

Análise das propriedades físico-mecânicas de argamassas de revestimento com a incorporação de fibras de polipropileno e nylon

Analysis of the physical-mechanical properties of coating mortars with the incorporation of polypropylene and nylon fibers

Felipe Sachet Colombo¹, Elaine Guglielmi Pavei Antunes¹,
Leidy Johana Jaramillo², Jorge Henrique Piva¹, Augusto Wanderlind¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, CEP: 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, CEP: 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

e-mail: felipe_sachetcolombo@hotmail.com, elainegpa@unesc.net, ljn423@gmail.com, jhpiva@gmail.com, acw@unesc.net

RESUMO

É cada vez mais frequente a busca de novas misturas e materiais que venham a melhorar as propriedades das argamassas de revestimento e conseqüentemente seu desempenho em serviço, assim sendo, as fibras sintéticas surgem como uma possibilidade de um novo material a ser utilizado na composição das misturas. O estudo tem por objetivo a análise do comportamento das argamassas de revestimento com a incorporação de diferentes teores de fibras de polipropileno e de nylon. O programa experimental foi baseado na incorporação de 500, 900 e 1300 g/m³ de fibras de polipropileno e nylon em uma argamassa de referência com traço de 1:0,5:5 (cimento:cal:areia). Como parâmetro, foi fixada a quantidade de água utilizada em todas as argamassas produzidas, sendo acrescentado um aditivo plastificante quando necessário. Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar a influência da incorporação de diferentes teores de fibras de polipropileno e de nylon nas características físicas e propriedades mecânicas de argamassas em seu estado endurecido. Para tal, foram realizadas as análises de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, dinâmico e estático, absorção de água por capilaridade e análise das características através de microscopia eletrônica por varredura. Os resultados indicam que as argamassas com incorporação de fibras de nylon apresentaram maiores valores de resistência à tração na flexão, compressão axial e menores valores de absorção de água por capilaridade. A análise das imagens obtidas pela microscopia das argamassas demonstrou que as argamassas com inserção de polipropileno apresentaram maior porosidade que as argamassas com adição de nylon. As argamassas com incorporação de fibras de polipropileno apresentaram menores valores de módulo de elasticidade dinâmico e estático, o que indica que estas argamassas possuem uma boa capacidade de sofrer deformações.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento, Fibras sintéticas, Polipropileno, Nylon, Desempenho.

ABSTRACT

The search for new mixtures and materials that will improve the properties of coating mortars and consequently their performance in service is becoming more and more frequent, thus synthetic fibres appear as a possibility for a new material to be used in the composition of mixtures. The study aims at analyzing the behavior of coating mortars with the incorporation of different contents of polypropylene and nylon fibers. The experimental program was based on the incorporation of 500, 900 and 1300 g/m³ of polypropylene and nylon fibers in a reference mortar with a trace of 1:0.5:5 (cement:lime:sand). As a parameter, the amount of water used in all mortars produced was fixed and a plasticizer additive was added when necessary. Thus, this

work aimed to analyze the influence of the incorporation of different contents of polypropylene and nylon fibers on the physical characteristics and mechanical properties of mortars in their hardened state. For this purpose, analyses of tensile strength in bending, compression strength, modulus of elasticity, dynamic and static, capillary water absorption and analysis of characteristics by scanning electron microscopy were performed. The results indicate that the mortars with incorporation of nylon fibers presented higher values of tensile strength in bending, axial compression and lower values of water absorption by capillarity. The analysis of the images obtained by the microscopy of the mortars showed that the mortars with polypropylene insertion showed greater porosity than the mortars with nylon addition. The mortars incorporating polypropylene fibers showed lower values of dynamic and static modulus of elasticity, which indicates that these mortars have a good capacity to suffer deformation.

Keywords: Coating Mortar, Synthetic Fibers, Polypropylene, Nylon, Performance.

1. INTRODUÇÃO

Com o uso difundido na construção civil, as argamassas são definidas como uma “mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria” [1]. As argamassas são divididas em dois grandes grupos, que são, as argamassas de assentamento e as argamassas de revestimento. As argamassas de revestimento são aplicadas visando o acabamento das edificações, contribuindo assim, com o aspecto estético e de valorização do bem [2]. Segundo os autores [3], a principal função das argamassas de revestimento, além do aspecto estético, é a proteção dos elementos estruturais e de vedação. Conforme WE-SOŁOWSKA [4], as argamassas auxiliam os elementos de vedação nas funções de estanqueidade à água e aos gases, isolamento térmico/acústico e regularização da superfície dos elementos de vedação. Desta forma, as argamassas de revestimento exercem um importante papel em uma edificação, contribuindo substancialmente para a durabilidade e qualidade da construção [5].

O revestimento é a camada mais exposta à ação das condições de exposição ambiental, como, por exemplo, a incidência solar e a água da chuva [6]. Neste sentido as diversas solicitações (físicas, de uso, etc.) devem ser atendidas pelo conjunto que compõe o sistema de revestimento [7]. Para tal, as argamassas de revestimento devem ter uma série de propriedades específicas, tanto em estado fresco, quanto no estado endurecido, para que possam atender a todas as funções necessárias.

De acordo com os autores [8], o desempenho das argamassas às vezes é afetado por manifestações patológicas. Os problemas patológicos mais frequentes são: a formação de manchas de umidade, o desprendimento da argamassa de revestimento e a formação de trincas e fissuras [9, 10]. Segundo SAHADE [9], a formação de trincas pode ser considerada uma das manifestações patológicas mais críticas, pois além de destacar o problema na argamassa de revestimento, pode sinalizar o comprometimento da segurança estrutural e o desempenho da vedação em relação à estanqueidade, durabilidade e isolamento térmico/acústico.

Com o intuito de reduzir ou evitar tais manifestações patológicas, as argamassas vêm sendo mais estudadas, visando a busca de melhorias em suas características físicas e propriedades mecânicas. Um dos pontos para obter-se tais melhorias é a escolha e/ou inserção de novos materiais na produção das argamassas de revestimento. O objetivo dessas adições é aprimorar as propriedades mecânicas tradicionais e, assim, funcionar como um reforço para evitar trincas [11- 14].

A incorporação de fibras naturais e sintéticas em argamassas é um exemplo de um novo material que vem sendo empregado na busca pela maior qualidade e desempenho destas. Essas fibras são geralmente produzidas a partir de vidro, aço e outros polímeros orgânicos [15]. Diferentes fibras sintéticas, como, polipropileno (PP), poliamida (PA), nylon e vidro têm sido utilizadas para melhorar o desempenho de argamassas [16-18].

