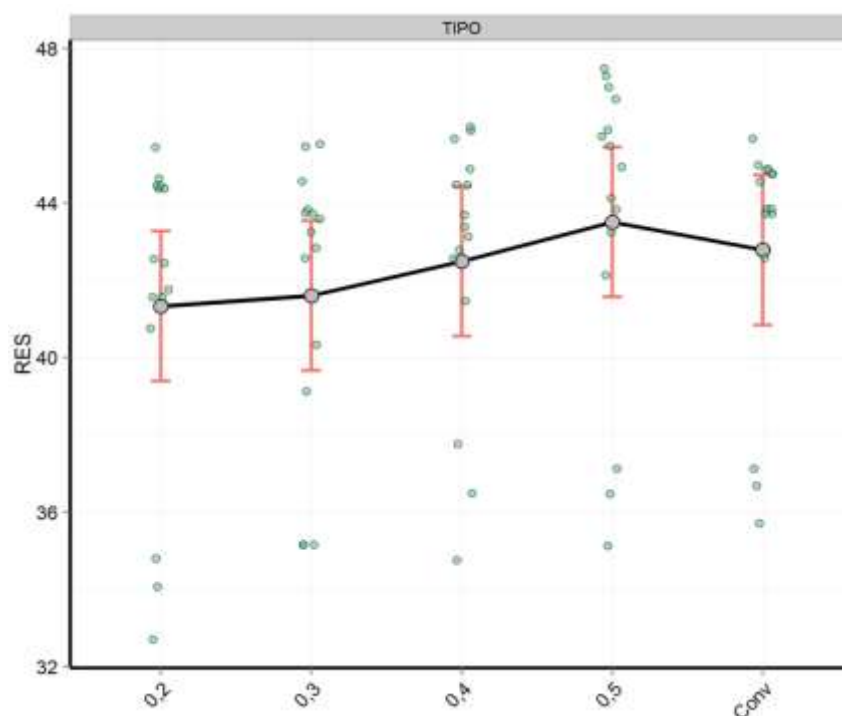


Figura 2.7 – Distribuição dos intervalos de confiança das médias de resistência a compressão axial

Na Figura 2.7 e na Tabela 2.3, tem-se as médias de todas as resistências medidas por quantidade de substituição de vidro e os respectivos intervalos de confiança. Nota-se que os cinco valores se diferenciam com relação à resistência que apresentam. Observando toda a distribuição vemos a porcentagem de substituição de 50% possui resultado relativamente superior que os demais e que o valor de 40% é o mais próximo do valor do concreto convencional.

Tabela 2.4 – Resultado da ANOVA feito com os dados de resistência a compressão axial

	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
TIPO	4	47,00892395	11,75223099	0,831088535	0,509927732
Resíduos	70	989,8538292	14,14076899		

Tabela 2.5 – Efeito das resistências a compressão axial.

<i>TIPO</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Efeito</i>	<i>Limite Superior</i>
20%	39,394	41,331	43,267
30%	39,666	41,603	43,539
40%	40,554	42,491	44,427
50%	41,567	43,504	45,440
Conv	40,844	42,780	44,717

O teste realizado para testar arbitrou a hipótese nula (H_0) de que as médias entre os experimentos dos diferentes traços e como hipótese alternativa (H_1) de que as médias são diferentes. O teste foi realizado considerando o nível de significância de 5%. A Tabela da ANOVA apresenta o resultado da estatística F sendo 0,8310 e para o p-Valor 0,5099, o que faz rejeitar a hipótese nula de

que as médias são iguais e fazendo com que seja aceita a hipótese de que as médias são diferentes. Dessa maneira a quantidade de vidro usada em suas porcentagens de substituição está influenciando nas medidas das suas respectivas influências.

