



**Caracterização mecânica de compósitos de matriz
cimentícia contendo resíduos de construção e
demolição (RCD) reforçados com fibras de sisal**

Cristina Xavier de Brito Machado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Prof. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia
Prof. Romildo Dias Tolêdo Filho

Júri

Presidente: Prof.^a Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto
França de Santana

Orientador: Prof. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Vogal: Prof.^a Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Novembro 2014

Resumo

Os ciclos de molhagem e secagem são usualmente utilizados na indústria de papel para reduzir a capacidade de absorção de água de fibras lignocelulósicas. Esse procedimento endurece a estrutura polimérica das fibrocélulas (processo conhecido como hornificação), resultando, assim, numa maior estabilidade dimensional das fibras. No presente estudo, foi avaliada a influência da hornificação de fibras de sisal no seu comportamento físico (variações dimensionais e absorção de água), mecânico (comportamento sob tracção directa) e microestrutural (modificações superficiais das fibras e da estrutura das fibrocélulas). Foram também realizados ensaios de arrancamento das fibras de sisal em matrizes à base de cimento, utilizando comprimentos de embebedimento de 25 mm, com o objectivo de verificar se a possível estabilidade dimensional decorrente da hornificação aumentava a aderência fibra-matriz. Os resultados obtidos mostram que a hornificação permite obter maior estabilidade dimensional, reduz a capacidade de absorção de água, aumenta a resistência à tracção e a rigidez e reduz a capacidade de deformação das fibras de sisal. Não foram observados acréscimos na carga de arrancamento, o que indica não ter havido melhoria da aderência da fibra hornificada à matriz cimentícia.

Tendo em conta as crescentes preocupações ambientais, tem vindo a ser estudada a possibilidade de reciclar materiais oriundos dos resíduos de construção e demolição (RCD), incorporando-os em novos materiais. Nesse contexto, no presente estudo, foi produzida areia reciclada através da trituração de uma viga de betão armado e posterior peneiração do material resultante, de forma a substituir a areia natural presente nas matrizes cimentícias. Foram utilizadas percentagens de inclusão de fibras vegetais naturais e hornificadas de 2% e 4% em volume e teores de substituição de areia natural por areia reciclada de 25% e 50%. Analisou-se a influência de cada modificação dos compósitos ao nível do comportamento mecânico (tracção, compressão e flexão).

Os resultados obtidos mostraram que a presença do material reciclado melhora significativamente a aderência fibra-matriz e, conseqüentemente, os valores máximos de tensão em todos os ensaios. Os resultados dos ensaios realizados evidenciaram também um comportamento frágil dos compósitos sem incorporação de fibras, por contraponto um comportamento dúctil para os mesmos compósitos reforçados com fibras curtas dispersas aleatoriamente. Verificou-se ainda uma redução da tensão da primeira fissura e do módulo de elasticidade aquando da incorporação de fibras em todas as matrizes e um aumento da tensão última e do índice de tenacidade para compósitos com 4% de reforço fibroso. O modo de rotura apresentou múltipla fissuração nos compósitos com introdução de 4% de fibras naturais e tratadas; o mesmo não se verificou para a taxa de reforço de 2%.

Palavras-chave: fibras naturais, sisal, hornificação, argamassa, material reciclado.

Abstract

Wetting and drying cycles are usually performed in the paper industry in order to reduce the water absorption capacity of lignocellulosic fibres. This procedure stiffens the polymeric structure of the fibre cells (a process known as hornification), resulting in a higher dimensional stability. In the present work, one investigated if the dimensional stability provided by the hornification process can improve the adhesion of the sisal fibre in a cement matrix. In order to study the fibre-matrix bond adhesion, pull-out tests were performed with embedment lengths of 25 mm. Furthermore, the influence of the hornification in the physical (dimensional variation and water absorption), mechanical (behavior under tensile loading) and microstructural behaviour (surface modifications of the fibre and changes in the fibre cell structure) was also investigated. The results obtained indicated a higher dimensional stability, a reduction in the water absorption capacity, an increase in the tensile strength and stiffness as well as a reduction in the modulus of elasticity and strain capacity with the hornification. No increases of the pull-out load were observed indicating a lack of improvement of the bond strength of the hornified fibre with the cementitious matrix.

Given the growing environmental concerns, recycling of waste materials from construction and demolition waste (CDW) has been studied so that they can be incorporated into new materials. In the present study, recycled sand was produced through crushing of a reinforced concrete beam and subsequent sieving of the resulting aggregates in order to replace natural sand in the cement matrices. Mortars were produced in this study with incorporation of natural and treated fibres of 2% and 4% by volume and replacement rates of 25% and 50% of natural sand by recycled one. The effect of each modification in the mechanical behaviour of the composite (tensile, compressive and flexural strength) was analyzed.

The results obtained indicated that the presence of the recycled material has a significant improvement regarding the fibre-matrix bond and, consequently, of the maximum values in all tests. The results showed also a brittle behaviour of the composites without the incorporation of fibres and a ductile behaviour of the composites reinforced with short fibres randomly dispersed. Simultaneously, it was observed a reduction of the first crack stress and of the modulus of elasticity upon incorporation of fibres in all matrices, as well as an increase of ultimate stress and index of tenacity in composites with 4% fibrous reinforcement. The failure mode showed a multiple cracking behaviour of the composites with 4% incorporation of natural and hornified fibres; the same was not observed for 2% incorporation.

Keywords: natural fibres; sisal; hornification; mortar; recycled material

Agradecimentos

Ao Prof. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia, pela disponibilidade, análise crítica e recomendações. Agradeço também pelo último esforço feito na revisão da dissertação.

Ao Prof. Romildo Dias Toledo Filho, professor na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pela disponibilização das instalações laboratoriais no LABEST, pelo apoio, pela sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas, e pelo seu contributo na parte experimental, assim como a toda a equipa deste laboratório.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento geral	1
1.2	Objectivos da dissertação	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Organização do documento	3
2.	Estado da arte	5
2.1.	Considerações iniciais	5
2.2.	Fibras utilizadas no reforço de compósitos cimentícios	7
2.3.	Métodos utilizados para melhorar a adesão fibra-matriz	10
2.4.	Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais	14
2.4.1.	Considerações gerais	14
2.4.2.	Propriedades mecânicas	15
2.4.2.1.	Resistência à compressão	18
2.4.2.2.	Resistência à tracção directa	19
2.4.2.3.	Resistência à tracção por flexão	20
2.4.3.	Durabilidade	20
2.5.	Incorporação de areia reciclada em compósitos de matriz cimentícia	22
2.5.1.	Produção e características da areia reciclada	22
2.5.2.	Descrição geral de algumas campanhas experimentais	23
2.5.3.	Quantidade de água de amassadura	26
2.5.4.	Propriedades mecânicas	28
2.5.4.1.	Resistência à compressão	28
2.5.4.2.	Resistência à flexão	31
2.5.4.3.	Módulo de elasticidade	33
2.6.	Considerações finais	33
3.	Programa experimental	37
3.1.	Considerações iniciais	37
3.2.	Materiais	39
3.2.1.	Cimento Portland, metacaulinita e cinza volante	39
3.2.2.	Areia	40

3.2.3.	Superplastificante	41
3.2.4.	Agente modificador de viscosidade.....	42
3.2.5.	Fibras de sisal	43
3.3.	Caracterização das fibras.....	43
3.3.1.	Considerações gerais.....	43
3.3.2.	Avaliação da capacidade de absorção das fibras.....	46
3.3.3.	Avaliação da variação dimensional das fibras	46
3.3.4.	Análise termogravimétrica.....	47
3.3.5.	Ensaio de tracção directa nas fibras	47
3.3.6.	Ensaio de arrancamento (<i>pull-out</i>).....	48
3.4.	Composição da Matriz.....	50
3.5.	Britagem e peneiração na produção de areia reciclada.....	52
3.6.	Produção dos compósitos de matriz cimentícia.....	53
3.7.	Caracterização mecânica dos compósitos de matriz cimentícia	54
3.7.1.	Ensaio de compressão uniaxial.....	54
3.7.2.	Ensaio de tracção directa	55
3.7.3.	Ensaio de flexão em quatro pontos	55
3.7.4.	Processo de fractura	57
4.	Análise e discussão dos resultados.....	59
4.1.	Considerações iniciais.....	59
4.2.	Influência da hornificação nas propriedades da fibra de sisal	59
4.2.1.	Alterações visuais.....	59
4.2.2.	Absorção de água	60
4.2.3.	Análise termogravimétrica.....	60
4.2.4.	Variação dimensional	61
4.2.5.	Resistência à tracção directa	63
4.2.6.	Aderência fibra-matriz	65
4.3.	Ensaio de consistência.....	71
4.4.	Caracterização mecânica dos compósitos.....	72
4.4.1.	Ensaio de compressão uniaxial.....	72
4.4.2.	Ensaio de tracção directa.....	74

4.4.3.	Ensaio de flexão em quatro pontos.....	77
4.4.4.	Processo de fractura	83
4.5.	Considerações finais	85
5.	Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros	87
5.1.	Conclusões.....	87
5.2.	Perspectivas de desenvolvimentos futuros	89
	Bibliografia.....	91
	ANEXO 1	I - 1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Tipos de fibras utilizados no reforço de compósitos cimentícios	7
Figura 2-2 - Extração das fibras longas de sisal: (a) planta agave sisalana; (b) desfibrilamento mecânico; (c) secagem; (d) enfardamento para venda.....	8
Figura 2-3 - Estrutura das fibras de sisal: (a) fibra composta por microfibras ocas unidas pela lamela média; (b) detalhe da lamela média (composta por hemicelulose e lignina) e da lamela exterior	9
Figura 2-4 - Diferentes morfologias da fibra de sisal: (a) ferradura, (b) arco e (c) arco retorcido	11
Figura 2-5 - Micrografia eletrônica de varredura: (a) polpa inicialmente alvejada; (b) polpa não alvejada	12
Figura 2-6 - Micrografias da superfície das fibras de sisal (a) sem tratamento e (b) acetiladas por uma hora a 120 °C	14
Figura 2-7 - Tipos de dispersão de reforço em materiais compósitos	16
Figura 2-8 - Definição da tensão das primeiras fissuras, tensão última (de pico), endurecimento (enrijecimento) na deformação e amolecimento	17
Figura 2-9 - Consumo de água	27
Figura 2-10 - Resultados dos ensaios à compressão	28
Figura 2-11 - Resultados dos ensaios à compressão	29
Figura 2-12 - Resultados dos ensaios à compressão	29
Figura 2-13 - Resultados dos ensaios à compressão	30
Figura 2-14 - Resultados dos ensaios à compressão	30
Figura 2-15 - Resultados dos ensaios à compressão	31
Figura 2-16 - Resultados da resistência à flexão	32
Figura 2-17 - Resultados do ensaio de flexão	32
Figura 2-18 - Módulo de elasticidade	33
Figura 3-1 - Curva granulométrica do CP II F-32 e adições (metacaulinita e cinza volante)	40
Figura 3-2 - Análise termogravimétrica do CP II F-32 em massa (a verde) e derivada de massa (a azul)	40
Figura 3-3 - (a) Curva granulométrica da areia utilizada; (b) comparação das curvas dos materiais finos com a areia	41
Figura 3-4 - Curva do ponto de saturação do superplastificante Glenium 51	42
Figura 3-5 - Agente modificador de viscosidade Rheomac UW 410	42

Figura 3-6 - Alinhamento e corte das fibras: (a) pente de pregos; (b) guilhotina para corte das fibras	43
Figura 3-7 - Relação entre ganho de massa em relação ao tempo no processo de ciclagem ..	44
Figura 3-8 - Forno utilizado para secagem das fibras: (a) vista esquemática; (b) forno com as fibras posicionadas no suporte ligado à balança externa	44
Figura 3-9 - Relação entre perda de massa em relação ao tempo no processo de ciclagem ...	45
Figura 3-10 - Variação de massa e temperatura de um feixe de fibras para um ciclo completo de molhagem e secagem	45
Figura 3-11 - Fixação e alinhamento das fibras no círculo metálico.....	46
Figura 3-12 – Moldagem dos provetes para ensaio de arrancamento	48
Figura 3-13 - Molde utilizado no ensaio de arrancamento; Detalhe do rebaixamento para encaixe do molde de PVC; Corte do molde para provetes do ensaio de arrancamento.....	49
Figura 3-14 - Configuração do ensaio de arrancamento	50
Figura 3-15 - (a) Molde de papel para ensaio de arrancamento; (b) configuração do ensaio de arrancamento; (c) detalhe de fibra submetida à tracção directa	47
Figura 3-16 - Imagens de secções transversais de fibras de sisal	48
Figura 3-17 – Representação esquemática do ensaio de consistência padrão para avaliação da trabalhabilidade da matriz e respectivo resultado	50
Figura 3-18 - Análise termogravimétrica da matriz cimentícia em diferentes idades	51
Figura 3-19 - Homogeneização e dispersão das fibras	51
Figura 3-20 - Demolição da viga de betão armado.....	52
Figura 3-21 - (a) Armazenamento dos agregados finos obtidos pela britagem; (b) Peneiro Nº 20	53
Figura 3-22 - Configuração dos moldes.....	53
Figura 3-23 - Moldagem dos compósitos: (a) Colocação da mistura no molde; (b) molde preenchido	54
Figura 3-24 - Ensaio de compressão uniaxial.....	54
Figura 3-25 – (a) Esquema de ensaio; (b) Ensaio de flexão em quatro pontos	56
Figura 3-26 - Definição dos pontos para cálculo dos índices de tenacidade segundo a ASTM C1018 (1992)	57
Figura 3-27 - (a) Configuração do sistema de montagem dos provetes para ensaio de tracção; (b) placas de fixação alinhadas	55
Figura 3-28 - Esquema de ensaio de tracção directa e verificação de alinhamento do provete	58

Figura 3-29 - Posicionamento da máquina fotográfica durante (a) o ensaio de tracção e (b) o ensaio de flexão.....	58
Figura 3-30 - Processo de fractura durante o ensaio de flexão.....	58
Figura 4-1 - Alteração na coloração das fibras sem tratamento (esquerda) e após 10 ciclos de molhagem e secagem (direita)	60
Figura 4-2 - Variação do índice de absorção de água das fibras de sisal após 1, 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem.....	60
Figura 4-3 - Análise termogravimétrica das fibras de sisal antes e após diferentes ciclos de tratamento de hornificação	61
Figura 4-4 - Variação dimensional das fibras sem e com tratamento.....	62
Figura 4-5 – Secção transversal de uma fibra (a) não tratada e (b) tratada.....	62
Figura 4-6 - Curvas força-deslocamento para avaliação da influência do tratamento: (a) fibras naturais, (b) fibras com 5 ciclos de tratamento e (c) fibras com 10 ciclos de tratamento.....	64
Figura 4-7 - Gráfico ideal força-deslocamento de um ensaio pull-out onde F_{ad} é a força adesional e F_{fr} a força friccional	65
Figura 4-8 - Curvas tensão - deslocamento do ensaio de pull-out	67
Figura 4-9 - Resposta média das misturas ao ensaio de pull-out.....	68
Figura 4-10 - Exemplo de rompimento da fibra no exterior do provete durante ensaio de arrancamento de fibra não tratada	69
Figura 4-11 – (a) Provete de ensaio de arrancamento de fibra tratada rompido longitudinalmente; (b) Impressão da fibra na matriz; (c) Rotura da fibra durante ensaio de arrancamento	69
Figura 4-12 – Comparação dos valores médios da tensão adesional (esquerda) e friccional (direita) das diferentes misturas	70
Figura 4-13 - Comparação dos valores médios da rigidez das diferentes misturas.....	70
Figura 4-14 – Resultados dos ensaios de consistência para os compósitos à base da matriz AR2	71
Figura 4-15 - Valores médios e respectivos desvios padrão do valor de espalhamento	72
Figura 4-16 - Curvas tensão-deformação para as matrizes AR1 e AR2	73
Figura 4-17 - Comparação da deformação correspondente à tensão máxima entre misturas ..	74
Figura 4-18 - Rotura à compressão	74
Figura 4-19 - Modo de rotura de provete ensaiado à tracção.....	75
Figura 4-20 - Curvas tensão - deslocamento do ensaio de tracção directa	76

Figura 4-21 - Curvas típicas obtidas do ensaio de flexão para (a) matrizes sem fibras e (b) compósitos de matriz natural.....	78
Figura 4-22 - Curvas típicas obtidas do ensaio de flexão para as matrizes AR1 e AR2 sem e com reforço.....	79
Figura 4-23 - Valores médios e respectivos desvios padrão da tensão de 1ª fissura (MPa)	79
Figura 4-24 - Valores médios e respectivos desvios padrão da tensão máxima pós-fissuração (MPa)	80
Figura 4-25 - Relação entre tensão de 1ª fissura e tensão máxima pós-fissuração	81
Figura 4-26 - Valores médios e respectivos desvios padrão do módulo de elasticidade (GPa)	81
Figura 4-27 - Valores médios e respectivos desvios padrão do índice de tenacidade I_{10}	82
Figura 4-28 - Modo de rotura de compósitos submetidos ao ensaio de flexão	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Valores típicos das propriedades das fibras de sisal	9
Tabela 2-2 - Traços das argamassas ensaiadas por Hamassaki et al. (1997)	23
Tabela 2-3 - Composição das argamassas produzidas por Bravesco (2001)	24
Tabela 2-4 - Composição dos resíduos produzidos por Chen et al. (2002)	24
Tabela 2-5 - Composição das argamassas produzidas por Chen et al. (2002)	24
Tabela 2-6 - Composição das argamassas produzidas por Corinaldesi & Moriconi (2007).....	25
Tabela 2-7 - Composição das argamassas produzidas por Pedrozo (2008)	26
Tabela 2-8 - Composição das argamassas produzidas por Ling et al.(2011)	26
Tabela 2-9 - Consumo de água	27
Tabela 3-1 - Variáveis de estudo	37
Tabela 3-2 - Ensaio realizados.....	38
Tabela 3-3 - Composição e propriedades físicas do CP II F-32, metacaulinita e cinza volante	39
Tabela 3-4 - Consumo de material por m ³ da matriz utilizada	52
Tabela 4-1 - Propriedades mecânicas das fibras naturais, com 5 e 10 ciclos de tratamento	64
Tabela 4-2 - Propriedades mecânicas adesionais das misturas submetidas ao ensaio de arrancamento (pull-out)	68
Tabela 4-3 - Propriedades mecânicas friccionais das misturas submetidas ao ensaio de arrancamento (pull-out)	68
Tabela 4-4 - Propriedades mecânicas das matrizes submetidas ao ensaio de compressão.....	73
Tabela 4-5 - Propriedades mecânicas das misturas submetidas ao ensaio de tracção directa.	75
Tabela 4-6 - Propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão	77

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

Desde que surgiram os materiais à base de cimento, no início do século XIX, até aos dias de hoje, a evolução na ciência e tecnologia dos materiais tem sido constante. O progresso deve-se tanto a novas tecnologias criadas como à incorporação de novos materiais, tais como os aditivos, já comumente utilizados, e as fibras. A preocupação crescente com o meio ambiente faz com que cada vez mais se procurem soluções sustentáveis, que incluem a substituição de materiais novos por materiais reciclados.

A eficiência da adição de fibras baseia-se em dois critérios em relação à matriz cujo comportamento é frágil: o primeiro é o aumento da resistência e o segundo é o aumento da tenacidade do compósito (Bentur e Mindess, 2007). Alguns aspectos que regem a eficiência das fibras na melhoria das propriedades mecânicas da matriz de cimento são o processo de transferência de tensões da matriz para a fibra e o efeito de “ponte de tensões”, que ocorre numa fase mais avançada do carregamento. A eficiência deste processo requer o controlo de propriedades básicas das fibras como a geometria, a composição química, as características superficiais, a resistência e a rigidez.

Tem havido um grande esforço para o desenvolvimento de materiais compósitos com múltipla fissuração em tracção directa. No entanto, esta evolução está directamente relacionada com a utilização de fibras sintéticas de reforço, como por exemplo o PVA (Poli Álcool Vinílico), de forma a que seja possível controlar a abertura de fissuras sob elevadas deformações.

Têm sido desenvolvidos diversos estudos em relação à utilização de fibras naturais em detrimento das sintéticas que têm mostrado resultados promissores, nomeadamente aumento de resistência, durabilidade e ductilidade. Estas melhorias são principalmente relevantes quando é utilizado reforço contínuo (Toledo Filho, 1997; Lima, 2004; Melo Filho, 2005; Silva, 2009; Melo Filho, 2012). Porém, compósitos reforçados com fibras curtas ainda não demonstraram ter um comportamento de múltipla fissuração sob tracção directa.

A utilização de fibras vegetais mostra-se bastante benéfica sob vários aspectos, incluindo o da preservação ambiental. Podem ser enumeradas várias vantagens, como sejam a grande disponibilidade de material, o reduzido gasto de energia e o baixo custo para a sua obtenção. Logo, estes conceitos têm impulsionado o desenvolvimento dos estudos científicos elaborados sobre este tema.

A fibra de sisal apresenta uma excelente resistência à tracção, mas, em contrapartida, apresenta uma reduzida adesão fibra-matriz (Guimarães, 1990). Devido a este facto, seria necessário um grande comprimento de fibra para que esta pudesse atingir a máxima tensão de tracção antes de ser arrancada da matriz e, assim, contribuir para a total transferência de tensões na matriz fissurada. Devido a esta limitação, é necessário recorrer a tratamentos químicos ou

físicos capazes de aumentar a capacidade de interacção fibra-matriz. O cumprimento desse objectivo proporcionaria uma melhor distribuição de tensões no reforço, conferindo, assim, um melhor comportamento ao compósito.

No caso do reforço em questão, isto é, fibras vegetais, é necessário garantir a durabilidade das mesmas no ambiente alcalino da matriz cimentícia. De acordo com vários autores (Farias Filho, 1999; Lima, 2004 e Melo Filho, 2005), uma solução possível para a vulnerabilidade das fibras em meio alcalino é o desenvolvimento de uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Com este objectivo, realizaram-se substituições parciais do cimento Portland por metacaulinita e resíduos calcinados de tijolos moídos para consumir o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) criado durante a hidratação do cimento. Adicionalmente, têm sido propostas algumas técnicas de tratamento, como seja a impregnação das fibras com substâncias bloqueadoras e/ou repelentes de água, a selagem da matriz (diminuição da quantidade e do tamanho dos poros bem como da sua interconectividade) e a modificação da mesma por meio do uso de cimentos com elevado teor de alumina.

O uso de uma matriz livre de hidróxido de cálcio resolve, potencialmente, o problema da deterioração das fibras. No entanto, a elevada absorção de água deste tipo de reforço, proveniente da sua estrutura porosa, leva a variações volumétricas, provocando, assim, uma redução da aderência das fibras à matriz cimentícia. Uma alternativa estudada na literatura para minimizar as variações dimensionais do reforço vegetal é a hornificação das fibras. A hornificação é um termo utilizado para descrever mudanças irreversíveis de fibras submetidas a processos de molhagem e secagem. Este tratamento provoca uma perda de capacidade de retenção de água nas fibras assim como modificações no seu comportamento mecânico (Brancato, 2008). Uma vez finalizado um ciclo de molhagem e secagem, a parede celular entra em colapso levando a modificações na sua estrutura, provocando fechamento do lúmen e deformações nas paredes das fibrocélulas.

Para além do tratamento das fibras, a introdução de materiais reciclados também tem vindo a ser estudada, devido à crescente preocupação ambiental. Neste estudo, esta solução foi explorada na forma de areia reciclada.

1.2 Objectivos da dissertação

O estudo elaborado tem como objectivo geral avaliar a influência do tratamento por ciclos de molhagem e secagem das fibras de sisal e a introdução de areia reciclada no comportamento mecânico de compósitos cimentícios com matriz livre de hidróxido de cálcio.

Pretende-se, em particular:

- Avaliar a influência do tratamento por ciclos de molhagem e secagem numa solução de hidróxido de cálcio (5 e 10 ciclos) nas propriedades mecânicas das fibras de sisal;

- Avaliar a influência da introdução de diferentes percentagens de areia reciclada e/ou fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos (tracção e flexão);
- Estudar a influência da hornificação no processo de fractura dos compósitos submetidos a esforços de tracção directa e flexão.

A pesquisa que se segue visa o desenvolvimento de um compósito de elevado desempenho mecânico e durabilidade, reforçado com fibras curtas de sisal submetidas ao processo de hornificação em matriz livre de hidróxido de cálcio. Deste modo, espera-se obter uma maior aderência fibra-matriz e compósitos que apresentem múltipla fissuração, tanto em flexão como em tracção directa.

1.3 Metodologia

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os tipos de fibras utilizados no reforço de argamassas à base de cimento e sobre os materiais substitutos de areia no mesmo tipo de argamassas.

Foi desenvolvido um programa experimental em que foram produzidos provetes com diferentes composições, tendo-se variado o reforço fibroso tratado (hornificado) ou natural entre 2% e 4% e a taxa de substituição de areia natural por areia produzida por material reciclado entre 25% e 50%. As fibras foram hornificadas através de ciclos de molhagem e secagem numa solução de hidróxido de cálcio (5 e 10 ciclos) após os quais se realizaram tanto ensaios de tracção directa como ensaios de aderência (*pull-out*) nas várias matrizes. Os provetes moldados dos compósitos foram submetidos, numa fase posterior, a ensaios de compressão uniaxial, de tracção directa e de flexão em quatro pontos.

1.4 Organização do documento

A dissertação encontra-se organizada da forma que se passa a descrever.

No presente capítulo apresenta-se uma introdução ao trabalho, salientando-se a relevância do tema numa perspectiva global, descrevendo-se os objectivos, a metodologia e a organização do estudo.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as características dos materiais das matrizes de compósitos reforçados com fibras e do material reciclado e expõem-se formas de tratamento para melhorar a adesão fibra-matriz.

O capítulo 3 apresenta as características dos materiais que foram empregues na produção dos compósitos, a metodologia do tratamento superficial aplicado nas fibras de sisal, a metodologia da produção de areia reciclada bem como os ensaios físicos e mecânicos realizados tanto nas fibras como nas argamassas produzidas.

No capítulo 4 faz-se uma análise e discussão de todos os resultados experimentais obtidos, uniformizando a elevada quantidade de informação adquirida. Faz-se uma análise detalhada a todas as grandezas posteriormente calculadas em cada ensaio comparando cada uma entre os vários compósitos produzidos.

As conclusões finais relativas ao estudo desenvolvido são descritas no capítulo 5, realçando-se os pontos mais importantes referentes à análise dos resultados obtidos na campanha experimental, descritos no capítulo anterior. Ainda neste capítulo perspectivam-se temas para novos trabalhos de investigação relacionados com o assunto desta dissertação.

2. Estado da arte

2.1. Considerações iniciais

O primeiro compósito à base de cimento Portland produzido numa escala industrial foi o cimento amianto (fibrocimento). Porém, devido aos elevados riscos para a saúde inerentes a este material, a produção destes compósitos foi proibida na maioria dos países industrializados. Desde então, foram realizados diversos estudos com o objectivo de encontrar uma fibra que possa substituir adequadamente o amianto e desenvolver os respectivos métodos de produção. Existem já alguns produtos à base de cimento a ser produzidos e comercializado tendo como reforço polpa de celulose, tela de fibra de viro e polipropileno, assim como fibras de poli (álcool de vinila), mais conhecidas como PVA (Lima e Toledo Filho, 2008).

Com a crescente preocupação ambiental, o interesse sobre o potencial de aplicação de fibras vegetais, como o sisal, como potencial substituto da fibra de amianto tem aumentado devido à sua disponibilidade, reduzido custo e consumo energético de produção quando comparado com as fibras manufacturadas (Roma *et al.*, 2008). Apesar da expectativa colocada sobre a possibilidade do uso de fibras de sisal na indústria da construção, e mais concretamente no Brasil onde esta existe em abundância, é necessário garantir a sua durabilidade no ambiente alcalino do cimento, como será referido posteriormente neste trabalho.

Por se tratarem de fibras de origem natural, estas não apresentam todas as mesmas características, ou seja têm secções transversais irregulares, o que dificulta o cálculo da respectiva área, apresentam formas diferentes dependendo da zona da qual foram extraídas da folha, i.e. do seu posicionamento, entre outras. Logo, é possível compreender que a introdução deste tipo de reforço traz uma grande variabilidade ao estudo e aos resultados dele obtidos, o que torna as possíveis conclusões em tendências de comportamento e não em propriedades constantes.

Para além do estudo do reforço de argamassas com fibras de sisal, é também possível a substituição parcial da areia por agregados reciclados de resíduos da construção e demolição tornando assim este material ainda mais ecológico.

No sector da construção, a produção de resíduos da construção e demolição (RCD) é inevitável desde há muito tempo, no entanto, só se começaram a desenvolver estudos mais específicos para avaliar as propriedades de desperdícios de alvenaria e betão a partir do início do século XX. Em muitos países (Estados Unidos, Japão, Rússia, Brasil, Alemanha, etc.) têm-se vindo a desenvolver variadas investigações, trabalhos e propostas de normalização na área da reciclagem de materiais de construção e demolição por motivos tanto económicos como ambientais. Porém, em Portugal, só se iniciou uma análise mais profunda nesta temática após a adesão à União Europeia (1986).

Uma vez que as áreas destinadas à deposição de entulho são caras, o respectivo transporte também e a deposição ilegal, infelizmente muito comum, prejudica a gestão de políticas ambientais e a população em geral, torna-se necessário encontrar uma utilização para uma grande percentagem de material inorgânico resultante das actividades da construção civil. Logo, a reutilização dos RCD contribui para a redução da exploração de recursos naturais e energéticos e ainda para a diminuição dos custos da construção. É por esta razão que se têm vindo a elaborar estudos e a avaliar a incorporação destes resíduos para alargar o conhecimento sobre o comportamento de novos materiais.

A característica inerente aos RCD é a sua heterogeneidade, que pode dificultar largamente a sua utilização. Por exemplo, o entulho conterá uma maior percentagem de material cerâmico durante a execução ou demolição de alvenaria com blocos cerâmicos ou de argamassa na fase de revestimentos. Outro problema existente é a contaminação do entulho, que pode levar a que a sua reciclagem não seja possível, no entanto, este facto pode ser evitado através de técnicas racionais de construção e demolição.

Resumindo, as vantagens da reciclagem dos resíduos da construção e demolição como agregado na produção de argamassas são a utilização do entulho no próprio local, a economia associada à aquisição de matéria-prima, uma vez que se procede à substituição de materiais convencionais por reciclados, a mitigação da poluição provocada pelo entulho e a preservação das reservas naturais de matéria-prima.

Neste capítulo introduz-se inicialmente, na secção 2.2, alguns tipos de fibras existentes como reforço de matrizes cimentícias, dando maior ênfase, naturalmente, às fibras de sisal que serão as utilizadas neste estudo.

De seguida, na secção 2.3, expõe-se o funcionamento de um compósito com melhor e pior adesão entre a fibra e a matriz, enumerando métodos utilizados na bibliografia tanto no melhoramento da fibra como da matriz de forma a alcançar um melhor comportamento mecânico do compósito.

Na secção 2.4 mostram-se as vantagens e desvantagens de se utilizarem fibras longas ou curtas no reforço de compósitos, descrevendo-se posteriormente as características das fibras que mais influência têm nas propriedades mecânicas dos compósitos. Ainda nesta secção analisa-se separadamente as resistências à compressão, tracção por flexão e tracção directa tanto em compósitos com a introdução de fibras curtas como com fibras longas e alinhadas. Para terminar, aborda-se o tema da durabilidade das fibras no interior da matriz, descrevendo-se factores de degradação, hipóteses de melhoria e procedimentos experimentais.

Depois da análise bibliográfica feita a argamassas com introdução de fibras vegetais, apresenta-se uma revisão dos compósitos cimentícios com introdução de areia reciclada. Descreve-se inicialmente na secção 2.5 a necessidade de reciclar resíduos da construção e demolição. Seguidamente, apresentam-se algumas campanhas experimentais sobre esta temática, analisando as respectivas resistências à compressão e à flexão assim como o módulo

de elasticidade destes materiais. Analisa-se, também, as diferenças de consumo de água entre argamassas com introdução de agregados reciclados e as respectivas argamassas de referência.

2.2. Fibras utilizadas no reforço de compósitos cimentícios

A gestão das reservas energéticas mundiais ainda disponíveis têm sido uma preocupação sempre presente nos países desenvolvidos nas últimas duas décadas. Assim, dado o aumento do preço da energia, é estritamente necessário racionalizar o seu uso através da introdução de novos materiais, cujo respectivo consumo seja menor. Um desafio para os dias de hoje envolve a fabricação de materiais compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras naturais. Já no passado, o Homem utilizava palha ou capim com o intuito de reforçar tijolos secos ao sol, conhecidos como adobes (Quagliarini, 2010).

A introdução de fibras descontínuas adicionadas a argamassas desenvolveu-se a partir da década de 60, quando surgiram no mercado diferentes tipos de fibras como sejam as metálicas, minerais e as de vidro (Brescansin, 2003). A Figura 2-1 esquematiza algumas das diferentes fibras utilizadas no reforço de compósitos cimentícios.

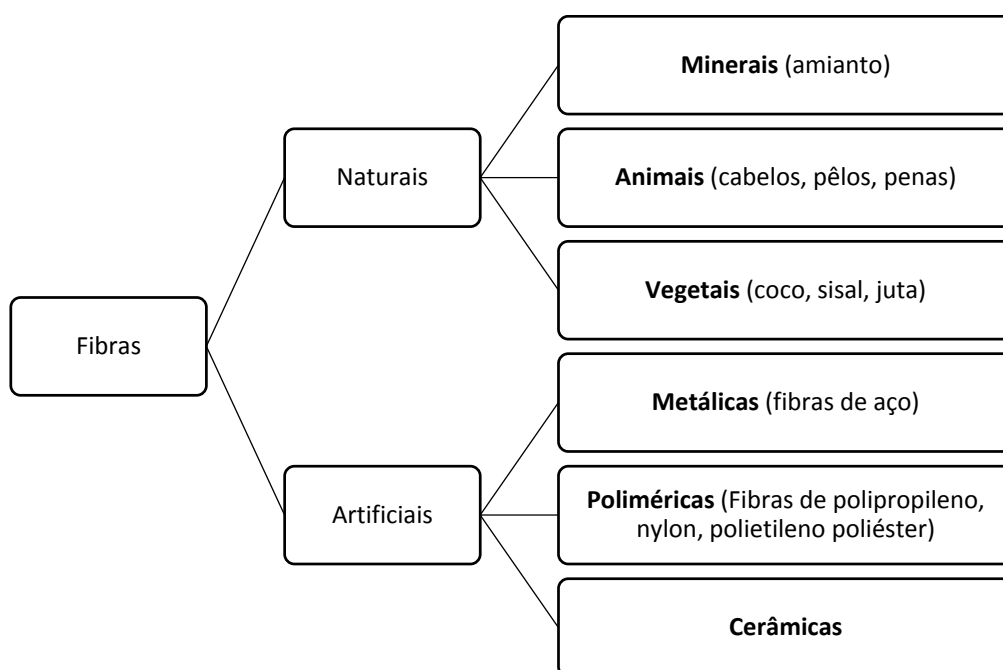


Figura 2-1 - Tipos de fibras utilizados no reforço de compósitos cimentícios

Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente pelo uso de fibras naturais em substituição das fibras sintéticas como reforço de compósitos poliméricos, principalmente por serem biodegradáveis, atóxicas, de fonte renovável e apresentarem baixo custo, o que coincide com os esforços actuais de protecção ao meio ambiente (Martin *et al.*, 2009). Neste trabalho serão estudadas as fibras de sisal por serem umas das mais resistentes, a que acresce o facto

de todo o trabalho experimental ter sido realizado no Brasil onde estas se encontram em grande abundância.

