

Análise do comportamento mecânico de argamassa com adição de fibras

Liliane Aparecida Rizzatti (1), Adriano Michael Bernardin (2)

UNESC – Universidade do extremo Sul Catarinense

(1) liliane.rizzatti@gmail.com, (2) amb@unesc.net

Resumo: O emprego de fibras na construção civil surgiu para suprir as necessidades de reforço e recuperação de determinadas estruturas visando a eficiência do componente final. Dentro deste escopo, este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento mecânico de compósitos de argamassa com a adição de fibras, em especial, as de vidro e as metálicas. As fibras estão sendo utilizadas em concretos e argamassas com maior frequência, visto que minimizam o comportamento frágil característico destes materiais. Além de melhorar o desempenho funcional e proporcionar maior homogeneidade ao elemento. Diante disso, inicialmente foram realizados testes em pastas de cimento até se obter a proporção de materiais ótima para posterior aplicação em argamassa. Os ensaios foram divididos em duas fases, cuja diferença entre elas está relacionada ao tempo de cura. Partindo do princípio de que o material compósito de pasta de cimento apresentou melhora em suas propriedades após a adição de fibras, deu-se continuidade ao trabalho com a confecção das argamassas, seguindo a mesma linha de desenvolvimento. As propriedades mecânicas das argamassas foram verificadas pelos ensaios de índice de consistência, de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, e microscopia e retração. Com os resultados obtidos, verifica-se que os compósitos argamassados com adição de ambas as fibras não apresentaram diferenças significativas em relação à argamassa pura. Porém, pode-se dizer que a argamassa com adição de fibra de vidro apresentou um aumento de resistência equivalente a 38,1% com adição de 0,5% aos 7 dias e um ganho de 14,3% com adição de 1,0% aos 28 dias, quando submetida a esforços de tração na flexão.

Palavras-Chave: Argamassa; Pasta de cimento; Fibra de vidro; Fibra metálica.

Analysis of the mechanical behavior of mortars with fiber addition

Abstract: The use of fibers in civil construction has emerged to meet the needs of reinforcement and recovery of certain structures aiming at the efficiency of the final component. Within this scope, this work presents a study on the mechanical behavior of composites of mortar with the addition of fibers, especially glass and metallic fibers. Fibers are being used in concretes and mortars more frequently, since they minimize the characteristic brittle behavior of these materials, besides improving the functional performance and providing greater homogeneity to the element. Initially, tests were carried out on cement pastes until the optimum proportion of materials was obtained for later application in mortar. The tests were divided in two phases, whose difference is related to the setting time. Assuming that the cement paste composite showed improvements in its properties after the addition of fibers, the work continued on the preparation of mortars, following the same development line. The mechanical

properties of the mortars were tested by the consistency index, tensile strength in flexion, compressive strength, microscopy analysis and shrinkage. The results showed that the composite mortar with the addition of both fibers did not presented significant differences regarding the pure mortar. However, the mortar with addition of glass fiber showed a resistance increase equivalent to 38,1% with addition of 0,5% at 7 days and a gain of 14,3% with addition of 1,0 % of glass fiber at 28 days, when submitted to tensile stress in flexion.

Key-words: Mortar; Mass of cement; Fiberglass; Metal Fiber.

Introdução

A utilização de fibras em compósitos tem sido destaque nos últimos tempos, sendo considerados um dos produtos inovadores na indústria da construção civil, uma vez que conferem bom desempenho e ganho no ciclo de vida.

Na elaboração de um componente estrutural em material compósito procura-se otimizar o aproveitamento das ótimas propriedades mecânicas associadas aos reforços fibrosos. Para Marinucci (2011, p. 63) “a seleção do reforço leva sempre em conta aspectos que variam desde o custo desses materiais até o desempenho pretendido e a técnica de fabricação empregada.”

As argamassas com adição de fibras podem ser definidas como compósitos, ou seja, materiais constituídos de pelo menos duas fases distintas principais. A própria argamassa endurecida, sem fibras, já é um componente cujas fases principais são a pasta, os poros e o agregado. Porém consideram-se como fases principais da argamassa com fibras a própria argamassa, denominada matriz e as fibras, que podem ser produzidas a partir de diferentes materiais como aço, vidro, polipropileno, náilon e carbono (FIGUEIREDO, 2011; CAPORRINO, 2016, p. 39). Os revestimentos argamassados são constituídos por mais de um aglomerante que proporciona endurecimento e aderência, e para isto é necessário que a argamassa resulte em uma mistura homogênea.

As argamassas de revestimento que integram o sistema de vedação das edificações auxiliam no isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste, protegendo a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo, regularizam a superfície dos elementos de vedação e servem de base para acabamentos decorativos. Sendo assim, as argamassas de revestimentos são usadas para revestir paredes, tetos e muros. A NBR 13281 (2005, p. 02) define argamassa como sendo uma "mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não

aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada)".

A argamassa é resultado da mistura de cimento, água e agregados miúdos. Pela presença do cimento, que é um aglomerante hidráulico, ela endurece com a ação da água. As argamassas de revestimento para uso interno ou externo devem apresentar no estado fresco coesão e trabalhabilidade, inclusive adequado poder de retenção de água e teor de ar incorporado. Já no estado endurecido, devem apresentar elevado poder de aderência, adequada resistência mecânica, moderada retração de secagem e módulo de deformação, propiciando à argamassa capacidade de acomodar deformações impostas ao revestimento (TOMAZ, 2015, p. 10).

Quando se fala em retração, a primeira ideia é a visualização de fissuras e trincas na superfície. A retração é um processo de redução de volume que ocorre na massa da argamassa, ocasionada principalmente pela saída de água por exsudação (AOKI, 2010).

Para Caporrino (2016, p. 38), quanto maior o teor de finos maior a retenção de água nas primeiras horas de cura, controlando assim a retração da argamassa. No entanto, em idades mais avançadas a retração da argamassa aumenta com o teor de finos. Portanto, nas argamassas com maior teor de cimento e, conseqüentemente, maior limite de resistência, as tensões vão se acumulando e a ruptura, quando ocorre, é na forma de macro fissuras, muito prejudiciais ao revestimento. Por outro lado, nas argamassas cujas ligações internas são menos resistentes, as tensões são dissipadas na forma de microfissuras não prejudiciais.

Com relação aos materiais compósitos, são feitos por uma fase e um reforço, sendo que os materiais de reforço são as fibras. Segundo Mano (2005), as fibras ampliam a capacidade de deformação do material e aumentam a sua capacidade de suporte de carga, principalmente quando submetidas a esforços de tração, flexo-tração e impacto. As fibras se distribuem aleatoriamente no material, reforçando toda a peça (FIGUEIREDO 2011, p. 30).

As fibras de vidro apresentam boas propriedades elásticas e baixo custo, o que as tornam competitivas com os metais não ferrosos, além de apresentarem a melhor relação custo/benefício entre os reforços oferecidos para a fabricação de compósitos poliméricos (MARINUCCI, 2011, p. 64; FIBERTEX, 2010). Apresentam baixo módulo de elasticidade, auto abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregadas a compósitos (LEVY NETO, 2006, p. 61).

Por sua vez, as fibras metálicas, principalmente as de aço, são as mais utilizadas em reforços por serem, para Bauer (1987), as mais eficazes e econômicas, e de fácil mistura à

matriz. Quase todas as fibras de aço são produzidas com aço carbono ordinário, porém as feitas de ligas metálicas são mais resistentes à corrosão em aplicações refratárias e em estruturas marítimas. Também são produzidas fibras especiais de aço inoxidável para concretos refratários que são submetidos a temperaturas elevadas. As fibras metálicas de aço são pequenos segmentos de arame misturados ao concreto em dosagens pré-calculadas, conferindo ao material ganho estrutural e podendo assim substituir a armadura tradicional (DRAMIX®, 2018).

O principal papel das fibras na argamassa é agir como ponte de transferência de tensões através de fissuras (BENTUR E MINDESS, 1990). Após a ruptura da matriz de argamassa, as fibras, enquanto atuam como pontes, sofrem um processo de arrancamento que demanda uma quantidade extra de energia para deformação e ruptura do compósito, proporcionando uma maior tenacidade.

Desta forma, o principal objetivo deste estudo foi a análise do comportamento mecânico e o desempenho de compósitos cimentícios, pasta e argamassa, com e sem adição de fibras de vidro e metálicas, em seu estado fresco e endurecido.