O efeito das fibras sintéticas adicionadas às argamassas de revestimento é dificultar a propagação de fissuras e trincas, as fibras acabam funcionando como uma espécie de barreira nesta propagação, pois para que a fissura se propague é necessário o arrancamento ou ruptura da fibra, ou ainda que a fissura contorne a fibra [6]. As fibras sintéticas também podem sofrer deformações, aumentar a resistência e, assim, permitir melhorar o desempenho da argamassa de revestimento [19, 20]. As fibras de polipropileno e nylon são algumas das fibras sintéticas utilizadas para melhorar o desempenho das argamassas de revestimento [17, 21, 22], classificadas como fibras do tipo polimérico e que possuem um baixo módulo de elasticidade. Segundo [8, 23], não há normalização do processo de produção de argamassas com incorporação de fibras sintéticas. Dessa forma, é necessário avaliar as propriedades da argamassa de revestimento que são influenciadas por essa incorporação, além do conteúdo que deve ser adicionado à argamassa, para que a incorporação possa

resultar na redução de manifestações patológicas e, conseqüentemente, na melhoria das propriedades. Cabe salientar também a importância de estudos comparativos, em uma mesma pesquisa, que foquem em composições de misturas com adições de fibras distintas, neste caso fibras de polipropileno e nylon, com mesmas proporções de adição, traços e componentes utilizados na mistura.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar e comparar a influência da incorporação de diferentes teores de fibras de polipropileno e de nylon nas características físicas e propriedades mecânicas de argamassas em seu estado endurecido. Para tal, foram realizadas as análises de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, dinâmico e estático, absorção de água por capilaridade e análise das características das composições através de microscopia eletrônica por varredura (MEV).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a confecção das argamassas de revestimento utilizou-se areia média lavada com módulo de finura de 2,37 e diâmetro máximo de 2,4 mm, conforme a NBR NM 248 [24], e, massa específica de 2,36 g/cm³, valor determinado de acordo com a NBR NM 52 [25]. O cimento utilizado foi o cimento Portland CP II - Z - 32, segundo classificação da NBR 11578 [26], com baixo teor de adição de Pozolana, possui massa específica de 2,95 g/cm³. A cal utilizada foi a cal hidratada CH III, conforme a NBR 7175 [27].

As fibras sintéticas, incorporadas nas argamassas de revestimento em estudo são as de polipropileno e nylon, conforme ilustra a Figura 1.

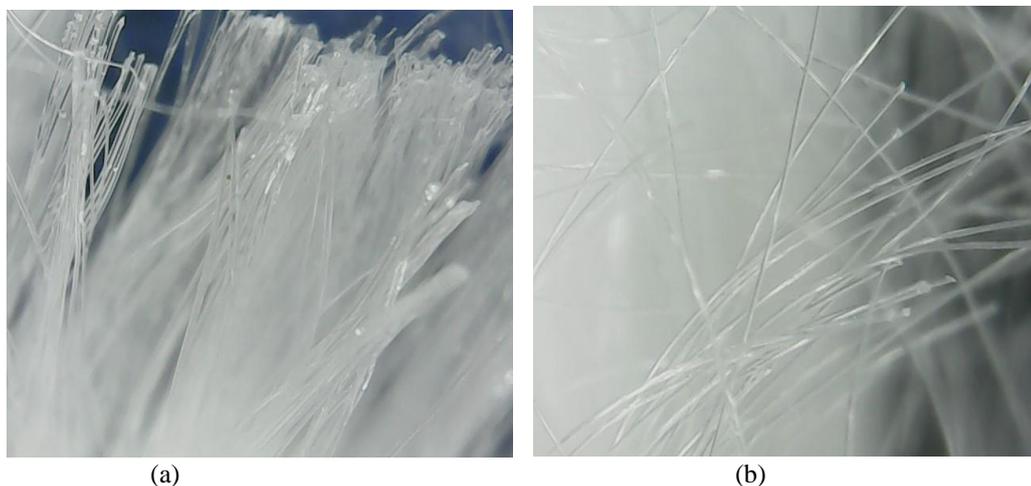


Figura 1: Fibras de polipropileno (a), fibras de nylon (b)

As fibras de polipropileno apresentam módulo de elasticidade de 3 GPa e massa específica de 0,91 g/cm³. As fibras de nylon têm um módulo de elasticidade de 4,76 GPa e massa específica de 1,14 g/cm³, de acordo com as especificações do fabricante. As fibras de polipropileno utilizadas neste trabalho são compostas de filamentos finos, com comprimento de 12 mm e 18 µm de diâmetro, cuja seção transversal é circular, de acordo com as especificações do fabricante. As fibras de nylon usadas são compostas de nylon 66 e vários filamentos, essas fibras têm um comprimento de 13 mm e 18 µm de diâmetro e uma seção trilobal, conforme as especificações do fabricante.

As fibras foram caracterizadas pelo teste de adsorção multimolecular (BET, Quantachrome Nova Station A), para determinar a área superficial específica e o volume de poros. Observou-se que as fibras de polipropileno possuem uma área superficial específica de 0,049 m²/g e 5,905x10⁻⁵ cm³/g de volume total de poros. Enquanto isso, as fibras de nylon têm uma área de superfície específica de 0,116 m²/g e 3,034x10⁻⁴ cm³/g de volume total de poros.

Para a realização dos ensaios laboratoriais, foram produzidas sete composições de argamassas de revestimento, executadas conforme a NBR 7200 [28], sendo uma de referência, codificada como AF0 e as demais com incorporação de diferentes teores de fibras de polipropileno e nylon. A Tabela 1 resume as condições de cada argamassa e a nomenclatura. A proporção de mistura de argamassa de 1:0,5:5 (cimento:cal:areia) foi utilizada nesta pesquisa e o teor de incorporação de fibras de polipropileno e nylon nas argamassas produzidas foi de 500, 900 e 1300 g/m³, seguindo como referência os trabalhos já realizados

neste âmbito [8, 23, 29, 30].

Tabela 1: Caracterização das argamassas produzidas.

CODIFICAÇÃO	TRAÇO (CIMENTO:CAL:AREIA)	INCORPORAÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS		
		FIBRA	COMPRIMENTO (mm)	TEOR (g/m ³)
AF0	1:0,5:5	Sem fibras	-	0
AFP500	1:0,5:5	Polipropileno	12	500
AFP900	1:0,5:5	Polipropileno	12	900
AFP1300	1:0,5:5	Polipropileno	12	1300
AFN500	1:0,5:5	Nylon	13	500
AFN900	1:0,5:5	Nylon	13	900
AFN1300	1:0,5:5	Nylon	13	1300

A produção das composições de argamassa com adição de fibras deu-se da seguinte maneira: primeiramente, foi inserido o cimento e a cal em um saco plástico e agitou-se, durante 30 segundos, esses dois componentes no saco lacrado, posteriormente foram acrescentadas as fibras sintéticas, polipropileno ou nylon, neste mesmo saco, de forma gradual e, após, realizou-se nova agitação. É importante relatar que antes de serem adicionadas as fibras foram desembaraçadas com o objetivo de eliminar possíveis entrelaços entre elas e, assim, facilitar sua dispersão. Para melhor homogeneização dos componentes, utilizou-se uma argamassadeira. A ordem de inserção dos componentes foi, inicialmente, a água de amassamento, seguida pela mistura seca de cimento, cal e fibras, previamente agitadas no saco plástico, este último lentamente.

Após o preparo das misturas das argamassas realizou-se a análise do índice de consistência, segundo a NBR 13276 [32] e as moldagens dos corpos de prova para análises no estado endurecido. Cabe salientar, que esta pesquisa tem como intuito principal, como já mencionado, analisar a influência das adições de fibras de polipropileno e de nylon nas características físicas e propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido e, por tal, fez-se o ensaio do índice de consistência no estado fresco para definição da relação água/aglomerante das composições, tendo em vista que a relação foi estabelecida de acordo com a NBR 16541 [33], onde a consistência ideal indicada é de 260 ± 5 mm.