As fibras de sisal são obtidas da planta *Agave sisalana* originária da Península de Yucatan, no México. O nome recebido deve-se ao facto da erva nativa se chamar zizal-xiu (Martin *et al.*, 2009). Esta planta foi introduzida no Brasil no início do século XX, concentrando-se o seu cultivo na região nordeste do país onde as condições de desenvolvimento se mostraram ser as ideais, principalmente nos estados da Bahia e Paraíba, que concentram 90% da produção nacional (Ferreira, 2012). De acordo com Chand *et al.* (1988), o clima quente e a grande luminosidade são requisitos base para o crescimento desta planta, sendo muito resistente a períodos de estiagens, apesar de se desenvolver melhor em áreas com presença de água.

As *Agave* são plantas suculentas que possuem tecidos carnosos ricos em água para tolerarem os períodos de seca, analogamente ao que acontece com os cactos (Ballester Olmos, 1995). Contudo, esta planta normalmente não frutifica, apenas floresce entre cinco e oito anos. Originária dos trópicos, segundo Ferreira (2012), possui folhas lisas com cerca de 10 cm de largura e 150 cm de comprimento das quais são extraídas as fibras que, secas, rendem 2 a 5,5% em relação ao seu peso verde. As folhas necessitam ser golpeadas e lavadas repetidas vezes de forma a retirar a polpa e as mucilagens para obter as fibras ou também podem ser conseguidas através de raspadeiras ou defibradeiras (Medina, 1954). De seguida, estas têm que ser centrifugadas para retirar o excesso de água e colocadas ao sol para secar, tendo este processo uma acção branqueadora. Depois de secas, as fibras são escovadas, classificadas e enfardadas como se ilustra na Figura 2-2.



Figura 2-2 - Extração das fibras longas de sisal: (a) planta agave sisalana; (b) desfibrilamento mecânico; (c) secagem; (d) enfardamento para venda (Ferreira, 2012)

Na Tabela 2-1 encontram-se as propriedades físicas e mecânicas típicas da fibra de sisal segundo diversas pesquisas.

Tabela 2-1 - Valores típicos das propriedades das fibras de sisal (Melo Filho, 2012)

Propriedade	Média	Referência
Massa específica (g/cm ³)	0,9 - 1,0	Toledo Filho (1997)
Resistência à tracção (MPa)	500 - 650	Toledo Filho (1997); Silva <i>et al.</i> (2008)
Módulo de elasticidade (GPa)	10 - 22	Toledo Filho (1997); Mohanty <i>et al.</i> (2000); Silva <i>et al.</i> (2008)
Deformação na rotura (%)	2,0 - 3,1	Toledo Filho (1997); Mohanty <i>et al.</i> (2000); Silva <i>et al.</i> (2008)
Absorção de água até à saturação (%)	200 - 250	Toledo Filho (1997)
Diâmetro (µm)	50 - 200	Mohanty <i>et al.</i> (2000)

Quanto à sua morfologia, cada fibra é um feixe de microfibras ocas, com comprimento bastante variável e diâmetro entre 0,1 e 0,3 mm (Li *et al.*, 2008). De acordo com Melo Filho *et al.* (2007), estas são unidas através da lamela média que é constituída por hemicelulose e lignina e a resistência depende do conteúdo de celulose e do ângulo espiral que as microfibras fazem em relação ao eixo central da fibra (Figura 2-3).

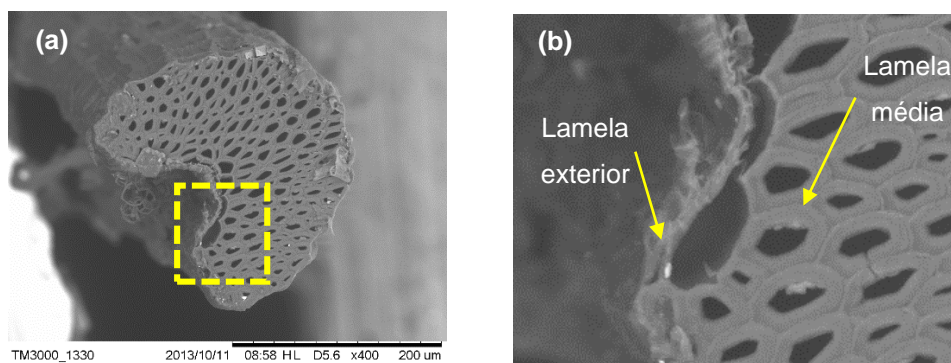


Figura 2-3 - Estrutura das fibras de sisal: (a) fibra composta por microfibras ocas unidas pela lamela média; (b) detalhe da lamela média (composta por hemicelulose e lignina) e da lamela exterior

O facto de se tratar de uma fibra natural com muitos parâmetros variáveis torna a introdução destas em qualquer estudo um desafio, devido, tanto à irregularidade da secção transversal, dificultando um cálculo normal das diferentes resistências, bem como variando o seu mecanismo de ancoragem com a matriz, um vez que esta propriedade está directamente ligada à forma da fibra (Silva, 2009).

2.3. Métodos utilizados para melhorar a adesão fibra-matriz

Uma das propriedades fundamentais dos compósitos reforçados com fibras é a interacção destes dois componentes, pois esta afecta consideravelmente o desempenho da mistura quando submetida a esforços mecânicos. O estudo e a compreensão desta interacção é de grande importância para ser possível prever o comportamento dos compósitos.

As fibras vegetais apresentam variações dimensionais não desprezáveis devido à sua absorção de água. Após a secagem, reduzem consideravelmente a sua dimensão radial, o que pode prejudicar a interacção fibra-matriz, reduzindo a ductilidade e a resistência pós-pico do material (Savastano Jr., 2000).

Aquando de um boa interacção fibra-matriz, o processo de arrancamento segue algumas fases características. O início do carregamento é representado por uma interacção elástica, ou seja, antes da fissuração da matriz, o mecanismo dominante é a transferência de tensões elásticas e os deslocamentos da matriz e das fibras são geometricamente compatíveis. Esta fase termina com o aparecimento da primeira fissura da matriz à qual corresponde a tensão adesional calculada pela divisão da força exercida no momento referido pela área lateral da fibra embebida. Numa fase mais avançada do carregamento, iniciam-se deslocamentos relativos entre as fibras e a matriz devidos à perda de aderência na interface. A transferência de tensões neste estágio provém de um deslizamento friccional.

Assume-se que esta tensão de atrito ou friccional desenvolvida é uma tensão tangencial uniformemente distribuída ao longo da interface fibra-matriz. Este processo tem uma maior importância no caso pós-fissuração, em que as fibras cruzam as fissuras. Propriedades como a resistência e a deformação última do compósito são controladas por este processo de transferência de tensões (Lima, 2004).

Através do ensaio de arrancamento, Toledo Filho (1997) e Silva (2009) avaliaram a aderência das fibras de sisal a uma matriz cimentícia. Após proceder a substituições de cimento Portland por micro-silica e escória, Toledo Filho (1997) observou um aumento de 24% no valor da carga adesional. Esta melhoria foi atribuída pelo autor aos materiais finos capazes de reduzir a porosidade da zona de transição melhorando, assim, a aderência entre a matriz e as fibras.

Como anteriormente referido, as diferentes morfologias que as fibras de sisal apresentam têm uma grande influência na adesão fibra-matriz. Silva *et al.* (2011) avaliou três geometrias diferentes de secções transversais de fibras de sisal: ferradura, arco e arco retorcido (Figura 2-4) e constatou que a morfologia da fibra interfere directamente na resistência à adesão. Nesse estudo, os valores da tensão de adesão mais elevados ocorreram para a última forma (arco retorcido), com valores médios de 0,92 e 0,42 MPa para as resistências adesional e friccional, respectivamente.

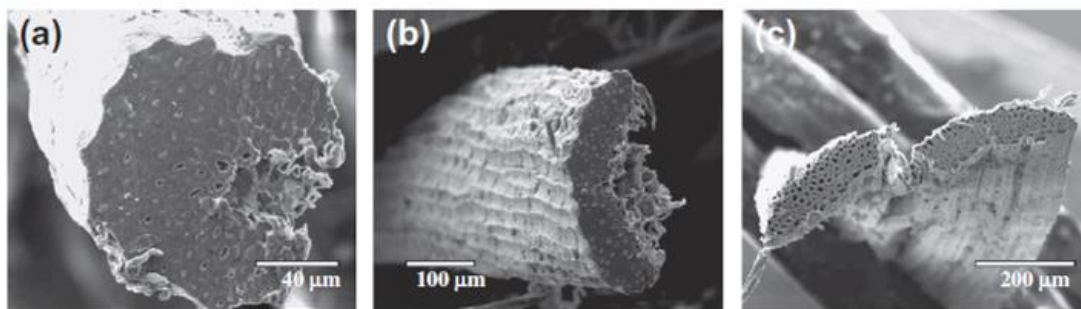


Figura 2-4 - Diferentes morfologias da fibra de sisal: (a) ferradura, (b) arco e (c) arco retorcido (Silva *et al.*, 2011)

Apesar de os valores de tensão de adesão serem próximos aos das fibras sintéticas, as variações de volume devidas à elevada capacidade de absorção de água das fibras de sisal e à reduzida adesão química, provocam grande perda de contacto com a matriz (Li *et al.*, 2008). Consequentemente, seria necessário um grande comprimento de ancoragem para que a fibra pudesse atingir a máxima tensão de tracção antes de ser arrancada da matriz, uma vez que o comprimento de reforço influencia directamente a força máxima de arrancamento.

O trabalho de Silva *et al.* (2011) resultou em valores médios de tensão de *pull-out* de 0,36 e 0,30 MPa para comprimentos de 10 e 40 mm de fibras de sisal, respectivamente.

Devido a estas deficiências, mostrou-se necessário proceder a algumas alterações, seja na matriz ou nas fibras, aplicando tratamentos químicos ou físicos capazes de aumentar a capacidade de interacção fibra-matriz, provocando uma melhor distribuição de tensões para o reforço, proporcionando, assim, um melhor comportamento mecânico ao compósito.

Em vez de alterar a matriz como anteriormente mencionado no estudo de Toledo Filho (1997), Claramunt *et al.* (2010) e Lopes *et al.* (2010) tentaram reduzir a hidrofiliçidade aplicando tratamento cíclicos em água e em ácido acético, respectivamente, promovendo uma menor expansão volumétrica de polpas e fibras assim como modificações nas propriedades mecânicas destas. Para o caso das fibras, foi possível identificar um enrijecimento da sua estrutura uma vez que ocorreram reduções na resistência à tracção e na capacidade de deformação.

Segundo Ferreira (2012), Claramunt *et al.* (2010) aplicou tratamentos cíclicos de molhagem e secagem em polpas de *pinus* com o objectivo de estabilizar dimensionalmente o seu reforço. Estas foram secas numa estufa com circulação de ar durante 7 horas a 60 °C, após o que eram imersas em água durante a noite. Este processo foi repetido até quatro vezes. Depois de tratadas, as polpas foram analisadas através de um equipamento de análise óptica (método de luz polarizada), capaz de determinar medidas de mais de 10000 fibras por análise (Figura 2-5). Através deste estudo foi possível não só identificar uma diminuição na capacidade de absorção de água, mas também um ganho de estabilidade dimensional por parte das microfibras.

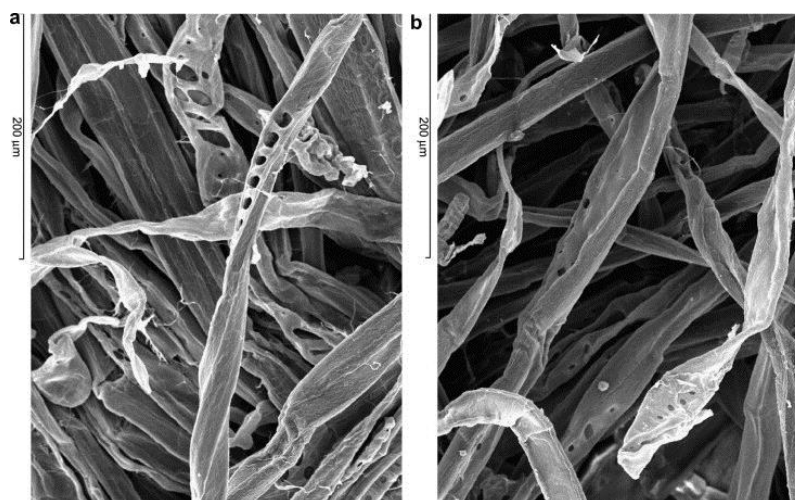


Figura 2-5 - Micrografia eletrônica de varredura: (a) polpa inicialmente alvejada; (b) polpa não alvejada (Claramunt *et al.*, 2010)

Para além do tratamento efectuado por Claramunt *et al.* (2010), outros autores desenvolveram diversos métodos de tratamento superficial visando a melhoria da interface fibra-matriz tanto por estabilidade dimensional como por processos físicos de alteração na estrutura da fibra.

Angrizani (2006), citado por Ferreira (2012), optou pelo tratamento superficial das fibras imergindo-as em água destilada durante uma hora, após a qual foram secas em estufa com circulação de ar a 60 °C durante duas horas. Estas fibras tratadas deram origem a compósitos com valores superiores de resistência à tracção directa, flexão e módulo, originando ainda uma menor dispersão dos resultados.

Selvam e Santiago (2007) efectuaram outro tratamento a fibras de coco, segundo um processo desenvolvido pela Embrapa do Ceará. As fibras foram imersas em água a 80 °C durante cerca de uma hora sob agitação, sendo posteriormente lavadas em água corrente. A secagem foi também efectuada em estufa durante apenas uma hora. Através de uma análise pelo Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) verificou-se a eliminação da camada superficial resultando numa área de contacto maior devido à exposição das fibrilas (reentrâncias) e marcas globulares (saliências). Pelos resultados obtidos foi possível comprovar que o tratamento foi eficaz e economicamente viável para aplicações em compósitos de engenharia. O tratamento referido com água quente minimizou os resíduos existentes, porém, é de notar que não foram extraídas componentes internas da fibra que envolveriam alterações nas propriedades mecânicas das mesmas.

Machado *et al.* (2008), por sua vez, utilizou uma solução de hidróxido de sódio, Na(OH)₂, na qual emergiu as fibras durante uma hora e meia a uma temperatura de 80 °C sem agitação mecânica. De forma a remover impurezas e substâncias solúveis provenientes deste tratamento químico, as fibras foram posteriormente lavadas com água corrente e secas em estufa. Estes

ciclos provocaram danos nas fibras, no entanto, a limpeza superficial promoveu uma melhor adesão fibra-matriz.

Na pesquisa de Angrizane *et al.* (2006) foram utilizadas fibras de 1, 3 e 5 cm, em que cada tamanho foi fraccionado em três partes. Uma das partes permaneceu sem tratamento superficial, outra parte das fibras foi imersa numa solução alcalina de $\text{Na}(\text{OH})_2$ durante uma hora, após a qual foram secas em estufa com circulação de ar a 60 °C e a última foi submetida a um banho de água destilada (H_2O). Os resultados obtidos mostraram um melhor desempenho geral das amostras com fibras tratadas, que apresentaram valores superiores de resistência à tracção e do módulo de elasticidade, apesar da dispersão identificada ser atribuída ao facto de se tratarem de fibras naturais. No entanto, houve uma diminuição da resistência ao impacto por parte dos compósitos com fibras tratadas na solução de $\text{Na}(\text{OH})_2$ devido à fragilização do reforço. Este estudo mostrou que o tratamento com água destilada parece ser uma solução com um custo-benefício interessante, visto que apesar de não alterar significativamente as propriedades da fibra, não mostrou danificá-la.

A utilização de um tratamento com uma solução foi também estudada no trabalho de Lopes *et al.* (2010), em que tal tratamento foi denominado acetilação. As fibras foram inicialmente embebidas numa solução aquosa de $\text{Na}(\text{OH})_2$ a 1% durante uma hora e, de seguida, procedeu-se ao tratamento de acetilação. Seguiram-se lavagens sucessivas até que a solução de lavagem final atingisse um pH neutro e as fibras foram posteriormente colocadas em estufa a 60 °C para secar durante 24 horas. A metodologia adoptada para a acetilação foi a de d'Almeida *et al.* (2005), onde as amostras das fibras foram acondicionadas num reator de condensação sob agitação e em banho termostático com solução de anidrido acético, na proporção de 1,5:1,0 em massa (Ferreira, 2012). Como catalisador da mistura adicionaram-se 5 gotas de ácido sulfúrico a cada 200 ml de solução. A temperaturas entre 100 e 120 °C os tempos reacionais (contacto entre fibras e solução) foram de 1 e 3 horas. Após esta duração, as amostras foram primeiramente lavadas com água corrente e posteriormente com água destilada na qual permaneceram por uma hora sendo que a água de lavagem final apresentava pH entre 5 e 6. Concluído o ciclo, as fibras eram mais uma vez secas em estufa a 60 °C durante 24 horas e armazenadas em dessecador com sílica gel até ao momento dos ensaios. Em todas as condições estudadas neste trabalho, o tratamento da acetilação provocou uma redução da capacidade de absorção de água por parte das fibras de sisal. Foram identificadas reduções mais acentuadas na resistência mecânica, maioritariamente quanto à força e extensão máxima até à rotura, das fibras acetiladas durante três horas, demonstrando assim um endurecimento na estrutura destas. A acetilação durante uma hora a 120 °C mostrou as melhores características físico-mecânicas entre todos os tratamentos estudados com redução considerável da hidroflicidade, perdas admissíveis nas propriedades mecânicas e aumento satisfatório de grupos polares com o tratamento, assim como modificação da sua superfície (Figura 2-6).

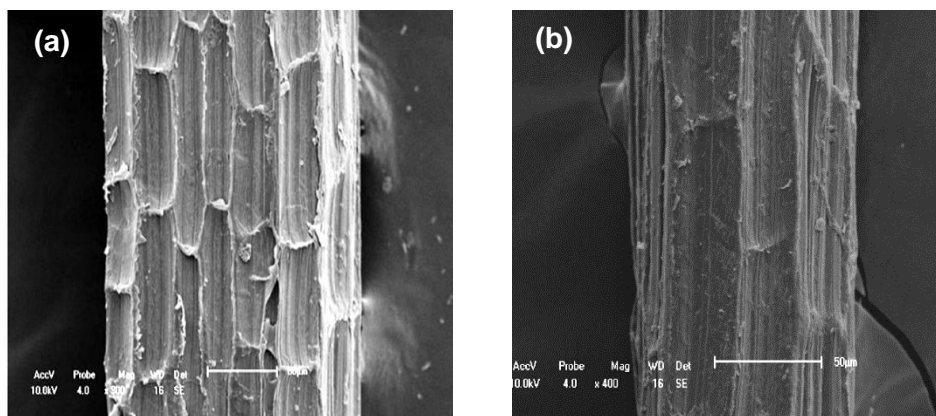


Figura 2-6 - Micrografias da superfície das fibras de sisal (a) sem tratamento e (b) acetiladas por uma hora a 120 °C (Lopes et al., 2010)

Para além dos tratamentos à base de soluções referidos, existem também alguns processos físicos para tentar melhorar a adesão fibra-matriz. Ferreira (2012) exemplifica alguns desses processos como a mercerização e despoldamento aplicados por Kin e Netravali (2010) e Zhong (2011). Ambos promovem a desfibrilação das fibras vegetais aumentando, assim, a área superficial de contacto.

No estudo de Kim e Netravali (2010), a tensão de rotura e o módulo de elasticidade dos compósitos aumentaram com o reforço de fibras mercerizadas de 168 MPa e 2,8 GPa para 188,5 MPa e 3,8 GPa, respectivamente.

De acordo com Zhong (2011), o processo de despoldamento provoca a microfibrilação superficial das polpas de sisal, o que teve uma grande influência nas propriedades mecânicas dos compósitos híbridos com sisal e fibras de aramida. A melhor resistência ao arrancamento deve-se ao facto das microfibrilas formadas na superfície das polpas de sisal promoverem uma maior área de contacto entre o reforço e a matriz.

2.4. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais

2.4.1. Considerações gerais

A pesquisa sobre a utilização de fibras vegetais teve sempre como objectivo melhorar as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, para além dos ganhos energéticos e económicos associados à extracção daquelas fibras. Este esforço é constante apesar da utilização de fibras vegetais levar a propriedades inferiores às fibras utilizadas para produção de materiais de elevado desempenho, como por exemplo o PVA.

De acordo com Ferreira (2012), Sahmaran e Li (2009) definem Engineered Cementitious Composites (ECC) como uma classe de compósitos cimentícios de elevado desempenho (*high performance fibre reinforced cementitious composites*) – HPFRCC. Estas misturas são concebidas a partir de optimização micromecânica para permitir elevada tenacidade e

durabilidade, uma vez que estes compósitos permitem o controlo da abertura de fissuras que chegam em muitos casos a valores médios inferiores a 100 micrómetros sob elevadas taxas de deformação.

Note-se que as propriedades de interesse para aplicações em engenharia civil incluem a resistência, a absorção de energia, a rigidez, a durabilidade e por último, mas não menos importante, o custo e a facilidade de utilização (RILEM, 1996).

As melhorias encontradas no desenvolvimento de materiais reforçados com fibras vegetais podem ser melhores do que o expectável. Destacam-se os compósitos reforçados com fibras curtas, devido à facilidade de dispersão na matriz, tornando os custos menores, uma vez que não é necessário o seu alinhamento. Apesar do comprimento de ancoragem ser reduzido, as fibras curtas são vantajosas, uma vez que um comprimento próximo de 50 mm facilita muito a execução, a dispersão e reduz o custo.

A elevada tenacidade e resistência à flexão apresentadas por estes materiais constituem um ganho de eficiência mecânica; no entanto, para garantir um elevado desempenho, são necessárias melhorias ainda mais profundas, como sejam o controlo de fissuração e o endurecimento acompanhado de um menor espaçamento de fissuras, para que este material se torne efectivamente num ECC.

A interface fibra-matriz é um dos parâmetros micro-mecânicos que rege o desempenho deste tipo de compósitos (Li *et al.*, 2004). Podem ser obtidas melhorias da zona de transição através de adições minerais e modificações nas características dos agregados utilizados, sempre com o objectivo de garantir uma melhor reologia da mistura, dispersão e ancoragem das fibras. Muitos autores estudaram o comportamento mecânico dos materiais cimentícios, avaliando a influência do volume de fibras, de adições minerais e a respectiva relação com a melhoria na resistência e durabilidade dos compósitos, assim como a influência da granulometria dos agregados e da organização do reforço (Li *et al.*, 2004).

2.4.2. Propriedades mecânicas

As características relativas ao reforço influenciam em grande medida o comportamento mecânico dos compósitos, como por exemplo o tipo e a geometria da fibra, a fracção volumétrica, a resistência e o módulo de elasticidade da fibra. No entanto, outros factores como a orientação em que as fibras são dispostas no interior da matriz também têm grande influência nas propriedades mecânicas do compósito. A fase onde este efeito se torna mais evidente é a pós-fissuração, pois é neste estágio que as fibras cruzam as fissuras que se propagam na matriz, transmitindo assim a carga de um ponto para outro e impedindo uma rotura frágil do material. O mecanismo de transferência de tensões em matrizes fissuradas influenciará a resistência e a deformação última do compósito e ainda o seu modo de rotura (Velasco, 2008).

Como referido anteriormente e tal como esquematizado na Figura 2-7, existem várias formas de dispersar as fibras no interior de uma matriz.

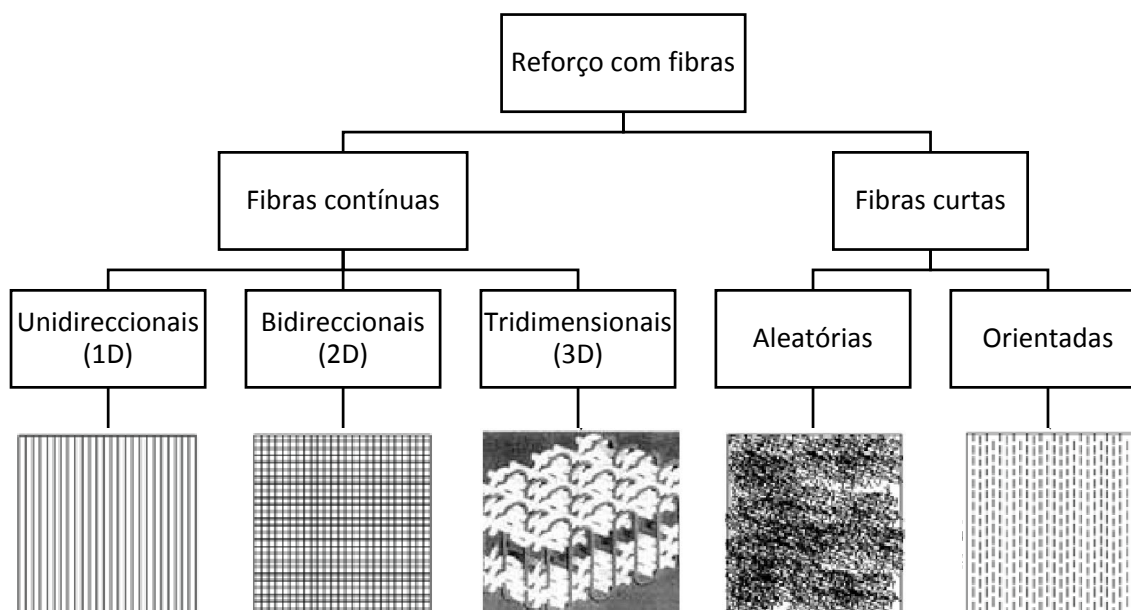


Figura 2-7 - Tipos de dispersão de reforço em materiais compósitos

O tipo de arranjo das fibras é escolhido dependendo do tipo de aplicação e do método de fabrico dos compósitos. Geralmente, compósitos produzidos com fibras curtas dispersas aleatoriamente no interior da matriz apresentam propriedades mecânicas inferiores às dos compósitos produzidos com fibras longas orientadas paralelamente ao carregamento (Toledo Filho, 1997; Lima, 2004; Melo Filho, 2005; Silva, 2009). No entanto, este último método é mais trabalhoso e implica custos mais elevados que o primeiro.

No âmbito da construção civil, os compósitos de secção fina reforçados com fibras curtas são conhecidos desde o século XVIII quando Ludwig Hatschek produziu, na Áustria, placas de cimento e amianto com uma máquina de prensar papel modificada (Gale, 1994). O melhoramento do processo de fabricação Hatschek levou a que, a partir da sua produção em série, o cimento amianto (cimento + fibras de amianto) se tornasse o principal produto laminado utilizado na construção civil, em forma de telhas, caixas de água, painéis e divisórias (Melo Filho, 2012).

O estudo de Toledo Filho (1997) foi desenvolvido com o intuito de compreender questões relativas à durabilidade e ao comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e coco. No seu trabalho foi utilizado um traço em massa de 1:1:0,4 (cimento:areia:água) em diferentes misturas com substituição de até 40% de cimento Portland por micro-sílica e escória. A estas matrizes foram adicionados 3% (em volume) de fibras com 25 mm. Os compósitos reforçados com fibras curtas de 15 a 25 mm apresentaram propriedades mecânicas inferiores às dos compósitos produzidos utilizando fibras de 50 mm. No entanto, para o primeiro grupo, foram observados ganhos de tenacidade após o surgimento da primeira fissura.

Lima (2004) avaliou o comportamento mecânico de compósitos livres de hidróxido de cálcio reforçados com fibras vegetais. Foram incorporadas nas matrizes 1, 2 e 3% (em relação à massa de materiais finos) de fibras de sisal com comprimento nominal de 25 mm. Nos ensaios à

tracção dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal, o comportamento foi determinado pela matriz até ao aparecimento da primeira fissura, onde se verificou uma redução brusca da resistência e uma transferência de cargas para as fibras. Quanto ao comportamento pós-fissuração, este foi caracterizado pelo aparecimento de uma única fissura com redução da carga até à rotura que equivale à situação de arrancamento das fibras da matriz. No entanto, foram observados ganhos significativos de tenacidade.

Também foram obtidos resultados promissores por d'Almeida *et al.* (2010) com adição de fibras de cuará em matrizes livres de hidróxido de cálcio. Observaram-se múltiplas fissuras para uma percentagem de 4% de fibras de 50 mm quando os provetes foram submetidos a esforços de tracção, obtendo-se uma tensão última de 4,59 MPa e uma tenacidade de 2,13 kJ/m².

Melo Filho (2012) efectuou mais uma pesquisa no mesmo sentido das anteriores, porém incorporou 2, 4 e 6% de fibras curtas de sisal de 25 e 50 mm em matrizes à base de cimento. Este autor utilizou uma matriz auto-compactável com agregados de dimensão máxima de 1,18 mm. Com esta matriz conseguiu que compósitos reforçados com fracções volumétricas de sisal de 6% e comprimento de 25 mm fossem moldados com adequado comportamento reológico (mistura trabalhável). Quando submetidos a esforços mecânicos, os compósitos apresentaram múltiplas fissuras em flexão e valores de tenacidade em flexão (calculados até um deslocamento de 20 mm) de cerca de 3 kJ/m². As amostras apresentaram também um bom comportamento quando submetidas a esforços de tracção directa, isto é, surgiram uma a três fissuras durante o ensaio, denotando uma boa capacidade para a transferência de esforços, no entanto, não apresentaram endurecimento após o surgimento da primeira fissura.

Lima (2004) conseguiu conferir uma maior durabilidade aos compósitos através de tratamentos com micro-sílica e escória, porém, quando os compósitos foram submetidos a ensaios de tracção e flexão, o comportamento apresentado incluiu amolecimento após um modo de rotura caracterizado pela abertura de apenas uma fissura (Figura 2-8).

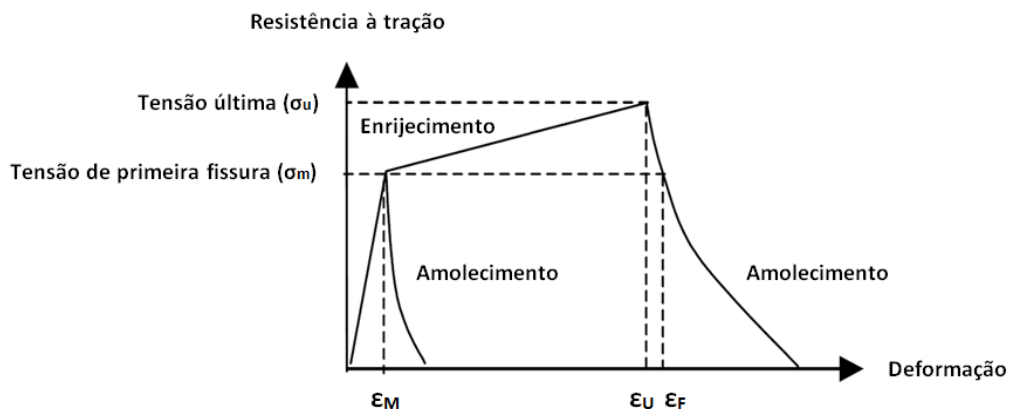


Figura 2-8 - Definição da tensão das primeiras fissuras, tensão última (de pico), endurecimento (enrijecimento) na deformação e amolecimento (adaptado de SONG, 2008)

O autor concluiu que os compósitos reforçados com fibras vegetais curtas não apresentaram múltipla fissuração porque a fibra que cruza a fissura não apresenta comprimento de embebimento suficiente ($l < l_{crit}$) para transmitir, ao longo deste comprimento, tensões maiores do que as tensões de rompimento da matriz. Neste momento, inicia-se um processo de arrancamento das fibras, em que as tensões envolvidas são as resultantes do processo de coesão da interface fibra-matriz e posteriormente do deslizamento friccional. Na tracção directa, o comportamento pós-fissuração é então caracterizado pelo amolecimento, ou redução da resistência, até à rotura do compósito, após o arrancamento das fibras.

2.4.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade de referência na classificação de materiais à base de cimento e influencia, indirectamente, a sua durabilidade. Pelo ensaio de compressão e pelo respectivo gráfico tensão-deformação, é possível obter, para além da resistência à compressão, outras propriedades necessárias ao dimensionamento estrutural, como sejam a deformação máxima, o módulo de elasticidade e a tenacidade.

A maioria das fibras vegetais apresenta um módulo de elasticidade reduzido, o que leva a que a sua introdução em matrizes cimentícias seja mais benéfica no incremento da tenacidade da matriz do que no aumento da sua resistência. Segundo Toledo Filho (1997), a adição de fibras vegetais reduz a resistência à compressão da matriz cimentícia e, de forma menos acentuada, o módulo de elasticidade. Contudo, o confinamento do material conseguido pela adição de fibras atrasa a propagação da primeira fissura e aumenta a ductilidade do material.

Alguns estudos realizados sobre esta temática mostram que a introdução de fibras de sisal e coco em matrizes cimentícias reduz a resistência à compressão das próprias matrizes entre 18% e 32%. Quanto ao módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com fibras de sisal e de coco, esta grandeza diminuiu de 6% a 15% e de 1,3% a 5%, respectivamente. Como indicado anteriormente, também neste estudo as fibras confinaram o material, retardando a propagação da primeira fissura e aumentando a tenacidade pós-carga de pico do material (Toledo Filho, 1997).

Lima (2004) investigou o comportamento das propriedades mecânicas de argamassas reforçadas com fibras de sisal com comprimento de 25 mm em fracções volumétricas de 1%, 2% e 3%, fazendo uma comparação com a mesma argamassa sem reforço. A resistência à compressão em compósitos reforçados com fibras de sisal apresentou reduções de 7,9% a 24,9%, sendo que a maior redução se verificou para uma fracção de 3% de fibras vegetais. Relativamente aos valores da tenacidade, o aumento registado foi de 60,8% nas argamassas reforçadas com 1% de fibras em relação à matriz base. Para os reforços de 2% e 3% de fibras o aumento foi ainda maior, respectivamente 76,5% e 66,7%.

Picanço e Ghavami (2008) estudaram o comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras de cuará, tendo verificado que a adição destas fibras à matriz cimentícia

era responsável por conferir maior ductilidade ao compósito após a fissuração da matriz. Logo, o compósito apresentou grandes deformações devido à contínua absorção de energia, ao invés da fractura frágil da matriz no início da fissuração em provetes não reforçados.

2.4.2.2. Resistência à tracção directa

Analogamente à avaliação do comportamento à compressão e à flexão, o comportamento à tracção directa de compósitos reforçados com fibras é determinado pela matriz até ao aparecimento da primeira fissura. Após a fissuração da matriz ocorre a transferência de carga da matriz para as fibras, levando a um desenvolvimento de tensões e deformações maiores para o compósito em relação à matriz sem reforço.

O gráfico tensão-deslocamento obtido através do ensaio de tracção directa é influenciado pela geometria das fibras, pela resistência da matriz e pela fracção volumétrica do reforço. Uma propriedade que também constitui um factor relevante no que se refere ao comportamento do compósito é o comprimento e a orientação das fibras: a adição de fibras longas e alinhadas na direcção do carregamento acarreta maiores acréscimos nos valores de resistência do que a adição de fibras curtas distribuídas aleatoriamente na matriz. Tal pode ser explicado pelo facto de o comprimento das fibras ser suficiente para uma redistribuição de tensões, resultando em múltiplas fissuras e num incremento da resistência. Até a utilização de fibras de reduzido módulo de elasticidade como reforço de matrizes cimentícias conduz a um comportamento pós-fissuração com ganho de resistência denominado "*strain hardening*" (Melo Filho, 2012).

A pesquisa de Lima (2004) incluiu também ensaios de tracção directa em laminados à base de cimento reforçado com fibras curtas de sisal. O comportamento pós-fissuração revelou que, em oposição à rotura brusca da matriz (sem fibras), estes compósitos conseguiram manter um valor de carregamento até a ocorrência de deformações bem maiores que as de pico. Tal como explicado anteriormente, o comportamento do compósito é regido pela matriz até ao aparecimento da primeira fissura, momento a partir do qual se verifica uma redução brusca de resistência e a transferência de carga para as fibras. A resposta pós-fissuração do compósito é caracterizada pela abertura de uma só fissura com redução de carga até à rotura, que corresponde ao arrancamento das fibras da matriz ou à rotura das mesmas.