Materiais e métodos

O processo de caracterização dos materiais e os ensaios realizados foram executados no Parque Científico e Tecnológico (i-parque) da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Materiais: Para o desenvolvimento experimental é de suma importância observar as características e os conceitos a respeito dos materiais adotados. Portanto, para melhor entendimento, neste capítulo são citadas algumas propriedades destes.

Para a confecção das argamassas, adotou-se a fibra de vidro (Figura 1, item “a”), em laminados com espessura de camada de aproximadamente 1 mm por, com 0,300 kg/m². A fibra metálica de aço utilizada foi a microfibras metálica (Figura 1, item “b”), cuja denominação comercial é OL 13/20. É produzida a partir de fios de aço trefilados e apresenta dimensões de 13 mm x 200 µm, sendo assim considerada microfibras. O aglomerante empregado foi o cimento Portland de alta resistência inicial – CP V ARI (Figura 1, item “c”). Por fim, como agregado miúdo optou-se pela areia média lavada (Figura 1, item “d”) com diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura de 2,37, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (2003). A Figura 1 mostra os materiais utilizados na confecção das argamassas, sendo que, a Figura 1 (a) apresenta a fibra de vidro (manta não tramada), (b) a

microfibra de aço, (c) o Cimento CPV ARI, e (d) a areia média lavada.



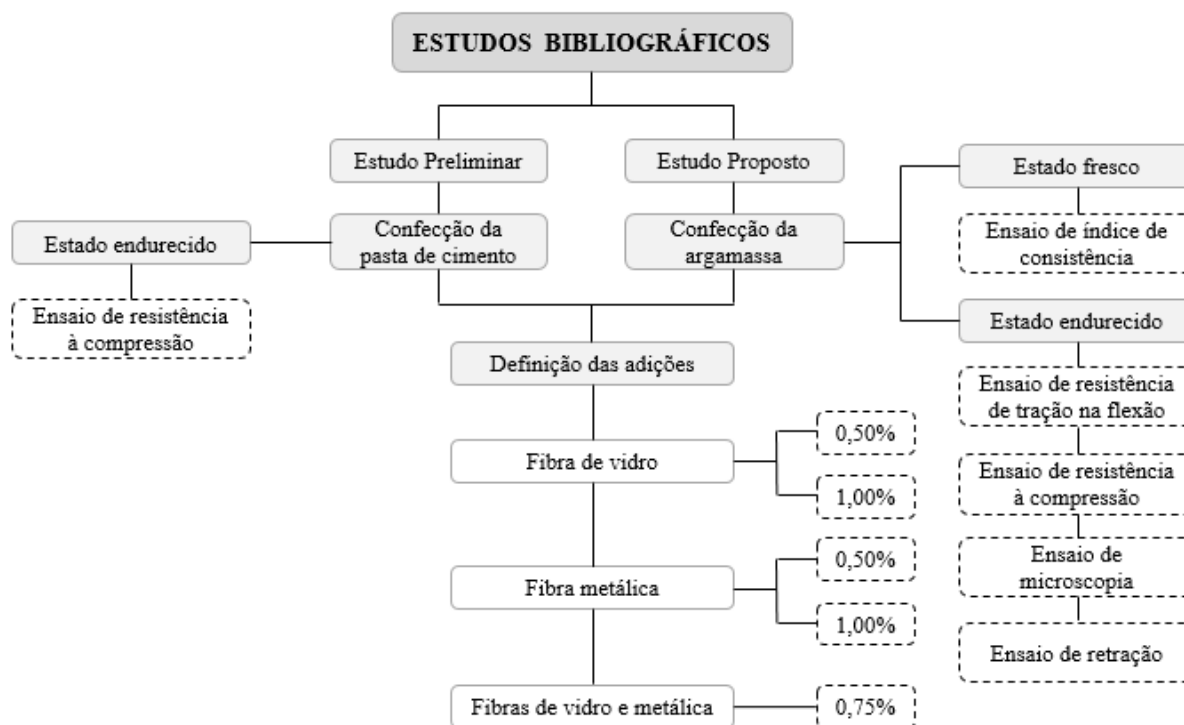
Figura 1. Materiais utilizados na confecção das argamassas: (a) fibra de vidro, (b) microfibra de aço, (c) Cimento CPV ARI, (d) areia média lavada

Métodos: A realização dos ensaios está embasada nas normas da ABNT, com critérios específicos detalhados a seguir.

Na execução dos trabalhos foram utilizados 36 corpos de prova em formatos cilíndricos com dimensões de $\varnothing 2,50$ cm x 5,00 cm para as pastas de cimento, e na confecção das argamassas adotou-se os corpos de prova em formato prismático com dimensões de 4,0 cm x 4,0 cm x 16,0 cm. Realizou-se ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e para os corpos de prova prismáticos executou-se ensaios de índice de consistência, resistência à tração na flexão e compressão, além de verificar sua retração e análise microscópica. Tal modelo experimental elaborado nos ensaios está explícito no Fluxograma 1. Ressalta-se que os corpos de prova cilíndricos não apresentam a mesma dimensão que a norma elenca, porém foram utilizados como referência os métodos de acordo com os procedimentos de moldagem estabelecidos nas normas técnicas de engenharia, em especial a NBR 5738 (2015) versão corrigida (2016).

A desforma dos corpos de prova foi dividida em dois momentos: aos 7 primeiros dias, pois se adotou o cimento CPV ARI, e aos 28 dias, para melhor resistência da mistura.

Fluxograma 1. Representação do modelo experimental



a) Índice de Consistência: Para a determinação do índice de consistência da argamassa a ser utilizada na realização do ensaio de caracterização, seguiu-se rigorosamente o que preconiza a NBR 13276 (2016). A determinação do índice de consistência da argamassa deu-se pelo cálculo da média de três medidas de diâmetro após o ensaio de abatimento, e seu resultado deve ser de 260 ± 5 mm.

b) Módulo de elasticidade: É a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada, sendo a tensão máxima que o material suporta sem sofrer deformação permanente. Para fins de cálculo seguiu-se o que preconiza a NBR 8522 (2017) adaptada através da NBR 8522 (2008).

c) Resistência à compressão axial: O ensaio de compressão axial seguiu as especificações da ABNT NBR 5739 (2007). As amostras cilíndricas confeccionadas em pastas de cimento foram ensaiadas em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL10000, com capacidade máxima de 10 toneladas-força. Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos ao ensaio após serem retirados do processo de cura. A carga foi aplicada com velocidade de 1 mm/min.

d) Resistência à tração na flexão: O ensaio de tração na flexão seguiu as especificações da ABNT NBR 13279 (2005). As amostras prismáticas foram ensaiadas em uma máquina universal de ensaios (EMIC, DL10000). Os corpos de prova prismáticos foram submetidos ao

ensaio após processo de cura e a carga foi aplicada com velocidade de 1 mm/min.

e) Resistência à compressão: O ensaio de compressão seguiu as especificações da ABNT NBR 13279 (2005). As duas partes dos corpos de prova prismáticos ensaiados por tração na flexão foram utilizadas e ensaiadas em uma máquina universal de ensaios (EMIC PC200CS). A carga foi aplicada com velocidade de 1 mm/min.

f) Microscopia Óptica: Permite a visualização de estruturas pela incidência de luz em lentes objetivas, que promovem um aumento de até 1000 x, sendo impossível observar a olho nu. As amostras prismáticas confeccionadas em argamassas foram ensaiadas em microscópio digital (Cooltech U500X), cujo foco de ampliação configurado foi de 600 x.

g) Retração: O ensaio foi realizado em ambiente de laboratório, com temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e 60 % de umidade relativa do ar. A medição da retração no estado endurecido foi realizada pela leitura inicial das dimensões dos corpos de prova utilizando um paquímetro (precisão 0,01 mm). As medidas foram feitas após 48 horas da moldagem e anteriormente ao rompimento, ou seja, após 7 e 28 dias;

Resultados e discussão

Pasta de cimento: O primeiro estudo foi feito em pasta de cimento, com a finalidade de obter resultados eficientes na confecção de argamassas com adições de fibras, visto que a pasta é constituída apenas por cimento e água. Com os resultados dos primeiros estudos foram adotados critérios para as composições com adições de fibras em pasta de cimento, para verificar o comportamento e as características da mistura.

a) Moldagem: Após testes para adquirir a melhor consistência da pasta, adotou-se a relação água/cimento (a/c) igual a 0,50, visto que a relação água/cimento (a/c) igual à 0,45 não apresentou a trabalhabilidade necessária para a confecção dos corpos de prova. Sendo assim, prosseguiu-se com a moldagem de 36 unidades de corpos de prova (CPs³) cilíndricos. As formulações foram distribuídas em:

- ✓ Pasta de cimento;
- ✓ Pasta de cimento + fibras de vidro e metálicas (F.V.¹ e F.M.²) – adição de 0,75%;
- ✓ Pasta de cimento + fibras de vidro (F.V.¹) – adições de 0,5% e 1,0%;
- ✓ Pasta de cimento + fibras metálicas (F.M.²) – adições de 0,5% e 1,0%.

b) Resistência à compressão axial: Para verificar o comportamento mecânico das

pastas de cimento, realizou-se o ensaio de compressão no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Parque Científico e Tecnológico da UNESC, cujo resultado é mostrado na Tabela 1.