Após, a definição da relação água/aglomerante do traço de referência fez-se o uso de aditivo plastificante, quando necessário e na quantidade necessária, nos traços com fibras para manter-se o índice de consistência em 260 ± 5 mm. Ressalta-se ainda que a dosagem de aditivo utilizada não seguiu as recomendações do fabricante, pois a quantidade adicionada, para as argamassas que necessitaram, ficou abaixo da dosagem indicada pelo fabricante. Desta forma, a determinação da quantidade de aditivo em cada tipo de argamassa produzida foi realizada de forma exploratória, ou seja, foram realizados testes com várias dosagens de aditivo até que se chegasse à consistência adequada.

As argamassas produzidas para a determinação dos índices de consistência foram utilizadas na moldagem dos corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm para realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, segundo a NBR 13279 [34]. Neste trabalho, foi adotada a idade de 28 dias para análise. Para a realização do ensaio de tração na flexão, utilizou-se uma prensa hidráulica EMIC DL10000, já para o ensaio de compressão axial utilizou-se uma prensa hidráulica EMIC PC200CS. O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade foi realizado segundo a NBR 15259 [35] e o ensaio de densidade aparente de acordo com a NBR 13280 [36]. A verificação do módulo de elasticidade dinâmico e estático foi determinado conforme prescreve as normas NBR 15630 [37] e NBR 8522 [38], respectivamente. Para determinação do módulo estático a norma foi adaptada para argamassas. O equipamento utilizado para a realização deste ensaio foi uma prensa hidráulica da marca EMIC PC200CS, juntamente com um extensômetro elétrico. Os ensaios de compressão axial, tração na flexão, absorção de água por capilaridade e módulo de elasticidade foram analisados por meio do método de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de comparação de médias (Teste de Tukey).

Com objetivo de identificar e fazer uma análise dos compostos e produtos gerados nas argamassas com a incorporação de fibras de polipropileno e nylon, foi realizado o ensaio com o microscópio eletrônico de varredura ZEISS, modelo MA10. As amostras para a realização deste ensaio foram retiradas de corpos de

prova produzidos especificamente para este, sendo posteriormente cortadas com o auxílio de um equipamento de precisão (ISOMET 1000), após o corte de precisão permaneceram em estufa a 80°C, até constância de massa. A análise do MEV foi feita com as amostras observadas em ambiente de vácuo variável, sendo este ensaio realizado no laboratório de cerâmica técnica do IDT/UNESC.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados e discutidos com intuito de analisar a influência da incorporação de fibras sintéticas nas argamassas com ênfase na análise comparativa entre as fibras de polipropileno e nylon, em um mesmo estudo, isto é, com mesmas proporções de adição, traços e componentes utilizados nas misturas.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio do índice de consistência. Através da realização do ensaio foi encontrada a relação de água/aglomerante adequada ao traço escolhido como referência.

Tabela2: Determinação do índice de consistência e relação água/aglomerante.

ARGAMASSAS	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE	CONSISTÊNCIA (MM)	ADITIVO
AF0	0,67	262,32	-
AFP500	0,67	261,60	0,12%
AFP900	0,67	262,80	0,21%
AFP1300	0,67	262,00	0,28%
AFN500	0,67	262,00	0,00%
AFN900	0,67	261,60	0,00%
AFN1300	0,67	260,00	0,00%

A relação água/aglomerante foi mantida constante, pois atende às condições normativas. Pôde-se observar, com a introdução das fibras nas argamassa, que o índice de consistência é reduzido, especificamente com as fibras de polipropileno, por esse motivo foi necessário o uso de aditivo plastificante para garantir o índice de consistência de acordo com o padrão, a porcentagem de aditivo aumentava a medida que a porcentagem de adição de fibras de polipropileno também aumentava. No entanto, na argamassa com fibras de nylon, o índice de consistência não diminuiu e os valores permanecem dentro dos 260 ± 5 mm. Segundo SILVA [30], as fibras de polipropileno são difíceis de dispersar na matriz de argamassa e podem causar falhas na mistura, caracterizadas por um agrupamento de fibras, como aglomerado. As propriedades reológicas da argamassa fresca são importantes para as condições de processamento e outros pesquisadores mostraram que as pastas e argamassas de cimento reforçado com fibra têm uma viscosidade maior do que as pastas normais de cimento e argamassas [39- 43].

De acordo com a microscopia eletrônica de varredura (MEV), é possível verificar este comportamento das fibras de polipropileno, da mesma forma que é possível verificar uma melhor dispersão das fibras de nylon na mistura. A dispersão inadequada das fibras de polipropileno e a formação dos novelos aprisiona parte da água da mistura e explicaria a diminuição da consistência das argamassas com incorporação deste tipo de fibra [31], diferentemente do que ocorre em argamassas com incorporação de fibras de nylon, que apresentam menor diminuição da consistência.

A Figura 2 mostra a micrografia da argamassa sem fibras e, com base na imagem, pode-se visualizar que a argamassa é homogênea, sem apresentar porosidade.

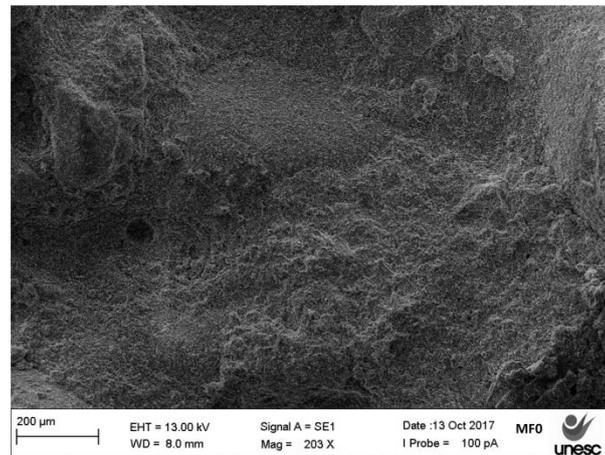


Figura 2: Micrografia MEV de AF0 após 28 dias de cura. Ampliação de 200x.

Em contraste, a Figura 3 apresenta as imagens obtidas através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), das amostras da série AFP (argamassas com incorporação de fibras de polipropileno) e da série AFN (argamassas com incorporação de fibras nylon). Os aumentos realizados foram de 60 e 200 vezes.