Na pesquisa de Silva (2009), que incluiu ensaios de tracção directa em compósitos laminados à base de cimento reforçados com fibras longas e alinhadas de sisal, observou-se um comportamento de endurecimento. Os gráficos tensão-deformação correspondentes apresentaram um comportamento de pós-fissuração caracterizado pela múltipla fissuração e com aumentos significativos na resistência à tracção directa. Este estudo mostrou a potencialidade do uso de laminados à base de cimento reforçados com fibras longas e alinhadas de sisal em sistemas estruturais.

2.4.2.3. Resistência à tracção por flexão

Guimarães (1987) analisou e avaliou o comportamento mecânico de argamassas de cimento reforçadas com fibras de sisal e coco. O autor fez variar o comprimento das fibras, as relações água-cimento e areia-cimento da matriz, a fracção volumétrica das fibras no compósito e o processo de moldagem. Observou que as fibras de sisal podiam aumentar a resistência à flexão assim como a ductilidade, enquanto as fibras de coco, apresentando menor peso específico, garantiam também um acréscimo de ductilidade pós-fissuração.

Os resultados dos ensaios de flexão de Lima (2004) mostraram que fibras curtas de sisal distribuídas aleatoriamente em matrizes cimentícias levaram a um aumento do deslocamento último, aumentando a tenacidade do material. Por outro lado, o reforço com fibras longas e alinhadas numa direcção permitiram o aumento da resistência posteriormente à fissuração da matriz e o desenvolvimento de múltipla fissuração à tracção e flexão.

Silva (2009) realizou também ensaios de flexão em compósitos reforçados com fibras longas de sisal (60 mm). A sua pesquisa englobou três variáveis diferentes: o volume de fibras, o número de camadas de reforço e a influência da pressão de moldagem. Os compósitos apresentaram tensão de rotura superior à tensão da matriz base, tanto em flexão como em tracção directa. O modo de rotura foi caracterizado pelo aparecimento de múltiplas fissuras nos ensaios de flexão.

2.4.3. Durabilidade

Numa perspectiva de médio a longo prazo, a capacidade de absorção de energia adquirida pela matriz cimentícia reforçada com fibras vegetais costuma não se manter constante, podendo voltar até a apresentar um comportamento frágil com o decorrer do tempo. Esta redução na tenacidade deve-se à degradação das fibras e da respectiva interface. Neste subcapítulo abordam-se questões como os mecanismos de degradação dos compósitos à base de cimento reforçados com fibras vegetais, as hipóteses de melhoria de durabilidade e os procedimentos experimentais utilizados em estudos realizados neste domínio.

A determinação dos mecanismos de degradação de compósitos reforçados com fibras vegetais é essencial tanto para a criação de técnicas de melhoria de durabilidade quanto para o desenvolvimento de metodologias de envelhecimento acelerado que simulem os fenómenos de degradação natural. Canovas *et al.* (1990) enumeraram os seguintes factores de degradação:

- Ciclos de chuva e insolação, que causam abrasão na interface, resultante dos diferentes coeficientes de expansão da matriz e das fibras;
- Reacção entre os álcalis do cimento, dissolvidos na água armazenada nos poros da matriz, e os componentes das macrofibras, provocando a dissolução da lignina e da hemicelulose das fibras vegetais;

- Variações dimensionais das fibras e da matriz devido a mudanças no ambiente, causando microfissuração na interface e na matriz;
- Temperaturas elevadas, que causam modificações estruturais na cadeia polimérica da celulose, originando fibras mais porosas e, conseqüentemente, uma maior capacidade de absorção de humidade
- Radiação solar, que origina a deterioração das camadas externas das fibras, assim como a redução no grau de polimerização da cadeia celulósica.

Para melhorar a durabilidade de matrizes cimentícias reforçadas com fibras vegetais, foram elaborados vários estudos nos quais se abordaram soluções como a impregnação das fibras com agentes repelentes e/ou bloqueadores de água, a selagem do sistema de poros da matriz, a redução da alcalinidade da matriz e a combinação da impregnação das fibras e a modificação da matriz de cimento (Silva, 2009).

Gram (1988) realizou trabalhos referentes a este tema, em que concluiu que o processo principal de degradação da fibra de sisal está relacionado com a decomposição química da lignina e da hemicelulose da lamela central da fibra. O resultado mais promissor do seu estudo foi a substituição de 45% de cimento por sílica de fumo, que teve como consequência uma diminuição da perda de tenacidade do compósito.

Quando expostas a um ambiente alcalino, as fibras de sisal podem sofrer diferentes níveis de degradação. O tipo de solução alcalina determina a extensão do ataque que, por sua vez, é definida pela perda de capacidade de deformação e da resistência das fibras. A deterioração das fibras de sisal em soluções alcalinas está associada a dois mecanismos distintos: um primeiro associado à decomposição química da lignina e hemicelulose na lamela média que quebra a ligação entre as fibras individuais (Gram, 1988) e um segundo devido à mineralização da fibra pela deposição de CH nas paredes celulares das mesmas (Toledo Filho, 1997).

Toledo Filho *et al.* (2003) concluiu que a adição de 10% de sílica de fumo à matriz constitui uma medida efectiva no retardamento da perda de resistência e tenacidade de compósitos reforçados com fibras de sisal. Outra alternativa para uma maior durabilidade dos compósitos e que também apresentou bons resultados foi a imersão das fibras numa solução de sílica de fumo.

Dando continuidade a estudos desenvolvidos anteriormente (Farias Filho, 1999 e Velasco *et al.*, 2004), Lima (2004) desenvolveu uma matriz livre de hidróxido de cálcio, tendo utilizado uma metacaulinita produzida em laboratório. Assim, conseguiu consumir 100% do hidróxido de cálcio através da substituição parcial do cimento por 30% e 40% de metacaulinita.

Percentagens superiores de substituição do cimento por metacaulinita comprometeriam a reologia da mistura, tornando-a pouco trabalhável. Assim, de acordo com Ferreira (2012), Silva *et al.* (2006) desenvolveram uma matriz composta por 50% de cimento Portland, 30% de metacaulinita e 20% de tijolo cerâmico moído como material cimentício. Realizaram-se 94 ciclos

de molhagem e secagem que não afectaram a resistência à flexão e a tenacidade do compósito, o que corresponde a um consumo efectivo do hidróxido de cálcio presente na matriz, demonstrando não haver deterioração da mesma.

2.5. Incorporação de areia reciclada em compósitos de matriz cimentícia

2.5.1. Produção e características da areia reciclada

A possibilidade de utilizar materiais reciclados na construção tem vindo a atrair a atenção de muitos autores, por constituir uma forma de melhorar a sustentabilidade do sector, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente. Aquando da demolição ou reabilitação de estruturas de betão armado, a reciclagem do betão tornou-se um método cada vez mais comum para utilizar os resíduos gerados. Este procedimento tem vários benefícios, o que o torna uma opção atractiva num contexto em que a sociedade tem preocupações ambientais crescentes (Fonseca *et al.*, 2011 e Pereira *et al.*, 2012).

As propriedades de agregados reciclados de betão e a respectiva influência no comportamento dos materiais em que estes são introduzidos, como por exemplo o betão, têm sido largamente investigadas (por exemplo, Maier e Durham, 2012; Thomas *et al.*, 2013; Xiao *et al.*, 2013). Para além dos agregados grossos reciclados (os que têm maior potencial), os agregados finos reciclados também têm chamado a atenção de alguns autores. Khatib (2005) indicou que quando introduzidos numa mistura de betão em percentagens entre 25% e 75% o efeito na resistência à compressão se mantinha inalterada. Evangelista e Brito (2007) utilizaram agregados finos reciclados de betão na produção de betão estrutural para substituir agregados finos naturais (areia) parcialmente ou na totalidade chegando à conclusão através dos resultados obtidos que uma percentagem de substituição até 30% não põe em causa as propriedades mecânicas do betão. Todavia, existem alguns resultados contraditórios na bibliografia analisada. Apesar de se obterem resultados que geralmente indicam reduções de resistência até 40%, Rasheeduzzafar e Khan (1984) não encontraram diferenças significativas quando introduziram agregados finos reciclados nas suas misturas de betão. Este facto leva a crer que tais diferenças se poderão dever a diferenças fundamentais das propriedades dos agregados reciclados utilizados e/ou a diferentes metodologias nas campanhas experimentais realizadas.

Os agregados reciclados de betão diferem dos agregados naturais na medida em que os primeiros contêm pasta de cimento aderida, mais porosa e proveniente do material de origem, o que afecta negativamente a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas e de durabilidade do betão novo (Ulsen *et al.*, 2013). No entanto, como referido, a sua utilização contribui para a reutilização dos resíduos da construção e demolição (RCD), reduzindo o seu impacto e, simultaneamente, mitigando a extracção de areia dos leitos dos rios, cuja actividade tem um grande impacto na degradação do ambiente (Neno *et al.*, 2013).

As argamassas produzidas com areia reciclada precisam de mais água de mistura para alcançar o mesmo nível de trabalhabilidade das argamassas convencionais, uma vez que têm

uma maior porosidade e absorção devido aos agregados reciclados. Agregados com maior porosidade e superfície específica por unidade de volume absorvem mais água e levam a que a argamassa resultante fique mais consistente (Hanžič *et al.*, 2008). Para obter uma trabalhabilidade satisfatória, Bavaresco (2001) teve que utilizar mais água em argamassas produzidas com agregados finos reciclados do que nas argamassas produzidas com areia natural. No entanto, a água efectiva na pasta de cimento é substancialmente menor devido à absorção destes agregados porosos. Assim, em argamassas que contenham agregados reciclados, tem de haver uma distinção clara entre a relação água-cimento (a/c) total e a efectiva.

2.5.2. Descrição geral de algumas campanhas experimentais

Hamassaki *et al.* (1997) realizaram ensaios em argamassas de diversos traços com a introdução de diferentes agregados reciclados, tendo determinado algumas das propriedades relevantes para o estudo de argamassas com constituintes reciclados (Tabela 2-2). Neste estudo, foi utilizado um cimento Portland CP II E – 32 e na produção das argamassas procurou-se manter uma consistência em termos de espalhamento de 250 ± 10 mm. Foi unicamente utilizada a fracção de RCD com dimensões menores que 4,8 mm. Na Tabela 2-2 a designação “I” denomina a argamassa de referência, *i.e.* sem agregados reciclados, e as misturas mais significativas são as “IV”, “V”, “VI” e “VII”, onde parte da sua constituição inclui agregados reciclados de betão.

Tabela 2-2 – Traços (em volume) das argamassas ensaiadas por Hamassaki *et al.* (1997)

Materiais constituintes	Designação						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Cimento	1	1	1	1	1	1	1
Cal (série 2)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Cal (série 3)	1	1	1	1	1	1	1
Areia natural	6	4	4	4	4	2	-
Material cerâmico	-	2	-	-	0,25	0,5	0,75
Tijolo	-	-	2	-	0,25	0,5	0,75
Betão	-	-	-	2	1,5	3	4,5

Bavaresco (2001) desenvolveu um trabalho sobre argamassas constituídas por agregados reciclados como substituição total ou parcial de areia natural. Neste estudo utilizaram-se os resíduos provenientes de demolições e reabilitações que passaram por uma triagem de forma a serem separados em duas composições distintas: uma composta por materiais com predominância de material cerâmico (AGRI) e outra com materiais constituídos por rebocos e betão endurecidos (AGRII) (Tabela 2-3). Após a trituração de todos os resíduos, estes foram peneirados e utilizou-se apenas a parcela de RCD com dimensões inferiores a 4,8 mm. Foi utilizado para este estudo o cimento Portland CP II F – 32. Comparou-se o comportamento das argamassas com introdução de agregados reciclados com a argamassa de referência, produzida com areia da região de Florianópolis, nos traços 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia).

Tabela 2-3 – Percentagem de substituição de areia natural das argamassas produzidas por Bavaresco (2001)

Materiais constituintes	AGRI (%)			AGRII (%)		
Material cerâmico	100	70	50	-	-	-
Argamassa e betão	-	-	-	100	70	50

Chen *et al.* (2002) realizaram um estudo experimental sobre a utilização de agregados reciclados finos em argamassas e betões. Com este intuito foram produzidas argamassas com dois grupos diferentes de agregados reciclados (A e B) e uma terceira com areia natural de forma a servir de referência. Os agregados reciclados resultaram da demolição de estruturas sendo estes constituídos por resíduos de betão, telhas, tijolos, aço, madeira, plástico, papel entre outras substâncias. Procedeu-se então a um tratamento apropriado do qual se retiveram apenas os resíduos de betão, tijolos, telhas e algumas impurezas de menor importância que foram agrupados em fracções distintas (Tabela 2-4).

Tabela 2-4 - Composição dos resíduos dos grupos A e B produzidos por Chen *et al.* (2002)

Resíduo	Materiais constituintes (%)			
	Betão	Tijolos	Telhas	Outros
A	67,55	18,68	13,32	0,45
B	75,37	19,91	4,30	0,42

Foram utilizadas diferentes relações a/c para cada tipo de agregado, assim como diferentes traços, como se mostra na Tabela 2-5. Na produção destas argamassas utilizaram-se apenas as partículas de dimensões inferiores a 4 mm.

Tabela 2-5 - Composição das argamassas produzidas por Chen *et al.* (2002)

Designação	Relação a/c	Materiais constituintes (kg/m ³)	
		Areia natural	Agregado reciclado (A, B ou N)
MA	0,38	388	1066
	0,46	463	
	0,50	538	
	0,67	576	
	0,80	614	
MB	0,38	145	1281
	0,46	220	
	0,50	295	
	0,67	333	
	0,80	371	
MN	0,38	579	0
	0,46	654	
	0,50	729	
	0,67	767	
	0,80	805	

Silva (2006) desenvolveu um estudo experimental no âmbito da incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias. Optou por três vectores de investigação distintos: um primeiro sobre a incorporação da parte mais fina dos agregados (pó de tijolo), procurando avaliar o efeito de *filler*; um segundo em que, além da introdução da parcela mais fina, reduziu também a quantidade de ligante; e um terceiro, em que incluiu nas misturas resíduo de tijolo com uma granulometria mais extensa, que se assemelhasse à da areia. Neste último vector, o mais importante para a presente pesquisa, este autor produziu quatro argamassas ao traço volumétrico 1:4 (cimento:areia), nas quais se procedeu à substituição de 0, 20, 50 e 100% de areia pelos resíduos de barro vermelho. Os resíduos de tijolo empregues corresponderam a desperdícios de uma fábrica de cerâmica de barro vermelho que foram reduzidos a pó e, de seguida, peneirados de forma a utilizar-se apenas a parcela com dimensões inferiores a 4,8 mm. Utilizou-se cimento Portland CP II – 32,5 e areia siliciosa do rio Tejo. A relação a/c variou de acordo com a percentagem de substituição dos RCD, tentando-se fixar o valor do espalhamento em 175 ± 10 mm.

Neno (2010) realizou um trabalho experimental em que caracterizou o desempenho de argamassas com a introdução de agregados finos provenientes da trituração de betão. Analogamente à pesquisa de Silva (2006), Neno (2010) realizou o mesmo número de argamassas com o mesmo traço volumétrico e as mesmas percentagens de substituição referidas, mas provenientes de betão, mantendo constante a curva granulométrica da areia natural. Procedeu à análise quanto à resistência à compressão e à flexão, à capacidade de absorção de água por capilaridade, à susceptibilidade à fendilhação entre outras.

A pesquisa de Corinaldesi e Moriconi (2007) teve como objectivo estimar tanto o comportamento mecânico como o reológico de argamassas cimentícias elaboradas com três tipos de agregados diferentes: uma primeira com a introdução de resíduos de betão (CON) obtidos de sobras de produção de elementos de betão pré-fabricados; uma segunda baseada em tijolos novos triturados (BRI); e a última com resíduos de demolição (REC) provenientes da demolição de um edifício. Estes últimos foram adequadamente tratados numa fábrica de reciclagem e consistiam em 72% de betão, 25% de alvenaria e 3% de betume. Utilizou-se um cimento CEM II – BL 32,5 R com um traço constante de 1:3 (cimento:areia ou RCD). Para a produção da argamassa de referência, o agregado natural empregue foi uma areia quartzosa com dimensão máxima de 0,15 mm. Para além de ter sido variado o tipo de RCD, modificou-se também a relação a/c como se pode observar na Tabela 2-6.

Tabela 2-6 - Composição das argamassas produzidas por Corinaldesi & Moriconi (2007)

Designação	Relação a/c	Materiais constituintes (g)			
		Areia natural	CON	BRI	REC
REF	0,60	135	-	-	-
CON	0,71	-	108	-	-
BRI	0,91	-	-	270	-
REC	0,78	-	-	-	108

Pedrozo (2008) levou a cabo uma campanha experimental de forma a avaliar a influência da substituição do agregado fino natural por agregado fino reciclado nas propriedades de argamassas e betões. Além de proceder a substituições de agregado natural por reciclado de 0, 25, 50, 75 e 100%, fez variar também, para cada uma das percentagens, a dimensão das partículas de RCD utilizadas (Tabela 2-7). Estas foram recolhidas na central de reciclagem de Belo Horizonte, Brasil e apenas foi utilizada a fracção menor que 4,8 mm. Foi utilizado um cimento Portland CP II F – 32 e uma areia quartzosa da região de Tijuca. A relação a/c manteve-se constante em 0,66 e o traço em 1:3 (volumétrico, cimento:areia).

Tabela 2-7 - Composição das argamassas produzidas por Pedrozo (2008)

Designação	Tipo de agregado	Dimensão das partículas (mm)
M1	Agregado fino bruto de RCD	< 4,8
M2	Agregado fino bruto de RCD	0,15 < 4,8
M3	Agregado fino calcinado de RCD	< 4,8

Ling *et al.* (2011) realizaram um trabalho experimental sobre a variabilidade do uso de vidro reciclado em argamassas de cimento (cimento branco – CB) arquitectónicas, nas quais a areia foi substituída por resíduos de vidro. Procederam a substituições de 0, 25, 50, 75 e 100% e foi ainda introduzido metacaulino (MK) como inibidor de reacções álcalis-sílica. De forma a conferir às argamassas a consistência desejada, os autores utilizaram superplastificante.

A composição das argamassas estudadas pelos autores encontram-se discriminadas na Tabela 2-8.

Tabela 2-8 - Composição das argamassas produzidas por Ling *et al.* (2011)

Designação	a/l ⁽¹⁾	Água (kg/m ³)	Ligante (kg/m ³)		Agregado (kg/m ³)		SP ⁽²⁾ (%)	slump (mm)
			CB	MK	Areia	Vidro		
M10R0	0,4	282	635	71	1412	0	5,5	243
M10R25					1059	353	4,0	258
M10R50					706	706	2,5	257
M10R75					353	1059	1,5	259
M10R100					0	1412	1,0	240
M20R100	0,4	282	565	141	0	1412	1,8	250
M30R100			494	212	0	1412	2,8	245

(1) Razão água/ligante; (2) superplastificante

2.5.3. Quantidade de água de amassadura

No estudo de Bavaresco (2001), o autor observou um consumo de água quase 60% maior em argamassas com a introdução de agregados reciclados do que a produzida com areia natural. O valor mais elevado desta propriedade foi obtido pelas argamassas compostas por

100% de material cerâmico (AGRI), seguindo-se as produzidas com 100% de materiais constituídos por rebocos e betão endurecidos (AGRII) (Figura 2-9). Como se pode identificar na mesma figura, a argamassa de referência registou o menor consumo de água.

Este resultado justifica-se pelo facto dos agregados reciclados absorverem uma quantidade superior de água do que a areia natural, uma vez que os primeiros terão na sua constituição, por exemplo, pasta de cimento que lhes confere uma maior porosidade. Porém, consegue-se obter uma argamassa com características próximas às das misturas correntes preparadas com relação a/c semelhante, se se saturarem previamente os agregados antes da adição do cimento (Neno, 2010). Neste estudo, este procedimento não foi executado, tendo o autor optado por adicionar a quantidade total de água necessária durante a amassadura, i.e. tanto para a hidratação do ligante como para a saturação dos agregados.

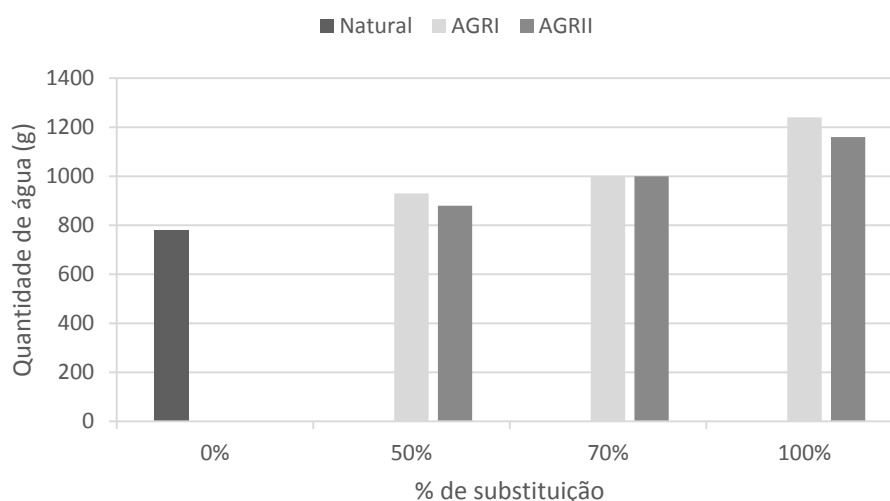


Figura 2-9 - Consumo de água (adaptado de Bavaresco, 2001)

Na campanha experimental desenvolvida por Silva (2006) verificou-se que a quantidade de água que foi necessário adicionar à argamassa, de forma a manter o espalhamento constante, aumentava com a percentagem de incorporação de resíduos de tijolo (Tabela 2-9).

Tabela 2-9 - Consumo de água (Silva, 2006)

% de incorporação de resíduos de tijolo	Água (ml)
0%	190
20%	200
50%	233
100%	300

Assim, conclui-se que, expectavelmente, será necessária uma maior quantidade de água para que uma argamassa com agregados reciclados apresente uma trabalhabilidade satisfatória

em comparação com as argamassas correntes. No entanto, a quantidade efectiva de água na pasta de cimento será inferior à quantidade total de água na argamassa, devido à absorção de uma percentagem da mesma pelos agregados reciclados porosos.

2.5.4. Propriedades mecânicas

2.5.4.1. Resistência à compressão

Na pesquisa de Hamassaki *et al.* (1997) registou-se um aumento de resistência das argamassas com o acréscimo da percentagem de substituição de agregados reciclados. Quase todas as argamassas com introdução de material reciclado atingiram, aos 7 dias, resistências à compressão semelhantes à da argamassa de referência e, aos 28 dias, um valor até superior à da argamassa convencional (Figura 2-10). É de notar que a resistência à compressão mais elevada foi verificada para a argamassa com introdução de maior quantidade de resíduos de betão (VII), uma vez que os finos obtidos pela reciclagem levaram a uma argamassa mais compacta.

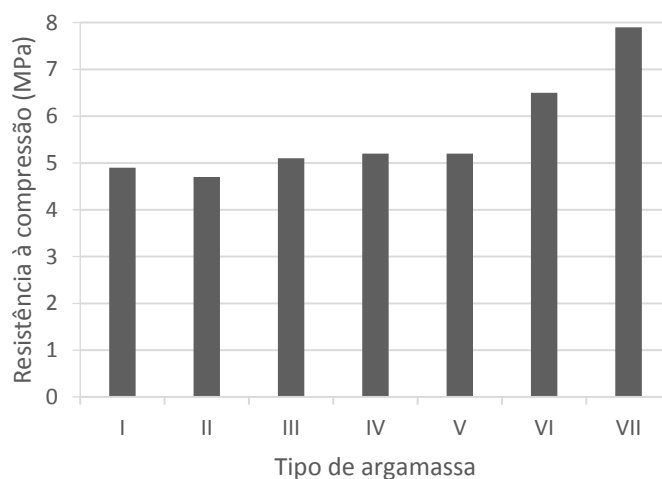


Figura 2-10 - Resultados dos ensaios à compressão (adaptado de Hamassaki *et al.*, 1997)

Bavaresco (2001) também obteve valores de resistência à compressão de argamassas produzidas com agregados reciclados superiores às argamassas sem este agregado (Figura 2-11). As hipóteses levantadas pelo autor para tentar explicar estes resultados são: a primeira relacionada com a maior presença de material fino total plastificante que pode melhorar a trabalhabilidade das argamassas e ocupar os espaços vazios deixados pela evaporação da água diminuindo o teor de ar incorporado tornando a argamassa mais compacta; a segunda devido à maior porosidade dos agregados que favorece o contacto do hidróxido de cálcio com o gás carbónico produzindo de forma mais acelerada carbonato de cálcio permitindo maior resistências e a terceira relacionada com a presença de argila calcinada no entulho introduzido causando reações pozolânicas contribuindo para uma maior resistência à compressão das argamassas.

Focando apenas as argamassas produzidas com resíduos de argamassa e betão (AGRII), mais relevantes para a presente dissertação, verifica-se que aquelas que registaram uma resistência à compressão superior foram as com 70% de substituição de areia natural por agregados reciclados. De facto, esta argamassa apresentou uma resistência substancialmente superior à da de referência, tendo as argamassas com teores de substituição de 50% e 100% apresentado um comportamento semelhante entre si e também superior ao da argamassa de referência.

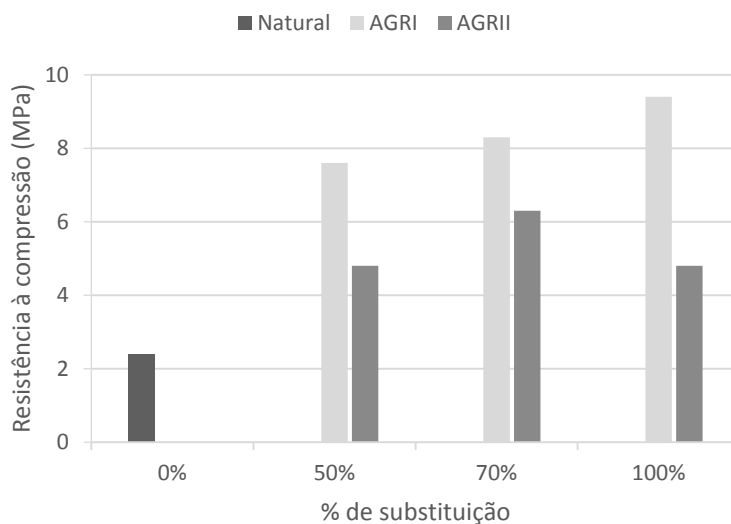


Figura 2-11 - Resultados dos ensaios à compressão (adaptado de Bavaresco, 2001)

No trabalho de Silva (2006) a resistência à compressão aumentou até uma substituição de areia natural por resíduos de tijolo de 40% a partir da qual a propriedade em causa diminuiu, como se pode observar na Figura 2-12. De acordo com este autor, o aumento deve-se ao efeito pozolânico, ainda que este seja muito reduzido.

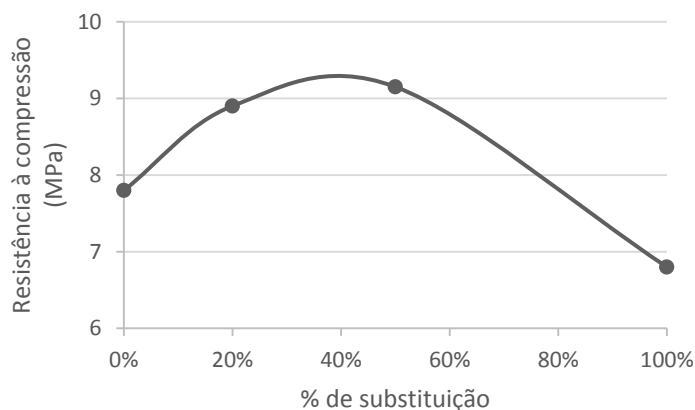


Figura 2-12 - Resultados dos ensaios à compressão (adaptado de Silva, 2006)

Nos estudos efectuados por Pedrozo (2008), o autor verificou uma diminuição do valor da resistência à compressão das argamassas com o aumento da percentagem de substituição de RCD. Analisando a argamassa M1 (agregado fino bruto de RCD < 4,8 mm), observou-se uma diferença máxima de 20% para um teor de substituição de 50% comparativamente à argamassa de referência, isto é, sem inclusão de agregados reciclados (Figura 2-13).

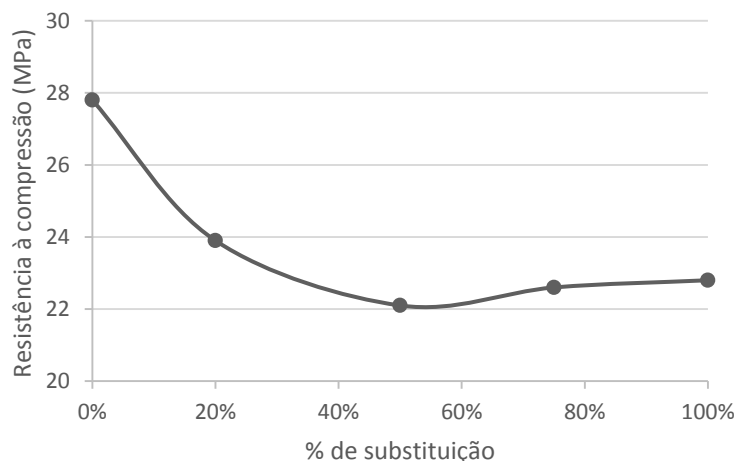


Figura 2-13 - Resultados dos ensaios à compressão (adaptado de Pedrozo, 2008)

Corinaldesi e Moriconi (2007) também obtiveram resultados inferiores em termos de resistência à compressão em argamassas com introdução de resíduos reciclados, por comparação com a respectiva argamassa de referência (REF). Verificou-se que a argamassa com RCD composto por tijolo (BRI) teve o pior comportamento à compressão, enquanto a argamassa produzida com RCD de resíduos de betão (CON) foi a única a superar uma resistência de 20 MPa aos 28 dias (Figura 2-14). Segundo os autores, neste último caso, a forma das partículas (arestas mais marcadas) desempenhou um papel positivo no que se refere à ligação entre o agregado e a pasta de cimento.

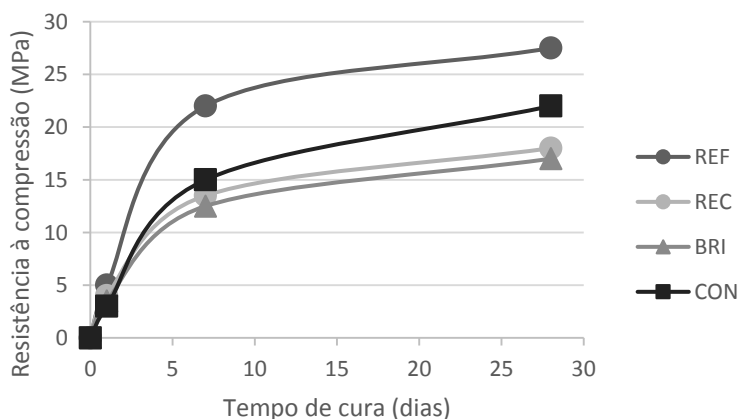


Figura 2-14 - Resultados dos ensaios à compressão (adaptado de Corinaldesi e Moriconi, 2007)

Analogamente ao que foi apresentado acima, Chen *et al.* (2002) também obteve resistências à compressão inferiores para argamassas recicladas (MA e MB) comparativamente à argamassa de referência (MN). Neste estudo foi utilizada uma relação a/c constante. Na Figura 2-15 representa-se, para as três argamassas ensaiadas, a relação entre a relação a/c e a resistência à compressão, mostrando-se que esta última decresce com o aumento da relação a/c. Neste trabalho verificou-se que a diferença entre a resistência à compressão da argamassa de referência e a das argamassas com agregados reciclados não depende da relação a/c da mistura, mas que o seu valor aumenta com o aumento da incorporação de agregados finos.

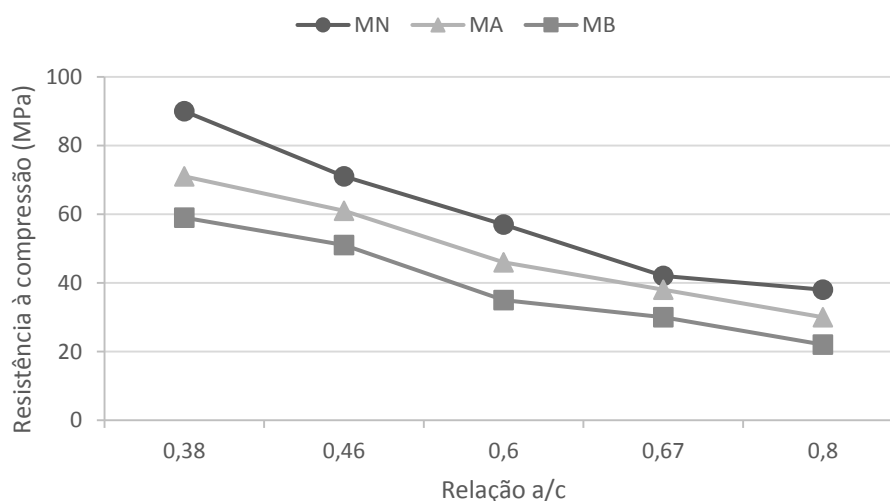


Figura 2-15 - Resultados dos ensaios à compressão (adaptado de Chen *et al.*, 2002)

2.5.4.2. Resistência à flexão

Segundo Dillman (1998), citado por Silva (2006), a resistência mecânica à flexão (aos 28 dias) depende principalmente do cimento utilizado e da relação a/c. Em argamassas com agregados reciclados, aquela propriedade depende também da qualidade do agregado reciclado introduzido e da percentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado.

O mesmo autor verificou que a resistência à flexão aumentou à medida que se substituiu a areia natural por resíduos de tijolo até cerca de 20%. Para valores de substituição superiores, a resistência diminui (Figura 2-16). A razão que o autor indica para o crescimento inicial é o facto de haver uma combinação do efeito pozolânico dos finos cerâmicos com o efeito *filler*. Outra justificação dada é a pozolanicidade poder verificar-se também para partículas menos finas, admitindo que o material tem essa capacidade reactiva, ou um possível efeito de pregagem da pasta de cimento nos agregados (devido à sua maior porosidade e angulosidade). Porém, é ainda possível que existam outras ligações químicas (além de pozolanicidade) e físicas (rugosidade, forma, absorção) entre os materiais que contribuem para o aumento da resistência.

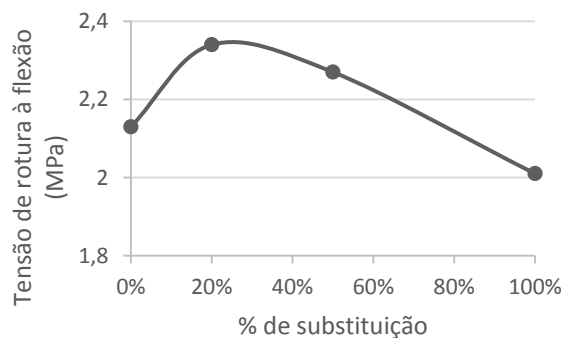


Figura 2-16 - Resultados da resistência à flexão (adaptado de Silva, 2006)

No trabalho de Pedrozo (2008), a maior parte das misturas estudadas tiveram uma resistência à flexão maior do que a da argamassa de referência, devido, principalmente, à redução da relação a/c livre das misturas com agregados reciclados. Uma vez que a relação a/c total não foi alterada a trabalhabilidade não foi mantida o que pode ter consequências muito negativas na perspectiva de utilização das mesmas.

Contrariamente aos autores citados, os resultados de Corinaldesi e Moriconi (2007) mostram que as argamassas com introdução de tijolo (BRI) ou com RCD incluindo alvenaria e betume (REC) apresentaram resultados inferiores de resistência à flexão, como se pode observar na Figura 2-17. A razão apresentada pelos autores baseia-se no facto de que os agregados reciclados possuem uma menor massa volúmica e maior absorção de água quando comparados com a areia natural. Logo, é provável que argamassas contendo RCD onde esteja incorporado alvenaria e betume (REC) tendem a desenvolver uma resistência à flexão menor, particularmente aquelas onde se introduziu material cerâmico. Por outro lado, a curva CON mostra que se o material introduzido for apenas de resíduos de betão, a resistência à flexão mantém-se constante quando comparado com a argamassa de referência.