A princípio, 18 unidades de corpos de prova cilíndricos foram mantidas em repouso durante 7 dias e em seguida foram rompidos. Posteriormente, o restante dos corpos de prova passou pelo mesmo processo aos 28 dias.

Tabela 1. Resultados do ensaio de compressão axial realizado na pasta de cimento aos 7 e 28 dias

Formulações dos Corpos de Prova (g)	(%)	Força Máxima (kgf)		Tensão (MPa)		Deformação (mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Pasta de cimento	0,00	1099,12	1110,47	21,95	22,18	1,070	1,095	1,03	1,01
Pasta + F.V ¹ + F.M ²	0,75	1311,54	1414,57	26,20	28,26	1,729	1,375	0,76	1,03
Pasta + F.V ¹	0,50	1354,36	1480,19	27,06	29,57	1,956	1,534	0,69	0,96
Pasta + F.V ¹	1,00	1234,90	1282,79	24,67	25,63	1,869	1,628	0,66	0,79
Pasta + F.M ²	0,50	1620,95	1498,46	32,38	29,94	1,282	1,013	1,26	1,48
Pasta + F.M ²	1,00	1428,52	2006,24	28,54	40,08	1,608	1,329	0,89	1,51

Comparando os resultados obtidos para a pasta de cimento e suas adições, verificou-se pelos gráficos de Pareto para o módulo de elasticidade e para a resistência à compressão aos 7 dias (Figuras 2 e 3 itens “a”), que o tipo de fibra é o fator que influi na melhora das características da mistura. Em contrapartida, nos gráficos de superfície de resposta (Figuras 4 e 5 itens “b”) constatou-se que o tipo de fibra com as melhores características foram as fibras metálicas com adição de 0,5%, ou seja, quanto menor a quantidade de fibras adicionadas à mistura, melhores foram os resultados. As Figuras 2 e 3 representam os gráficos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias, sendo que, as Figuras 4 e 5 (a) apresentam o diagrama de Pareto e (b) o diagrama de superfície de resposta.

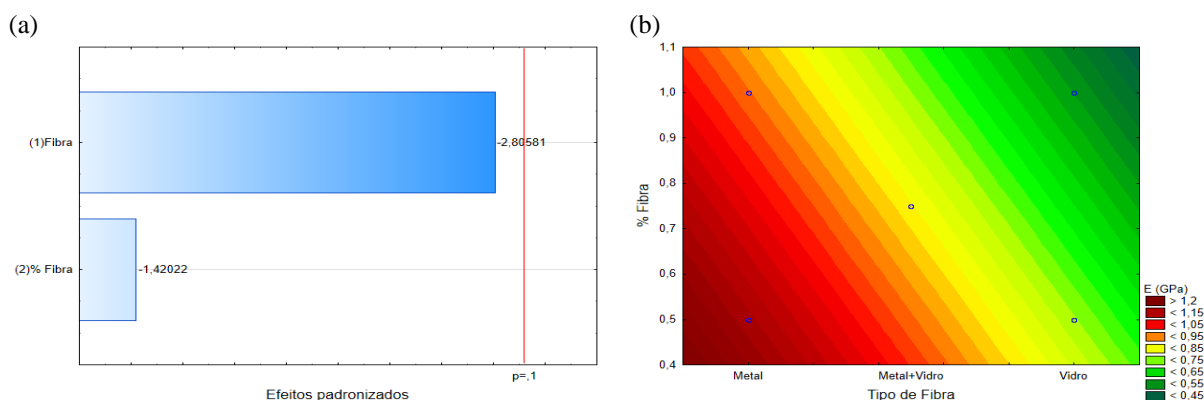


Figura 2. Gráficos para o módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de superfície de resposta.

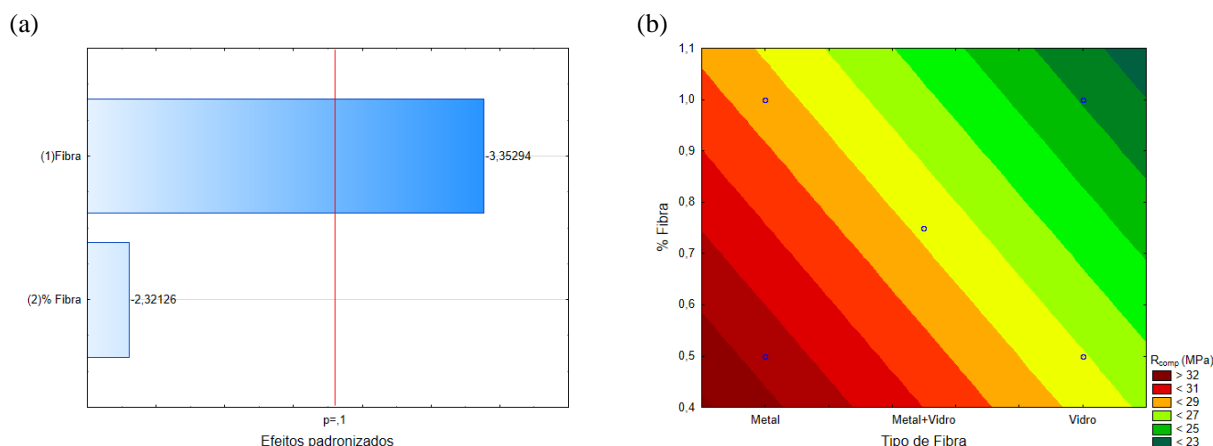


Figura 3. Gráficos para a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de superfície de resposta.

Com relação aos gráficos de Pareto para o módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias (Figura 4, itens “a” e “b” e Figura 5, item “a”), observou-se que o tipo de fibra ainda é o que predomina nas características da mistura, e nos gráficos de superfície de resposta (Figura 5, item “b”), as fibras metálicas continuam com as melhores características, porém, agora com adição de 1,0%. Sendo assim, quanto maior a quantidade de fibras adicionadas à mistura, melhores os resultados à compressão. As Figuras 4 e 5 representam os gráficos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias, sendo que as Figuras 4 e 5 (a) apresentam o diagrama de Pareto e (b) o diagrama de médias e superfície de resposta. Os resultados indicaram melhora das propriedades em compósitos de pasta de cimento com a adição de fibras.