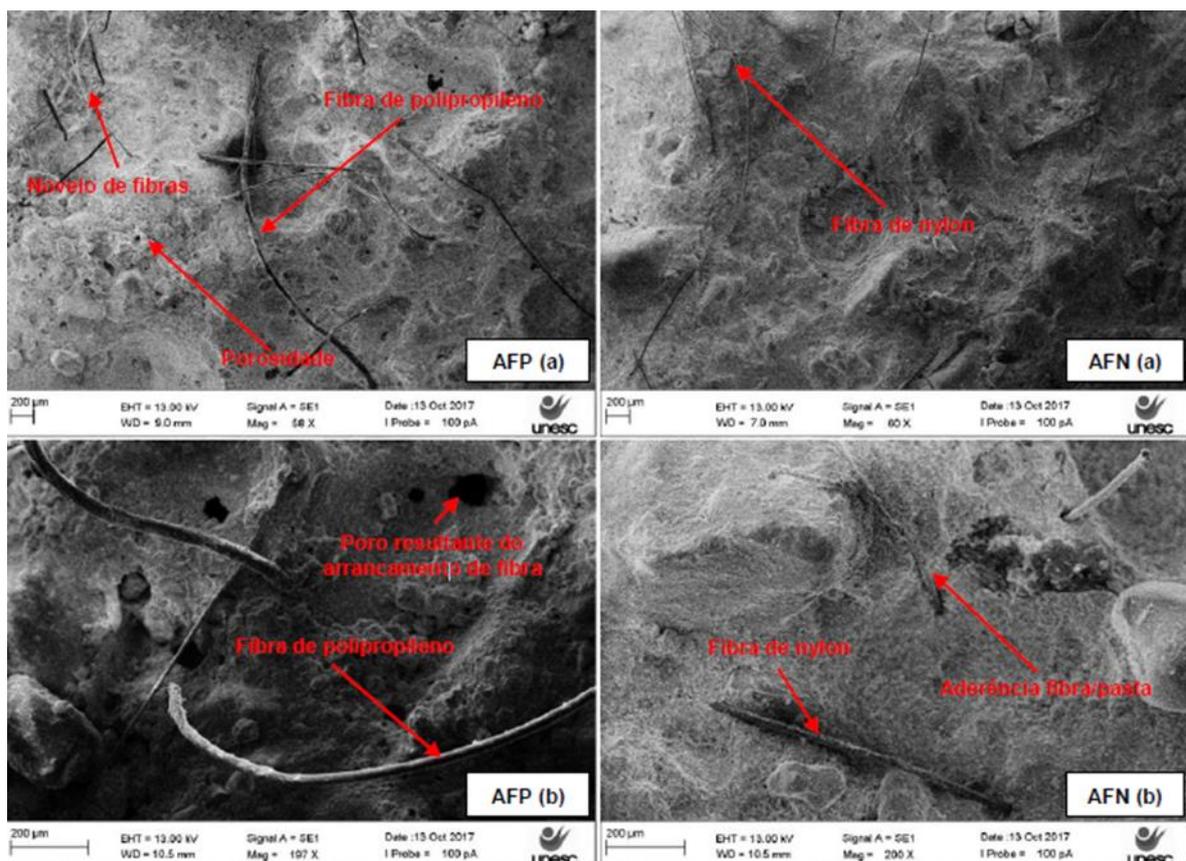


Figura 3: MEV das amostras das séries AFP e AFN

Observa-se que as amostras da série AFP o tendem a formar grupos ou aglomerados de fibras, o que significa que as fibras de polipropileno não têm uma boa dispersão no interior da mistura. Isso está de acordo com os resultados das pesquisas de CENTOFANTE e DAGOSTINI [31] e explica a diminuição da

trabalhabilidade, porque a dificuldade de dispersão e formação de aglomerados de fibras de polipropileno faz com que uma parte da mistura de água fique aprisionada no interior destas e o índice de consistência da argamassa com este tipo de fibras são reduzidos. No entanto, na argamassa com fibras de nylon apresentada na série AFN, observa-se uma boa dispersão das fibras e não foram observados aglomerados de fibras, o que é coerente com a boa trabalhabilidade dessas argamassas. Além disso, pode-se ver também nas micrografias que argamassas com fibras de polipropileno apresentaram porosidade em comparação com a argamassa com fibras de nylon, talvez seja uma consequência da remoção da fibra de polipropileno quando a amostra foi preparada para o teste. O que significa que a aderência desse tipo de fibra não é muito boa em comparação com a aderência das fibras de nylon que foi realmente boa e mostrou um melhor ajuste à mistura de argamassa. De acordo com uma pesquisa realizada por ASKARINEJAD e RAHBAR [44], a aderência das fibras às pastas de cimento é uma função da polaridade dos grupos funcionais destas, e que a energia da adesão entre as fibras e o cimento aumentam com a polaridade destas, é dizer, enquanto maior polaridade apresentar as fibras, maior será a adesão destas ao cimento. As fibras de nylon são fibras que são consideradas polares devido aos grupos funcionais amido, já as fibras de polipropileno têm grupos funcionais apolares (não polar). Portanto, os resultados observados nas imagens são coerentes devido às características químicas superficiais que apresentam as fibras.

A resistência à tração na flexão das argamassas é apresentada na Figura 4. Observa-se que, com a incorporação de fibras de nylon na argamassa, a resistência à tração à flexão aumenta, enquanto a incorporação de fibras de polipropileno diminui essa propriedade.

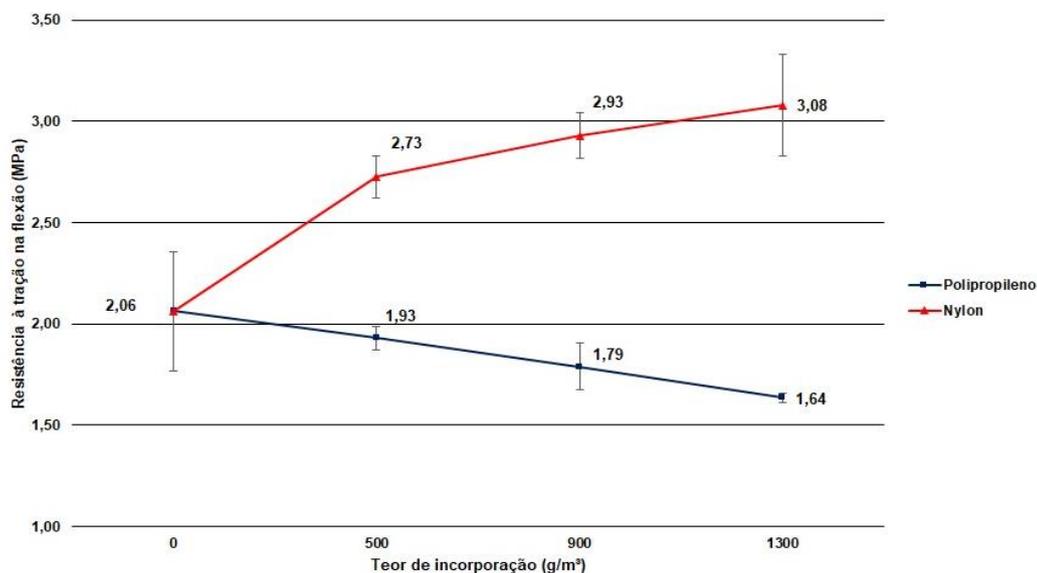


Figura 4: Resultados da ruptura à tração na flexão.