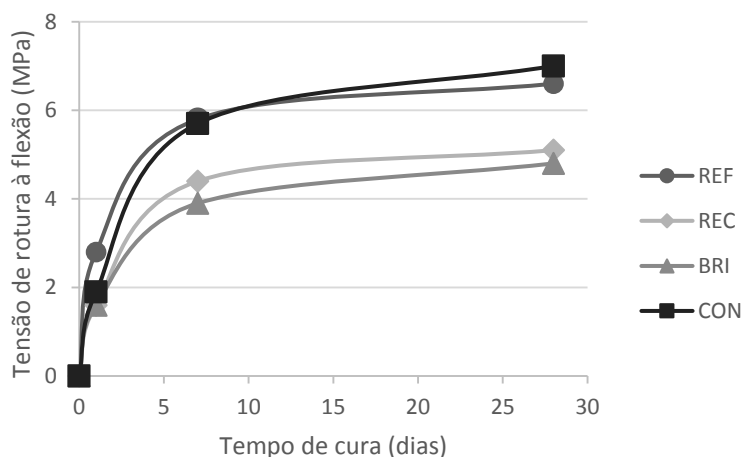


Figura 2-17 - Resultados do ensaio de flexão (adaptado de Corinaldesi e Moriconi, 2007)

2.5.4.3. Módulo de elasticidade

Silva (2006) obteve, para argamassas com incorporação de resíduos de tijolo, módulos de elasticidade cerca de 40% menores do que o da argamassa base, tanto para 2 como para 5 meses de idade. Este autor verificou que o módulo de elasticidade de um mesmo tipo de argamassa não parece ser sensível à idade da argamassa a partir de uma determinada altura (Figura 2-18).

Na sua pesquisa, Neno (2010) obteve módulos de elasticidade superiores para as argamassas modificadas em comparação com a de referência. Este autor justifica este facto, em parte, pela maior massa volúmica (maior densidade e menos vazios), devido ao efeito *filler*, associado à percentagem de substituição de 20%.

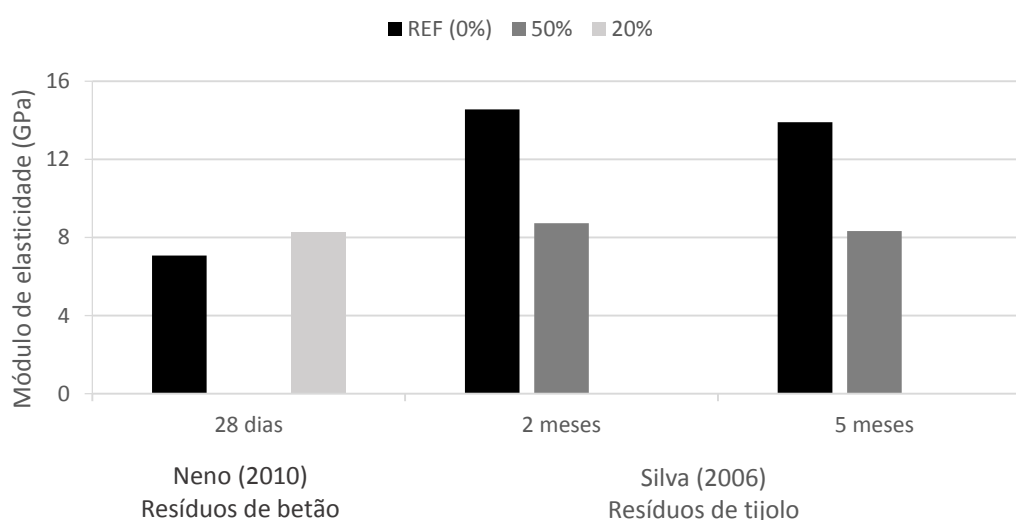


Figura 2-18 - Módulo de elasticidade (adaptado de Silva, 2006 e Neno, 2010)

2.6. Considerações finais

A revisão da literatura apresentada neste capítulo mostra que a sustentabilidade é uma problemática com a qual o sector da construção civil se tem de preocupar cada vez mais. Neste contexto, e numa perspectiva de melhorar a sustentabilidade do sector, a utilização de fibras vegetais em compósitos cimentícios e a incorporação de areias recicladas pode também melhorar algumas propriedades mecânicas e beneficiar ao mesmo tempo dos ganhos energéticos e económicos.

A revisão da literatura apresentada neste capítulo mostrou que apesar de os compósitos reforçados com fibras longas e alinhadas apresentarem globalmente melhores resultados em termos de resistência mecânica, a utilização de fibras curtas permite obter valores de tenacidade maiores e uma facilidade de dispersão superior na matriz que, naturalmente, corresponde a custos menores.

As propriedades das fibras de origem natural apresentam uma elevada variabilidade, o que implica uma preocupação acrescida quanto à interface destas com a matriz. É por isso necessário proceder a tratamentos superficiais das fibras e/ou da própria matriz melhorando a resposta global da argamassa.

Em relação à resistência à compressão, a inclusão de fibras apenas favorece o confinamento do material, atrasando, deste modo, a propagação da primeira fissura. No que respeita às restantes propriedades mecânicas, nomeadamente as resistências à tracção por flexão e tracção directa, as fibras representam um papel mais relevante, pois após o rompimento da matriz (um material frágil), as tensões são transferidas para as fibras existentes, dando oportunidade à argamassa de suportar mais carga. As fibras longas e alinhadas conferem uma vantagem nesta propriedade pois produzem múltipla fissuração, o que não ocorre com a utilização de fibras curtas.

A durabilidade das fibras no interior da matriz é um aspecto relevante, na medida em que o hidróxido de cálcio existente na matriz do compósito cimentício leva à decomposição química da lignina e da hemicelulose da lamela central, principalmente quando exposto aos vários factores de degradação (chuva, radiação solar, etc.). É com este objectivo que se realizam tratamentos das fibras, através de imersão em diversas soluções, ou da própria matriz, substituindo parcialmente o cimento por outros materiais (sílica de fumo, metacaulinita, etc.), reduzindo assim a alcalinidade do sistema.

De acordo com a bibliografia consultada e citada no presente capítulo, pode-se concluir que a substituição de agregados naturais, particularmente areia, por RCD poderá ser favorável ao desempenho de argamassas, quando realizada em percentagens até 50%. Para uma taxa de substituição superior a 50%, o comportamento das argamassas com a incorporação de RCD tende a piorar. No entanto, a origem dos agregados reciclados pode também ser uma causa desta diferença de resposta das argamassas, sendo que nos estudos descritos o desempenho das argamassas com RCD de natureza cerâmica originou melhores desempenhos do que com RCD de betão.

Quanto à trabalhabilidade deste tipo de argamassas, verificou-se que estas necessitam de mais água de amassadura para garantir a mesma fluidez por comparação com as argamassas convencionais, uma vez que os agregados reciclados apresentam uma maior porosidade em comparação com a areia natural devido à pasta de cimento aderida. Os resíduos de vidro constituem uma excepção a este respeito, já que têm uma absorção de água praticamente nula.

Relativamente à resistência à compressão e à flexão das argamassas com introdução de RCD, a bibliografia consultada apresenta uma discrepância de resultados: nalguns trabalhos obteve-se valores inferiores e noutros valores superiores para as propriedades em causa das argamassas com incorporação de RCD, por comparação com as argamassas de referência. Esta discrepância verificou-se independentemente do tipo de resíduo utilizado.

No que concerne ao módulo de elasticidade, dos estudos analisados pode concluir-se que esta propriedade é menor para argamassas com incorporação de RCD de origem cerâmica e superior para argamassas com incorporação de RCD de betão, mais uma vez por comparação com as respectivas argamassas de referência.

Com base na literatura consultada, até à presente data, foram poucos os estudos realizados em que tenha sido combinada a utilização de fibras de natureza vegetal em argamassas com incorporação de agregados reciclados. É neste contexto que se desenvolve a presente dissertação, em que se procurou incorporar fibras de sisal como reforço de compósitos cimentícios e substituir parcialmente a areia natural por agregados reciclados de betão. Em particular, procurou-se avaliar o efeito daquelas duas abordagens nas propriedades mecânicas de argamassas.

3. Programa experimental

3.1. Considerações iniciais

Com o intuito de estudar argamassas de matriz cimentícia contendo resíduos de construção e demolição reforçadas com fibras vegetais foram ensaiadas misturas com diferentes percentagens destes componentes. Todo o programa experimental foi desenvolvido durante quatro meses no Laboratório de Estruturas e Materiais Prof. Lobo Carneiro (LABEST) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil.

Neste estudo, foram utilizadas percentagens de inclusão de fibras vegetais de 2% e 4% em volume com comprimento de 25mm e teores de substituição de areia natural por areia reciclada proveniente de betão de 25% e 50%.

Antes da execução dos compósitos, aplicou-se um tratamento com uma solução de hidróxido de cálcio a metade das fibras para mitigar a sua variação dimensional e em consequência obter uma melhor aderência fibra-matriz. De seguida, as fibras com e sem tratamento foram ensaiadas à tracção até à sua rotura. Tendo-se concluído que as fibras tratadas não tinham ficado demasiado frágeis, procedeu-se a ensaios de arrancamento (*pull-out*) com os diferentes tipos de matrizes e fibras tratadas e não tratadas para verificar a melhoria da aderência entre as matrizes e o reforço. Finalmente, moldaram-se então placas de compósitos, tendo sido utilizados moldes com geometria igual aos dos ensaiados por Ferreira (2012) para que fosse possível comparar os comportamentos de compósitos semelhantes. Posteriormente, as peças obtidas foram cortadas em provetes de dimensões menores, que foram ensaiados à flexão e à tracção. A Tabela 3-1 resume as variáveis do estudo experimental e a Tabela 3-2 os respectivos ensaios elaborados.

Tabela 3-1 - Variáveis de estudo (% em volume)

Mistura	Areia Natural	Areia Reciclada	Fibra Natural	Fibra Tratada
7) Matriz N	100%			
8) Matriz AR1	75%	25%		
9) Matriz AR2	50%	50%		
10) Matriz N + 2% FN	100%		2%	
11) Matriz AR1 + 2% FN	75%	25%	2%	
12) Matriz AR2 + 2% FN	50%	50%	2%	
13) Matriz N + 2% FT	100%			2%
14) Matriz AR1 + 2% FT	75%	25%		2%
15) Matriz AR2 + 2% FT	50%	50%		2%
16) Matriz N + 4% FN	100%		4%	
17) Matriz AR1 + 4% FN	75%	25%	4%	
18) Matriz AR2 + 4% FN	50%	50%	4%	
19) Matriz N + 4% FT	100%			4%
20) Matriz AR1 + 4% FT	75%	25%		4%
21) Matriz AR2 + 4% FT	50%	50%		4%

Tabela 3-2 - Ensaios realizados

Mistura	Tracção directa	Arrancamento (pull-out)	Compressão	Tracção	Flexão
Fibras sem tratamento	25x				
Fibras com 5 ciclos	25x				
Fibras com 10 ciclos	25x				
7) Matriz N			3x	5x	3x
8) Matriz AR1			3x	5x	3x
9) Matriz AR2			3x	5x	3x
10) Matriz N + 2% FN		10x			
11) Matriz AR1 + 2% FN		10x			3x
12) Matriz AR2 + 2% FN		10x			3x
13) Matriz N + 2% FT		10x			3x
14) Matriz AR1 + 2% FT		10x			3x
15) Matriz AR2 + 2% FT		10x			3x
16) Matriz N + 4% FN				5x	
17) Matriz AR1 + 4% FN					3x
18) Matriz AR2 + 4% FN				5x	3x
19) Matriz N + 4% FT				5x	3x
20) Matriz AR1 + 4% FT					3x
21) Matriz AR2 + 4% FT				5x	3x
Total	75	60	9	35	39

Importa referir que a presente dissertação foi desenvolvida na continuidade de outro estudo anteriormente realizado na UFRJ, em que foram estudadas algumas das combinações de variáveis representadas na Tabela 3-1, nomeadamente N+2%FN e N+4%FN (matriz natural com 2% e 4% de fibras naturais, respectivamente). Pretendia-se, assim, complementar esse estudo cruzando a informação obtida em ambas as campanhas experimentais. Porém, tal não foi possível pelas seguintes razões: (i) os resultados reportados nesse trabalho revelaram-se demasiados díspares dos obtidos na presente dissertação; (ii) apenas foi possível aceder aos valores das propriedades dos compósitos ensaiados nesse trabalho, não tendo sido possível consultar os dados de base para a respectiva determinação. Assim, não tendo sido possível analisar as razões para tal disparidade, optou-se por não apresentar os resultados desse estudo neste trabalho.

Efectuaram-se também ensaios de compressão às matrizes sem reforço para que houvesse uma melhor compreensão sobre a substituição da areia natural pela areia produzida por resíduos de construção e demolição.

Para além da presente secção de introdução, o presente capítulo contém seis secções. Na secção 3.2 apresenta-se todos os materiais utilizados. De seguida, na secção 3.3, procede-se à exposição dos ensaios de caracterização das fibras. Na secção 3.4 descreve-se a dosagem da matriz utilizada neste trabalho. O modo de produção da areia reciclada é descrito na

secção 3.5. Após a exposição de todas as componentes dos compósitos em estudo, na secção 3.6 apresenta-se a metodologia de produção dos mesmos. Finalmente, na secção 3.7, a última deste capítulo, expõem-se os ensaios mecânicos executados para a caracterização do material.

3.2. Materiais

3.2.1. Cimento Portland, metacaulinita e cinza volante

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP II F-32, composto com *filler* calcário. A metacaulinita foi adquirida à empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio LTDA para a elaboração desta pesquisa, enquanto a cinza volante foi fornecida pela empresa POZO FLY. A determinação da composição química destes materiais foi analisada no Laboratório de análises físico-químicas do LABEST/COPPE/UFRJ. Na Tabela 3-3 apresenta-se a composição e as propriedades físicas do cimento, da metacaulinita e da cinza volante utilizadas neste estudo.

Tabela 3-3 - Composição e propriedades físicas do CP II F-32, metacaulinita e cinza volante

Propriedades Químicas e Físicas	CP II F-32	Metacaulinita	Cinza Volante
CaO	73,09%	2,62	1,94
SiO₂	13,64%	51,2	51,58
SO₃	3,97%	0,09	1,51
Al₂O₃	3,78%	35,3	28,24
K₂O	0,39%	0,97	3,39
SrO	0,30%	-	-
TiO₂	0,30%	0,41	1,3
MnO	0,06%	0,16	1,51
ZnO	0,05%	-	-
CuO	0,02%	-	-
Densidade (g/cm³)	3,18	2,65	1,41
Área superficial (m²/kg)	-	22,6	420

As curvas granulométricas do cimento, cinza volante e metacaulinita ilustrada na Figura 3-1, foi determinada através do equipamento Malvern MasterSizer 2000, do laboratório de Técnicas Analíticas do LABEST/COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro que permite medir a distribuição dos diferentes tamanhos de partículas numa amostra através da difracção de raio laser.

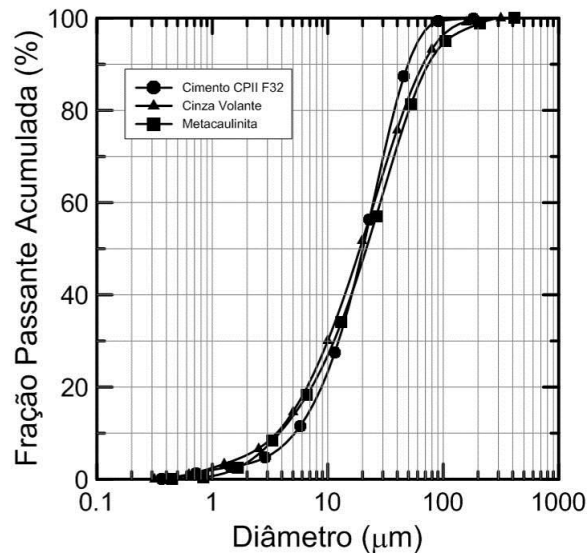


Figura 3-1 - Curva granulométrica do CP II F-32 e adições (metacaulinita e cinza volante)

Fez-se também uma análise termogravimétrica com um equipamento da TA Instruments, modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultaneous. O equipamento foi operado a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min com temperatura ambiente até aproximadamente 1000 °C em atmosfera de nitrogénio e fluxo do registrador de 100 mL/min. Os resultados obtidos mostram que se está perante uma matriz que contém hidróxido de cálcio, ocorrência apresentada em temperaturas próximas de 400 °C, e facilidade de carbonatação, evento apresentado em temperaturas próximas de 600 °C (Figura 3-2).

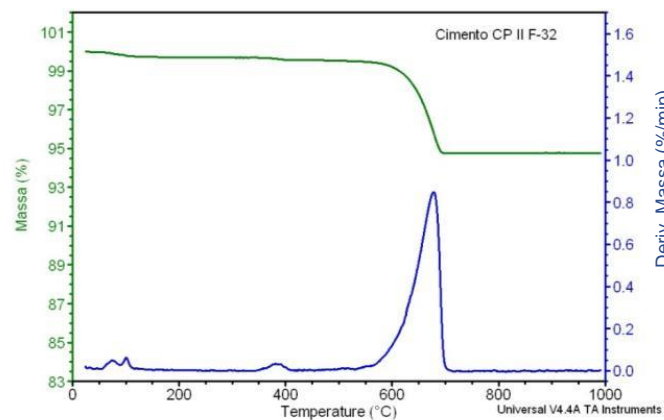


Figura 3-2 - Análise termogravimétrica do CP II F-32 em massa (a verde) e derivada de massa (a azul)

3.2.2. Areia

Neste trabalho, utilizou-se uma areia quartzosa de rio, cuja massa específica é 2,67 g/cm³. Esta areia foi peneirada de forma a se obter apenas partículas de dimensões inferiores a 0,84 mm (ABNT Peneira nº20) e só estas foram utilizadas. Na Figura 3-3 mostra-se

a curva granulométrica da areia natural (a) assim como esta em comparação com as curvas anteriormente referidas do cimento, cinza volante e metacaulinita (b).

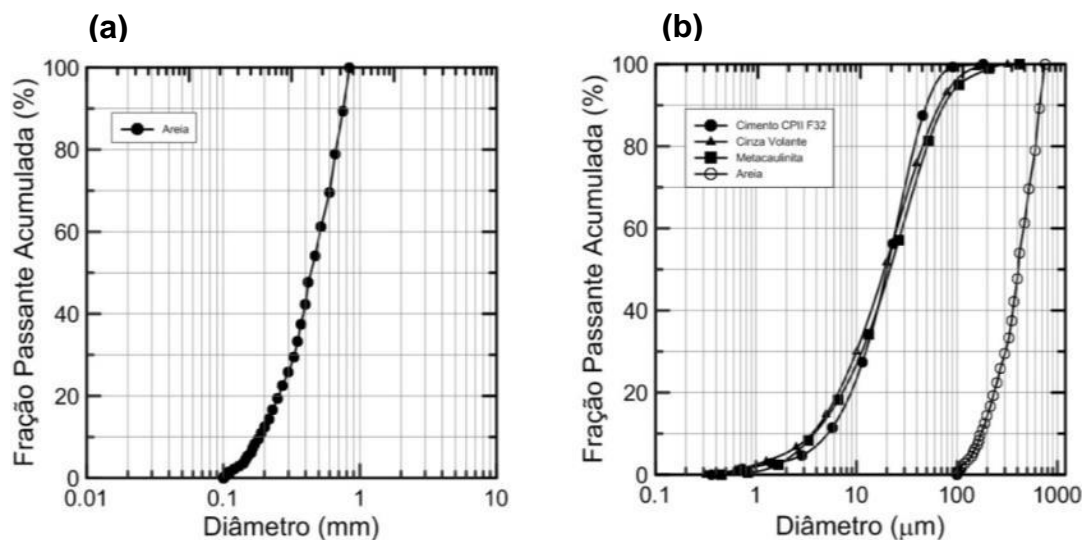


Figura 3-3 - (a) Curva granulométrica da areia utilizada; (b) comparação das curvas dos materiais finos com a areia (Ferreira, 2012)

3.2.3. Superplastificante

Houve necessidade de se utilizar um superplastificante de forma a tornar as argamassas mais trabalháveis e de forma a que houvesse uma melhor dispersão das fibras na matriz para além de evitar o aparecimento de segregação na mistura. Utilizou-se um dispersante do tipo PA (Poliacrilato, Glenium 51), com um teor de sólidos de 31,20%, massa específica de 1,073 kg/m³ e pH 6,2. De forma a avaliar a compatibilidade e o ponto de saturação do dispersante sobre as partículas finas, foi utilizado o ensaio de fluidez de pastas através do uso do funil de Marsh, também utilizado por Aïtcin (2000).

Este método consiste em medir o tempo que 1 litro de pasta demora a passar através de um funil com um determinado diâmetro, cujo valor no presente estudo foi de 5 mm. Mede-se o tempo de escoamento em intervalos de tempo pré-estabelecidos de forma a identificar variações no tempo do fluxo de pastas. Para a mistura utilizada nesta pesquisa, os resultados apontam para um ponto de saturação dos materiais finos (cimento, metacaulinita e cinza volante) de 0,75%.

Os resultados do ensaio de compatibilidade e ponto de saturação executados na mistura de cimento CII F-32 com o superplastificante referido anteriormente estão representados na Figura 3-4. Esta representa os tempos de fluxo em função do teor de dispersante Glenium 51 utilizado.

Todas as pastas foram produzidas com uma relação água/cimento constante de 0,4. A Figura 3-4 mostra que o ponto de saturação se encontra em 0,75% de sólidos do dispersante em relação ao peso dos materiais finos, isto é, cimento, metacaulinita e cinza volante. O dispersante mostrou-se compatível com o cimento CIII F-32, resultado que pode ser comprovado pelo facto de o tempo de fluxo da pasta produzida permanecer próximo para os intervalos de 5, 10, 30 e 60 minutos (Ferreira, 2012).

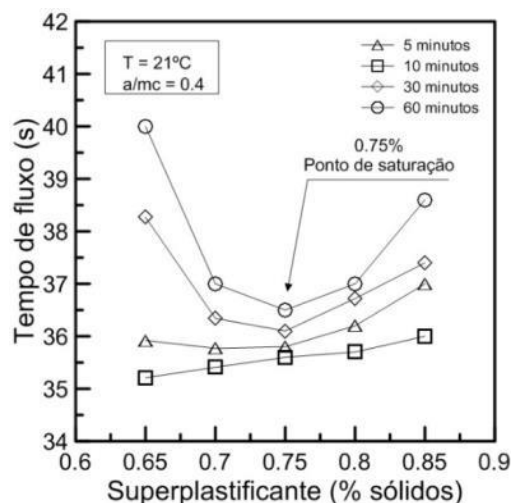


Figura 3-4 - Curva do ponto de saturação do superplastificante Glenium 51 (Ferreira, 2012)

3.2.4. Agente modificador de viscosidade

Baseado em estudos anteriores foi também introduzido um agente modificador de viscosidade para homogeneizar o reforço e a matriz de forma eficaz e para obter uma boa dispersão das fibras. Foi utilizado um agente modificador de viscosidade de nome comercial Rheomac UW 410, fabricado pela empresa BASF, para evitar a segregação, exsudação e manter a coesividade das argamassas com introdução de fibras. O Rheomac UW 410 é um produto com base química de polímeros de celulose de elevado peso molecular em forma de pó branco, como se pode observar na Figura 3-5. Este agente modificador de viscosidade foi adicionado à mistura húmida durante a sua produção (1,4 g por mistura).



Figura 3-5 - Agente modificador de viscosidade Rheomac UW 410

3.2.5. Fibras de sisal

As fibras de sisal utilizadas neste trabalho foram obtidas no Município de Valente-BA e foram fornecidas pela Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB), antiga Associação dos Pequenos Agricultores. As fibras apresentavam um comprimento variável entre 90 cm e 100 cm, apresentando na sua superfície resíduos provenientes do processo de extracção, como por exemplo mucilagens, cuja existência é prejudicial à cura dos compósitos.

Antes do tratamento superficial previsto e da moldagem dos compósitos, as fibras foram lavadas em água quente (80 – 100 °C). De seguida, as mesmas foram colocadas durante um dia numa sala com temperatura média constante de 40 °C, de forma a evaporar toda a água absorvida durante a lavagem. Após a secagem, as fibras foram escovadas num “pente de pregos” para facilitar assim o seu corte. Os feixes alinhados foram cortados em comprimentos de 25 mm com auxílio de uma guilhotina (Figura 3-6).

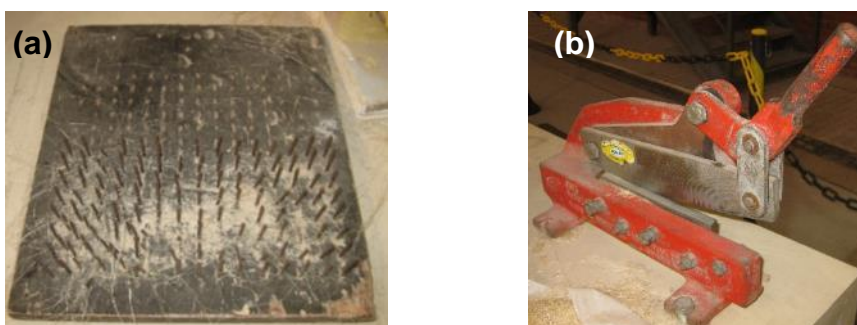


Figura 3-6 - Alinhamento e corte das fibras: (a) pente de pregos; (b) guilhotina para corte das fibras

3.3. Caracterização das fibras

3.3.1. Considerações gerais

O tratamento aplicado às fibras tendo como objectivo a sua hornificação consistiu na realização de 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem numa solução de hidróxido de cálcio. A concentração óptima obtida por Ferreira (2012) foi de 7,3 g de hidróxido de cálcio para cada litro de água. Durante o procedimento, foram monitorizadas as seguintes variáveis após 1, 5 e 10 ciclos: capacidade de absorção de água e variação dimensional (através do diâmetro da fibra).

Ferreira (2012) concluiu que 3 h era o tempo suficiente para promover a saturação das fibras, com base na identificação de pequenas diferenças (inferiores a 4%) de absorção entre 3 h e 24 h (Figura 3-7).

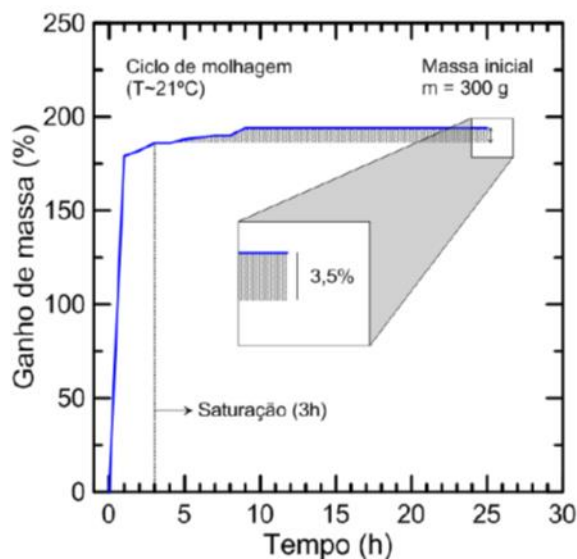


Figura 3-7 - Relação entre ganho de massa em relação ao tempo no processo de ciclagem (Ferreira, 2012)

A estufa utilizada para a secagem das fibras, produzida pela INTI equipamentos, inclui um forno com controlo electrónico de temperatura, interligado a uma balança externa, da marca digital Marte, cuja precisão é 0,01 g (Figura 3-8).

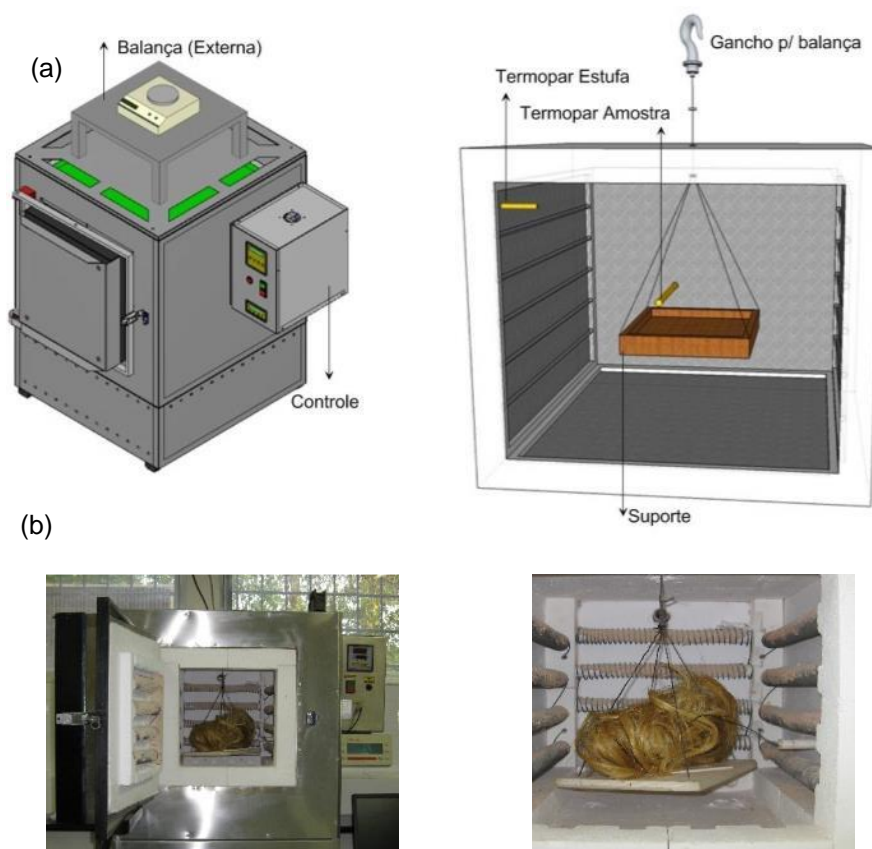


Figura 3-8 - Forno utilizado para secagem das fibras: (a) vista esquemática; (b) forno com as fibras posicionadas no suporte ligado à balança externa (adaptado de Ferreira, 2012)

Determinou-se o tempo de secagem de 16 h a uma temperatura de 80 °C, uma vez que nestas condições se atingiu uma estabilização de massa melhor que para uma temperatura de apenas 60 °C, como se mostra na Figura 3-9.

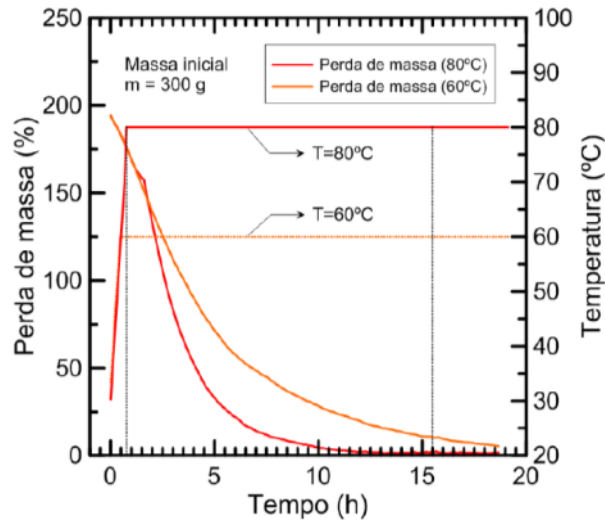


Figura 3-9 - Relação entre perda de massa em relação ao tempo no processo de ciclagem

Em suma, um ciclo de molhagem e secagem consistiu na imersão das fibras na solução de hidróxido de cálcio ($T \approx 23 \text{ }^\circ\text{C}$) durante 50 min e secagem em estufa a uma temperatura de 80 °C por 16 horas (Figura 3-10). Este procedimento foi repetido 10 vezes com o objectivo de estabilizar dimensionalmente as fibras. A estufa foi regulada para uma taxa de aquecimento de 1 °C/min até atingir a temperatura estabelecida anteriormente (80 °C). Após as 16 horas de secagem, a estufa foi arrefecida naturalmente até atingir uma temperatura de aproximadamente 23 °C, de forma a não provocar um possível choque térmico nas fibras.

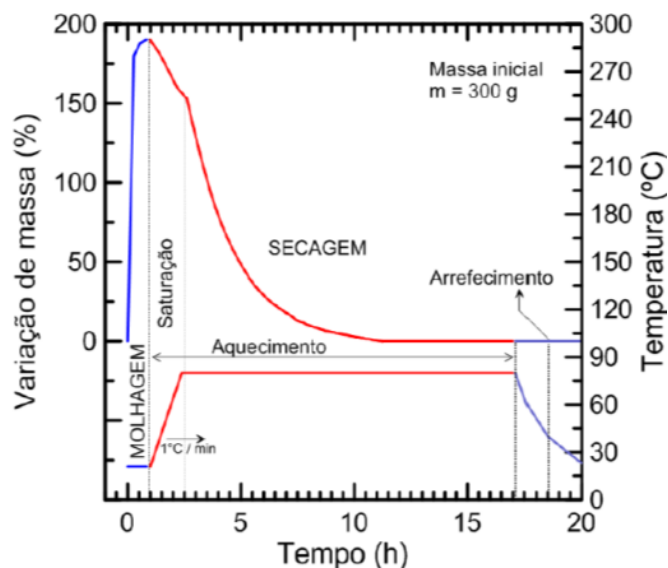


Figura 3-10 - Variação de massa e temperatura de um feixe de fibras para um ciclo completo de molhagem e secagem (adaptado de Ferreira, 2012)

3.3.2. Avaliação da capacidade de absorção das fibras

O índice de absorção de água (I_{abs}) das fibras foi obtido através da metodologia proposta por Toledo Filho (1997). A capacidade de absorção de água das fibras foi medida através da utilização da Equação 3.1, onde “ P_{est} ” representa o peso da fibra seca em estufa e por isso estabilizada e “ $P_{húm}$ ” o peso húmido da fibra, isto é, após saturação.

$$I_{abs} = \frac{P_{húm} - P_{est}}{P_{est}} \quad (3.1)$$

A indústria do papel utiliza uma metodologia semelhante para analisar a capacidade de absorção de fibras, que denomina a capacidade de absorção de água WRV (Water Retention Value), regida pela Norma TAPPI UM 256 (2011).

3.3.3. Avaliação da variação dimensional das fibras

De forma a analisar a variação dimensional (área da secção transversal) das fibras, estas foram cortadas transversalmente. O corte foi realizado com uma lâmina, após um período de saturação das fibras de 24 h, evitando assim o esmagamento da região cortada. Esta duração foi estipulada uma vez que quanto maior for o tempo de imersão, mais flexível se torna a fibra, possibilitando um corte mais eficiente e uma melhor análise da secção transversal.

Para a realização das medidas, cada segmento de fibra foi fixado num círculo metálico, mantendo o alinhamento da fibra na direcção paralela ao eixo do círculo, de forma a ser possível a visualização da sua área num microscópio electrónico de varrimento (MEV), JOEL JSM-6460. As fibras foram fixadas através de uma fita adesiva recoberta com aproximadamente 20 nm de ouro para que estas se tornassem condutoras e mais adequadas à análise no MEV (Figura 3-11). O microscópio foi operado sob uma tensão de aceleração de 20 kV e uma distância de trabalho de aproximadamente 30 mm. As áreas foram depois medidas através do programa AutoCAD.