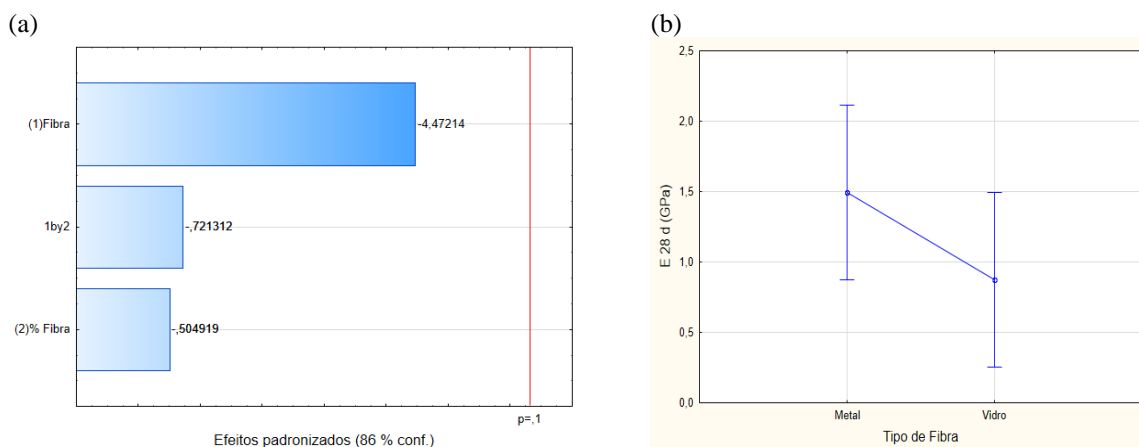


Figura 4. Gráficos para o módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

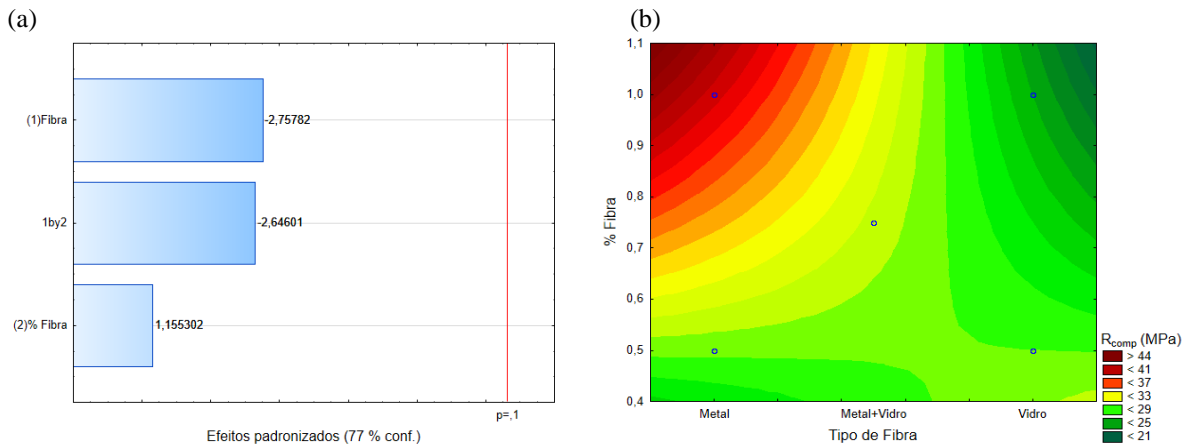


Figura 5. Gráficos para a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de superfície de resposta.

Argamassa: Com base nos resultados obtidos para pasta de cimento, foi utilizada a mesma metodologia para a elaboração das argamassas, ou seja, foram adotadas as mesmas adições de fibras em função do incremento do comportamento mecânico das pastas com adições. Ainda, nos ensaios com argamassa realizou-se uma pesquisa mais detalhada do seu comportamento mecânico levando em consideração alguns itens propostos em normas, conforme será demonstrado a seguir.

c) Índice de Consistência: Após testes a partir do ensaio de índice (IC) de consistência, chegou-se a uma relação água cimento (a/c) de 0,45 para argamassa, obedecendo à configuração exigida no resultado de índice de consistência. Assim, foi adotada esta relação como ponto de referência para as demais misturas confeccionadas com a adição de fibras. Vide a Figura 6 que representa os resultados dos índices de consistência para cada formulação de argamassa com adições de fibras, sendo que a Figura 6 (a) apresenta a argamassa sem adição, (b) a argamassa com adição de 0,5% de fibras de vidro, (c) a argamassa com adição de 1,0% de fibras de vidro, (d) a argamassa com adição de 0,75% de fibras de vidro e metálica, (e) a argamassa com adição de 0,5% de fibras metálicas e (f) a argamassa com adição de 1,0% de fibras metálicas.

Conforme recomendações da ABNT NBR 13276 (2016), os resultados são as médias aritméticas dos diâmetros de abatimento. O resultado para a mistura de argamassa sem adições atende à especificação da norma, com valor médio de 256,3 mm. A NBR 13276 estabelece um IC de 260 ± 5 mm. A adição de fibra de vidro reduz o IC, com valores médios de 252 mm para adição de 0,5% de fibra e de 238 mm para adição de 1,0%. Porém, a adição de fibra metálica aumenta o IC de 263 mm para adição de 0,5% de fibra e 270 mm para adição de 1,0.

Esta variação no índice de consistência pode estar relacionada ao fato de as fibras de

vidro, para a mesma massa, apresentarem um volume maior se comparado às fibras metálicas, como consequência há redução da trabalhabilidade da mistura com a adição de fibra de vidro.

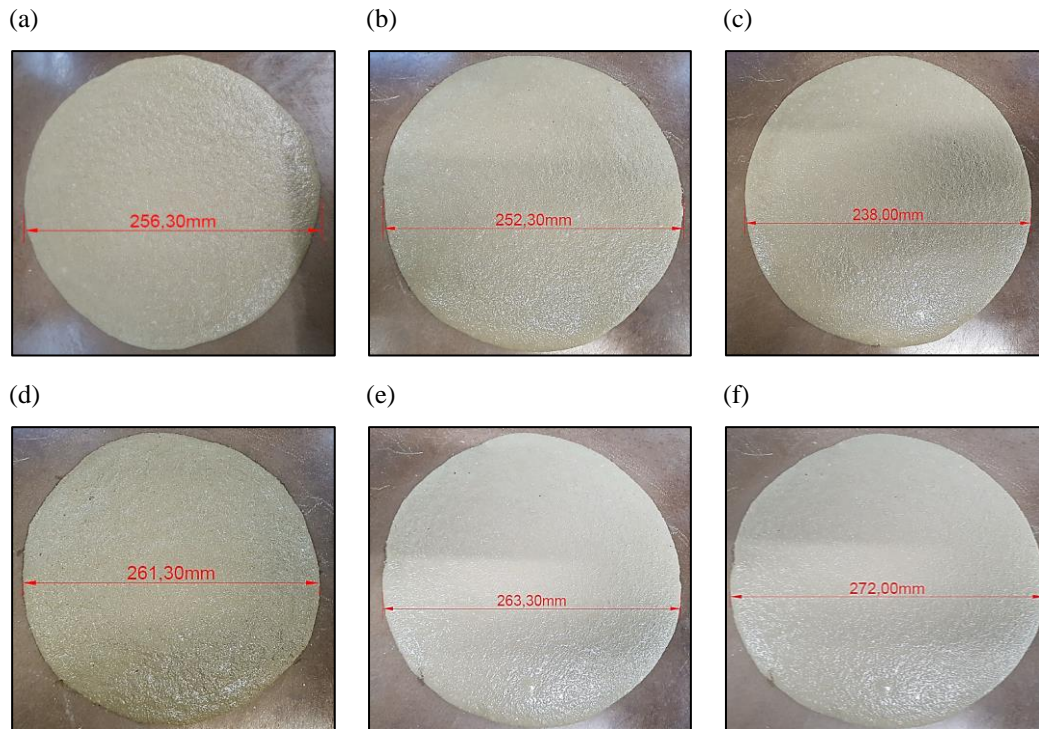


Figura 6. Resultados dos índices de consistência: (a) argamassa sem adição, (b), argamassa com adição de 0,5% de fibras de vidro, (c) argamassa com adição de 1,0% de fibras de vidro, (d) argamassa com adição de 0,75% de fibras de vidro e metálica, (e) argamassa com adição de 0,5% de fibras metálicas, (f) argamassa com adição de 1,0% de fibras metálicas

De acordo com a análise estatística utilizando gráficos de Pareto e de médias para o ensaio de IC, verificou-se que o tipo de fibra é o fator que mais influencia nas propriedades da argamassa, conforme mencionado anteriormente, visto que o nível de confiabilidade foi de 88% de significância. A Figura 7 apresenta os gráficos para o ensaio de índice de consistência dos corpos de prova cilíndricos, sendo que a Figuras 7 (a) apresenta o diagrama de Pareto e (b) o diagrama de médias. Pelo gráfico de médias percebe-se que a fibra metálica aumenta o IC e a fibra de vidro diminui este índice.

Na prática, quando se utiliza argamassa como revestimento, por exemplo, é preferível que o índice de consistência seja menor, tendendo a uma mistura menos porosa e consequentemente mais resistente e durável. O fato desta mistura ser mais seca também facilitará em aplicações verticais por propiciar maior aderência.