A Figura 2.8 apresenta o gráfico de efeito. Trata-se de uma forma de visualizar as mudanças na resposta do processo a partir das alterações nos níveis dos fatores. Desta maneira pode ser avaliada a influência de cada fator separadamente. No caso aplicado pode ser inferido que a substituição parcial do vidro influencia a resposta, que é a resistência do concreto. Observa-se que conforme ocorre a substituição aumenta a resistência, cuja substituição de 50% sendo recomendada para ser usada no aproveitamento do vidro como agregado no concreto.

Para que o modelo ajustado seja confiável, as suposições descritas no Diagnóstico do Modelo não podem ser violadas. Para verificar se existem outliers, analisamos se cada observação é outlier em Y. Pelo gráfico dos resíduos padronizados x valores ajustados, verifica-se que nenhum resíduo é maior, em módulo, que 3 o que leva a inferir que nenhuma observação é outlier em Y.

A normalidade dos resíduos é uma suposição essencial para que os resultados do ajuste do modelo de regressão sejam confiáveis. Para isso, deve ser verificado o gráfico de Probabilidade (QQ-Plot). No gráfico de Resíduos x Valores, apresentado na Figura 2.9, ajustado tem-se que os pontos não seguem uma tendência definida e além de pontos estarem próximo ao zero. Tal característica é indício de que a variância dos resíduos é homocedástica, portanto tem-se uma variância constante dos erros experimentais, para observações distintas. No gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta da Figura 2.9, observa-se que os pontos não parecem ter uma tendência e por isso temos indícios de independência dos erros.