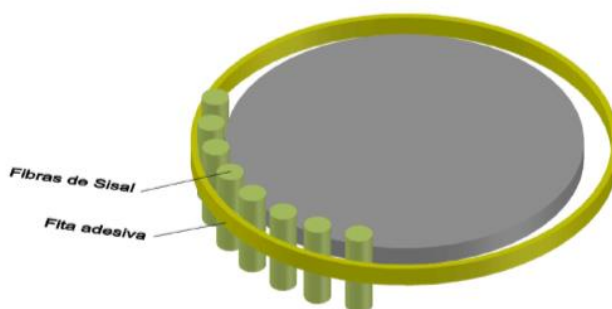


Figura 3-11 - Fixação e alinhamento das fibras no círculo metálico

3.3.4. Análise termogravimétrica

As análises térmicas por termogravimetria e derivada de termogravimetria (TG/DTG) das amostras de fibras sem tratamento e fibras com 1, 5 e 10 ciclos de tratamento foram realizadas no equipamento simultâneo DSC-TGA, modelo SDT Q-600, da TA Instruments. O objectivo da análise foi monitorizar a variação de massa em função da temperatura, em condições controladas. Com este intuito, foram utilizados cadinhos de platina (capacidade de 110 μ L) no equipamento que foi previamente calibrado através dos procedimentos indicados pelo fabricante para os mesmos tipos de cadinhos.

Foram utilizadas cerca de 8 mg (\pm 0,1 mg) de amostra na análise dinâmica da temperatura ambiente até 1000 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Optou-se por utilizar o nitrogénio (N_2) como gás de arraste com um fluxo máximo de 100 mL/min. A temperatura de *onset* da perda de massa foi definida pela curva TG utilizando o *software Universal Analysis* da TA Instruments.

3.3.5. Ensaio de tracção directa nas fibras

O ensaio de tracção directa nas fibras foi realizado conforme a norma ASTM C1557, numa máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGX-100kN, utilizando uma célula de carga de 1 kN. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento com uma velocidade de travessão de 0,1 mm/min. Foram utilizadas fibras de 25 mm de comprimento presas a um molde de papel para melhorar o alinhamento na máquina e a aderência entre as garras superior e inferior (Figura 3-12).

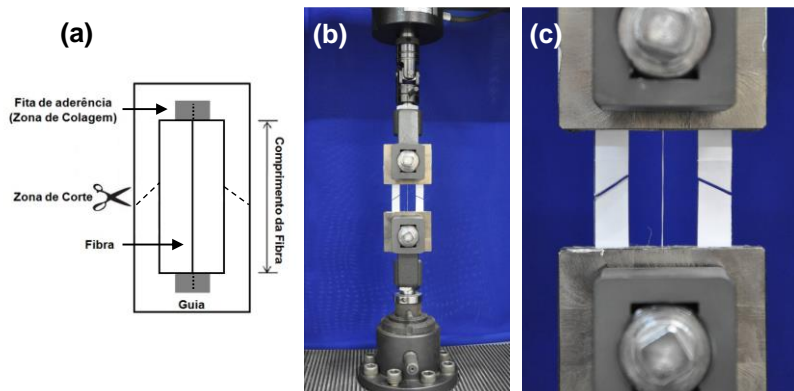


Figura 3-12 - (a) Molde de papel para ensaio de arrancamento; (b) configuração do ensaio de arrancamento; (c) detalhe de fibra submetida à tracção directa

Os materiais utilizados na preparação dos provetes foram papel de 90 g/m², fita crepe e fita metálica de alumínio.

O cálculo da secção transversal da fibra foi efectuado do mesmo modo que a análise da variação dimensional da fibra, isto é, através do microscópio electrónico de varrimento (MEV), JOEL JSM – 6460 (Figura 3-13) e pelo programa AutoCAD.

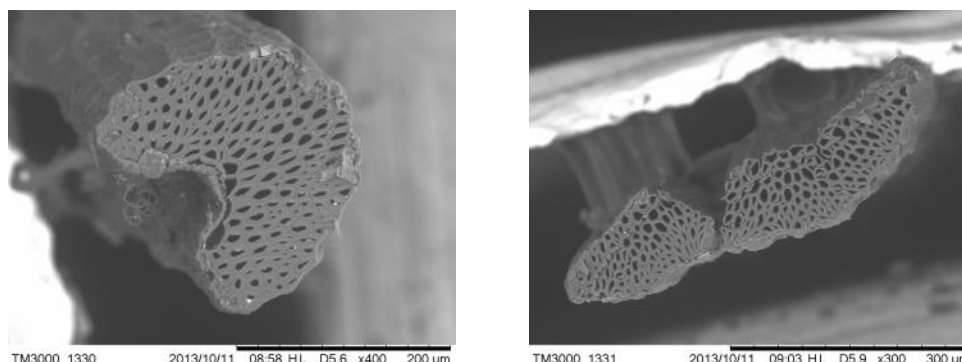


Figura 3-13 - Imagens de secções transversais de fibras de sisal

A partir destes cálculos determinou-se a tensão de tracção usando a seguinte equação,

$$\sigma = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (3.2)$$

onde “ $F_{m\acute{a}x}$ ” representa a força máxima de tracção e “ A ” a área da secção transversal.

3.3.6. Ensaio de arrancamento (*pull-out*)

Nos ensaios de arrancamento foram testadas várias combinações de misturas com fibras tratadas e não tratadas, com um comprimento de embebimento de 25 mm. Os ensaios foram realizados após seis dias de cura em câmara húmida ($T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR=100\%$) e um dia de secagem a uma temperatura de $T=23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e HR de $43\% \pm 3\%$.

Os provetes cilíndricos com 25 mm de altura e 20 mm de diâmetro foram moldados manualmente, utilizando um modo de preenchimento similar ao processo de confeitaria, como se pode observar na Figura 3-14.



Figura 3-14 – Moldagem dos provetes para ensaio de arrancamento

Utilizaram-se para as moldagens das amostras duas placas prismáticas de acrílico com rebaixamento na sua parte central, de forma a permitir o encaixe do molde de PVC, e perfuradas no centro de cada rebaixamento para garantir o alinhamento da fibra, como se encontra esquematizado na Figura 3-15.

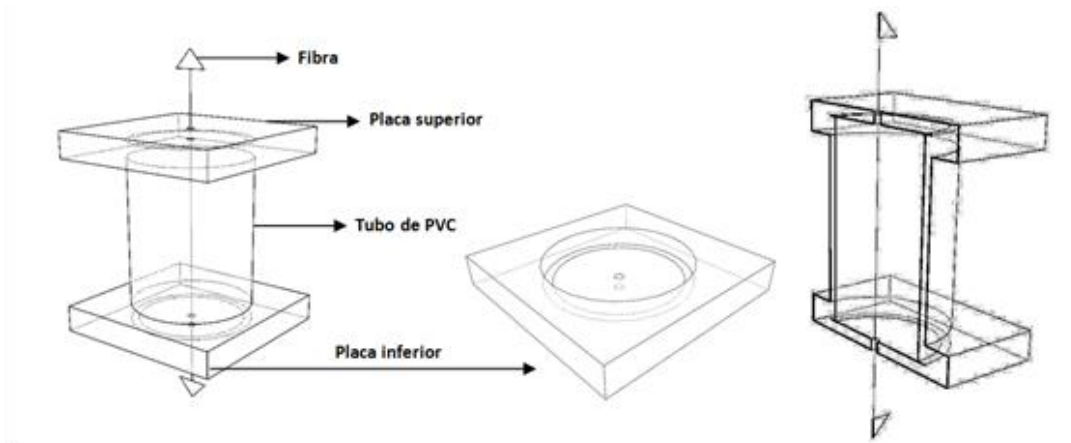


Figura 3-15 - Molde utilizado no ensaio de arrancamento; Detalhe do rebaixamento para encaixe do molde de PVC; Corte do molde para provetes do ensaio de arrancamento

Depois de o molde ser preenchido com a matriz, a placa superior foi colocada e a fibra foi esticada. Após 24 h, os provetes foram desmoldados e instalados numa câmara húmida, onde permaneceram durante seis dias, como anteriormente referido.

O ensaio de arrancamento foi realizado numa máquina de ensaios Tytron 250, fabricada pela MTS Systems, contendo uma célula de carga de 50 N. Os ensaios foram realizados com velocidade de deslocamento do travessão de 0,1 mm/min. A configuração do ensaio de arrancamento está apresentada na Figura 3-16, onde se pode notar que a fibra está centrada no molde de PVC. De forma a não contabilizar a parte da fibra fora do provete minimizou-se o máximo possível a distância entre o molde e a garra da máquina.

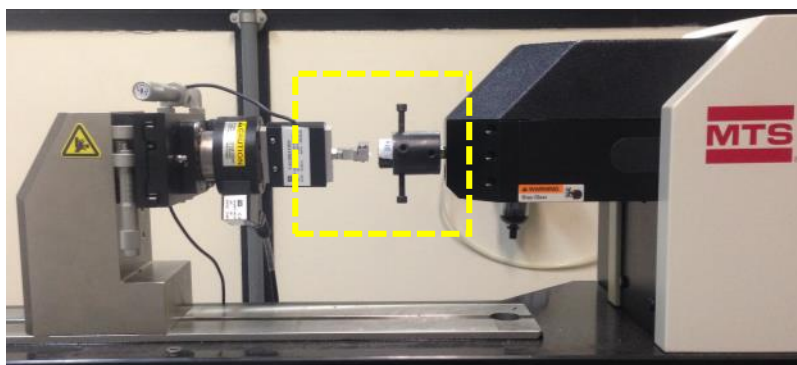




Figura 3-16 - Configuração do ensaio de arrancamento

3.4. Composição da Matriz

A matriz utilizada neste estudo foi produzida com uma areia de diâmetro máximo de 840 μm , cinza volante, metacaulinita comercial e cimento Portland. Para a avaliação do ponto de saturação do superplastificante na matriz, bem como a quantidade de aditivo necessário para manter boas condições reológicas para as misturas reforçadas com fibras vegetais, foram realizados ensaios de consistência padrão como o representado na Figura 3-17. Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 1995).



Figura 3-17 – Representação esquemática do ensaio de consistência padrão para avaliação da trabalhabilidade da matriz e respectivo resultado

Os ensaios termogravimétricos executados por Ferreira (2012) para a avaliação do consumo de hidróxido de cálcio em matrizes com 28, 60 e 90 dias de idade indicaram que o consumo deste componente foi obtido para a seguinte composição de materiais cimentícios: 33% de cimento, 27% de metacaulinita e 40% de cinza volante. Pela Figura 3-18 pode identificar-se que a partir de 28 dias de idade não se verifica presença de hidróxido de cálcio, facto que se observa pela não existência de picos (eventos térmicos) próximos de 400 $^{\circ}\text{C}$.

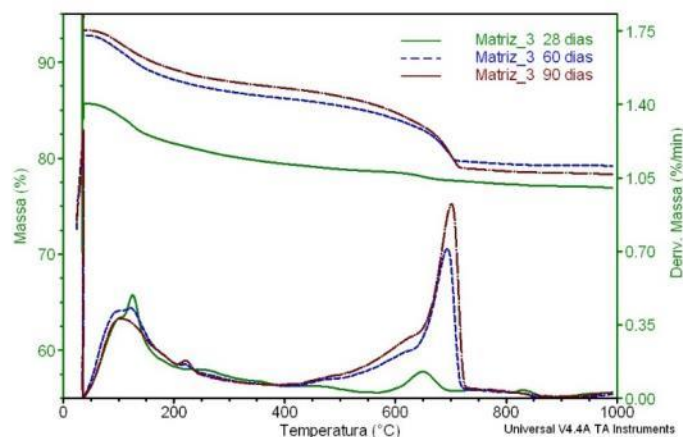


Figura 3-18 - Análise termogravimétrica da matriz cimentícia em diferentes idades (adaptado de Ferreira, 2012)

Definiu-se inicialmente a proporção dos materiais cimentícios sem fibras. No entanto, quando se incorporou fibras vegetais nas matrizes, estas mostraram grande segregação aquando do ensaio de espalhamento. Foi então necessário introduzir alguns ajustes na matriz, alterando os teores de superplastificante (SP) e adicionando um agente modificador de viscosidade (VMA). Este suplemento promoveu uma maior coesão entre as fibras e a matriz, reduzindo, porém, o espalhamento da mesma, como se pode identificar na Figura 3-19.



Figura 3-19 - Homogeneização e dispersão das fibras

As quantidades de SP e VMA que levaram a uma mistura trabalhável e capaz de homogeneizar o reforço e a matriz de forma eficaz, com boa dispersão de fibras e sem segregação foram 27 kg/m^3 de superplastificante e $1,0 \text{ kg/m}^3$ do agente modificador de viscosidade. O traço da matriz está apresentado na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 - Consumo de material por m³ da matriz utilizada

Nome	MATRIZ (kg/m ³)						
	C	Areia	MC	CV	W	SP*	VMA
Matriz Natural (N)	398	597	318	478	459	27	1,0

*Sólidos de SP/MC

** C: cimento Portland; MC: metacaulinita; CV: cinza volante; W: Água; SP: superplastificante; VMA: agente modificador de viscosidade

3.5. Britagem e peneiração na produção de areia reciclada

De forma a obter a areia reciclada necessária para a execução deste estudo, foi necessário proceder primeiramente à demolição de uma viga de betão armado como é ilustrado na Figura 3-20. O betão utilizado nessa viga era da classe C30/37, com armaduras A500 NR e diâmetros de 8 mm e 16 mm. Tratava-se de um betão com abaixamento de aproximadamente 50 mm sendo, por isso, de classe S2.



Figura 3-20 - Demolição da viga de betão armado

Após a demolição, o betão foi encaminhado para uma britadeira de mandíbulas que produziu agregados finos e grossos, os quais foram armazenados separadamente em sacos, como se ilustra na Figura 3-21 (a). Na produção das argamassas deste trabalho foi definido que a areia utilizada teria que ter apenas partículas de dimensões inferiores a 0,84 mm, logo os agregados finos foram peneirados no peneiro nº20 (segundo o ABNT) com abertura da malha de 0,84 mm e só estas foram utilizadas.

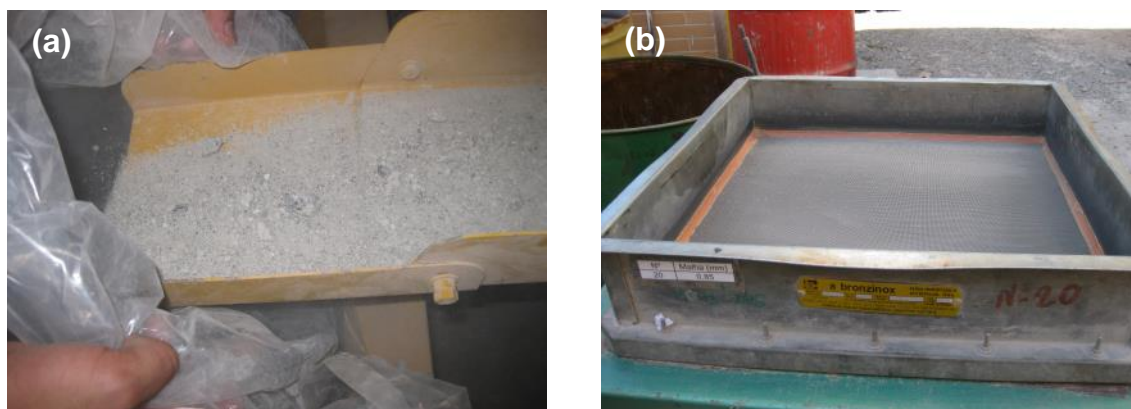


Figura 3-21 - (a) Armazenamento dos agregados finos obtidos pela britagem; (b) Peneira Nº20

3.6. Produção dos compósitos de matriz cimentícia

A preparação das misturas foi executada numa misturadora com capacidade de 5 l. Os passos seguidos para a produção das misturas foram os seguintes:

- 1) Pesagem de todos os materiais necessários à produção da mistura;
- 2) Homogeneização dos materiais finos (cimento Portland, metacaulinita e cinza volante) na misturadora durante 1 min;
- 3) Adição lenta da água e mistura durante 2 min;
- 4) Paragem de 30 segundos para retirar material retido nas bordas da misturadora;
- 5) Adição do superplastificante e mistura durante 5 min;
- 6) Lançamento do reforço fibroso durante 2 a 6 min (dependendo da quantidade a ser introduzida);
- 7) Adição do agente modificador de viscosidade e mistura durante 2 min;

Uma vez concluído este processo, as misturas foram dispostas em moldes de alumínio com dimensões de 400 mm x 250 mm x 15 mm, com fundo de acrílico para propiciar um melhor acabamento, como se representa na Figura 3-22.

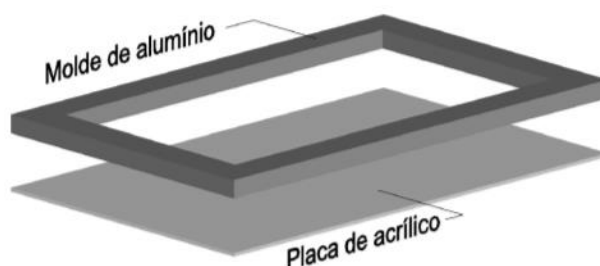


Figura 3-22 - Configuração dos moldes

A Figura 3-23 ilustra o processo de moldagem. Depois de desmoldados, os provetes foram colocados numa câmara húmida, de forma a terem uma cura em ambiente controlado ($T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} = 100\%$) até um dia antes da data de realização dos ensaios mecânicos, onde ficaram a secar a uma temperatura de $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} = 43\% \pm 3\%$.

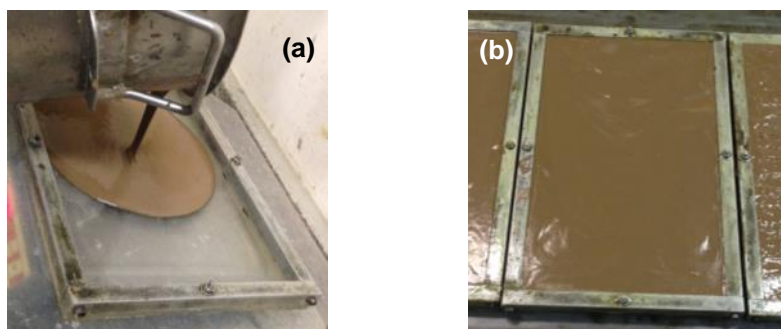


Figura 3-23 - Moldagem dos compósitos: (a) Colocação da mistura no molde; (b) molde preenchido

3.7. Caracterização mecânica dos compósitos de matriz cimentícia

3.7.1. Ensaios de compressão uniaxial

Os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura que foram ensaiados com 28 dias de idade. Todas as moldagens foram realizadas segundo a NBR 7215 (1996). Foram ensaiados três provetes por composição.

Para realizar os ensaios de compressão foi utilizada uma máquina de ensaios universal Shimadzu – 100kN. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de deslocamento de 0,01 mm/min. A definição da deformação axial do provete consistiu na média fornecida por dois LVDT's, acoplados por anéis metálicos, posicionados na região central do provete (Figura 3-24). Quanto às deformações e ao carregamento aplicado, estes foram lidos por um sistema de aquisição de dados “ADS 2000”, de 16 bits, da marca Lynx.

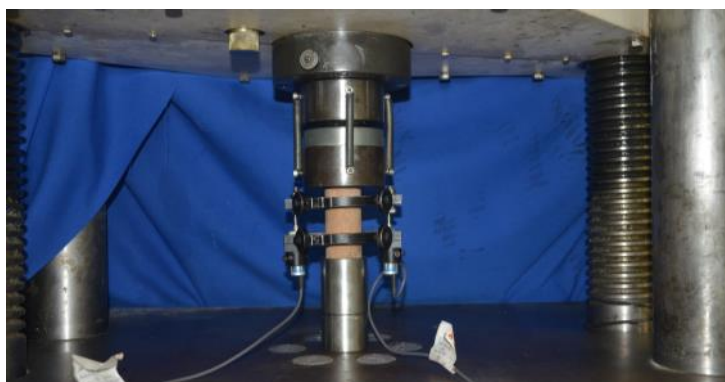


Figura 3-24 - Ensaio de compressão uniaxial

Com as curvas tensão – deformação obtidas nestes ensaios foi possível calcular os valores médios de tensão máxima de compressão, a deformação na tensão máxima e o módulo de elasticidade.

3.7.2. Ensaio de tracção directa

Os ensaios de tracção foram realizados em provetes prismáticos (cinco por cada mistura) com dimensões de 40 mm x 400 mm x 15 mm.

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios electro-mecânica Shimadzu AGX, com uma célula de carga de 100kN, a uma velocidade de deslocamento da mesma de 0,1 mm/min. Os deslocamentos axiais foram obtidos através da leitura (média) de dois LVDTs. Visando a obtenção da deformação do provete durante o carregamento, foram utilizados suportes de alumínio onde os LVDTs foram acoplados e aos quais o provete foi fixado em quatro pontos, por parafusos, impedindo assim a sua rotação em relação ao eixo da amostra. Ilustra-se na Figura 3-27 o provete preso aos suportes e na Figura 3-28 apresenta-se a configuração do ensaio.

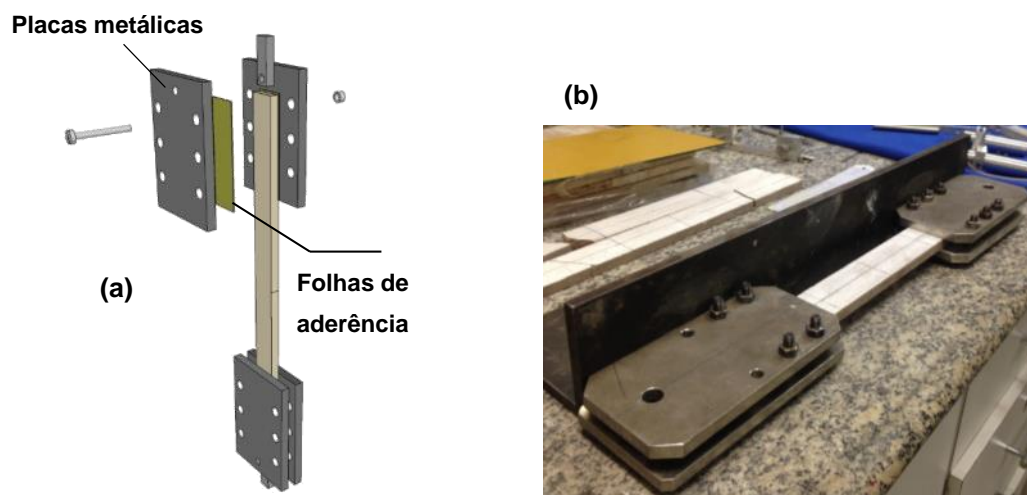


Figura 3-25 - (a) Configuração do sistema de montagem dos provetes para ensaio de tracção; (b) placas de fixação alinhadas

3.7.3. Ensaio de flexão em quatro pontos

Os ensaios de flexão em quatro pontos foram realizados em provetes (3 de cada mistura) paralelepípedicos com dimensões de 80 mm x 400 mm x 15 mm. Estes foram retirados da câmara húmida um dia antes do ensaio e armazenados durante 24 horas numa sala com ambiente controlado onde a temperatura era de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a humidade relativa era de $43\% \pm 3\%$. Com o objectivo de realçar o aparecimento de fissuras nos provetes, estes foram pintados de branco com uma tinta à base de água antes da realização do ensaio.

Os ensaios de flexão foram realizados segundo a norma EN ISO 14125, numa máquina de ensaios electro-mecânica Shimadzu AGX com uma célula de carga de 100 kN, a uma velocidade de deslocamento de 0,3 mm/min. Na Figura 3-26 pode visualizar-se a configuração do ensaio de flexão em quatro pontos. Os pontos de carga estão afastados entre si por 100 mm e o vão entre apoios dista 300 mm. A carga e a flecha a meio vão foram obtidos pelo sistema de aquisição de dados Trapézio através do sensor da máquina de ensaios mecânicos e um LVDT

(Linear Variable Differential Transformer). Os resultados foram expressos em tensão de tracção por flexão devido a possíveis variações na altura dos provetes. A energia absorvida pelo provete é equivalente à área sob a curva carga – deslocamento até 20 mm.

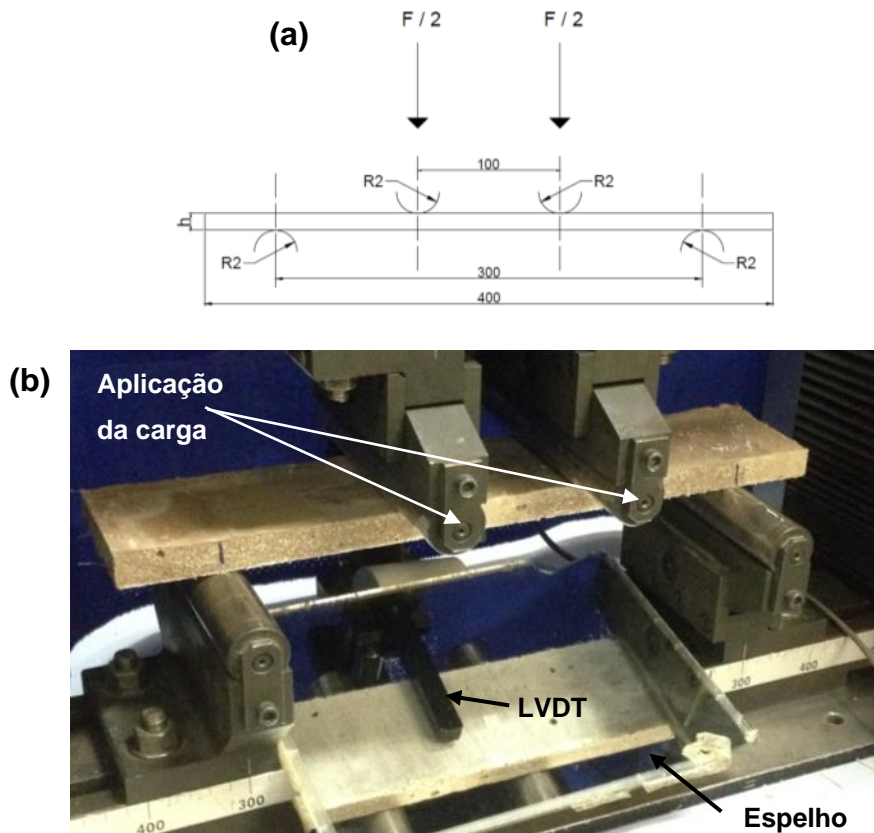


Figura 3-26 – (a) Esquema de ensaio; (b) Ensaio de flexão em quatro pontos

Os resultados obtidos foram definidos em termos de tensão de tracção por flexão utilizando-se a equação 3.3,

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6M}{bh^2} \quad (3.3)$$

onde “ σ ” representa a tensão de tracção na flexão, “M” o momento de flexão, “b” a largura da amostra e “h” a altura da mesma.

Foram também calculados os índices de tenacidade pela norma ASTM C1018 (1992) que define esta grandeza na flexão em termos de relações entre as áreas sob a curva carga-deslocamento em múltiplos do deslocamento da primeira fissura e a área sob a curva carga-deslocamento até à primeira fissura. Essas várias relações (I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30}) são chamadas índices de tenacidade e são calculadas como relações das áreas sob a curva carga-deslocamento até deslocamentos 3, 5,5, 10,5 e 15,5 vezes o deslocamento da primeira fissura, respectivamente, como está apresentado na Figura 3-27. Os índices I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} têm valores 5, 10, 20 e 30,

respectivamente, para comportamento elasto-plástico ideal. Existem no entanto outras normas para o cálculo da tenacidade, nomeadamente a NBN B15-238 (1992) e JCSE-SF4 (1983), que não se adequavam tão bem ao caso analisado neste trabalho (Lima, 2004).

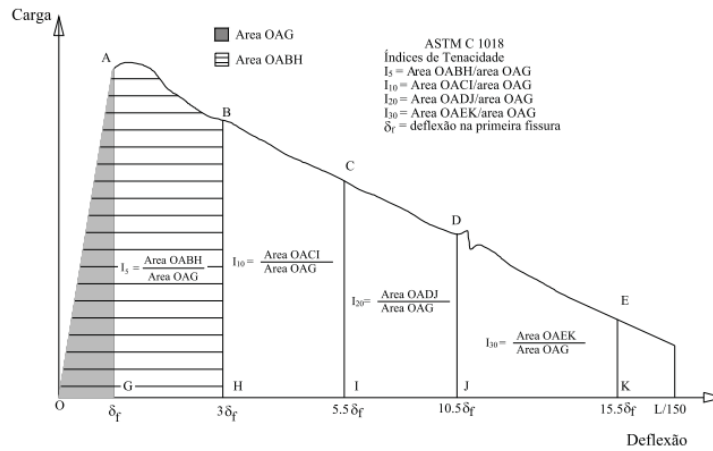


Figura 3-27 - Definição dos pontos para cálculo dos índices de tenacidade segundo a ASTM C1018 (1992) (Lima, 2004)

O módulo de elasticidade dos compósitos foi calculado através dos resultados dos ensaios de flexão. Com este objectivo obteve-se a extensão (ϵ) pela flecha medida no vão central em função da força aplicada no ensaio através da equação 3.4 fornecida na EN ISO 14125,

$$\epsilon = \frac{4,7 * f * h}{l^2} \quad (3.4)$$

onde “f” é a flecha, “h” a altura do provete e “l” o vão entre apoios que neste caso se tratava de uma constante de 300 mm.

Posteriormente, criou-se o gráfico tensão-deformação e calculou-se o declive de uma parte linear no início do ensaio com a função **slope** do Excel. Escolheu-se esta zona do gráfico por corresponder a um comportamento elástico linear do material.

3.7.4. Processo de fractura

O padrão de fissuração foi avaliado através da análise de imagens, realizada em diferentes momentos de deformação (para ensaios de tracção directa) e deslocamento (para ensaios de flexão). Para esta observação, utilizou-se uma câmara digital NIKON D90 com uma lente Macro e com resolução de 10 Mega pixéis, que capturou imagens de alta resolução em intervalos de 30 segundos (Figura 3-29). Com base nestas imagens, foi observada a formação, abertura, propagação e espaçamento das fissuras (Figura 3-30).

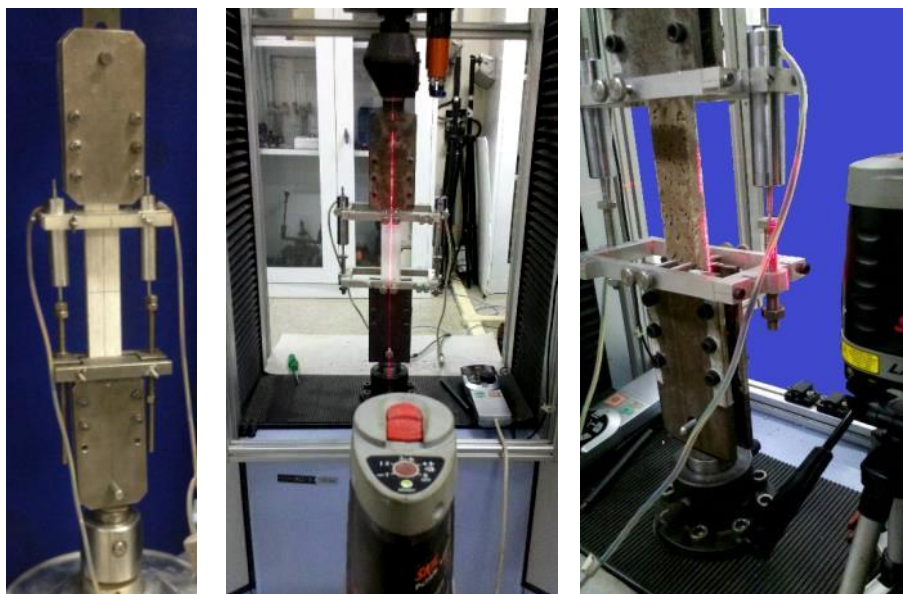


Figura 3-28 - Esquema de ensaio de tracção directa e verificação de alinhamento do provete

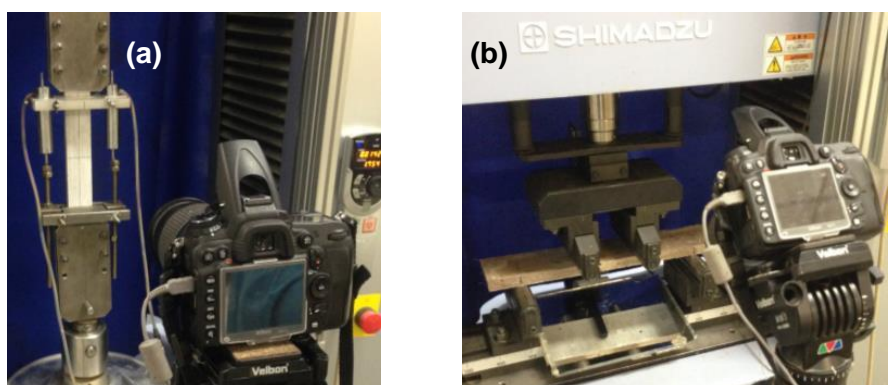


Figura 3-29 - Posicionamento da máquina fotográfica durante (a) o ensaio de tracção e (b) o ensaio de flexão

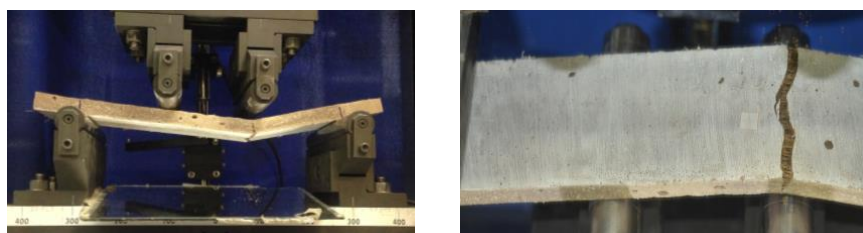


Figura 3-30 - Processo de fractura durante o ensaio de flexão

4. Análise e discussão dos resultados

4.1. Considerações iniciais

No presente capítulo apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos na campanha experimental, descrita no capítulo 3. Quando aplicável, procede-se a uma análise comparativa destes resultados com os recolhidos e apresentados aquando do levantamento bibliográfico. Esta análise, em que os aspectos estatísticos são considerados, tem como principal objectivo simplificar a leitura do elevado número de resultados individuais (Anexo 1) e permitir retirar algumas conclusões.

Na primeira parte deste capítulo são apresentados e analisados os resultados referentes às propriedades das fibras de sisal utilizadas na produção das argamassas do programa experimental. Em seguida, procede-se à análise das propriedades mecânicas principais dos compósitos. Por fim, estuda-se a influência do tratamento superficial aplicado às fibras em duas vertentes diferentes, nomeadamente nas propriedades mecânicas e no modo de rotura.

Uma vez que, como referido anteriormente, este trabalho foi elaborado para completar uma outra pesquisa, mas que não foi possível utilizar os dados desta, para algumas das propriedades analisadas não foi possível efectuar a análise comparativa com as argamassas de referência.

4.2. Influência da hornificação nas propriedades da fibra de sisal

4.2.1. Alterações visuais

A primeira lavagem das fibras em água quente não alterou significativamente o aspecto geral da fibra de sisal, no entanto, o mesmo já não pode ser referido para as fibras após os 10 ciclos de molhagem e secagem numa solução de hidróxido de cálcio. A hornificação fez com que as fibras de sisal apresentassem uma perda da coloração original, dourada, e ganhassem uma cor um pouco mais escura (Figura 4-1). Pensa-se que esta alteração visual seja devida à dissolução de resíduos da superfície das fibras, tais como graxas e ceras, e à contínua absorção da solução. Também foi possível observar uma desagregação mais fácil das fibras tratadas em comparação com as originais.



Figura 4-1 - Alteração na coloração das fibras sem tratamento (esquerda) e após 10 ciclos de molhagem e secagem (direita)

4.2.2. Absorção de água

O tratamento superficial efectuado nas fibras de sisal mostrou ser efectivo no que respeita à diminuição da capacidade de absorção de água (Figura 4-2). De notar que ao fim dos 10 ciclos, a variação da propriedade em análise é de quase 80%. O ciclo 1 representado corresponde à molhagem na solução de hidróxido de cálcio e posterior secagem em estufa; o processo de lavagem em água quente (aplicado de forma a retirar os resíduos oriundos da sua extracção) não foi contabilizado neste caso.