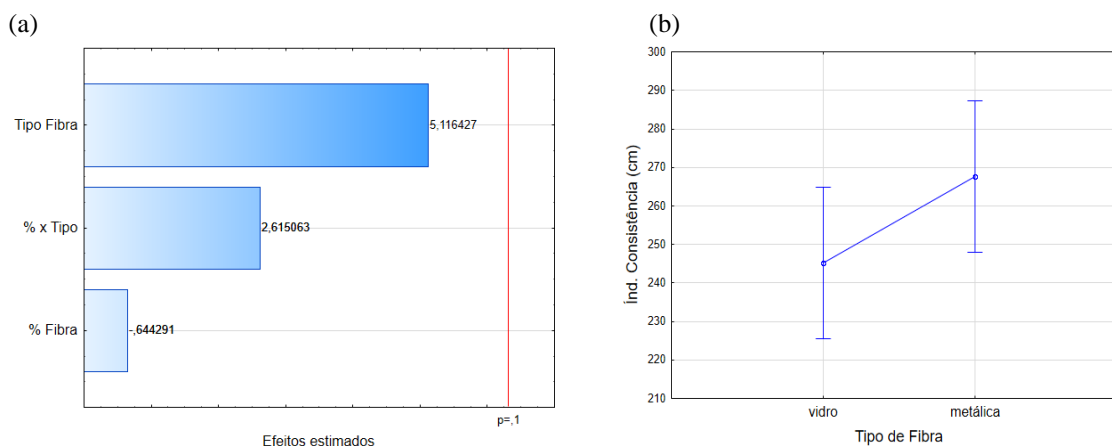


Figura 7. Gráficos para o ensaio do índice de consistência dos corpos de prova prismáticos: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

d) Moldagem: Foram moldados 36 corpos de prova (CPs³) prismáticos das argamassas e suas adições, cujo rompimento ocorreu aos 7 dias e posteriormente aos 28 dias. As formulações foram distribuídas em:

- ✓ Argamassa;
- ✓ Argamassa + fibras de vidro e metálicas (F.V¹ e F.M²) – adição de 0,75%;
- ✓ Argamassa + fibras de vidro (F.V¹) – adições de 0,5% e 1,0%;
- ✓ Argamassa + fibras metálicas (F.M²) – adições de 0,5% e 1,0%.

e) Resistência à tração na flexão e resistência à compressão: A verificação do comportamento mecânico das argamassas e suas adições se deu pelo ensaio de tração na flexão, executado no Laboratório de Ensaio Mecânicos, com os resultados expressos na Tabela 2. O ensaio de compressão, por sua vez, foi efetuado no Laboratório de Construção Civil, com os resultados mostrados na Tabela 3.

Tabela 2. Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão realizado na argamassa aos 7 e 28 dias

Formulações dos Corpos de Prova	(%)	Força Máxima (kgf)		Tensão (MPa)		Deformação (mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Argamassa	0,00	222,10	374,80	5,105	8,61	0,8341	1,1090	0,9793	1,2426
Argamassa+F.V ¹ +F.M ²	0,75	202,00	378,27	4,642	9,03	1,0390	1,1520	0,7148	1,2540
Argamassa + F.V ¹	0,50	306,80	388,20	7,052	8,92	1,3080	0,3534	0,8626	4,0398
Argamassa + F.V ¹	1,00	301,30	428,30	6,926	9,84	1,1630	0,9418	0,9528	1,6722
Argamassa + F.M ²	0,50	274,60	335,70	6,313	7,72	0,7182	0,5700	1,4064	2,1656
Argamassa + F.M ²	1,00	263,07	329,50	6,045	7,57	0,7327	0,6297	1,3200	1,9245

Tabela 3. Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na argamassa aos 7 e 28 dias

Formulações dos Corpos de Prova	(%)	Força Máxima (kN)		Tensão (MPa)		Deformação (mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Argamassa	0,00	63,27	71,49	39,55	44,68	0,983	1,494	6,44	4,79
Argamassa+F.V ¹ +F.M ²	0,75	63,25	64,51	39,53	40,32	0,804	1,426	7,87	4,52
Argamassa + F.V ¹	0,00	57,70	63,34	36,06	39,59	0,710	0,751	8,13	8,43
Argamassa + F.V ¹	1,00	59,87	55,49	37,42	34,68	0,701	1,192	8,54	4,65
Argamassa + F.M ²	0,50	62,87	62,61	39,29	39,13	1,813	1,315	3,47	4,76
Argamassa + F.M ²	1,00	60,14	57,35	37,58	35,84	1,680	0,941	3,58	6,09

Os dados das Tabelas 3 e 4 mostram que quanto maiores os valores para a força máxima e tensão, mais resistentes serão os corpos de prova. Da mesma forma, quanto maior o módulo de elasticidade, maior será a capacidade de o material absorver as deformações sem que ocorra a ruptura. O módulo de elasticidade está relacionado ao comportamento elástico do revestimento e pode fornecer informações a respeito da deformabilidade e da rigidez de um revestimento de argamassa. Esta propriedade mecânica é de grande interesse, pois está ligada aos fenômenos patológicos dos revestimentos de argamassa, em especial, as fissuras (CAMPITELI E SILVA, 2006).

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para a argamassa e suas adições, verificou-se pelos gráficos de Pareto e de médias que, para o módulo de elasticidade, deformação e resistência à tração na flexão, o tipo de fibra é o fator de influência no incremento das características da mistura, visto que o nível de confiabilidade aos 7 dias para o módulo de elasticidade foi de 76% e para a deformação na ruptura foi de 92% de significância. Em contrapartida, os resultados para o módulo de elasticidade e deformação na ruptura aos 28 dias não possuem nível de confiabilidade. Porém para a resistência à tração na flexão constatou-se um nível de confiabilidade de 93% de significância, conforme ilustram as Figuras 8, 9 e 10, que mostram os gráficos referentes ao ensaio de tração na flexão para o módulo de elasticidade, deformação na ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos aos 7 e 28 dias, sendo que, as Figuras 8, 9 e 10 (a) apresentam o diagrama de Pareto e (b) o diagrama de médias. Ressalta-se que tanto para a resistência à tração na flexão quanto para a resistência à compressão aos 7 dias, os resultados indicaram que não houve significância estatística para os resultados obtidos.

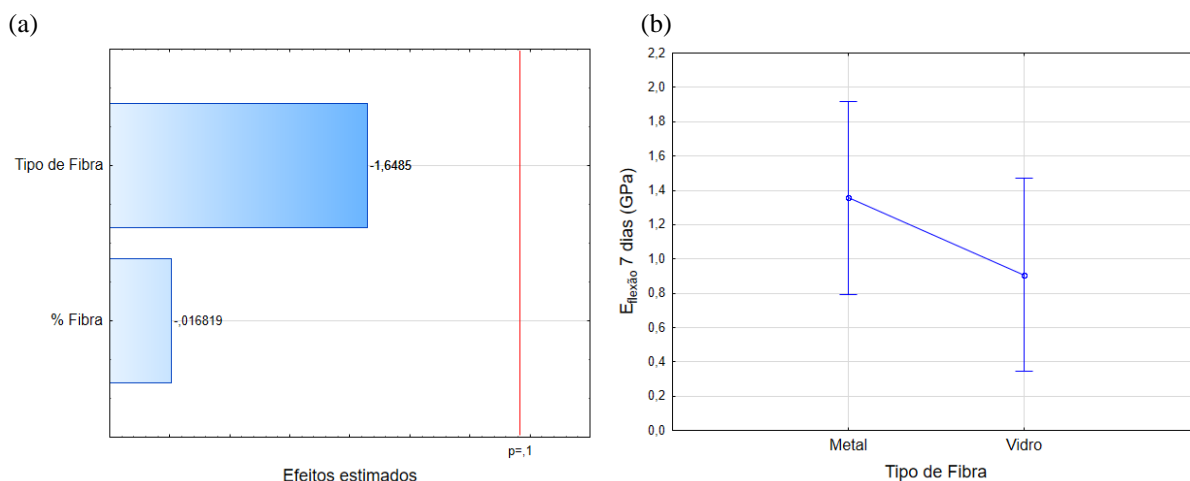


Figura 8. Gráficos referentes ao ensaio de tração na flexão para o módulo de elasticidade dos corpos de prova prismáticos aos 7 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