Entretanto, a análise estatística demonstrou que não há variância significativa entre os valores de resistência à tração na flexão para as argamassas com incorporação de fibras de polipropileno, com relação à argamassa de referência. No entanto, as argamassas com incorporação de fibras de nylon apresentaram variância nos resultados obtidos, em comparação com a argamassa de referência. Segundo a análise, a amostra AFN1300 foi a que apresentou o resultado mais significativo, com valor aproximadamente 49% maior que o resultado da amostra de referência (AF0), este valor foi seguido pela amostra AFN900 com um valor aproximado 42% maior e pela amostra AFN500 com um valor aproximado 32% maior. Essa variação na resistência à tração à flexão também pode ser explicada pelas características da fibra e pela interação com a mistura, porque as fibras de nylon mostraram melhor aderência à argamassa e, conseqüentemente, menor porosidade em comparação com a argamassa com fibras de polipropileno. Uma característica das fibras de nylon que podem ajudar a ter uma melhor aderência é a área superficial maior que a área superficial das fibras de polipropileno, o que significa que as fibras de nylon podem se encaixar melhor com o cimento e os agregados e, como resultado, é obtida uma argamassa com uma menor porosidade. A porosidade tem grande influência no comportamento mecânico das argamassas, pois os poros dos materiais sólidos são concentradores de tensões quando o corpo está sob carga, tornando a porosidade um fator limitante. Outro

fator importante é o módulo elástico das fibras utilizadas; o módulo elástico da fibra de nylon é maior que a fibra de polipropileno. SILVA [30], explicou que se o módulo elástico da fibra for maior, a força que o elemento suporte sob carga será maior, o que é demonstrado com os resultados obtidos. Os resultados com fibras de polipropileno estão de acordo com as tendências encontradas por outros pesquisadores [8, 29, 30], no entanto, a porcentagem de fibras das adições usadas era diferente. Com as fibras de nylon, os resultados estão de acordo com o aumento da resistência à tração à flexão encontrada pela pesquisa de CORTEZ [23], SPADEA *et al.* [42] e HANIF *et al.* [45].

A Figura 5 demonstra os resultados da resistência à compressão axial das argamassas. Verifica-se conforme os resultados médios obtidos, que a incorporação de fibras de nylon proporcionou um aumento na resistência à compressão axial e a incorporação de fibras de polipropileno proporcionou uma diminuição deste valor. Porém, observa-se que o aumento do teor de incorporação das fibras não representa um aumento ou diminuição dos valores de resistência à compressão axial. De acordo com a análise estatística realizada, não há variância significativa entre os resultados obtidos pelas argamassas com incorporação de fibras de polipropileno entre si e as argamassas com incorporação de fibras de nylon entre si.

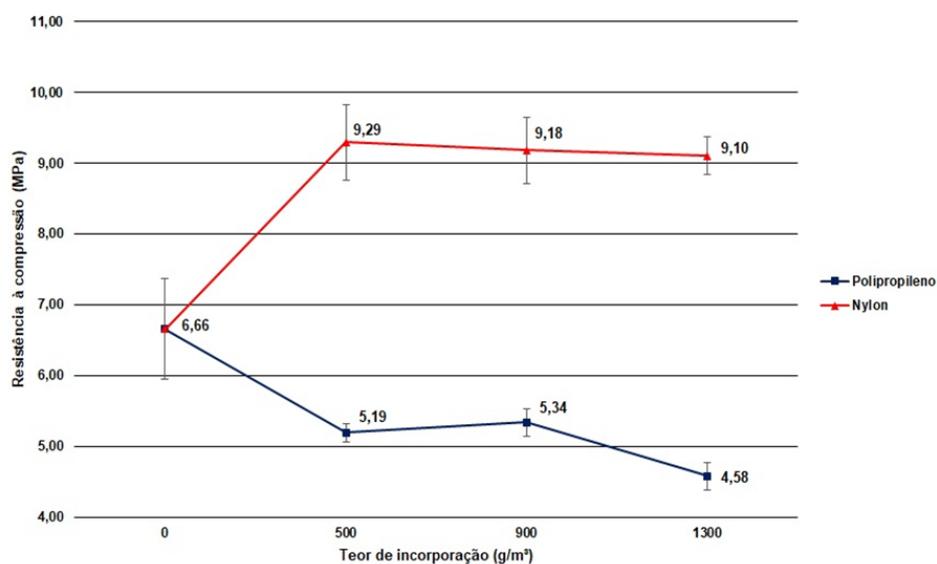


Figura 5: Resultados da ruptura à compressão axial

No entanto, ainda de acordo com a análise estatística, as argamassas com incorporação de ambas as fibras apresentaram variância significativa com relação ao resultado obtido pela argamassa de referência (AF0). As amostras AFN500 e AFP1300 foram as que apresentaram os resultados mais significativos, a primeira com o valor de resistência à compressão axial aproximadamente 40% maior que o resultado da amostra de referência (AF0). Já, a segunda, AFP1300, com o valor de resistência à compressão axial aproximadamente 31% menor que o resultado da amostra de referência (AF0). Assim como nos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão, também se acredita que os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial estão diretamente ligados às características e às propriedades físicas das fibras utilizadas. Em comparação, observa-se que estes resultados são similares aos obtidos pelos autores [2, 8, 29], ou seja, ocorre uma diminuição da resistência à compressão axial com a incorporação. Os resultados obtidos pelas argamassas com incorporação de fibras de nylon seguem a tendência dos obtidos na literatura [23], ou seja, ocorre um aumento da resistência à compressão axial com a incorporação de fibras de nylon. A diminuição da resistência à compressão axial das argamassas com incorporação de fibras de polipropileno ocorre devido ao aumento de vazios provocados pelas fibras [29]. Mas, isto não ocorre para as fibras de nylon, muito possivelmente devido a sua seção trilobal e sua área superficial maior, que consegue preencher melhor esses vazios existentes e assim, proporcionam um aumento na resistência à compressão axial, conforme abordado no item anterior.

Na Figura 6 são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade. As argamassas com fibras de polipropileno apresentaram, em geral, maior valor médio de absorção de água por capilaridade em relação às argamassas com incorporação de fibras de nylon, aos 10 e aos 90 minutos de teste

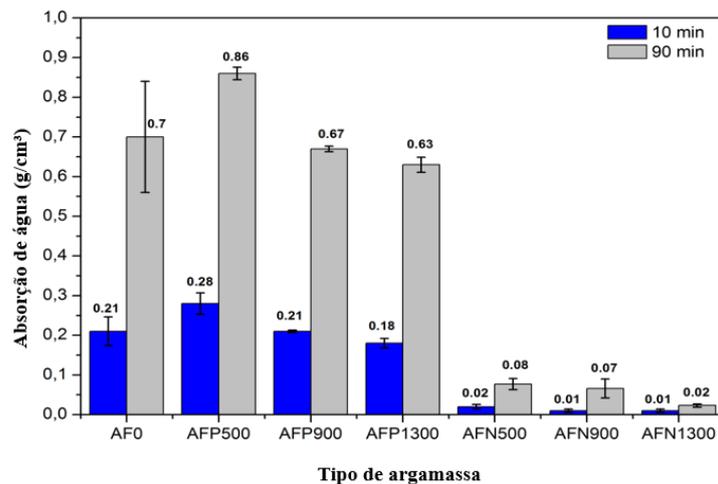


Figura 6: Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade

De acordo com a análise estatística, a amostra AFN1300 foi a que apresentou a menor absorção de água, inclusive em relação à amostra de referência (AF0), com aproximadamente 95% menor absorção de água por capilaridade aos 10 minutos e aproximadamente 97% menor aos 90 minutos. Já, a amostra AFP500, apresentou a maior absorção em relação à amostra de referência (AF0), com aproximadamente 33% maior absorção de água por capilaridade aos 10 minutos e aproximadamente 23% maior aos 90 minutos.