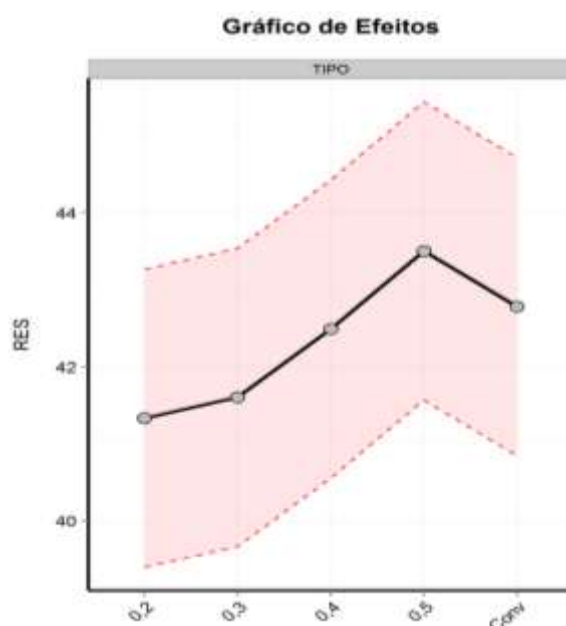


Figura 2.8 – Efeito das misturas na resistência

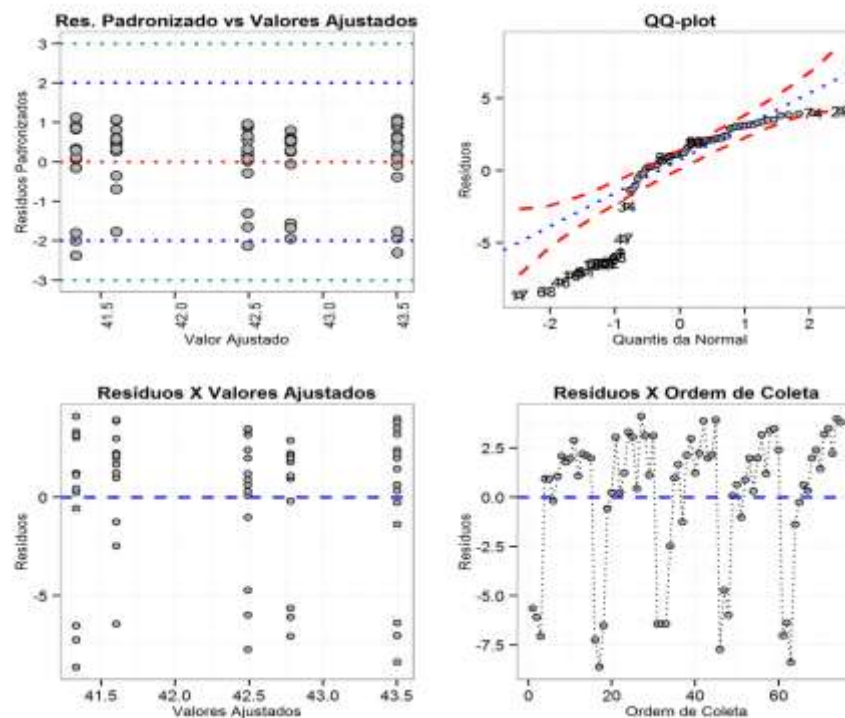


Figura 2.9 – Verificação de resíduos

2.4 CONCLUSÃO

As resistências médias à compressão axial e à tração por compressão diametral dos corpos de prova dos concretos produzidos com agregados de vidro nas proporções de 30, 40 e 50% foram sistematicamente maiores que as misturas produzidas com agregados naturais a partir dos 28 dias, porém não houve diferenças significativas entre as misturas em todas as idades. O vidro em substituição ao agregado miúdo natural produziu melhor trabalhabilidade nas misturas com maior proporção de substituição, por exibirem granulometria textura lisa, mas, por se ligarem de forma mais fraca com a pasta de cimento, apresentaram resistência ligeiramente menores nas idades iniciais nos ensaios mecânicos de compressão axial e tração por compressão diametral. Os ensaios de compressão e tração por compressão diametral indicaram que o ganho de resistência nos concretos contendo substituição por vidro aumentam a uma taxa ligeiramente menor que nos concretos tomados como referência, mas concretos com agregados de vidro tem potencial de alcançar resistências superiores à do concreto normal para tempos de cura mais longos. As vantagens em longo prazo do concreto contendo vidro podem ser atribuídas as melhores qualidades de ligação do silicato de cálcio hidratado que resulta da reação pozolânica do vidro com hidróxido de cálcio, e melhor aderência e ganho na resistência da massa cimentícia nas idades mais avançadas.

A verificação da microestrutura do concreto a partir das imagens de MEV embasam a ideia que se tinha no início da pesquisa em que haveria interação do vidro com a pasta, que a superfície do vidro buscava sim a fusão com a pasta projetando um concreto com menor porosidade e mais maciço

além de lhe conferir resistência satisfatória. A análise estatística apresenta gráficos e valores que validam os experimentos realizado explicando a relação dos erros com o experimento de modo geral. O esquema de análise de resíduos ainda atesta a normalidade da distribuição dos erros. A construção da ANOVA valida a relação das adições com os seus respectivos ganhos de resistências. O estudo dos efeitos também aponta um caminho nesse sentido atestando que a medida que os agregados miúdos são adicionados a resistência aumenta. Mas aponta também que a melhor proporção para adição de vidro é da faixa de 50%, tomando como referência a mistura do concreto convencional sem as substituições de vidro.

2.5 BIBLIOGRAFIA

ABNT. **ABNT NBR NM 248:2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** [S.l: s.n.], 2003. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABNT. **ABNT NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** [S.l: s.n.], 2007a.

ABNT. **Nbr 5739 :2007 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l: s.n.], , 2007b

ABNT. **NBR 9776:1987 Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro: ABNT, p. 5–7, 1987.

BARROS, L. M.. **Concreto de alta resistência a partir de matéria-prima amazônica e vidro reciclado.** Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2016.

BIRCHALL, J. D. e HOWARD, A. J. e BAILEY, J. E. **On the Hydration of Portland Cement.** The Journal of the Society of Chemical Industry, Japan, v. 360, n. 1, p. 445–453, 1978.

TOPÇU, İlker Bekir e CANBAZ, Mehmet. **Properties of concrete containing waste glass.** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 2, p. 267–274, 1 Fev 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888460300262X>>. Acesso em: 19 maio 2019.