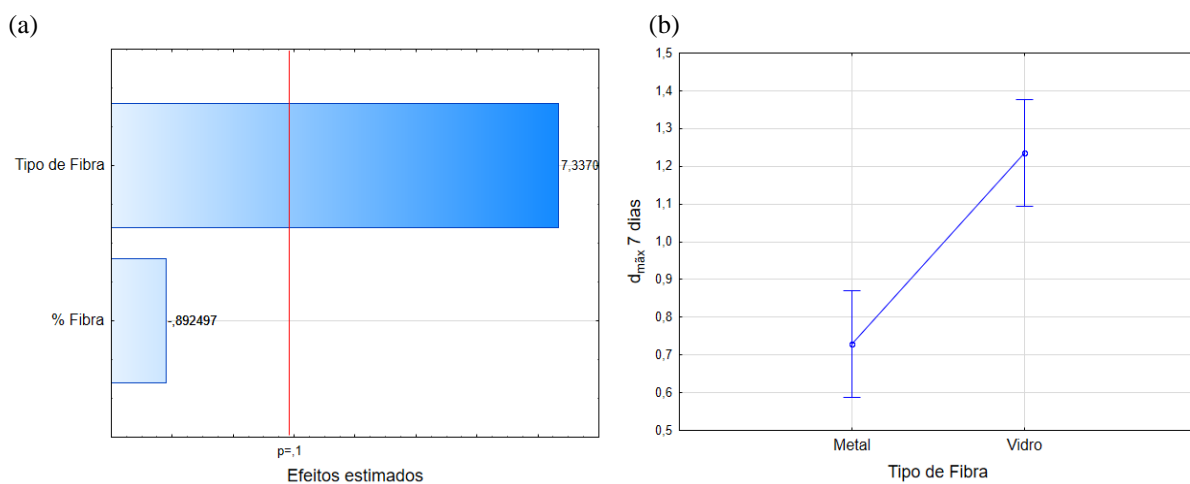


Figura 9. Gráficos referentes ao ensaio de tração na flexão para a deformação na ruptura dos corpos de prova prismáticos aos 7 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

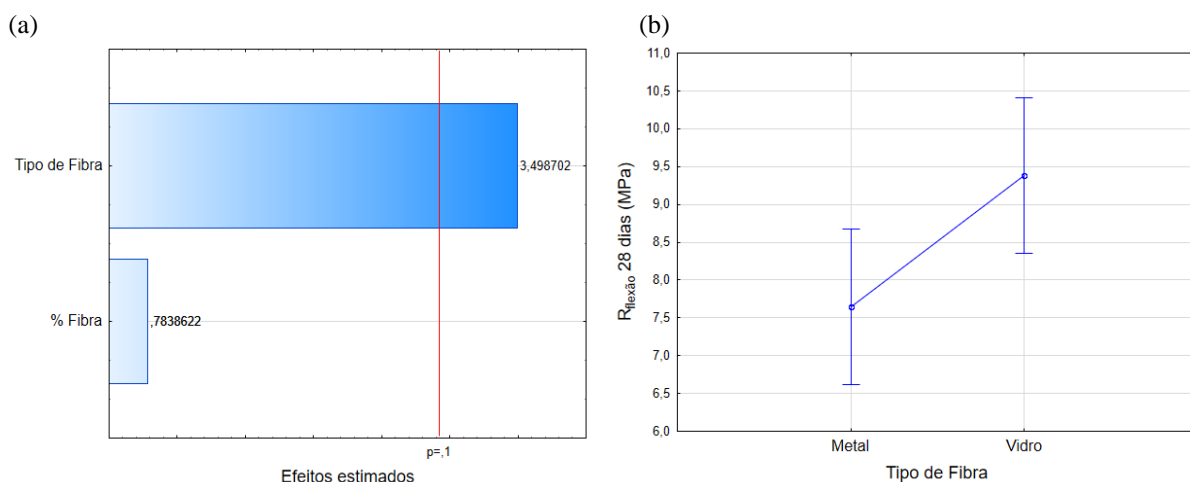


Figura 10. Gráficos referentes ao ensaio de tração na flexão para a resistência de tração na flexão dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

A partir do ensaio de resistência à compressão verificou-se, por meio dos gráficos de Pareto, que o módulo de elasticidade e a deformação na ruptura aos 7 dias indicam que o tipo de fibra ainda é o fator que predomina nas características da mistura, tendo em vista que o nível de confiabilidade para o módulo de elasticidade e para a deformação na ruptura foi de 94% de significância. No entanto, aos 28 dias, tanto para o módulo de elasticidade quanto para a deformação na ruptura os resultados não apontaram significância estatística, ocorrendo apenas interação para a resistência à compressão, com nível de confiabilidade de 83% relacionado ao percentual de fibra, ou seja, o fator mais significativo nas propriedades da mistura, de acordo com as Figuras 11, 12 e 13, que mostram os gráficos do ensaio de compressão para o módulo de elasticidade, deformação na ruptura e resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos aos 7 e 28 dias, sendo que as Figuras 11, 12 e 13 apresentam (a) o diagrama de Pareto e (b) o diagrama de médias.

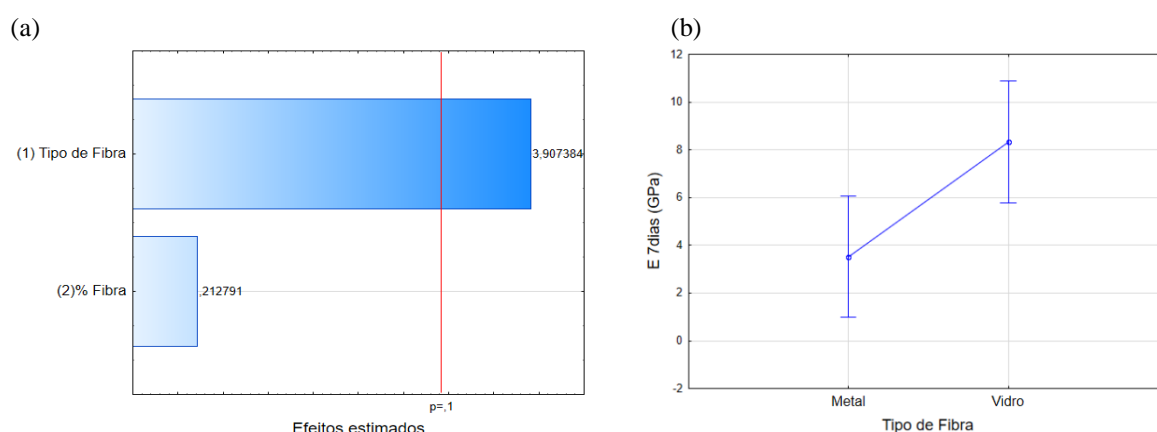


Figura 11. Gráficos referentes ao ensaio de compressão para o módulo de elasticidade dos corpos de prova prismáticos aos 7 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

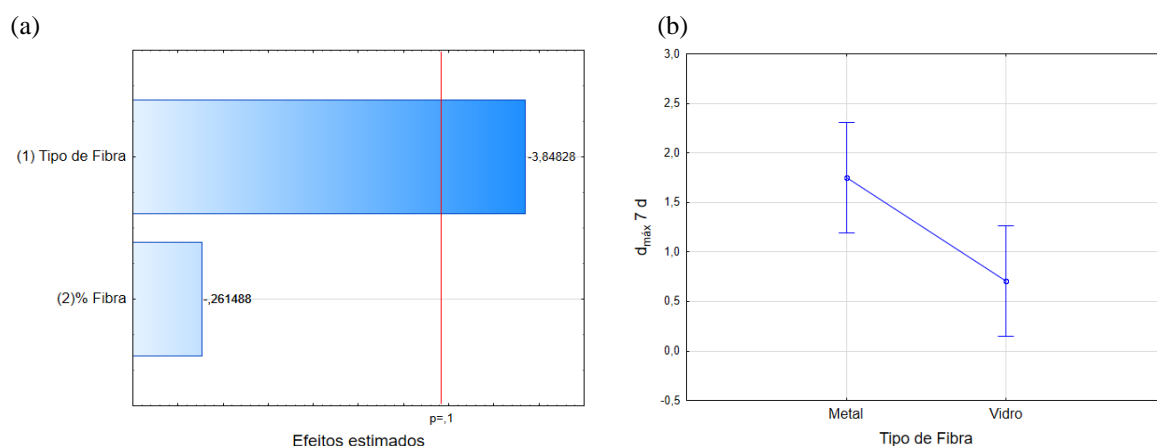


Figura 12. Gráficos referentes ao ensaio de compressão para a deformação dos corpos de prova prismáticos aos 7 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