Observa-se que, com o aumento da incorporação de fibras de nylon nas argamassas, diminui a absorção de água, o que é coerente com a baixa porosidade e a boa dispersão dessas fibras encontradas nessas argamassas, verificados também na microscopia. Porém, para as argamassas com fibras de polipropileno essa diminuição não é clara, observa-se que os valores de absorção de água são próximos da referência, o que demonstra que a influência dessas fibras não afeta essa característica. Com o teste de absorção de água foi possível calcular o coeficiente de capilaridade das argamassas produzidas é mostrado na Tabela 3. As argamassas com fibras de polipropileno não apresentam diferença significativa em relação à referência da argamassa. Enquanto isso, a argamassa com fibras de nylon mostrou diferença significativa e redução do coeficiente de capilaridade com o aumento da incorporação da fibra de nylon dentro da mistura. Sendo que a amostra AFN1300 apresentou um valor aproximado 97% menor que a amostra AF0, a amostra AFN900 valor aproximado 89% menor e a amostra AFN500 valor aproximado 88% menor, ou seja, comprova a significância dos resultados médios obtidos. Esses valores estão de acordo com os resultados obtidos por CORTEZ [23], que constatou que tradicionalmente as argamassas com incorporação de fibras sintéticas tendem a apresentar um coeficiente de capilaridade menor em relação às argamassas sem fibras.

Tabela3: Resultados do coeficiente de capilaridade.

ARGAMASSAS	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE (G/DM ² .MIN ^{1/2})
AF0	7,80
AFP500	9,40
AFP900	7,35
AFP1300	7,14
AFN500	0,93
AFN900	0,83
AFN1300	0,20

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e estático mostrados na Figura 7, constata-se que os comportamentos destes seguem o mesmo delineamento dos resultados apresentados para os valores de resistência e de absorção de água. De modo que, a incorporação de fibras de polipropileno nas argamassas proporciona uma diminuição no módulo de elasticidade, já a incorporação de

fibras de nylon provoca um aumento do módulo de elasticidade. Entretanto, a análise estatística demonstra que para os resultados de módulo de elasticidade dinâmico não há variação significativa entre as amostras AFN500, AFN900, AFN1300 e a amostra AFP500 com relação à amostra de referência (AF0).

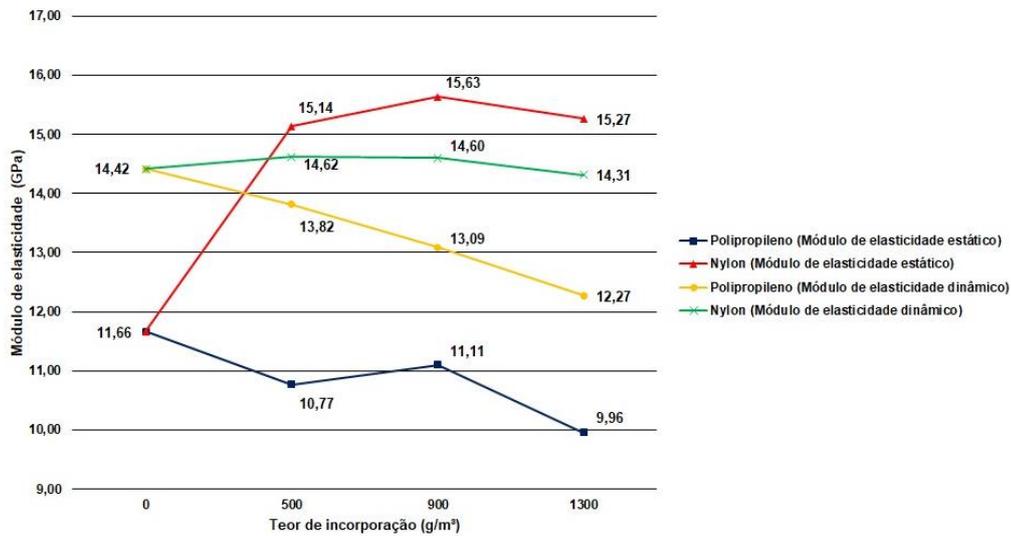


Figura 7: Resultados do módulo de elasticidade dinâmico e estático

Segundo a análise, a amostra AFP1300 foi a que apresentou o resultado mais significativo, com valor aproximadamente 14,91% menor que o resultado da amostra de referência (AF0), este valor foi seguido pela amostra AFP900 com valor aproximadamente 9,23% menor. O módulo de elasticidade está ligado à rigidez do material, o que indica a capacidade de suportar deformações sem rachaduras. Nesse caso, percebe-se que se o módulo for muito alto, ele será muito suscetível a variações higroscópicas e térmicas, sendo que deforma pouco e acaba rachando. Quanto menor o módulo de elasticidade, maior a capacidade de deformação da argamassa, reduzindo a possibilidade de trincas no estado endurecido [46]. Portanto, em relação a essa característica, o polipropileno suportará melhor essas variações, ajudando a evitar a geração de trincas.

A Figura 8 ilustra o comportamento das ondas geradas pelo pulso do transdutor transversal, para cada série de argamassa produzida, sendo a série AF0 a de referência, a AFP com incorporação de fibras de polipropileno e a AFN com incorporação de fibras de nylon.

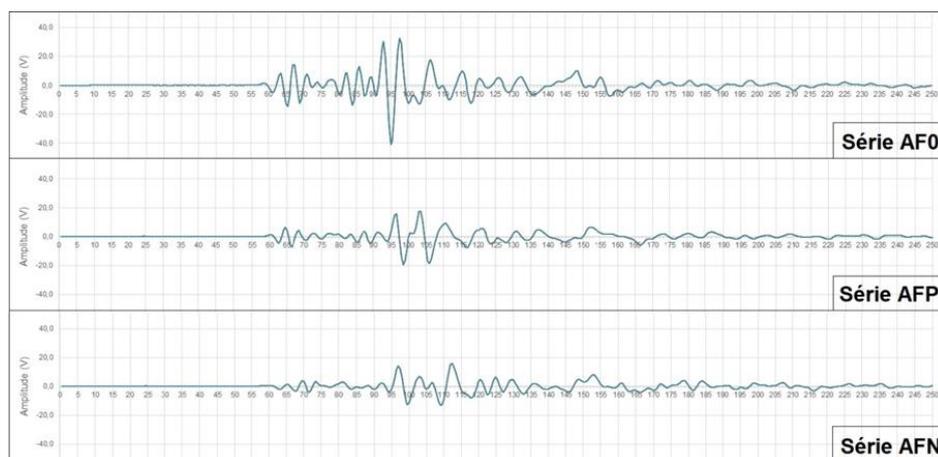


Figura 8: Pulso de ondas gerado pelo transdutor transversal

Conforme pode-se observar, o comportamento de ambas é similar, de forma que os tempos em que ocorrem o primeiro pico e a primeira grande amplitude das ondas são bem próximos, o que reflete nos valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos. Para os resultados de módulo de elasticidade estático, a análise estatística demonstrou que não há variância significativa entre as amostras AFP500, AFP900 e