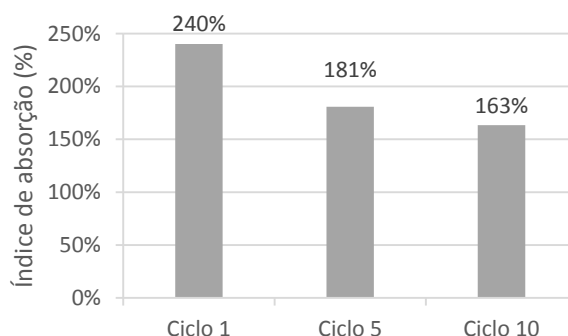


Figura 4-2 - Variação do índice de absorção de água das fibras de sisal após 1, 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem

Estes resultados estão de acordo com o que foi observado no estudo de Claramunt *et al.* (2010), ou seja, a estabilização dimensional das fibras após aplicação de tratamentos de molhagem e secagem. Logo, a situação alcançada seria o comportamento esperado em relação a fibras submetidas ao processo de hornificação.

4.2.3. Análise termogravimétrica

Na Figura 4-3 apresentam-se os resultados da análise termogravimétrica de fibras sem tratamento superficial e com 1, 5 e 10 ciclos de molhagem e secagem. É possível identificar claramente uma semelhança entre as curvas obtidas para as fibras antes e após os tratamentos,

não sendo detectadas variações significativas nas temperaturas em que estas ocorrem. Verifica-se que ocorrem perdas de massa principalmente em dois eventos térmicos diferentes, *i.e.*, o primeiro durante a fase de perda de água da amostra (~100 °C) e o segundo entre 200 e 400 °C durante a perda de lignina, hemicelulose e celulose.

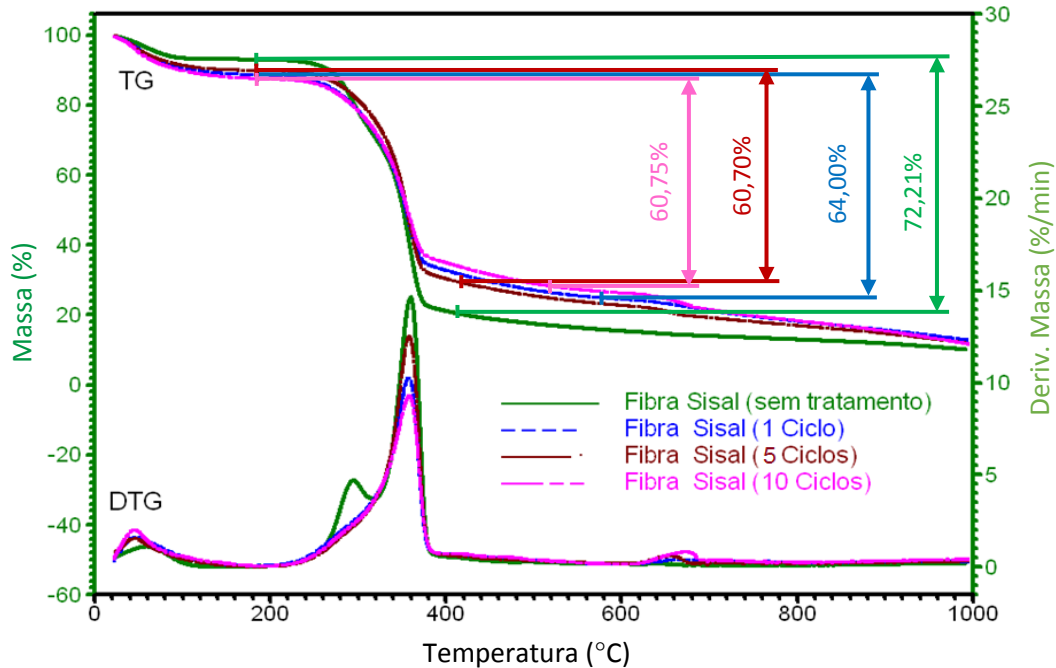


Figura 4-3 - Análise termogravimétrica das fibras de sisal antes e após diferentes ciclos de tratamento de hornificação

No entanto, para as fibras sem tratamento há uma clara diferença neste segundo evento térmico, nomeadamente entre 280 e 320 °C ocorre um pico referente à perda de massa devido à decomposição da hemicelulose e um segundo pico entre 320 e 400 °C correspondente à decomposição da celulose. A decomposição da lignina ocorre em várias etapas até aproximadamente 1000 °C, logo não é possível identificar um pico correspondente. Para as fibras com os vários ciclos de tratamento, esta diferença não é observada, possivelmente pela decomposição prematura da hemicelulose devida ao tratamento com a solução de hidróxido de cálcio.

Como se pode observar na Figura 4-3, existe uma tendência para uma menor perda de massa, entre os 200 e 400°C, quanto maior o número de ciclos de tratamentos de hornificação. As fibras com 10 ciclos apresentam nesse intervalo uma diminuição de massa quase 12% inferior às fibras não hornificadas.

4.2.4. Variação dimensional

Os valores médios das áreas das secções transversais das fibras antes e após o tratamento de hornificação são apresentados na Figura 4-4. Para as fibras sem tratamento, a

área média das fibras saturadas foi $0,030 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ e para as fibras com 10 ciclos foi $0,025 \pm 0,01 \text{ mm}^2$.

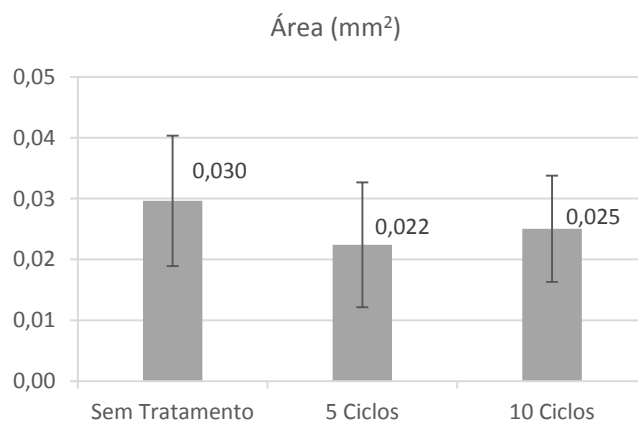


Figura 4-4 - Variação dimensional das fibras sem e com tratamento

A Figura 4-4 mostra que o tratamento provocou alguma redução da área da secção transversal das fibras, embora se esperasse e fosse desejável uma redução superior para garantir que todos os espaços vazios tinham colapsado e que não haveria hipótese da fibra dilatar nem retrair em contacto com água (note-se que a estabilidade dimensional é um factor muito importante para a adesão fibra-matriz). Existem diversas hipóteses para explicar as mudanças ao nível da estrutura celular da fibra com a hornificação. Mostram-se imagens obtidas através de um microscópio electrónico de varrimento (MEV) de secções transversais de uma fibra não tratada e de uma fibra submetida aos ciclos de tratamento (Figura 4-5).

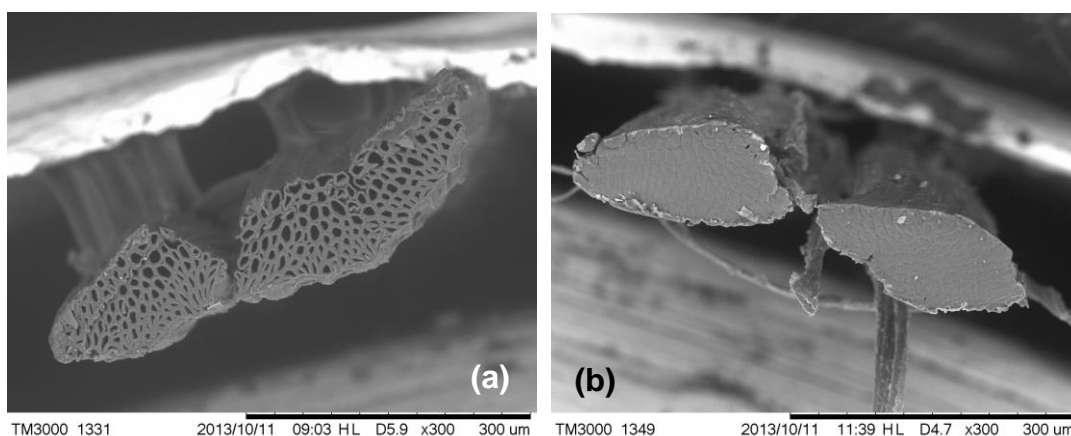


Figura 4-5 – Secção transversal de uma fibra (a) não tratada e (b) tratada

É possível verificar, pelas imagens, a redução quase total do lúmen (vazios) e a expansão das paredes celulares, embora a área total da secção transversal não seja

expressivamente inferior. Apesar das fibras apresentadas na figura anterior não serem as mesmas, este comportamento foi observado para todas as amostras analisadas.

Através dos resultados e das imagens obtidos, admite-se a validade de uma hipótese para justificar as grandes mudanças estruturais ocorridas. Esta baseia-se na formação de pontes de hidrogénio irreversíveis entre as fibrilas e as microfibrilas impedindo, assim, a absorção (Stone *et al.*, 1968). De acordo com esta hipótese, as microfibrilas que compõem as fibras seriam ligadas após a secagem, prevenindo deste modo a expansão excessiva quando novamente saturadas.

4.2.5. Resistência à tracção directa

Após a hornificação, realizaram-se os ensaios de tracção directa das fibras de forma a avaliar as possíveis modificações do tratamento no seu comportamento. Na Figura 4-6 apresentam-se as curvas força-deslocamento axial das fibras não tratadas, com 5 e 10 ciclos de tratamento e na Tabela 4-1 exibem-se os valores médios de carga e resistência de rotura à tracção (F_u e σ_u), a deformação de rotura (ϵ_u) e a rigidez (K) das respectivas fibras. São também apresentados os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação para cada propriedade mencionada.

Esperava-se que este tipo de tratamento diminuísse consideravelmente a dispersão dos resultados, tanto em termos de rigidez como de resistência. Em termos de resistência, a dispersão diminuiu quase para metade entre as fibras naturais e as sujeitas a 10 ciclos (Anexo 1), apesar de permanecer ainda muito elevada. Entre as fibras tratadas com 5 e 10 ciclos, a variação não foi significativa. Ocorreu um aumento consistente do valor médio da tensão de rotura ao longo dos ciclos atingindo um máximo de 8% para as fibras com 10 ciclos de tratamento; no entanto, tendo em conta a muito elevada variabilidade desta propriedade, esse aumento tem um significado limitado.

A propriedade que sofreu uma alteração maior com o tratamento de hornificação foi a capacidade de deformação das fibras de sisal, tendo-se verificado um decréscimo de quase 50%. Por outro lado, observou-se um acréscimo na rigidez das fibras para os 10 ciclos (de cerca de 18%), apesar de ter havido uma ligeira diminuição no caso dos 5 ciclos. Mais uma vez, os desvios padrão obtidos são bastante elevados, aspecto que é característico deste tipo de materiais naturais; deste modo, esta tendência também terá um significado limitado.

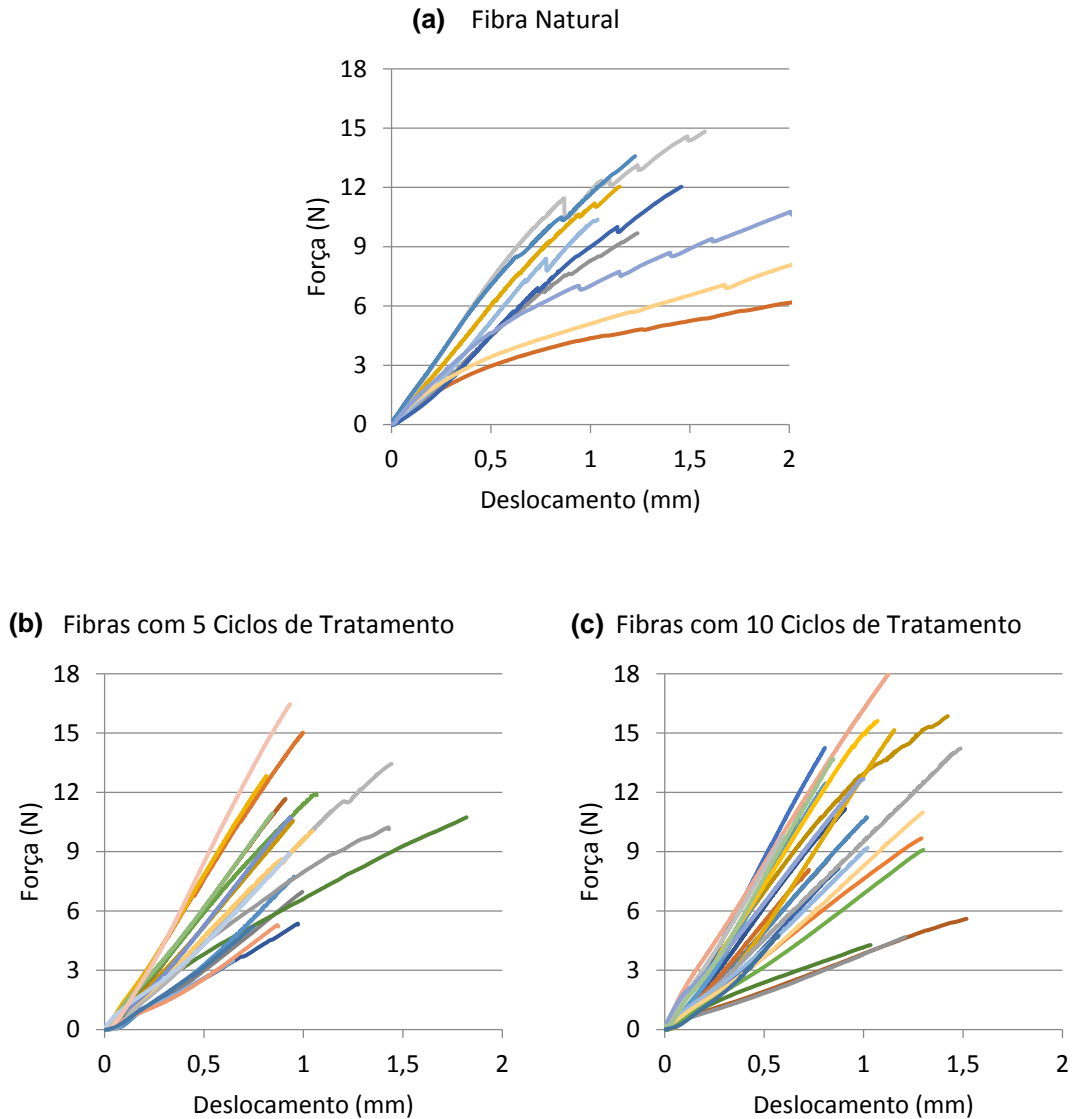


Figura 4-6 - Curvas força-deslocamento para avaliação da influência do tratamento: (a) fibras naturais, (b) fibras com 5 ciclos de tratamento e (c) fibras com 10 ciclos de tratamento

Tabela 4-1 - Propriedades mecânicas das fibras naturais, com 5 e 10 ciclos de tratamento

Fibras	F_u (N)	σ_u (MPa)	ϵ_u	K (N/mm)
Natural	$9,69 \pm 3,66$ (37,7)	$416,17 \pm 211,96$ (50,9)	$0,08 \pm 0,04$ (51,5)	$10,67 \pm 3,61$ (33,8)
5 Ciclos	$9,07 \pm 3,96$ (43,6)	$425,89 \pm 106,21$ (24,9)	$0,04 \pm 0,01$ (26,3)	$10,04 \pm 4,51$ (44,9)
10 Ciclos	$10,63 \pm 3,77$ (35,4)	$448,69 \pm 119,09$ (26,5)	$0,04 \pm 0,01$ (29,7)	$12,54 \pm 4,66$ (37,1)

Como o deslocamento medido tem em conta não só a extensão da fibra mas também as deformações associadas ao sistema de ensaio (peças, garras, etc.), optou-se por não determinar o módulo de elasticidade, mas a rigidez.

Quanto ao andamento das curvas obtidas, é possível identificar pela Figura 4-6 uma maior não linearidade nas fibras naturais do que nas fibras tratadas. Por outro lado, todas apresentam um comportamento frágil na rotura. É ainda de notar que com o tratamento, as fibras tendem a tornar-se mais rígidas e a apresentar menor extensão última.

Pelas razões acima referidas, optou-se por utilizar as fibras com 10 ciclos de tratamento para dar continuação ao trabalho pois, em geral, as propriedades consideradas mais importantes (resistência e rigidez) aumentaram comparativamente às outras fibras.

Spence *et al.* (2010), ao aplicar um tratamento de hornificação em polpas, também observaram um aumento significativo na resistência à tracção directa das fibras.

4.2.6. Aderência fibra-matriz

A avaliação da aderência fibra-matriz foi efectuada, como mencionado anteriormente, por ensaios de *pull-out*, cujos gráficos teóricos força-deslocamento se encontram apresentados na Figura 4-7. Podem ser identificadas duas regiões nestes gráficos: uma primeira, correspondente à zona elástica linear, na qual a aderência é idealizada como sendo perfeita e que se verifica antes da matriz fissurar; uma segunda região, caracterizada pela propagação instável da fissura na interface fibra-matriz, representada por uma ligeira perda de carga de arrancamento. Esta segunda fase culmina com uma brusca diminuição da força, a qual simboliza a rotura total da ligação fibra-matriz, dando posteriormente início ao processo de arrancamento da fibra, caracterizado por um processo de aderência friccional, mantendo-se a carga sensivelmente constante.

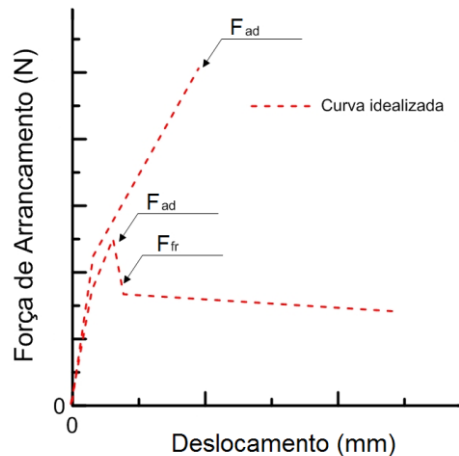


Figura 4-7 - Gráfico ideal força-deslocamento de um ensaio *pull-out* onde F_{ad} é a força adesional e F_{fr} a força friccional

As tensões adesional (τ_{ad} , Equação 4.1) e friccional (τ_{fr} , Equação 4.2) foram calculadas através das seguintes equações,

$$\tau_{ad} = \frac{F_{ad}}{P * l} \quad (4.1)$$

$$\tau_{fr} = \frac{F_{fr}}{P * l} \quad (4.2)$$

onde “F_{ad}” representa a força adesional, “F_{fr}” a força friccional, “l” o comprimento de embebimento (que neste trabalho corresponde a 25 mm) e “P” o perímetro da fibra obtido através de imagens obtidas por microscopia eletrónica de varrimento (MEV) e posterior análise em *AutoCAD*.

Estes ensaios foram elaborados para as combinações de matrizes natural, com 25% e 50% de substituição de areia natural por areia reciclada e para fibras naturais e tratadas.

O andamento da curva ideal representada acima pode ser identificado em algumas respostas medidas experimentalmente no ensaio de *pull-out* ilustradas na Figura 4-8. Nalguns casos, durante o processo de redução da força após a carga de pico, nota-se um novo aumento de resistência, que pode ser explicado pela mobilização adicional de fricção nestes provetes provocada, por exemplo, pelo contacto da fibra com um grão de areia na interface fibra-matriz.

Nos ensaios realizados com fibras naturais e matriz com 25% de substituição verificaram-se valores anormalmente reduzidos (Mistura 3 da Figura 4-8) cuja razão pode ter a ver com o facto de se tratarem de fibras sem aplicação do tratamento. Porém, em média, o comportamento da matriz AR1 com fibra natural foi muito parecido à mesma matriz com fibras tratadas, sendo que o mesmo também se verificou para a matriz AR2. Nos resultados com a matriz natural já se denotou uma diferença mais elevada entre a utilização de fibras naturais ou hornificadas, nomeadamente no valor de tensão máxima (Figura 4-9).

Para a matriz AR2, na maior parte das curvas distingue-se a ausência de uma redução brusca de carga, situação que é mais visível no caso das fibras naturais do que nas fibras tratadas. Este facto leva a concluir que há uma menor aderência fibra-matriz na presença de uma percentagem maior de areia reciclada, levando a fibra muito rapidamente à fase de arrancamento sem tirar partido da parte adesional (fase de aderência ideal na interface fibra-matriz). No entanto, com o tratamento das fibras, já é possível identificar a existência da redução de carga após a fase adesional podendo isto indicar uma melhoria na aderência fibra-matriz.

Nas Tabela 4-2 e Tabela 4-3 apresentam-se tanto os valores médios como os desvios padrão e coeficientes de variação da inclinação do troço adesional (Rigidez – K), assim como a carga, a tensão e o deslocamento adesional (F_{ad}; σ_{ad}; D_{ad}) e friccional (F_{fr}; σ_{fr}; D_{fr}). Os coeficientes de variação obtidos nas propriedades analisadas neste ensaio são bastante elevados, alcançando os 70%, imprimindo a estes resultados um grau de confiança limitado.

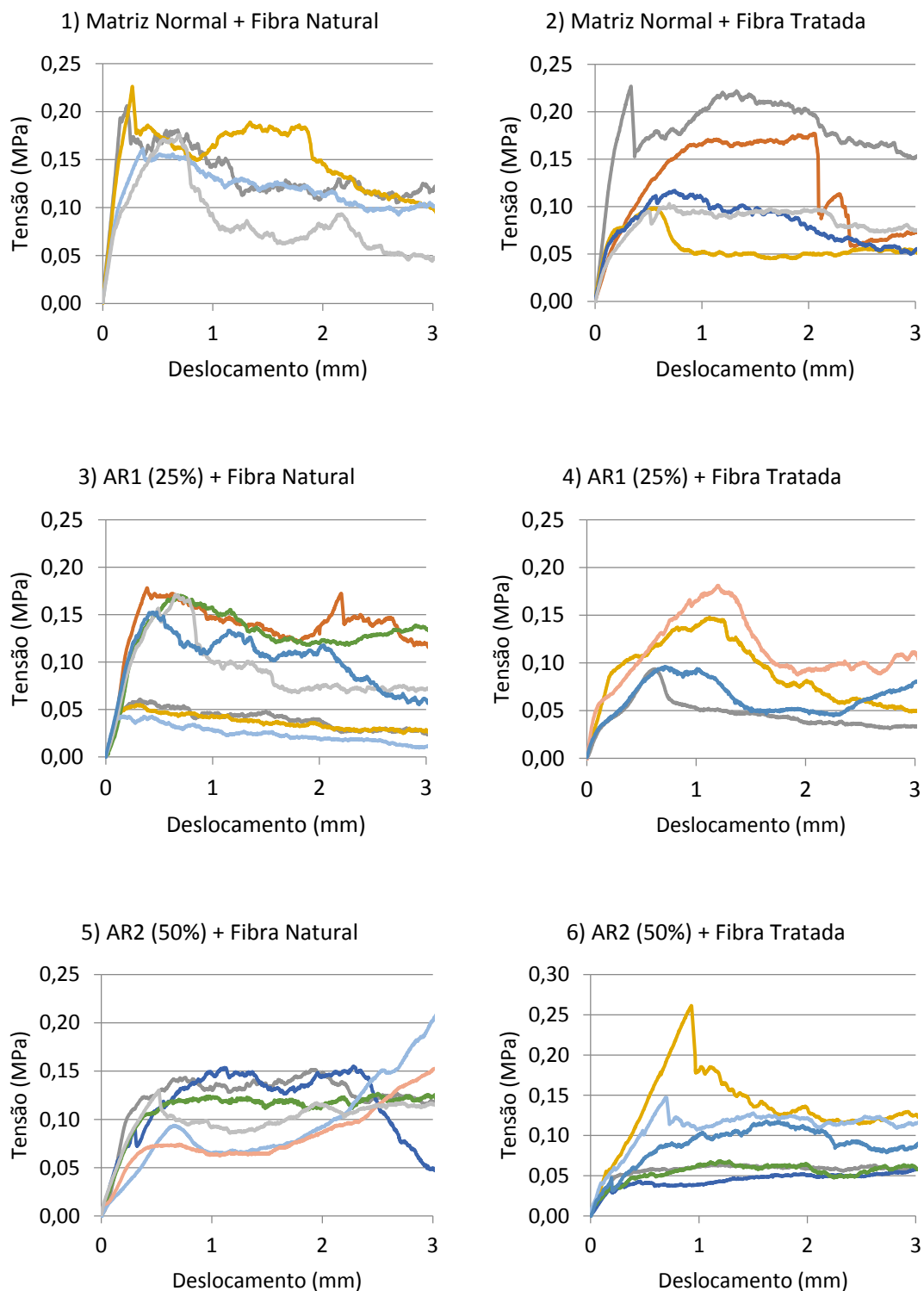


Figura 4-8 - Curvas tensão - deslocamento do ensaio de pull-out

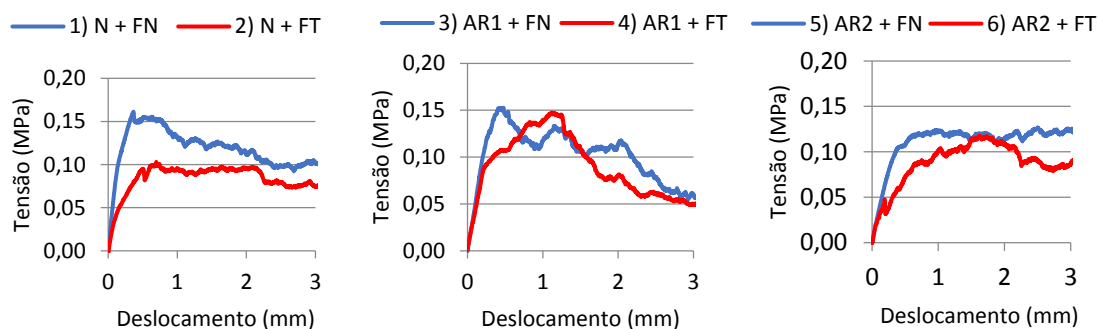


Figura 4-9 - Resposta média das misturas ao ensaio de pull-out

Tabela 4-2 - Propriedades mecânicas adesivas das misturas submetidas ao ensaio de arrancamento (pull-out)

Mistura	K (N/mm)	F _{ad} (N)	σ _{ad} (MPa)	D _{ad} (mm)
1) N + Fibra natural	19,41 ± 9,75 (50,2)	4,70 ± 1,35 (28,7)	0,18 ± 0,04 (19,9)	0,53 ± 0,36 (68,8)
2) N + Fibra tratada	17,68 ± 5,40 (30,5)	4,59 ± 1,38 (30,2)	0,15 ± 0,06 (39,2)	0,88 ± 0,67 (76,5)
3) AR1 (25%) + Fibra natural	17,28 ± 9,22 (53,3)	4,24 ± 2,78 (65,7)	0,14 ± 0,08 (55,0)	0,52 ± 0,25 (49,1)
4) AR1 (25%) + Fibra tratada	10,90 ± 5,38 (49,4)	2,75 ± 1,15 (41,9)	0,11 ± 0,05 (48,7)	1,08 ± 0,44 (41,2)
5) AR2 (50%) + Fibra natural	9,93 ± 5,12 (51,6)	2,91 ± 0,85 (29,1)	0,11 ± 0,04 (32,5)	1,26 ± 0,84 (66,9)
6) AR2 (50%) + Fibra tratada	11,44 ± 5,66 (49,5)	3,60 ± 2,68 (74,5)	0,11 ± 0,08 (67,0)	1,13 ± 0,82 (72,7)

K – rigidez; F_{ad} – carga adesional; σ_{ad} – tensão adesional; D_{ad} – deslocamento adesional

Tabela 4-3 - Propriedades mecânicas friccionais das misturas submetidas ao ensaio de arrancamento (pull-out)

Mistura	F _{fr} (N)	σ _{fr} (MPa)	D _{fr} (mm)
1) N + Fibra natural	3,21 ± 1,57 (49,0)	0,12 ± 0,04 (29,8)	1,21 ± 0,08 (6,5)
2) N + Fibra tratada	2,75 ± 0,92 (33,3)	0,09 ± 0,04 (45,0)	1,45 ± 0,88 (60,6)
3) AR1 (25%) + Fibra natural	3,16 ± 2,20 (69,6)	0,10 ± 0,06 (56,0)	1,13 ± 0,06 (52,9)
4) AR1 (25%) + Fibra tratada	1,61 ± 0,45 (28,1)	0,06 ± 0,02 (32,4)	1,59 ± 0,48 (30,5)
5) AR2 (50%) + Fibra natural	2,31 ± 0,60 (26,0)	0,09 ± 0,03 (37,2)	1,36 ± 0,63 (46,1)
6) AR2 (50%) + Fibra tratada	2,90 ± 1,80 (61,9)	0,09 ± 0,05 (50,7)	1,44 ± 0,79 (54,8)

F_{fr} – carga friccional; σ_{fr} – tensão friccional; D_{fr} – deslocamento friccional

Os resultados do ensaio de arrancamento (*pull-out*) na presença das fibras tratadas não apontaram uma melhoria significativa quanto à capacidade de ancoragem da fibra à matriz. Em todos os casos analisados, a tensão adesional média manteve-se constante ou diminuiu no caso mencionado quando comparado com os ensaios realizados com fibras não tratadas. Ao contrário do que foi observado por Zhong (2011), em que o tratamento aplicado às fibras provocou a

desfibrilação das mesmas aumentando a área de contacto entre o reforço e a matriz e consequentemente a adesão fibra-matriz, não se observou, com o tratamento das fibras realizado neste trabalho, melhorias no que a esta propriedade diz respeito.

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que para o comprimento de embebedimento de 25 mm não ocorreu o rompimento da fibra para a maioria das amostras ensaiadas, embora tenha ocorrido em casos pontuais tanto a rotura da fibra no exterior do provete (Figura 4-10) como no interior do mesmo (Figura 4-11). Este resultado mostrou que o comprimento analisado não foi suficiente para mobilizar totalmente a resistência à tracção da fibra através da aderência fibra-matriz, ocorrendo, por isso, o seu deslizamento no interior da matriz. Em contraposição ao resultado obtido neste trabalho, Toledo Filho (1997) observou, para um comprimento de embebedimento de 50 mm, o rompimento da maior parte das amostras tanto para as fibras tratadas como para as não tratadas. É então possível prever, através dos resultados apresentados, que o comprimento de embebedimento ideal para fibras de sisal se encontra entre 25 e 50 mm.

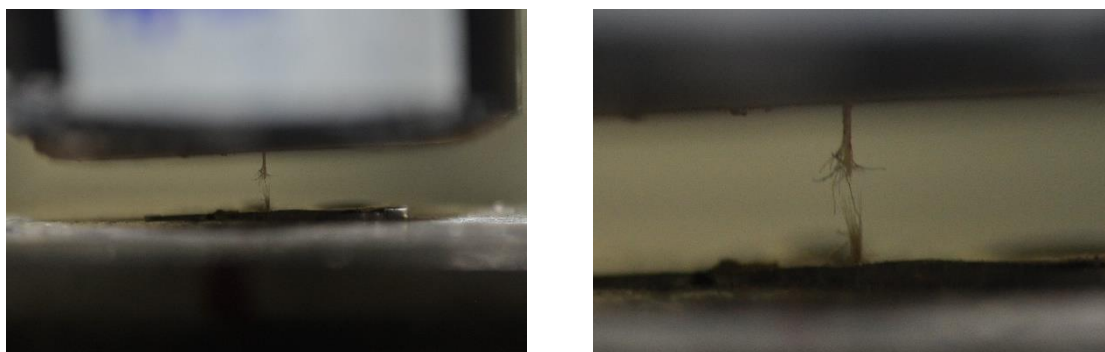


Figura 4-10 - Exemplo de rompimento da fibra no exterior do provete durante ensaio de arrancamento de fibra não tratada



Figura 4-11 – (a) Provete de ensaio de arrancamento de fibra tratada rompido longitudinalmente; (b) Impressão da fibra na matriz; (c) Rotura da fibra durante ensaio de arrancamento

Para as matrizes natural e AR1, ocorreu um decréscimo do valor médio da tensão adesional e friccional de aproximadamente 20% com a troca de fibras sem tratamento para as fibras hornificadas. Para o caso da matriz AR2 (50%), esta propriedade manteve-se constante aquando da análise entre fibras tratadas e não tratadas, como se observa na Figura 4-12.

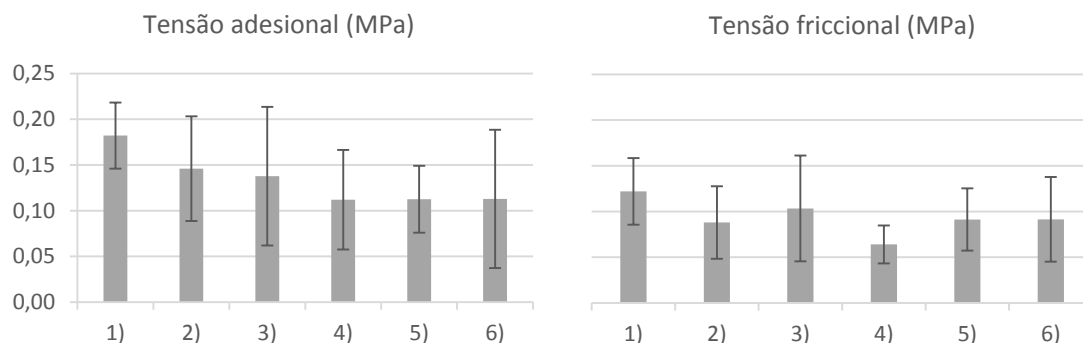


Figura 4-12 – Comparação dos valores médios da tensão adesional (esquerda) e friccional (direita) das diferentes misturas

Comparando as diferentes matrizes com as fibras naturais, identifica-se também uma diminuição do valor médio da tensão adesional de 24% e 38% entre N e AR1 (25%) e entre N e AR2 (50%), respectivamente, sendo que a diferença entre AR1 e AR2 é 18%. Assim, identifica-se a matriz com 50% de substituição de areia natural (AR2) como a que tem menor aderência com a fibra natural.

Relativamente à comparação entre fibras hornificadas com diferentes matrizes, pelos resultados apresentados, conclui-se que com a matriz natural a tensão adesional média é 23% superior aos resultados médios alcançados para as restantes matrizes.

É importante referir que com AR2 (substituição de 50% de areia natural), os resultados médios da tensão adesional são equivalentes aos obtidos com AR1 (substituição de 25%). Este facto é favorável, uma vez que com uma quantidade superior de material reciclado (50%) seria possível atingir uma resistência praticamente igual ao compósito com apenas 25% de agregados reciclados, permitindo aumentar a incorporação de um material mais ecológico.

No que concerne à rigidez, identifica-se um decréscimo desta propriedade crescente de AR1 (3 da Figura 4-13) e AR2 (5 da Figura 4-13) em comparação com N (1 da Figura 4-13) com fibras sem tratamento (11% e 49%, respectivamente). Já para as fibras tratadas, a diminuição é em média de 37% (2, 4 e 6 da Figura 4-13).

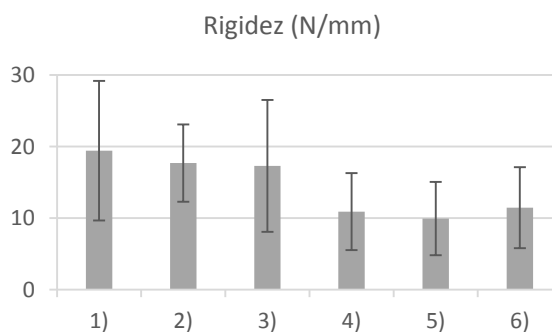


Figura 4-13 - Comparação dos valores médios da rigidez das diferentes misturas

4.3. Ensaio de consistência

Foram realizados ensaios de consistência para todos os compósitos, logo após a sua produção, de forma a caracterizar as características reológicas dos mesmos. Na Figura 4-14 encontram-se os resultados deste ensaio para as modificações, tanto a nível de agregado como de introdução de fibras, realizadas na matriz AR2.