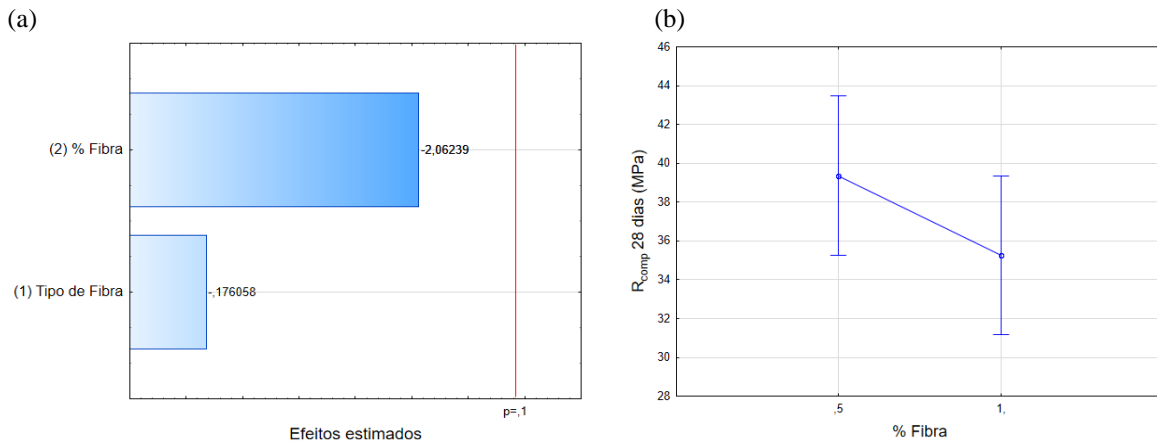


Figura 13. Gráficos referentes ao ensaio de compressão para a resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias: (a) diagrama de Pareto, (b) diagrama de médias.

Uma vez que as fibras aumentam a durabilidade do material, elas também influenciam diretamente nas propriedades do estado fresco, trabalhabilidade e escoamento. Sendo assim, é necessária a adoção de um teor ótimo de adição de fibras para alcançar o desejado aumento das resistências mecânicas e garantir simultaneamente a fluidez. Além disso, o alinhamento das fibras e orientação são muito dependentes da fluidez da mistura, que também determina o risco de segregação e deformabilidade (MENDES (2018) apud STÄHLI (2008)). Ainda, para garantia de tal trabalhabilidade, a quantidade de água deve ser aumentada na mistura, mas o aumento da demanda reduz a resistência da argamassa (GHAFARI, COSTA E JÚLIO, 2014).

f) Microscopia Óptica: Pela análise microscópica dos corpos de prova prismáticos verificou-se a existência de porosidade na microestrutura, que pode ser observada na Figura 14, que representa a visualização dos corpos de prova prismáticos. Xu, Deng e Chi (2017), quando utilizaram microfibras metálicas em uma matriz de cimento Portland, constataram uma alta porosidade na interface de ligação da fibra e matriz, devido à reação da água com o metal, ocasionando oxidação na superfície em algumas regiões da microestrutura.

As Figuras 14, 15 e 16 representam a visualização da existência de poros na microestrutura através do ensaio de microscopia, as Figuras 14, 15 e 16 (a) apresenta a argamassa sem adição, (b) a argamassa com adição de 0,5% de fibras de vidro, (c) a argamassa com adição de 1,0% de fibras de vidro, (d) a argamassa com adição de 0,75% de fibras de vidro e metálica, (e) a argamassa com adição de 0,5% de fibras metálicas e (f) a argamassa com adição de 1,0% de fibras metálicas.

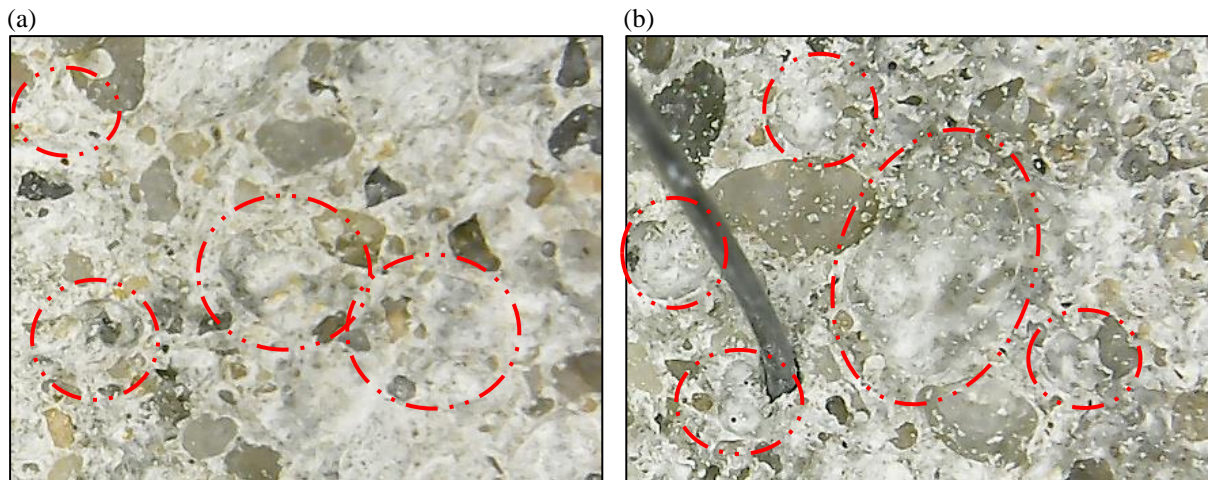


Figura 14. Visualização da existência de poros na microestrutura através do ensaio de microscopia: (a) argamassa sem adição, (b) argamassa com adição de 0,75% de fibras de vidro e metálica

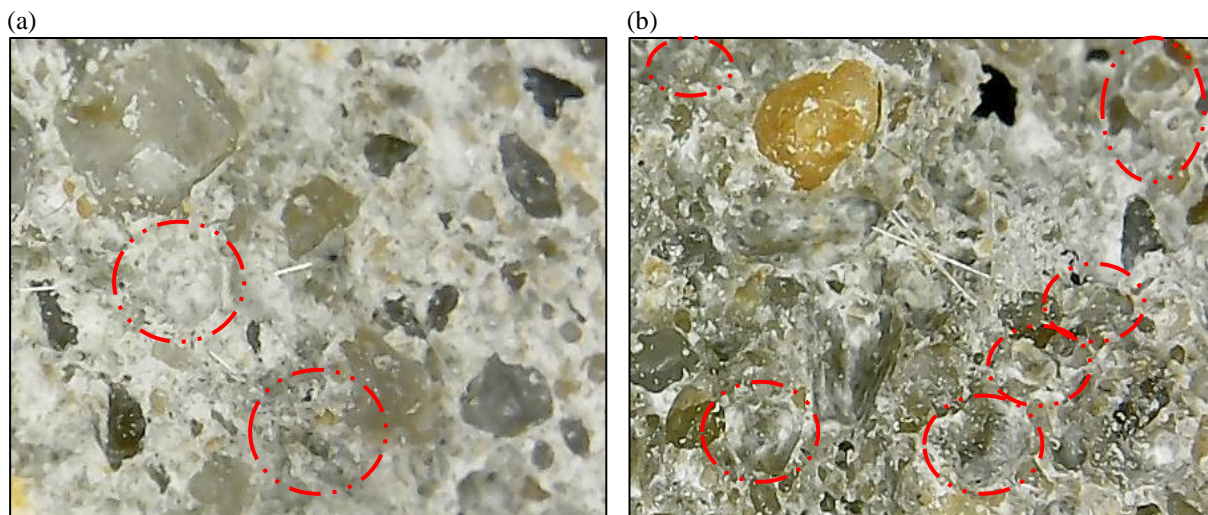


Figura 15. Visualização da existência de poros na microestrutura através do ensaio de microscopia: (a) argamassa com adição de 0,5% de fibras de vidro, (b) argamassa com adição de 1,0% de fibras de vidro