AFP1300 com relação à amostra de referência (AF0). Segundo a análise, a amostra AFN900 foi a que apresentou o resultado mais significativo, com valor aproximadamente 34,05% maior que o resultado da amostra de referência (AF0), este valor foi seguido pela amostra AFN1300 com valor aproximadamente 30,96% maior e pela amostra AFN500 com valor aproximadamente 29,84% maior. Ao se comparar os resultados encontrados entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático, observa-se que existe uma variação entre os valores obtidos em cada ensaio. De modo que as amostras de referência (AF0) apresentam uma variação de aproximadamente 24% entre os módulos estáticos e dinâmicos, já as amostras com incorporação de fibras de polipropileno apresentam uma variação de aproximadamente 23% e as amostras com incorporação de fibras de nylon a variação é de aproximadamente 6%. O módulo de elasticidade dinâmico é geralmente 20 a 40% maior que o módulo de elasticidade estático, as amostras de referência (AF0) e as amostras da série AFP seguiram esta tendência, no entanto as amostras da série AFN não seguiram. Porém, de acordo com os autores [47, 48], é necessário analisar alguns fatores que podem influenciar os resultados de ensaios de módulo de elasticidade estático, assim como para o módulo de elasticidade dinâmico, fatores como: velocidade de aplicação da carga, dimensão dos corpos de prova, temperatura do ensaio, entre outros. A incorporação das fibras de polipropileno resulta em menores valores de módulo de elasticidade, em comparação à amostra de referência, também já observado por outras pesquisas [2, 23]. Entretanto, o comportamento das argamassas com incorporação de fibras de nylon não seguiu a tendência expressada em pesquisas anteriores, onde a incorporação das fibras de nylon nas argamassas proporcionou uma diminuição do módulo de elasticidade [23].

A incorporação das fibras de nylon neste trabalho representou um aumento nos valores de módulo de elasticidade, exceto para o módulo de elasticidade dinâmico, onde a análise estatística demonstrou que não há variância significativa dos resultados com relação à amostra de referência. Os resultados de módulo de elasticidade encontrados comprovam o comportamento observado das argamassas com relação aos esforços mecânicos, onde as argamassas com maior resistência mecânica apresentam maiores módulos de elasticidade e conseqüentemente menor capacidade de absorver deformações, no caso das argamassas com incorporação de fibras de nylon. Já argamassas com menor resistência mecânica apresentam menores módulos de elasticidade e conseqüentemente maior capacidade de absorver deformações, no caso das argamassas com incorporação de fibras de polipropileno.

O comportamento dos módulos de elasticidade obtidos pode ser explicado por meio dos valores de densidades encontrados através da realização do ensaio prescrito pela NBR 13280 [36], cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de densidade

ARGAMASSAS	DENSIDADE (KG/M ³)
AF0	2036,40
AFP500	1971,94
AFP900	1915,73
AFP1300	1872,14
AFN500	2014,29
AFN900	2009,98
AFN1300	2021,13

Considerando os valores de densidade aparente obtidos, verifica-se que os valores encontrados para as argamassas com fibras de nylon são maiores que os das argamassas com fibras de polipropileno e próximos aos valores da argamassa de referência. Argamassas densas tendem a restringir deformações mais intensamente do que argamassas menos densas. Portanto, a porosidade reflete no módulo de elasticidade (estático e dinâmico) das argamassas [49].

Segundo SILVA [46], em argamassas densas, a velocidade de propagação das ondas geradas pelo transdutor transversal é maior do que em argamassas menos densas, de modo que essas argamassas possuem

maior módulo de elasticidade dinâmico. Com base nessas afirmações, o comportamento do módulo elástico da argamassa pode ser explicado, possivelmente, por suas características físicas, conforme discutido em outros itens deste trabalho, bem como pelas características físicas e pela forma das fibras sintéticas utilizadas.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se afirmar que as fibras sintéticas podem ser utilizadas visando a melhoria do desempenho das argamassas de revestimento. Contudo, deve-se observar a fibra que será utilizada em cada caso. Pois as fibras de nylon apresentam um potencial para utilização visando a melhoria de resistência mecânica e absorção de água, por outro lado as fibras de polipropileno apresentam um potencial para utilização como um material de reforço da argamassa, possibilitando assim pequenas “movimentações” e evitando manifestações patológicas, como fissuras, por exemplo. O módulo elástico é diretamente afetado pela incorporação de fibras de polipropileno e nylon nas argamassas de revestimento. Através da análise dos resultados do módulo elástico dinâmico, é possível observar que há uma diminuição do módulo elástico nas argamassas com incorporação de fibras de polipropileno. Já a análise do módulo de elasticidade estático demonstra que há um aumento do módulo de elasticidade nas argamassas com incorporação de fibras de nylon. Essa conclusão é importante, pois as proporções de adição, traços e componentes utilizados nessa pesquisa são distintos ao das outras nesse âmbito.

A absorção de água por capilaridade mostra redução com a incorporação de fibras de nylon, enquanto as argamassas com fibras de polipropileno não alteram significativamente essa característica, sendo assim, é vantajoso o uso das fibras de nylon já que é desejada uma baixa absorção de água para as argamassas. As propriedades mecânicas como a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão foram incrementadas com a adição de fibras de nylon, enquanto as fibras de polipropileno tiveram um efeito negativo em relação à resistência à compressão. Quanto ao índice de consistência as argamassas com incorporação de fibras de polipropileno apresentam redução, sendo necessário o uso de aditivos para garantir a trabalhabilidade da pasta. Por outro lado, argamassas com fibras de nylon não influenciaram significativamente essa característica.

Quanto ao teor de adição das fibras nas misturas de argamassa considera-se o percentual de 500g/m³ o mais viável para os dois tipos de fibras analisados, tanto economicamente – pois demanda em menor quantidade de fibras que as outros teores testados, quanto em facilidade de mistura, além de apresentar resultados promissores no ensaio de absorção de água, de propriedades mecânicas e consistência e com valores próximos aos maiores percentuais de inserção.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- [2] SILVA, R.P. Argamassas com adição de fibras de polipropileno - estudo comportamento reológico e mecânico. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [3] LI, Y., REN, S. (Eds.), 6 - Building Decorative Concrete and Mortar, in: Building Decorative Materials, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, <https://doi.org/10.1533/9780857092588.92>, pp. 92-109, 2011.
- [4] WESOŁOWSKA, M., The Role of Mortar Microstructure in Providing the Face Wall Structural Integrity. *Procedia Engineering* 193, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.204>, pp. 198-204, 2017.
- [5] BAÍA, L.L.M; SABBATINI, F.H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.
- [6] BAUER, E.; CORTEZ, I.M.M.. Compósitos à base de fibras sintéticas em argamassas para revestimento na prevenção da fissuração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIAS DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. Anais... Brasília: ANTAC, pp. 89-100, 2001.
- [7] SAFIUDDIN, Md. Concrete Damage in Field Conditions and Protective Sealer and Coating Systems. *Coatings* 7, 90. <https://doi.org/10.3390/coatings7070090>, 2017
- [8] TISCOSKI, B. L., ANTUNES, E.G.P., VITO, M., GODINHO, D.S.S. Efeito da adição de fibras de polipropileno na resistência de aderência à tração em argamassa de revestimento, in: XII SBTA-Simpósio Brasileiro De Tecnologia das Argamassas. Presented at the XII Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, Sao Paulo, Brazil, 2017.