Figura 4-14 – Resultados dos ensaios de consistência para os compósitos à base da matriz AR2

Pela Figura 4-15, onde estão representados os valores médios de espalhamento e os respectivos desvios padrão das diferentes argamassas, é possível identificar uma redução acentuada da consistência das matrizes com a introdução de fibras. Nas matrizes N, AR1 e AR2 tal redução é de 43%, 34% e 37%, respectivamente. É de notar que o tratamento das fibras para a mesma percentagem não diminui o valor do espalhamento; no entanto, o aumento da taxa de incorporação de fibras de 2% para 4% tem um efeito negativo no que a esta propriedade diz respeito, uma vez que diminui o espalhamento em mais 10% aproximadamente.

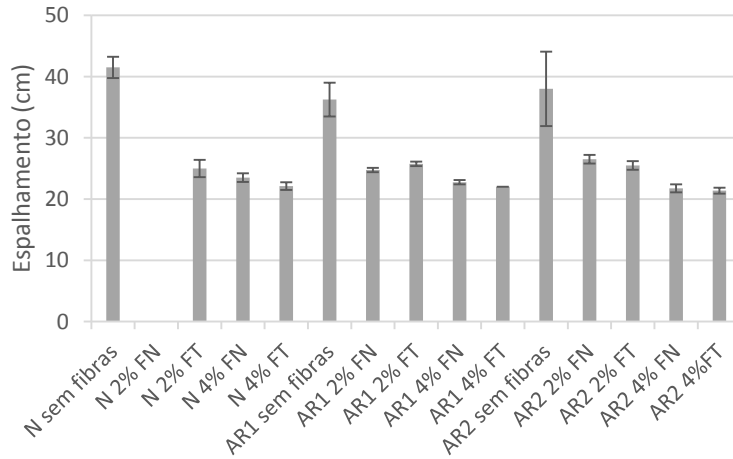


Figura 4-15 - Valores médios e respectivos desvios padrão do valor de espalhamento

A utilização de superplastificante e VMA em detrimento da adição de água tornou a mistura suficientemente homogênea mesmo para o cenário mais difícil, *i.e.*, 50% de material reciclado e 4% de fibras. Logo, não criou dificuldades significativas na moldagem das placas, embora a mistura se fosse tornando cada vez menos fluida. Isto deve-se ao facto da pasta aderida aos agregados reciclados absorver uma quantidade superior de água comparativamente ao agregado natural e, para além destes, as fibras terem também uma maior absorção de água.

Os resultados obtidos neste ensaio mostraram que o tratamento das fibras não permitiu obter um efeito desejável no que concerne à absorção de água da mistura, pois o espalhamento das misturas onde as mesmas foram incorporadas foi idêntico ao das composições com fibras naturais.

4.4. Caracterização mecânica dos compósitos

4.4.1. Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão foram realizados apenas para as duas misturas em análise com introdução de areia reciclada (AR1 e AR2) sem o reforço das fibras devido a restrições de tempo e material. Na Figura 4-16 estão apresentadas as curvas tensão-deformação típicas (provete representativo) obtidas dos ensaios de resistência à compressão executados aos 28 dias de idade. O comportamento foi qualitativamente semelhante para todas as misturas, aumentando a força com rigidez aproximadamente constante até um valor de pico a partir do qual a matriz fissurou e a força diminuiu a uma taxa sensivelmente constante e menor do que a da fase inicial (ascendente).

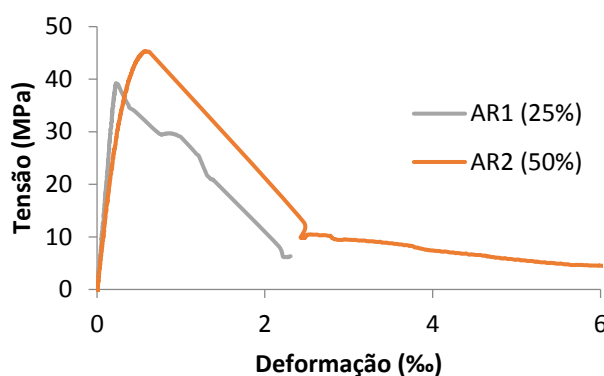


Figura 4-16 - Curvas tensão-deformação para as matrizes AR1 e AR2

Os resultados médios da tensão e deformação máxima ($\sigma_{\text{máx}}$ e $\epsilon_{\text{máx}}$), assim como do módulo de elasticidade (E) são apresentados na Tabela 4-4. Todos os valores são seguidos pelos respectivos desvios padrão e coeficientes de variação, no entanto, para a matriz normal os valores são apenas indicados pelo trabalho de Ferreira (2012).

Tabela 4-4 - Propriedades mecânicas das matrizes submetidas ao ensaio de compressão

Mistura	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (‰)	E (GPa)
Normal	33,56 ± 1,47 (4,4)	5,27 ± 0,07 (1,4)	13,27 ± 0,31 (2,3)
AR1 (25%)	39,18*	0,22*	12,57*
AR2 (50%)	44,25 ± 1,53 (3,5)	0,59 ± 0,03 (5,7)	12,32 ± 1,18 (9,6)

$\sigma_{\text{máx}}$ – tensão máxima; $\epsilon_{\text{máx}}$ – deformação máxima; E – módulo de elasticidade

* só foi possível obter um resultado válido

Observando os gráficos tensão-deformação e a tabela é possível verificar a existência de uma tendência de crescimento da tensão máxima com o aumento da percentagem de substituição de areia natural por areia reciclada, chegando a uma diferença relativa máxima de 32% (por comparação com a composição normal). A razão mais plausível para este resultado é o facto de se ter utilizado uma relação a/c constante, *i.e.*, a mesma quantidade de água foi introduzida tanto nas misturas com areia natural como nas com areia reciclada. Sabendo que os agregados reciclados contêm resíduos de pasta, estes absorvem mais água levando a que a pasta produzida fique com menos água livre, resultando, por isso, uma argamassa mais compacta e, conseqüentemente, com resistência superior. Se, na formulação das misturas, se tivesse optado pela opção de espalhamento constante, em detrimento da relação a/c, ter-se-ia que ter aumentado a quantidade de água com a introdução de agregado reciclado, o que teria criado um efeito nocivo para a pasta.

Por outro lado, pela tabela apresentada, a deformação correspondente à tensão máxima apresenta um aumento acentuado com a introdução de uma maior percentagem de material

reciclado, sendo que aquela deformação para a composição AR2 é 2,6 vezes superior à registada para a matriz AR1 (Figura 4-17).

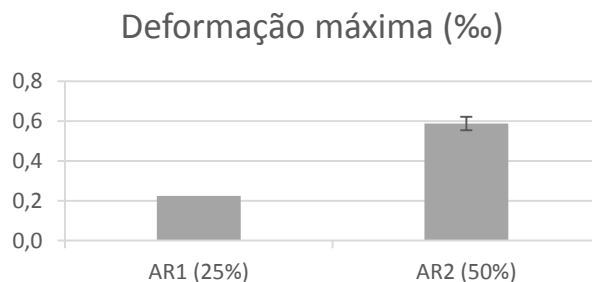


Figura 4-17 - Comparação da deformação correspondente à tensão máxima entre misturas

O módulo de elasticidade apresentou uma ligeira redução com a incorporação de areia reciclada (não obstante o elevado desvio padrão nas misturas em que se ensaiou mais do que um provete). Este resultado é consistente com o facto de ter sido introduzido material reciclado, que terá certamente pasta aderida tornando este material mais deformável.

Na Figura 4-18 representam-se os modos de rotura dos provetes denotando que, para o mesmo nível de carga, os provetes com maior percentagem de substituição de areia natural por reciclado (AR2) apresentaram uma maior desintegração.

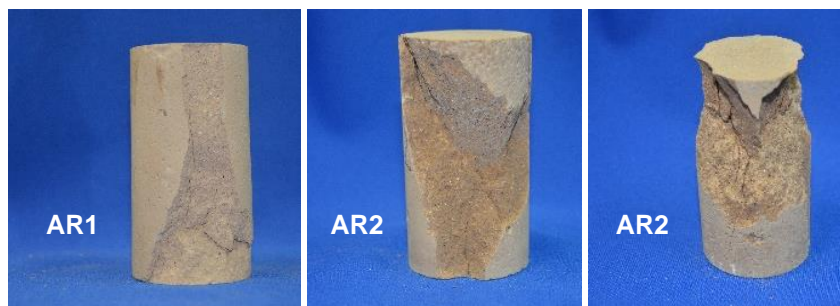


Figura 4-18 - Rotura à compressão

4.4.2. Ensaio de tracção directa

Submeteram-se a ensaios de tracção directa as três matrizes sem reforço fibroso e a matriz normal e AR2 com a introdução em cada uma, tanto de fibra natural como de fibra tratada numa percentagem de 4%. Na Tabela 4-5 são apresentados os valores médios da tensão e deformação associados ao aparecimento da 1ª fissura (σ_{1f} e ϵ_{1f}) e do módulo de elasticidade (E), a par dos respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 4-5 - Propriedades mecânicas das misturas submetidas ao ensaio de tracção directa

Misturas	σ_{1f} (MPa)	ϵ_{1f} (‰)	E (GPa)
7) Matriz Normal	1,69 *	0,26 *	11,59 *
8) Matriz AR1 (25%)	1,45 ± 0,64 (44,1)	0,10 ± 0,09 (92,4)	13,62 ± 4,71 (34,6)
9) Matriz AR2 (50%)	0,72 **	0,5 **	4,29 **
16) Matriz N + 4% FN	0,70 ± 0,03 (4,9)	0,33 ± 0,14 (42,5)	4,09 ± 0,88 (21,5)
18) Matriz AR2 + 4% FN	0,86 ± 0,32 (37,0)	0,17 ± 0,07 (42,9)	6,55 ± 1,15 (17,5)
19) Matriz N + 4% FT	1,29 ± 0,33 (25,9)	0,15 ± 0,04 (24,4)	8,41 ± 0,56 (6,7)
21) Matriz AR2 + 4% FT	1,34 ± 0,28 (21,2)	0,16 ± 0,03 (21,1)	9,22 ± 4,16 (45,1)

σ_{1f} – tensão de 1ª fissura; ϵ_{1f} – deformação de 1ª fissura; E – módulo de elasticidade

* só foi possível obter menos de três resultados válidos;

** Ensaio não deve ter sido conduzido até à rotura

Infelizmente, devido ao facto de todas as roturas se terem dado pelas garras (Figura 4-19), os valores obtidos terão que ser analisados com alguma reserva na medida em que a resistência medida constitui um minorante da real capacidade do material.



Figura 4-19 - Modo de rotura de provete ensaiado à tracção

Por uma razão que não foi possível apurar, a aquisição de dados do deslocamento medido através dos LVDT acoplados ao provete estagnou no momento da primeira fissura. Por essa razão, considerou-se o deslocamento medido pela máquina de ensaios que engloba o deslocamento das peças da própria máquina, apenas de forma a poder observar o comportamento pós-fissuração com as limitações anteriormente referidas (Figura 4-20); logo, não foram apresentados os valores da tensão e deformação máxima pós-fissuração.

É possível verificar que as matrizes normais apresentaram um comportamento frágil em oposição aos compósitos que, como expectável, exibiram um comportamento mais dúctil, conseguindo absorver energia para além dos 2 mm de deslocamento. Em face da variabilidade que esta propriedade apresenta, não foi possível analisar uma curva representativa de cada composição. No entanto, pode referir-se que existe uma tendência para a resistência máxima aumentar em média para quase o dobro quando se compara as composições com fibras naturais e as misturas com fibras tratadas. Comparando os resultados em termos de fibras naturais, parece haver um melhor comportamento por parte da matriz AR2, situação que já não se verifica no caso das composições com fibras tratadas, para as quais os valores de resistência

apresentam a mesma ordem de grandeza (pese embora a variabilidade dos resultados ser muito superior quando utilizada a matriz AR2).

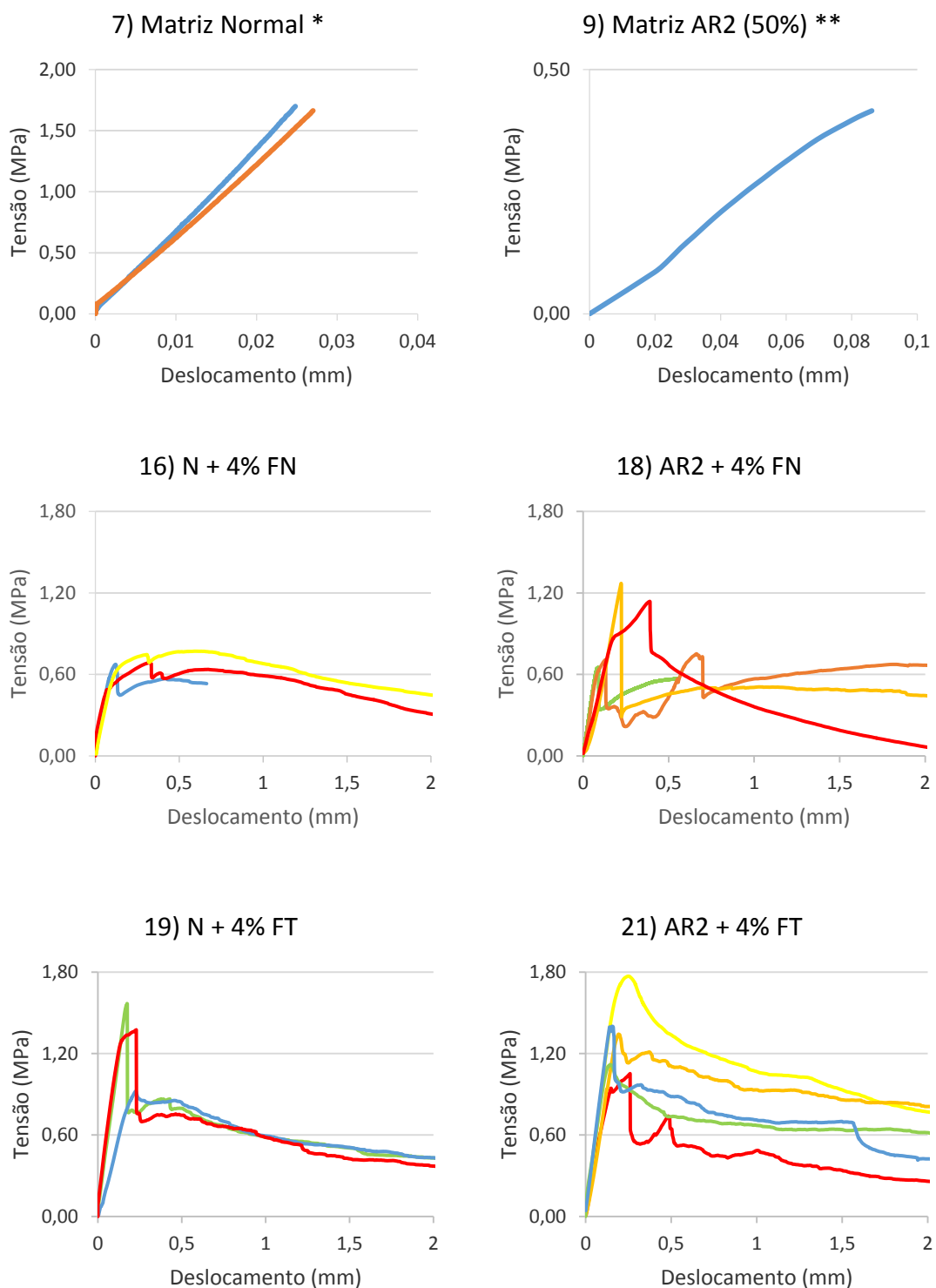


Figura 4-20 - Curvas tensão - deslocamento do ensaio de tracção directa

Não obstante as limitações dos resultados obtidos neste ensaio, novamente, a matriz reciclada parece apresentar uma melhor aderência às fibras devido à rugosidade e irregularidade das suas partículas, embora com este ensaio as fibras tratadas tenham levado a um ganho de resistência. Isto pode dever-se ao facto de a maior área de contacto da fibra, provocada pela sua hornificação, ter fortalecido a adesão fibra-matriz.

4.4.3. Ensaio de flexão em quatro pontos

Os ensaios de flexão foram realizados sobre todas as matrizes sem e com a introdução tanto de fibras naturais como das hornificadas e em percentagens de 2% e 4%. Na Tabela 4-6 encontram-se os resultados médios da tensão correspondente à primeira fissura (σ_{1f}) e o respectivo deslocamento (D_{1f}), a tensão máxima pós-fissuração (σ_u) e também o respectivo deslocamento (D_u), o módulo de elasticidade (E) e, por último, a tenacidade expressa pelo índice I_{10} (ITC – I_{10}). Todos os valores são sucedidos pelo seu desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4-6 - Propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão

Mistura	σ_{1f} (MPa)	D_{1f} (mm)	σ_u (MPa)	D_u (mm)	E (GPa)	ITC - I_{10}
7) Matriz Normal	5,93 ± 0,72 (12,2)	0,57 ± 0,01 (1,3)	-	-	13,74 ± 2,21 (16,1)	0,00
8) Matriz AR1 (25%)	3,90 ± 1,15 (29,5)	0,29 ± 0,07 (24,9)	-	-	11,72 ± 3,57 (30,5)	0,00
9) Matriz AR2 (50%)	4,99 ± 1,76 (35,2)	0,39 ± 0,11 (27,2)	-	-	10,44 ± 4,13 (39,6)	0,00
10) Matriz N + 2% FN *	-	-	-	-	-	-
11) Matriz AR1 + 2% FN	3,28 ± 0,13 (4,0)	0,33 ± 0,01 (3,0)	1,91 ± 0,14 (7,3)	4,24 ± 1,16 (27,3)	7,60 ± 1,10 (14,4)	4,81 ± 0,51 (10,5)
12) Matriz AR2 + 2% FN	4,29 ± 0,29 (6,8)	0,35 ± 0,01 (4,0)	1,97 ± 0,66 (33,5)	2,71 ± 0,83 (30,8)	8,57 ± 4,96 (57,9)	4,48 ± 0,38 (8,4)
13) Matriz N + 2% FT	3,77 ± 0,75 (20,0)	0,32 ± 0,04 (11,7)	1,48 ± 0,66 (44,6)	4,66 ± 2,69 (57,7)	8,40 ± 1,88 (22,3)	4,32 ± 0,41 (9,5)
14) Matriz AR1 + 2% FT	4,45 ± 0,83 (18,7)	0,39 ± 0,02 (5,5)	1,97 ± 0,04 (1,8)	2,65 ± 1,12 (42,5)	7,65 ± 0,49 (6,5)	4,01 ± 0,12 (3,0)
15) Matriz AR2 + 2% FT	4,14 ± 0,68 (16,4)	0,46 ± 0,04 (7,8)	1,52 ± 0,14 (9,3)	2,10 ± 0,74 (35,4)	8,18 ± 2,09 (25,5)	4,05 ± 0,09 (2,2)
16) Matriz N + 4% FN *	-	-	-	-	-	-
17) Matriz AR1 + 4% FN	1,48 ± 0,26 (17,7)	0,34 ± 0,08 (24,3)	2,08 ± 0,39 (18,8)	6,73 ± 1,71 (25,3)	3,26 ± 0,03 (0,8)	9,15 ± 0,95 (10,3)
18) Matriz AR2 + 4% FN	2,60 ± 0,37 (14,1)	0,32 ± 0,06 (17,0)	2,72 ± 0,25 (9,1)	1,94 ± 1,15 (59,1)	3,40 ± 1,57 (46,3)	7,61 ± 0,15 (2,0)
19) Matriz N + 4% FT	3,13 ± 0,34 (11,0)	0,42 ± 0,07 (17,2)	2,15 ± 0,32 (14,9)	2,68 ± 0,93 (34,6)	4,79 ± 0,19 (4,0)	6,39 ± 1,02 (16,0)
20) Matriz AR1 + 4% FT	3,70 ± 0,57 (15,5)	0,33 ± 0,05 (15,1)	2,92 ± 0,54 (18,6)	2,12 ± 0,38 (17,8)	7,00 ± 1,40 (20,0)	6,41 ± 1,10 (17,1)
21) Matriz AR2 + 4% FT	3,08 ± 0,84 (27,3)	0,29 ± 0,07 (23,2)	2,49 ± 0,37 (14,9)	1,83 ± 0,52 (28,5)	5,75 ± 2,91 (50,6)	7,18 ± 0,83 (11,6)

σ_{1f} – tensão de 1ª fissura; D_{1f} – deslocamento de 1ª fissura; σ_u – tensão máxima pós-fissuração; D_u – deslocamento máximo pós-fissuração; E – módulo de elasticidade; ITC – índice de tenacidade

* Misturas estudadas por Ferreira (2012)

Os gráficos da Figura 4-21 são referentes às três matrizes e aos compósitos produzidos com a matriz sem introdução de material reciclado. Todos os resultados são apresentados em tensão-deslocamento a meio vão do provete, em detrimento dos gráficos habituais tensão-deformação. O LVDT utilizado não permitiu obter o andamento integral do ensaio em questão, pois a flecha do provete excedia o limite do aparelho, tendo este que ser removido, e estagnada a respectiva aquisição de dados. Para isso, utilizou-se o deslocamento medido pela própria máquina de ensaios que, naturalmente, engloba as respectivas folgas, e que, por essa razão, inviabiliza a obtenção da extensão desejada.

Apesar de os ensaios terem sido realizados até um deslocamento máximo de 10 mm, apenas se representa a resposta até 3 mm de forma a ser possível visualizar melhor a parte inicial do ensaio, sendo que o comportamento seguinte se mantém praticamente constante. É ainda necessário referir que os provetes ensaiados com o reforço de fibras seriam capazes de deformar mais do que o deslocamento de 10 mm registado no ensaio, uma vez que não ocorreu uma rotura total desses provetes. No entanto, por restrições de tempo de utilização da máquina, só foi possível realizar aqueles ensaios até ao deslocamento referido.

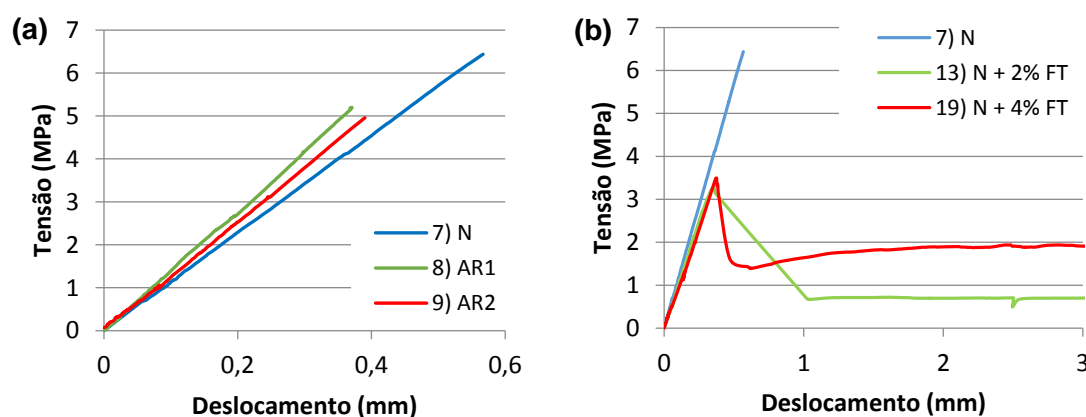


Figura 4-21 - Curvas típicas obtidas do ensaio de flexão para (a) matrizes sem fibras e (b) compósitos de matriz natural

Verifica-se que os provetes sem incorporação de fibras têm um comportamento elástico linear até à sua rotura, tratando-se, como seria expectável, de um material frágil. Quanto às misturas reforçadas com 2% e 4% de fibras tratadas, estas são solicitadas após o aparecimento da primeira fissura, impedindo o acontecimento descrito anteriormente. Nesta fase, são as fibras que continuam a suportar a carga. Observa-se que as argamassas com maior percentagem de fibras (4%) apresentam melhor comportamento do que para o reforço de 2%, apresentando as primeiras um aumento da força após o surgimento da primeira fissura, enquanto que nas segundas aquele valor se mantém quase constante.

Quanto à resistência máxima, esta diminui para metade com a introdução de fibras na matriz natural (Figura 4-21 – b), resultado que não se verifica para as restantes matrizes, com

incorporação de areia reciclada, como se pode confirmar na Figura 4-22. Esta diminuição da resistência entre matrizes deve-se ao facto do material reciclado incorporado conter pasta aderida e ser de uma qualidade inferior comparativamente à areia natural, levando naturalmente a uma redução significativa da resistência máxima (Figura 4-21 – a). Relativamente à diminuição de resistência máxima devido à introdução de fibras, esta pode dever-se ao facto de as fibras substituírem volumetricamente uma percentagem de constituintes da argamassa (ligante, areia) que a torna menos resistente mas mais dúctil.

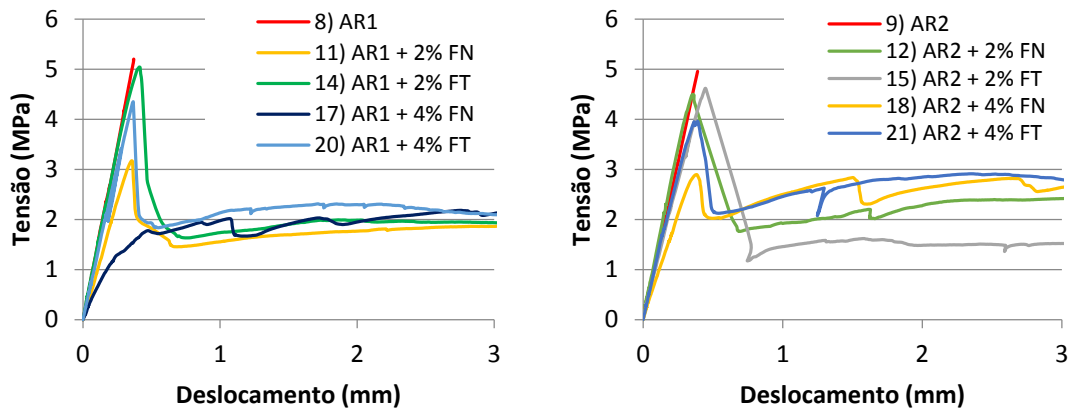


Figura 4-22 - Curvas típicas obtidas do ensaio de flexão para as matrizes AR1 e AR2 sem e com reforço

Em termos de valores médios da tensão de ocorrência da 1ª fissura, é de notar que com fibras naturais aquela tensão é maior quando utilizada a matriz AR2, enquanto com fibras tratadas os valores mantêm-se mais uniformes para as três matrizes diferentes (tendo em conta o desvio padrão), apesar do valor médio ser maior para a matriz AR1 (Figura 4-23).

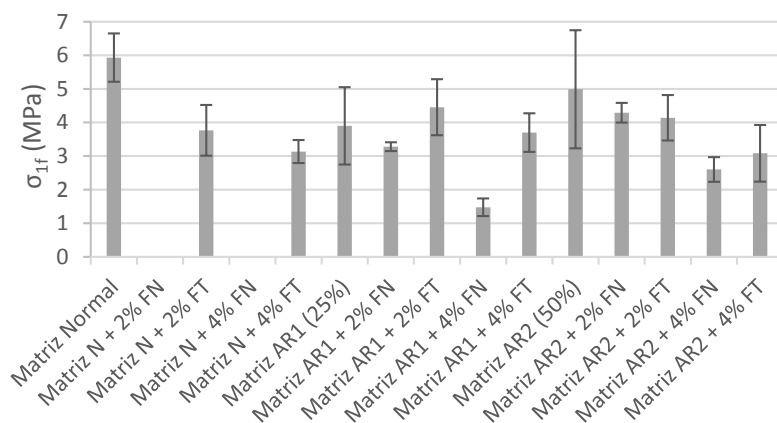


Figura 4-23 - Valores médios e respectivos desvios padrão da tensão de 1ª fissura (MPa)

Quanto à análise segundo a tensão máxima pós-fissuração, os valores médios obtidos parecem mostrar que a taxa de reforço de 4% é mais favorável do que a de 2%. Note-se que

para a menor percentagem de reforço os valores em causa variam entre 1,5 MPa e 2,0 MPa em oposição aos valores alcançados para os compósitos com 4% de fibras, os quais variam entre 2,0 MPa e 3,0 MPa. Os resultados obtidos para a matriz N, para a qual apenas se investigou o reforço tratado, é consistente com o referido anteriormente. No que concerne às matrizes AR1 e AR2, já é possível verificar uma distinção entre as fibras naturais e as tratadas relativamente à percentagem de 4%. A matriz AR1 tem um melhor comportamento nesta propriedade com fibras tratadas, o que não acontece com a matriz AR2 onde os valores são muito próximos (Figura 4-24).

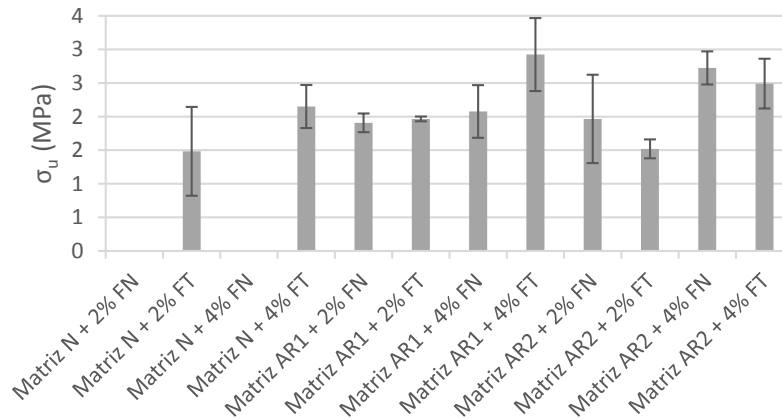


Figura 4-24 - Valores médios e respectivos desvios padrão da tensão máxima pós-fissuração (MPa)

Uma razão possível para os comportamentos descritos acima é o facto da areia reciclada ter partículas mais angulosas e irregulares do que a areia natural, melhorando a aderência das fibras às matrizes recicladas (AR1 e AR2). Por esta razão, o tratamento das fibras não terá grande vantagem, principalmente na matriz AR2, uma vez que a substituição de 50% de areia natural já melhora consideravelmente o comportamento, como os dados anteriormente evidenciam. No caso da matriz AR1 (25% de substituição), este facto não é tão nítido, levando à conclusão que o tratamento das fibras, nesta circunstância, melhora a aderência fibra-matriz.

As relações entre a tensão de 1ª fissura e a tensão máxima pós-fissuração encontram-se representadas na Figura 4-25. É possível verificar que a relação entre as duas tensões diminui notavelmente com o aumento de incorporação de fibras hornificadas de 2% para 4%, verificando-se um decréscimo médio de 68%. Esta aproximação revela que o volume de reforço crítico na flexão está a ser atingido.

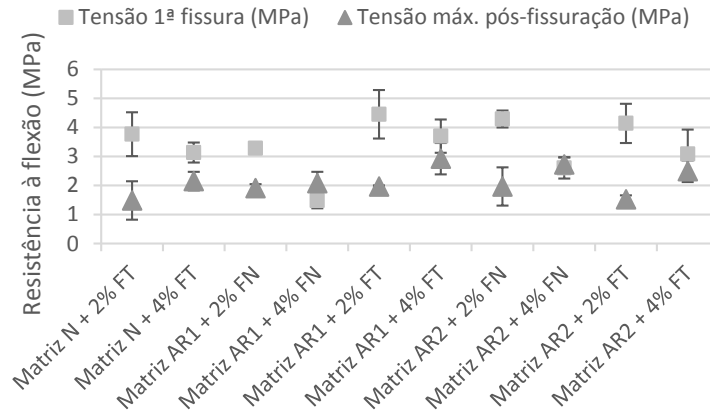


Figura 4-25 - Relação entre tensão de 1ª fissura e tensão máxima pós-fissuração

Para as fibras naturais, este comportamento é ainda mais marcado, uma vez que a ordem dos valores médios das tensões referidas é invertida com o aumento do reforço de 2% para 4%, *i.e.*, a tensão pós-fissuração supera a tensão de 1ª fissura, indicando que já foi ultrapassado o valor crítico de reforço, tanto na matriz AR1 como na AR2. Novamente, este resultado parece mostrar que não existe vantagem no tratamento das fibras aquando da utilização de matrizes recicladas, uma vez que com hornificação será necessária uma percentagem maior das mesmas para se atingir o valor crítico, prejudicando certamente o comportamento reológico do compósito.

Relativamente ao módulo de elasticidade (aparente), como seria de esperar, apesar dos elevados valores de desvio padrão, esta propriedade decresce nas diferentes matrizes com a introdução de fibras (Figura 4-26). Por comparação com a matriz natural, a menor redução do valor médio do módulo de elasticidade (18%) corresponde à matriz AR2 com introdução de 2% de fibra natural; em oposição, a maior redução (72%) verifica-se na matriz AR1 reforçada com 4% de fibra natural.

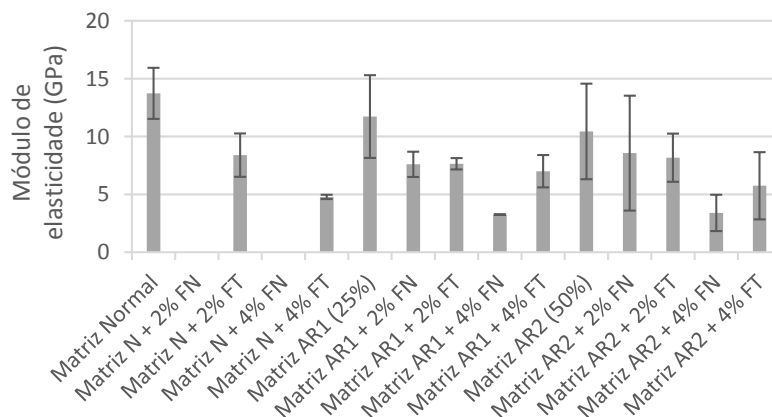


Figura 4-26 - Valores médios e respectivos desvios padrão do módulo de elasticidade (GPa)

Quando se introduzem fibras num compósito, este não fica com uma consistência em estado líquido tão homogénea como a que teria sem a introdução de um reforço, apesar de neste trabalho se ter utilizado superplastificante e VMA de forma a melhorar este facto. Todos estes incrementos podem criar vazios de ar na mistura que podem explicar o decréscimo do módulo de elasticidade referido anteriormente. A própria redução volumétrica da pasta devido à incorporação das fibras pode contribuir para aquela diminuição de rigidez.

Analisando os dados por matriz, verifica-se que o aumento da percentagem de fibras naturais de 2% para 4% introduz uma diminuição do valor da propriedade em questão de 57% para a matriz AR1 e de 60% para matriz AR2. Para o caso das fibras tratadas, esta diminuição não se verifica, mantendo-se os valores sensivelmente constantes e semelhantes aos obtidos para as fibras naturais. Pelas razões apresentadas, considera-se que tanto o aumento da percentagem de incorporação como o tratamento das fibras não parece ser vantajoso no que a este parâmetro diz respeito.

Ao analisar o índice de tenacidade (I_{10}) dos vários compósitos, reforçados tanto com fibras hornificadas como com fibras naturais, obtiveram-se valores médios 40% superiores para os provetes reforçados com 4% de fibras, em comparação com os provetes com 2% de reforço. Tal deve-se ao facto de após o aparecimento da primeira fissura haver uma maior quantidade de fibras a suportar a mesma quantidade de carga, logo seria de esperar um aumento significativo, que é também possível ser verificado pela Figura 4-27.