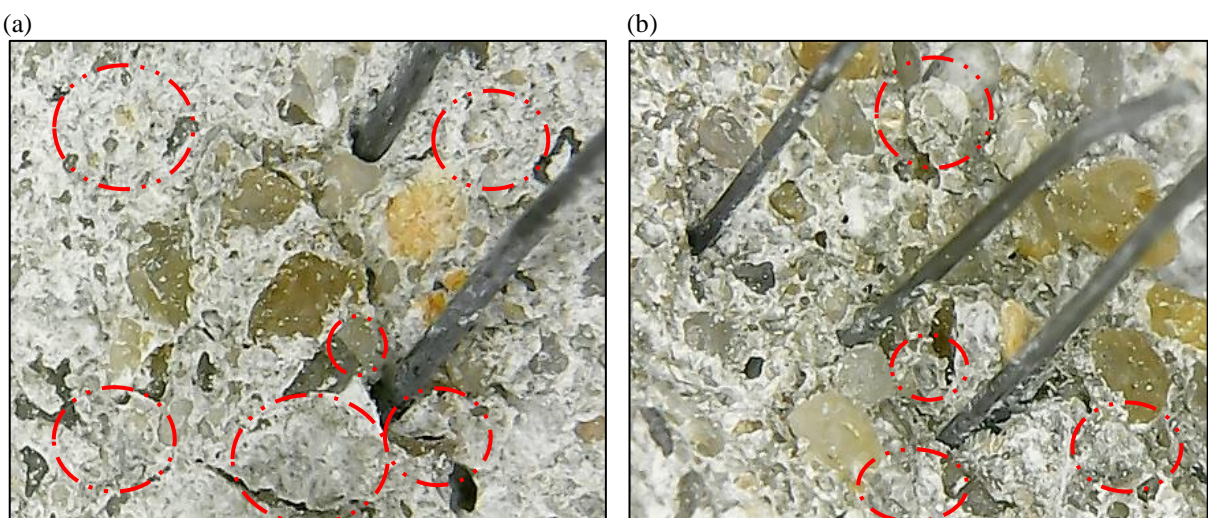


Figura 16. Visualização da existência de poros na microestrutura através do ensaio de microscopia: (a) argamassa com adição de 0,5% de fibras metálicas, (b) argamassa com adição de 1,0% de fibras metálicas

g) Retração: Pela análise dos resultados para retração nos tempos de cura de 7 e 28 dias percebeu-se, pela análise de variância (p -valor $> 0,8$), que não ocorreu diferença entre o efeito do tipo de fibra e do percentual de fibras adicionadas à mistura, tendo em vista o efeito do agregado miúdo e até mesmo os erros existentes durante o manuseio do operador. Ressalta-se que o processo de cura se deu em ambiente livre de água, ou seja, as amostras não foram imersas em água, sendo expostas apenas à umidade do ar. Os resultados estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados do ensaio de retração realizado na argamassa aos 2, 7 e 28 dias

Formulações dos Corpos de Prova	Adição (%)	Retração (%)					
		1	2	3	1*	2*	3*
Argamassa	0,00	0,925	1,000	2,025	0,250	0,250	0,750
Argamassa + F.V ¹ + F.M ²	0,75	1,925	3,900	3,775	-0,200	-0,450	0,175
Argamassa + F.V ¹	0,50	-0,450	0,000	-0,300	-0,700	-1,075	-0,475
Argamassa + F.V ¹	1,00	-2,200	-1,200	0,125	-0,275	-0,400	-0,350
Argamassa + F.M ²	0,50	-0,250	0,550	-0,475	-0,025	-0,400	-0,475
Argamassa + F.M ²	1,00	0,000	-0,080	-3,075	-0,925	-0,250	-0,200

Conclusões

No presente trabalho realizou-se um estudo do efeito das fibras de vidro e metálica nas propriedades mecânicas em pastas de cimento e argamassas.

A partir da análise dos resultados, pode-se observar que na composição confeccionada com pasta de cimento e adição de diferentes teores de fibras de vidro e metálica obteve-se desempenho mecânico satisfatório, visto que as fibras de vidro apresentam melhor desempenho em comparação com a pasta de cimento sem adições. Além disso, as fibras metálicas apresentam melhores resultados em comparação com a pasta de cimento sem adições e com adições de fibras de vidro, em função do aumento no módulo de elasticidade e na resistência à compressão.

Os resultados para as misturas elaboradas em argamassa acrescidas com diferentes teores de fibras de vidro e metálica não apresentaram diferenças significativas em relação à argamassa pura. Ressalta-se que as fibras de vidro apresentaram melhor desempenho à tração na flexão em comparação com as demais misturas, tendo em vista que ocorreu um aumento de 38,1% com adição de 0,5% de fibras de vidro aos 7 dias e um ganho equivalente a 14,3% com adição de 1,0% de fibras de vidro aos 28 dias. Por outro lado, ocorreu uma redução de 9,3% com adição de 0,5% de fibras de vidro aos 7 dias e 22,4% com adição de 1,0% de fibras de

vidro aos 28 dias para a resistência à compressão dos corpos de prova com adição, se comparados à argamassa sem adições.

Portanto, para o caso em estudo, e com base em pesquisas e análises, conclui-se que o agregado miúdo influencia nas propriedades da microestrutura, visto que os resultados para os experimentos confeccionados em pasta de cimento foram diversos daqueles. Ainda, deve ser considerado que as fibras influenciam na incorporação de ar à mistura e que este não é totalmente expulso, o que também gera zonas porosas de menor resistência mecânica.

A adição das fibras promove a redução de trabalhabilidade do material, e isso também é um fator a ser levado em consideração, porquanto para manter a mesma trabalhabilidade que havia sem as fibras, deve ser adicionada mais água à mistura, o que deixa a argamassa mais porosa e conseqüentemente menos resistente.

Conforme os resultados apresentados, as fibras não melhoram significativamente o comportamento mecânico dos elementos, no entanto a literatura e outros estudos realizados elencam que são recomendadas para evitar a retração hidráulica, combater a fissuração, evitar a segregação e/ou aumentar a resistência à abrasão. Um exemplo disso está relacionado à fissuração. Onghero (2009), quando verificou o efeito do uso de microfibras de vidro na retração livre de concretos de alto desempenho, concluiu que a incorporação de fibra auxilia na diminuição da deformação. Quanto maior a área exposta às intempéries maior será a influência na retração hidráulica devido à perda de água durante o processo de cura da argamassa. Por isso, nestas situações, observa-se um melhor desempenho quando utilizado junto as fibras.

Referências bibliográficas

_____. **NBR 12142: Concreto: Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Especificações.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 8522: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 9778: Argamassa e Concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2001. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum.** Rio de Janeiro, 1991.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

CAPORRINO, C. F. Patologias das anomalias em alvenarias e revestimentos argamassados. **Revista Técnica: Espaço restrito**, São Paulo, p.38-43, maio 2016.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 248p. São Paulo, 2011.

GHAFFARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers. **Construction and Building Materials**. v. 66, p. 375-383, 2014.

LEVY NETO, Flávio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

MANO, E.B. – **Introdução a Polímeros.** Ed. Edgard Blücher Ltda. 2005.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia.** São Paulo: Artliber, 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 2008.

MENDES, M. H. **Comportamento mecânico de compósitos contendo cimento alcali-ativado e microfibras metálicas.** 2018. 29p. Mestrado em Engenharia, Univ. Fed. De Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Tradução Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

ONGHERO, L.; REPETTE, W. L.; GÓMEZ, L. A. **O efeito do uso de microfibras de vidro na retração livre de concretos de alto desempenho.** Florianópolis: IBRACON, 2009.

ONUKEI, F. A.; GASPARETTO, A. **Comparativo das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido com adição de fibras de aço e de polipropileno** (2013) 22p-23p.

SILVA, Narciso G.; CAMPITELI, Vicente C. **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento.** Paraná: 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2006.

SPECK, Jaison Araujo. **Análise do desempenho de placas cimentícias através da adição de fibra e telas, visando à redução de deformações térmicas e patologias.** 2014. 29p. Mestrado em Engenharia, Univ. Fed. Do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TOMAZ, E. Argamassas de revestimentos. **Revista Técnica: Canteiro Mecanizado,** São Paulo, 2015, p.10, out. 2015.

XU, L.; DENG, F.; CHI, Y. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste. **Construction and Building Materials.** v. 145, p. 619-638, 2017.