- [9] SAHADE, R.F., CHOTOLI, F.F., DE LIMA, S.S., LEAL, P.R.M. Capítulo 4 - Caracterização de argamassa de revestimento de fachada em edifício litorâneo com expansão, fissuração com esfarelamento e baixa resistência mecânica: estudo de caso, in: Pesquisa Científica e Inovação Tecnológica Nas Engenharias. Atena Editora, pp. 35-44, 2019.
- [10] SALOMÃO, M.C.F., BAUER, E., KAZMIERCZAK, C. S. Drying parameters of rendering mortars. *Ambient. constr.* 18, <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200239>, pp. 7–19, 2018
- [11] ERDOGMUS, E. Use of Fiber-Reinforced Cements in Masonry Construction and Structural Rehabilitation. *Fibers* 3, <https://doi.org/10.3390/fib3010041>, pp. 41-63, 2015
- [12] MAIA PEDERNEIRAS, C., VEIGA, R., DE BRITO, J. Rendering Mortars Reinforced with Natural Sheep's Wool Fibers. *Materials* 12, 3648. <https://doi.org/10.3390/ma12223648>, 2019
- [13] PEREIRA, M.V., FUJIYAMA, R., DARWISH, F., ALVES, G.T. On the Strengthening of Cement Mortar by Natural Fibers. *Mat. Res.* 18. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.305314>, pp. 177-183, 2015
- [14] SHARDA, S., SINGH, M., SINGH, S. A review on Properties of Fiber Reinforced Cement-based materials. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 13. <https://doi.org/10.9790/1684-130501104112>, pp. 104–112, 2016
- [15] PARADAVA, D.D., PITRODA, J. Utilization Of Artificial Fibres In Construction Industry: A Critical Literature Review. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 4, 2013.
- [16] GULER, S. The effect of polyamide fibers on the strength and toughness properties of structural lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 173, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.212>, pp. 394-402, 2018.
- [17] HABIB, A., BEGUM, R., ALAM, M.M. Mechanical Properties of Synthetic Fibers Reinforced Mortars. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 4, pp. 923–927, 2013.
- [18] SONG, P.S., HWANG, S., SHEU, B.C.. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research* 35, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>, pp. 1546-1550, 2005
- [19] ALY, T., SANJAYAN, J.G., COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Mater Struct*, 41. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9361-2>, pp. , 1741–1753, 2008.
- [20] BRITO, J., VEIGA, M., PEDERNEIRAS, C. Effects of the Incorporation of Waste Fibres on the Cracking Resistance of Mortars: A Review. *Int. J. Green Technol.* 4. <https://doi.org/10.30634/2414-2077.2018.04.5>, pp. 38-46, 2018.
- [21] BENDJILLALI, K., CHEMROUK, M., BOULEKBACHE, B. Performances of cementitious mortars containing recycled synthetic fibres under hot-dry climate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23, <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1344152>, pp. 1235-1247, 2019.
- [22] MONTE, R., BARROS, M.M.S.B., FIGUEIREDO, A.D.. Evaluation of early age cracking in rendering mortars with polypropylene fibers. *Ambient. constr.* 18, <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200240>, pp. 21-32, 2018.
- [23] CORTEZ, I.M.M., Contribuição ao estudo dos sistemas de revestimento à base de argamassa com a incorporação de fibras sintéticas. 1999. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.
- [29] OLIVEIRA, M.L.L., GLEIZE, P.J.P., ROMAN, H.R. Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas, in: V SBTA-Simposio Brasileiro De Tecnologia das Argamassas. Presented at the V Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, Sao Paulo, Brazil, pp. 479-491, 2003.
- [30] SILVA, R.P. Argamassas com adição de fibras de polipropileno - estudo do comportamento reológico e

mecânico (Master's Thesis). Universidade de São Paulo, Brazil, 2006.

- [31] CENTOFANTE, G., DAGOSTINI, C.M.. Análise das propriedades de argamassas de revestimento com adição de fibras de polipropileno. Unoesc & Ciência -ACET, pp. 7-16, 2014.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008b.
- [39] FRANÇA, M.S., CARDOSO, F.A., PILEGGI, R.G. Influence of the addition sequence of PVA-fibers and water on mixing and rheological behavior of mortars. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 9, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000200005>, pp. 226–243, 2016.
- [40] GRÜNEWALD, S. Fibre reinforcement and the rheology of concrete, in: Understanding the Rheology of Concrete. Elsevier, <https://doi.org/10.1533/9780857095282.2.229>, pp. 229–256, 2012.
- [41] KARAHAN, O., ATIŞ, C.D., The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. Materials & Design 32, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>, pp. 1044-1049, 2011.
- [42] SPADEA, S., FARINA, I., CARRAFIELLO, A., *et al.*. Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. Construction and Building Materials 80, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>, pp. 200-209, 2015.
- [43] ZHOU, X., LI, Z. Characterization of rheology of fresh fiber reinforced cementitious composites through ram extrusion. Mater. Struct. 38, <https://doi.org/10.1617/14064>, pp. 17–24, 2004.
- [44] ASKARINEJAD, S., RAHBAR, N. Effects of Cement–Polymer Interface Properties on Mechanical Response of Fiber-Reinforced Cement Composites. J. Nanomech. Micromech. 7, 04017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NM.2153-5477.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NM.2153-5477.0000119), 2017.
- [45] HANIF, I.M., NOOR SYUHAILI, M.R., HASMORI, M.F., *et al.*, Effect of nylon fiber on mechanical properties of cement based mortar. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 271, 012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012080>, 2017.
- [46] SILVA, N.G., CAMPITELI, V.C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. Ambiente Construído 8, pp. 21–35, 2008.
- [47] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.3.ed. São Paulo: Ibracon, 2008.
- [48] NETO, A; HELENE, P.R. Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade do Concreto. In: IBRACON 44º Congresso Brasileiro do Concreto.
- [49] DANTAS, S.R.A., SERAFINI, R., ROMANO, R.C.O., *et al.* Influence of polypropylene microfibre (PPMF) dispersion procedure on fresh and hardened rendering mortar properties. Ambient. constr. 20, 7–23. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200384>, 2020.

ORCID

Felipe Sachet Colombo

<https://orcid.org/0000-0003-1232-1226>

Elaine Guglielmi Pavei Antunes

<https://orcid.org/0000-0002-9698-1100>



Leidy Johana Jaramillo
Jorge Henrique Piva
Augusto Wanderlind

<https://orcid.org/0000-0003-1065-3753>
<https://orcid.org/0000-0002-1753-4944>
<https://orcid.org/0000-0002-5312-9700>