Quanto à análise das características aquando da utilização de fibras naturais ou tratadas, os resultados obtidos mostram que o índice de tenacidade é inferior no caso da utilização das fibras hornificadas. Porém, a magnitude daquela diferença varia consideravelmente, *i.e.*, de 6% a 40% para AR2 e AR1, respectivamente. O maior valor foi verificado para a combinação AR1 + 4% FN, levando à possibilidade de a matriz com substituição de 25% de agregados reciclados ter um comportamento mais favorável do que a matriz com percentagem de substituição de 50%.

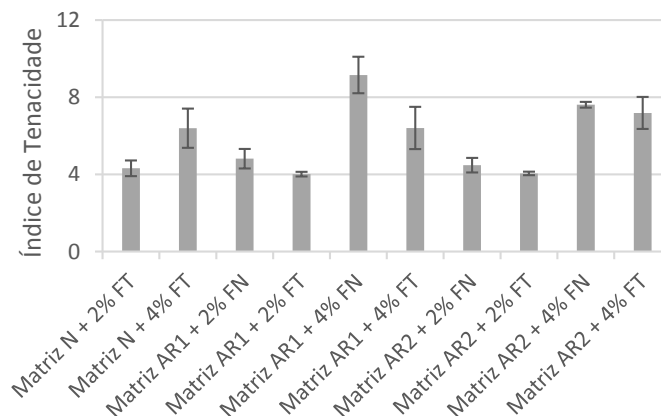
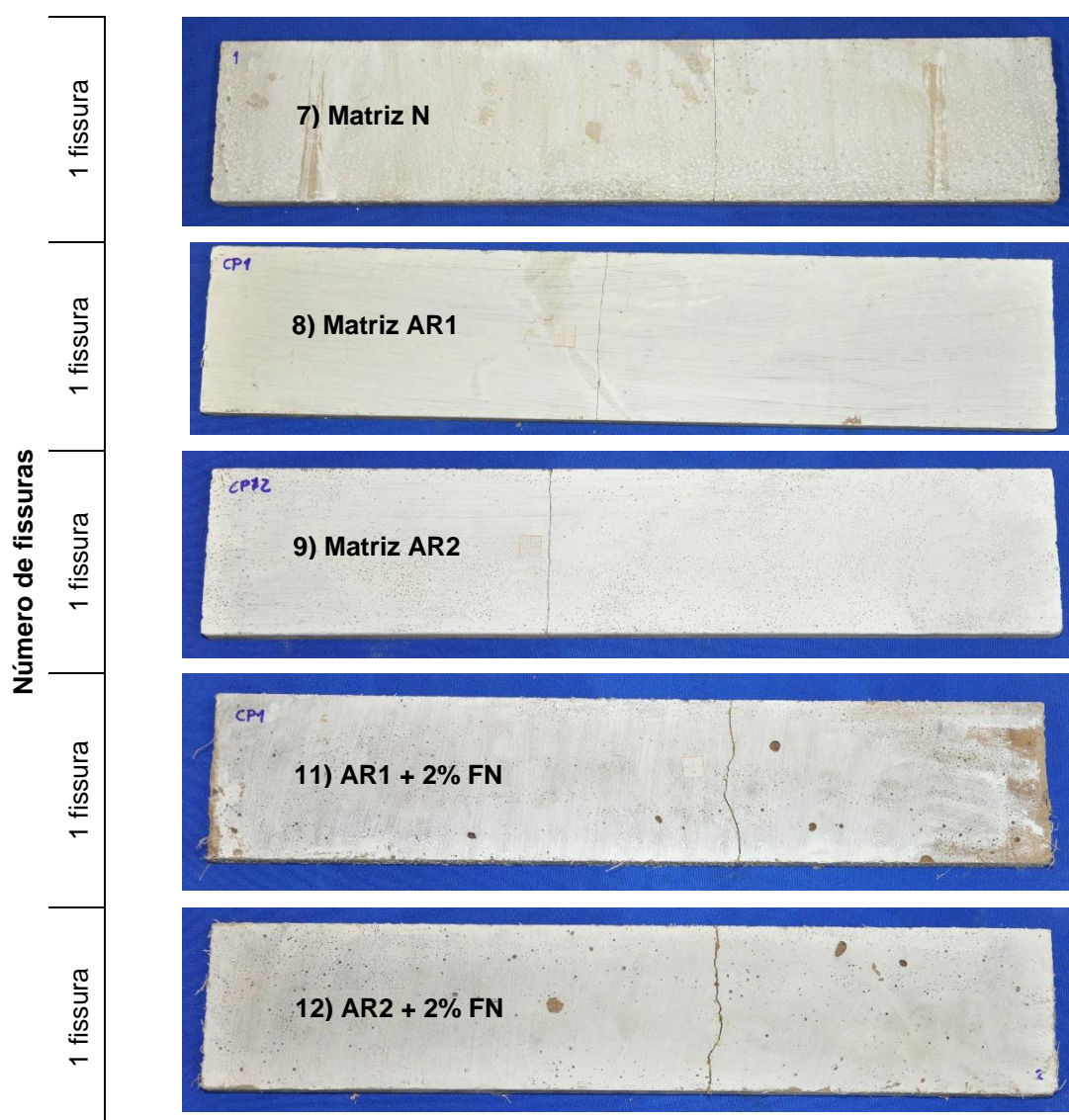


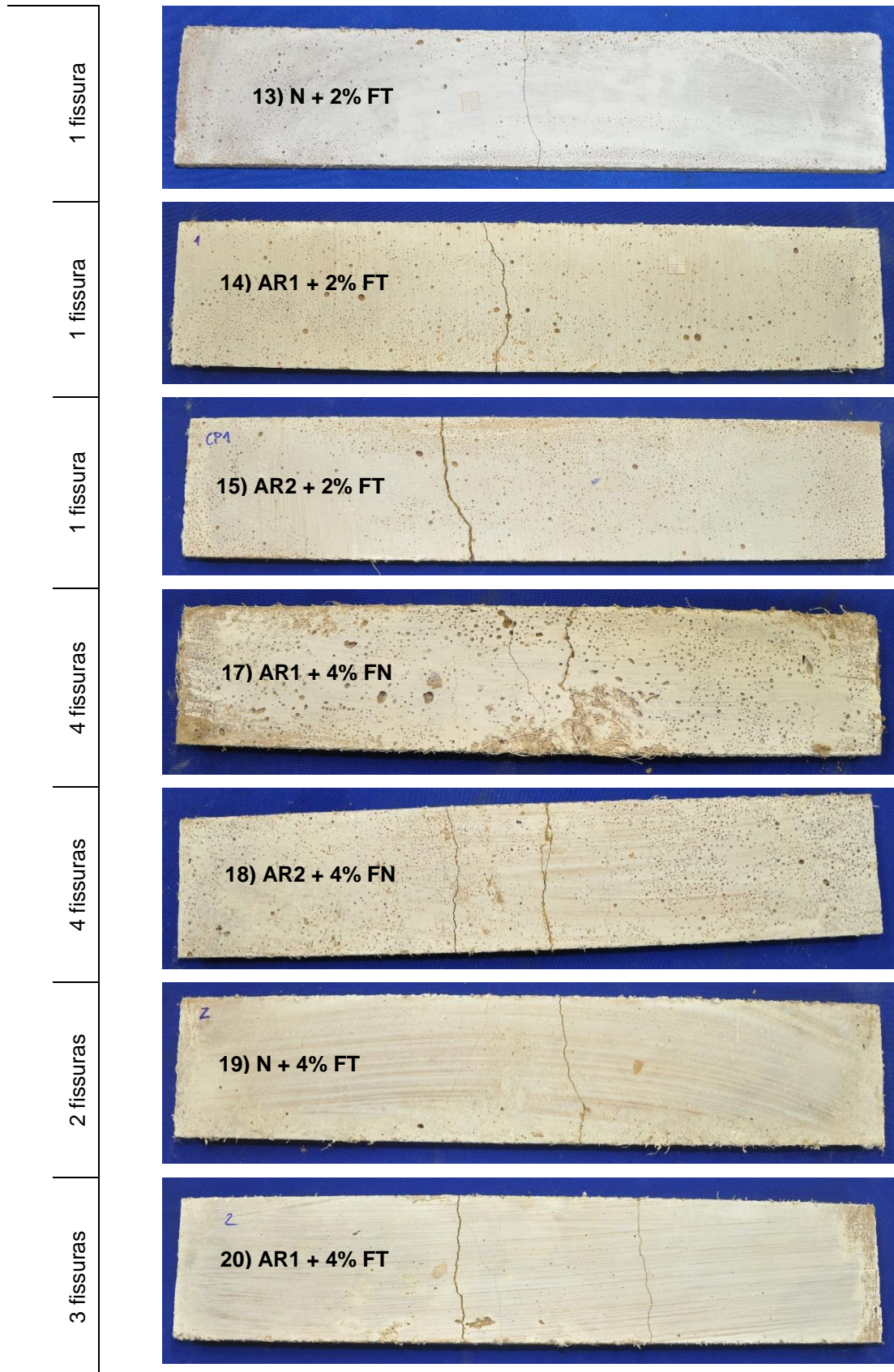
Figura 4-27 - Valores médios e respectivos desvios padrão do índice de tenacidade I_{10}

4.4.4. Processo de fractura

Na Figura 4-28 apresentam-se os modos de rotura de todas as misturas ensaiadas à flexão e referidas no início deste subcapítulo. Verifica-se que para as misturas sem reforço fibroso e com 2% de fibras (tratadas ou não tratadas) foi observada apenas 1 fissura. O aumento do volume de fibras para 4% levou, como seria expectável, ao aparecimento de mais fissuras. Assim como acontece quando se aumenta o reforço em varão, ou seja, mais fendas mas de menor abertura (para a mesma carga).

De notar que para os compósitos reforçados com fibras naturais apareceram, em média, 4 fissuras por provete, em oposição aos reforçados com fibras tratadas nas quais o número de fissuras variou entre 2 e 3. Não foi possível retirar nenhuma relação consistente adicional no que toca à relação entre fibras naturais e tratadas, apesar de, pelos resultados anteriores se ter esperado que com a matriz natural o desempenho fosse melhor do que com fibras tratadas e com as matrizes recicladas se observaria uma melhor resposta para fibras naturais.





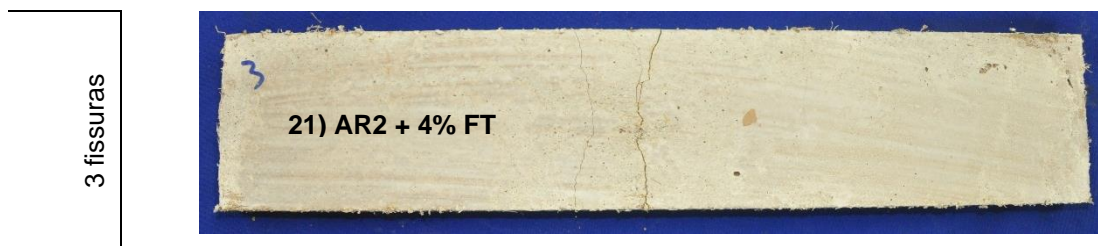


Figura 4-28 - Modo de rotura de compósitos submetidos ao ensaio de flexão

4.5. Considerações finais

Após a análise de todos os ensaios realizados tanto ao nível da fibra tratada e não tratada como dos compósitos naturais e reciclados é possível denotar uma falta de coerência dos resultados entre os ensaios. É também necessário referir a grande variabilidade existente nos respectivos ensaios que levam a que as conclusões obtidas sejam apenas tendências de comportamento dos materiais estudados.

É no entanto viável concluir que na sua maioria as combinações com melhor desempenho foram a matriz natural com o reforço tratado ou as matrizes com a incorporação de agregados reciclados e fibras naturais. Isto deve-se ao facto de a substituição da areia por material reciclado já provocar uma melhoria significativa ao nível da adesão fibra-matriz não sendo por isso necessário proceder ao tratamento das fibras para obter um resultado melhor. Quanto à primeira opção, esta pode ser explicada pela maior superfície de contacto que o tratamento da fibra provoca aumentando a adesão fibra-matriz assim como o desempenho do compósito.

5. Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões

O objectivo deste estudo foi avaliar a eficiência do tratamento por hornificação das fibras de sisal e da substituição parcial de areia natural por areia reciclada na aderência das fibras a matrizes à base de cimento.

A pesquisa iniciou-se com a aplicação do tratamento de molhagem e secagem na solução de hidróxido de cálcio nas fibras, seguido da sua avaliação física e mecânica, de forma a determinar os efeitos provocados nestas propriedades. Os resultados do ensaio de tracção directa indicaram que, após 5 ciclos de tratamento, a dispersão era significativamente menor, em comparação com as fibras naturais, e similar aos resultados obtidos para 10 ciclos. No entanto, como se observou um aumento consistente (8%) do valor médio da tensão à tracção directa para o maior número de ciclos (10), optou-se por escolher este procedimento para a continuação do estudo. O tratamento produziu fibras mais frágeis, pelo que a capacidade de deformação diminuiu quase para metade do valor observado para as fibras naturais. Outro factor diferenciador foi o aumento substancial da rigidez (18%) nas fibras submetidas aos 10 ciclos de tratamento.

Quanto à resistência ao arrancamento, foi possível concluir que, de uma forma geral, o tratamento das fibras não provocou uma elevada melhoria. É de notar que a matriz natural reforçada com fibras naturais apresentou um melhor comportamento; já as matrizes com substituição de 25% e 50% de areia natural por areia reciclada mostraram uma resposta muito semelhante com o reforço fibroso natural e hornificado, além de suprimir quase por completo a fase adesional, na qual a aderência fibra-matriz é considerada perfeita, passando a resposta do ensaio a ser maioritariamente de origem friccional (arrancamento da fibra do provete). Concluiu-se então que o tratamento aplicado às fibras de sisal não melhorou significativamente a capacidade de ancoragem da fibra à matriz. O pior desempenho verificou-se para a matriz AR2, que apresentou a menor aderência às fibras naturais e o melhor desempenho para a matriz natural reforçada com fibras naturais. Ambas as matrizes recicladas (AR1 e AR2) mostraram um comportamento análogo quando reforçadas com as fibras hornificadas, denotando que o factor diferenciador é o material reciclado caracterizado por conter partículas mais angulosas e irregulares.

Estes resultados contrariam a menor capacidade de absorção de água das fibras tratadas, comprovada pelos ensaios de índice de absorção bem como pelas análises microestruturais, que indicaram menores variações da respectiva secção transversal quando saturadas, sendo este comportamento promovido pelas modificações nas fibrocélulas com alargamento das lamelas médias e diminuição da área do lúmen. No entanto, estas mesmas

modificações na estrutura das fibras tiveram reflexo positivo na resistência à tracção directa das fibras, conforme anteriormente referido.

No que diz respeito à moldagem dos compósitos, mesmo a incorporação de 4% de reforço e a substituição de 50% de areia natural por reciclada, não levantou dificuldades de maior uma vez que se utilizou um superplastificante e um agente modificador de viscosidade (VMA). A mistura, mesmo bastante coesa, foi facilmente moldável.

Quanto ao comportamento mecânico dos compósitos, os resultados do ensaio de tracção indicaram que houve um ganho de resistência com a incorporação das fibras tratadas devido à maior área de contacto provocada pela hornificação das mesmas. Contudo, as matrizes recicladas, caracterizadas por partículas mais rugosas e irregulares, foram as que, em geral, exibiram melhores resultados.

Relativamente aos ensaios de flexão, os resultados favoreceram novamente a utilização de material reciclado em substituição da areia natural, tendo-se verificado um desempenho semelhante entre as fibras naturais e as tratadas. Todavia, quando foram utilizadas fibras naturais, a tensão de primeira fissura foi superior para a matriz AR2; já para as fibras hornificadas o valor desta propriedade mostrou-se superior para a matriz AR1. Em geral, a utilização de 4% de fibras permitiu obter um melhor comportamento no que concerne à tensão última; a mesma conclusão é possível ser obtida pela análise do índice de tenacidade calculado. Em suma, e combinando todos os resultados deste ensaio, existe uma conclusão global e transversal às várias grandezas estudadas que é o facto de a utilização de material reciclado favorecer a aderência ao reforço fibroso natural, melhorando o desempenho para as várias propriedades. O mesmo não é possível afirmar para as fibras tratadas, em consequência da variabilidade dos resultados encontrados.

O processo de fractura dos provetes sem introdução de fibras e com 2% de reforço fibroso, natural ou hornificado, envolveu apenas uma fissura, tendo os primeiros provetes apresentado um comportamento frágil, ao contrário dos segundos para os quais a resposta foi dúctil, uma vez que as fibras absorveram as cargas após a rotura frágil da matriz. Quanto aos compósitos preparados com 4% de fibras, observou-se o aparecimento de múltiplas fissuras em que no caso das fibras naturais foram em número superior às fibras tratadas para uma mesma carga.

Com os resultados apresentados verificou-se que a aplicação do tratamento de molhagem e secagem nas fibras não foi tão eficiente como se previa na melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos. Por outro lado, esta melhoria foi alcançada principalmente com a substituição de areia natural por areia produzida através da trituração de material reciclado melhorando, assim, a zona interfacial entre as fibras e as matrizes utilizadas. Os compósitos desenvolvidos apontam para um caminho promissor no desenvolvimento de materiais parcialmente reciclados de bom desempenho mecânico

5.2. Perspectivas de desenvolvimentos futuros

Para um melhor entendimento das modificações do processo de hornificação, da interação fibra-matriz e do comportamento dos compósitos, ainda terão de ser realizados diversos estudos. Entre os parâmetros que se considera oportuno estudar, referem-se os seguintes:

- aderência das diversas argamassas produzidas a diferentes tipos de suporte (por exemplo tijolo ou betão);
- condutibilidade térmica;
- reacção ao fogo;
- retracção;
- fendilhação;
- resistência à fendilhação;
- resistência ao choque;
- curva granulométrica dos resíduo de construção e demolição (RCD);
- diferença de absorção de água da areia natural e reciclada;
- espaçamento e abertura de fissuras.

Tratando-se de fibras vegetais, será também relevante submeter os provetes a ensaios de durabilidade, como por exemplo, ensaios de permeabilidade à água ou ao vapor de água e a determinação do coeficiente de capilaridade uma vez que influenciam o desempenho para condições de serviço. Outros estudos interessantes para uma melhor compreensão do material em causa seria submeter os provetes ao envelhecimento natural e acelerado, através de ciclos de molhagem e secagem, térmicos ou de gelo-degelo assim como em ambiente salino.

No entanto, não foi possível realizar nenhum destes ensaios de elevada importância para o conhecimento mais aprofundado do material em análise devido à curta duração imposta à campanha experimental realizada.

Bibliografia

- Aïtcin, P. C. (2000). *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: Pini.
- Angrizani, C., Vieira, C. A. B., Zattera, A. J., Freire, E., Santana, R. M. C., & Amico, S. C. (2006). Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster. In CBECIMat, *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil*.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13276 (2005). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7215 (1996). *Cimento Portland: determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM Committee (1992). Standard test method for flexural toughness and firstcrack strengthof fiber-reinforced concrete. ASTM C1018, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- ASTM Committee (2012). Standard test method for tensile strength and Young's modulus of fibers. ASTM C1557, West Conshohocken, PA.
- Bavaresco, C. R. (2001). *Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites*. London: Elsevier Applied Science.
- Brancato, A. (2008). *Effect of progressive recycling on cellulose fiber surface properties*, Tese de Doutorado em Engenharia Química e Biomolecular, School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.
- Brenscansin, J. (2003). *Comportamento à fratura de compósitos de matriz cimentícia reforçada com polpa de bambu*, Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Canovas, M. F., Kawiche, G. M., & Selva, N. H. (1990). Possible ways of preventing deterioration of vegetable fibres in cement mortars. In *Second international RILEM symposium proceedings, Salvador Bahia Brazil*. London: Chapman and Hall.
- Chand, N., Tiwary, R. K., & Rohatgi, P. K. (1988). Bibliography resource structure properties of natural cellulosic fibres – an annotated bibliography. *Journal of Materials Science*, 23(2), 381-387.
- Chen, H. J., Yen, T., & Chen, K. H. (2002). Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 125-132.
- Claramunt, J., Ardanuy, M., & García-Hortal, J. A. (2010). Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate polymers*, 79(1), 200-205.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2007). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(1), 289-294.
- D'Almeida, A. L. F. S., Calado, V., Barreto, D. W., & d'Almeida, J. R. M. (2005). Acetilação da fibra de bucha (*Luffa cylindrica*). *Polímeros Ciência e Tecnologia*, 15(1) , 59–62.

- D'Almeida, A., Toledo Filho, R., & Melo Filho, J. (2010). Cement composites reinforced by short curaua fibers. *Revista Materia*, 15(2), 153-159.
- ISO 14125 (1998). Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties, *International Standard*
- Evangelista, L., & Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397-401.
- Farias Filho, J. (1999). *Efeito da adição de metacaulinita e tijolo moído queimado na durabilidade de compósitos argamassa-fibra de sisal*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil.
- Ferreira, S. R. (2012). *Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Fonseca, N., Brito, J., & Evangelista, L. (2011). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637-643.
- Gale, D. M. (1994). Synthetic Fibers in Thin-Section Cement Products: A Review of the State of the Art. *ACI Special Publication*, 146.
- Gram, H. E. (1988). Durability of natural fibres in concrete, *Swedish Cement and Concrete Research Institute*, 83(1), 143-172.
- Guimarães, S. (1987). Fibra vegetal-cimento - Resultados de algumas experiências realizadas no THABA/CEPED. In *Anais do I Simpósio Internacional Sobre Produção e Transferência de Tecnologia em Habitação: Da Pesquisa à Prática*, 103, São Paulo, Brasil.
- Guimarães, S. (1990). Vegetable fiber cement composites, In Sobral H.S. (Ed.) *Vegetable plants and their fibres as building materials*, In *second international Rilem Symposium*, Chapman & Hall, 98-107.
- Hamassaki, L. T.; Sbrihhi N. C.; Florindo, M. C. (1997). Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria, Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, In: *Workshop EPUSP/ANTAC*, 107 – 115, São Paulo, Brasil.
- Hanžič H, Mautinger A, Jurič B and Oliveira L. A. P. (2008). Water retention capability of mortars made of recycled aggregate. In: *World Sustainable Building Conference*, 15-621, Melbourne, Australia.
- Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 35, 763 -769.
- Kim, J. & Netravali, A. (2010). Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites, *Composites: Part A*, 1245-1252, NY, USA.
- Li, V. C., Horikoshi, T., Ogawa, A., Torigoe, S., & Saito, T. (2004). Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-CCE). *ACI Materials Journal*, 101(3), 242-248.
- Li, Y., Hu, C., & Yu, Y. (2008). Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(4), 570-578.

- Lima, P. R. L. (2004). *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Lima, P. R. L., & Toledo Filho, R. D. (2008). Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. *Ambiente Construído*, 8(4), 7-19.
- Ling, T. C., Poon, C. S., & Kou, S. C. (2011). Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 848-854.
- Lopes, F. F., Araújo, G. T., Nascimento, J., Gadelha, T. S., & Silva, V. (2010). Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(7), 783-788.
- Machado, M. S.; Mulinari, D. R.; Cioffi, H. M. O.; Herman, J. C.; Voorwald, H. J. C. (2008). Efeito do tratamento alcalino sobre a superfície de fibras de sapé, In *CBECiMat, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Porto de Galinhas, Brasil.
- Maier, P. L., & Durham, S. A. (2012). Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 29, 428-437.
- Martin, A. R., Martins, M. A., Mattoso, L. H., & Silva, O. R. R. F. (2009). Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 19(1), 40-46.
- MEDINA, J. C. (1954). *O Sisal*, Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, Brasil.
- Melo Filho, J. A. (2005). *Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Melo Filho, J. A.; Silva, F. A.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R. (2007). Effect of Reinforcement Ratio and Molding Pressure on the Mechanical Performance of Short Sisal FRC, In: *4th International Conference on Science and Technology of Composite Materials*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Melo Filho, J.A. (2012). *Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Miranda, L. (2000). *Study of factors that influence cracking of coating mortars with recycled rubble*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276(1), 1-24.
- Neno, C. J. F. (2010). *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão - Integração de RCD*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Neno, C. J. F.; Brito, J.; Veiga, R. (2013). Using fine recycled concrete aggregate for mortar production, *Materials Research*, 17,168 – 177.
- Pedrozo, R. F. E. (2008). *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

- Pereira, P., Evangelista, L., & Brito, J. (2012). The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 722-729.
- Picanço, M. D. S., & Ghavami, K. (2008). Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. *REM: Revista Escola de Minas*, 61(1), 13-18.
- Quagliarini, E., & Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 309-314.
- Rasheeduzzafar, A., & Khan. (1984). Recycled concrete – a source of new aggregate, *Cement and Concrete Aggregates*, 6, 17-27.
- Roma Jr, L. C., Martello, L. S., & Savastano Jr, H. (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials*, 22(4), 668-674.
- Sahmaran, M. & Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash, *Cement and Concrete Research*, 39 (11), 1033-1043.
- Savastano Jr, H., & Pimentel, L. L. (2000). Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, 4(1),10-103.
- Selvam, P. V. P., & Santiago, B. H. (2007). Tratamento superficial da fibra do coco: estudo de caso baseado numa alternativa econômica para fabricação de materiais compósitos, *Revista Analytica*, 26, 783-788.
- Silva, A. F., Mobasher, B., Soranakom, C., & Toledo Filho, R. D. (2011). Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites, *Cement and Concrete Composites*, 33 (8), 814-823.
- Silva, A. F. (2009). *Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Silva, F. A., & Chawla, N. (2008). Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, 68(15), 3438-3443.
- Silva, A. F., Toledo Filho, R. D., & Fairbairn, E. M. R. (2006). Accelerated aging characteristics of sisal fiber-cement based composites made with a CH free cementitious matrix, In *Brazilian Conference Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction – NOCMAT*, Brasil.
- Silva, J. R. M. C. (2006). *Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias*, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Singh, S., Shukla, A., & Brown, R. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1919-1925
- Song, J. (2008). Adsorption of Amphoteric and Nonionic Polymers on Organic Thin Films, in *Wood and Paper Science*, 225.
- Spence, K. L., Venditti, R. A., Rojas, O. J., Habibi, Y., & Pawlak, J. J. (2010). The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: water interactions and physical properties for packaging applications. *Cellulose*, 17(4), 835-848.

- Stone, J. E., Scallan, A. M., & Abrahamson, B. (1968). Influence of beating on cell wall swelling and internal fibrillation, *Svensk Papperstidning*, 687-694.
- TAPPI UM 256 (2011). Water Retention Value (WRV). Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI).
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., & Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054-1065.
- Toledo Filho, R. D. (1997). *Natural fibre reinforced mortar composites: experimental characterization*, Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, DECPUC-Rio/DEC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., England, G. L., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 185-196.
- Ulsen, C., Kahn, H., Hawlitschek, G., Masini, E. A., & Angulo, S. C. (2013). Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. *Waste management*, 33(3), 656-662.
- Velasco, R. V. (2008). *Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: Propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Velasco, R. V., Farage, M. C. R., & Gonçalves, J. P. (2004). Desenvolvimento e caracterização mecânica de matrizes a base de cimento para a produção de laminados de baixo impacto ambiental, In *Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural*, Brasil.
- Xiao, J., Li, H., & Yang, Z. (2013). Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings. *Construction and Building Materials*, 38, 681-688.
- Zhong, L. (2011). The effects of microfibrillation on the properties of hierarchical sisal fibres and its composites. In *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 491-499(9).

ANEXO 1

Resultados dos ensaios de tracção directa

Fibras Naturais					
	Força de rotura (N)	Área (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação de rotura	Rigidez (N/mm)
CP01	8,58	0,04	219,99	0,16	8,19
CP06	9,68	0,02	420,88	0,05	8,22
CP07	12,03	0,01	1002,86	0,05	12,58
CP12	12,04	0,02	523,47	0,06	10,83
CP17	4,16	0,01	297,26	0,12	5,17
CP19	10,41	0,03	385,68	0,05	8,88
CP21	13,52	0,04	355,67	0,04	16,69
CP22	14,85	0,04	424,35	0,06	15,19
CP23	11,40	0,05	253,41	0,12	7,64
CP24	13,60	0,04	357,85	0,05	14,40
CP25	10,77	0,03	336,48	0,08	9,58
Média	9,69	0,03	416,17	0,08	10,67
Desv. Pad	3,66	0,01	211,96	0,04	3,61
CV (%)	37,7	36,2	50,9	51,5	33,8

Fibras com 5 ciclos					
	Força de rotura (N)	Área (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação de rotura	Rigidez (N/mm)
CP01	11,68	0,03	467,15	0,04	13,14
CP02	6,96	0,01	535,54	0,04	6,13
CP03	10,58	0,03	391,68	0,04	11,25
CP04	5,36	0,01	464,30	0,04	5,04
CP05	10,75	0,03	325,83	0,07	6,79
CP06	7,77	0,01	647,15	0,04	7,22
CP07	15,06	0,03	442,97	0,04	16,71
CP08	10,22	0,03	352,55	0,06	8,86
CP10	12,96	0,03	479,93	0,03	16,89
CP11	3,89	0,01	324,24	0,05	3,42
CP13	11,93	0,03	411,30	0,04	12,30
CP16	3,49	0,01	268,26	0,03	5,49
CP17	5,28	0,01	376,85	0,03	5,65
CP18	13,44	0,02	611,08	0,06	10,15
CP19	10,07	0,02	419,56	0,04	10,61
CP21	10,73	0,04	306,63	0,04	12,18
CP22	10,96	0,03	421,64	0,03	12,83
CP23	8,92	0,02	594,47	0,04	8,55
CP24	16,46	0,05	350,24	0,04	20,54
CP25	5,22	0,02	326,42	0,03	7,01
Média	9,07	0,02	425,89	0,04	10,04
Desv. Pad	3,96	0,01	106,21	0,01	4,51
CV (%)	43,6	45,8	24,9	26,3	44,9

Resultados dos ensaios de tracção directa - continuação

	Fibras com 10 ciclos				
	Força de rotura (N)	Área (mm)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação de rotura	Rigidez (N/mm)
CP01	5,60	0,01	430,85	0,06	6,24
CP02	8,65	0,02	540,37	0,03	11,13
CP03	15,86	0,04	440,58	0,06	18,56
CP04	11,18	0,03	429,96	0,04	14,04
CP05	5,32	0,01	531,58	0,05	7,05
CP06	10,73	0,02	466,51	0,04	11,49
CP07	8,08	0,02	505,06	0,03	8,77
CP08	4,70	0,01	392,08	0,05	6,06
CP09	15,17	0,03	561,76	0,05	8,51
CP10	8,18	0,02	545,52	0,03	10,87
CP12	11,40	0,04	325,64	0,03	19,36
CP13	12,45	0,03	377,24	0,03	17,76
CP14	9,67	0,03	312,03	0,05	8,09
CP15	14,21	0,03	444,18	0,06	10,04
CP16	15,61	0,02	678,73	0,04	16,13
CP17	14,25	0,02	619,36	0,03	19,79
CP18	9,09	0,03	303,10	0,05	8,16
CP19	9,21	0,03	306,87	0,04	8,75
CP20	18,29	0,03	609,75	0,05	16,22
CP21	9,81	0,04	245,19	0,02	17,34
CP22	10,99	0,02	523,51	0,05	9,11
CP23	12,68	0,04	333,70	0,04	19,18
CP24	13,70	0,03	547,94	0,03	16,95
CP25	4,75	0,02	297,09	0,02	11,47
Média	10,63	0,03	448,69	0,04	12,54
Desv. Pad	3,77	0,01	119,09	0,01	4,66
CV (%)	35,4	34,9	26,5	29,7	37,1

Resultados dos ensaios de arrancamento (*pull-out*)

	1) N + Fibra natural			
	Força máxima (N)	Perímetro (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
CP01	10,51	1,76	0,06	0,24
CP02	-	-	-	-
CP03	3,89	0,76	0,03	0,21
CP04	11,21	1,28	0,04	0,35
CP05	4,32	1,24	0,03	0,14
CP06	5,17	1,41	0,05	0,15
CP07	3,59	0,85	0,01	0,17
CP08	1,30	0,77	0,02	0,07
CP09	4,30	0,98	0,02	0,18
CP10	9,55	0,95	0,04	0,40
Média	5,89	1,11	0,03	0,21
Desv. Pad	3,33	0,34	0,02	0,11
CV (%)	56,5	30,4	44,1	50,4

	2) N + Fibra tratada			
	Força máxima (N)	Perímetro (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
	6,00	1,36	0,03	0,18
	6,20	1,09	0,03	0,23
	4,47	1,50	0,03	0,12
	5,16	1,19	0,02	0,17
	8,10	1,06	0,02	0,31
	5,88	0,98	0,01	0,24
	7,77	0,67	0,02	0,47
	6,20	1,38	0,03	0,18
	3,45	0,55	0,01	0,25
	2,73	1,00	0,01	0,11
Média	5,60	1,08	0,02	0,22
Desv. Pad	1,71	0,30	0,01	0,10
CV (%)	30,5	28,0	42,4	46,2

	3) AR1 (25%) + Fibra natural			
	Força máxima (N)	Perímetro (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
CP01	-	-	-	-
CP02	6,74	1,51	0,05	0,18
CP03	1,58	1,04	0,03	0,06
CP04	1,35	0,98	0,03	0,06
CP05	4,21	0,61	0,02	0,28
CP06	8,81	2,07	0,08	0,17
CP07	1,84	1,71	0,05	0,04
CP08	3,36	1,03	0,05	0,13
CP09	7,51	1,76	0,05	0,17
CP10	2,74	0,72	0,02	0,15
Média	4,24	1,27	0,04	0,14
Desv. Pad	2,78	0,51	0,02	0,07
CV (%)	65,7	39,9	44,0	54,4

	4) AR1 (25%) + Fibra tratada			
	Força máxima (N)	Perímetro (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
	5,17	1,13	0,03	0,18
	2,49	1,06	0,02	0,09
	3,08	0,83	0,02	0,15
	4,87	1,33	0,02	0,15
	2,44	1,78	0,03	0,05
	6,79	1,56	0,02	0,17
	0,13	1,28	0,02	0,00
	4,58	1,01	0,01	0,18
	0,86	0,98	0,02	0,03
	2,21	0,75	0,01	0,12
Média	3,26	1,17	0,02	0,11
Desv. Pad	2,07	0,32	0,00	0,06
CV (%)	63,3	27,3	24,2	56,6

	5) AR2 (50%) + Fibra natural			
	Força máxima (N)	Perímetro (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
CP01	2,65	1,88	0,03	0,06
CP02	3,68	0,97	0,03	0,15
CP03	12,41	1,18	0,05	0,42
CP04	3,32	0,86	0,03	0,16
CP05	2,97	0,68	0,03	0,17
CP06	4,76	0,80	0,03	0,24
CP07	5,30	1,22	0,03	0,17
CP08	5,74	0,90	0,02	0,26
CP09	6,96	1,67	0,06	0,17
CP10	7,69	1,64	0,06	0,19
CP11	-	-	-	-
Média	5,55	1,18	0,04	0,20
Desv. Pad	2,93	0,36	0,01	0,09
CV (%)	52,7	30,2	39,7	43,2

	6) AR2 (50%) + Fibra tratada			
	Força máxima (N)	Perímetro (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
	3,60	1,33	0,01	0,11
	4,77	1,14	0,01	0,17
	2,00	0,99	0,02	0,08
	7,92	1,21	0,02	0,26
	2,35	1,60	0,03	0,06
	5,52	1,23	0,02	0,18
	1,92	1,10	0,02	0,07
	3,29	1,09	0,02	0,12
	8,01	1,85	0,03	0,17
	4,61	1,21	0,03	0,15
	2,14	0,69	0,02	0,12
Média	4,40	1,22	0,02	0,14
Desv. Pad	2,33	0,32	0,01	0,06
CV (%)	53,1	26,1	26,9	44,7

Resultados dos ensaios de arrancamento (*pull-out*) - continuação

1) N + Fibra natural							
	Força adesional (N)	Deslocamento adesional (mm)	Tensão adesional (MPa)	Força friccional (N)	Deslocamento friccional (mm)	Tensão friccional (MPa)	Rigidez (N/mm)
CP03	3,89	0,22	0,21	2,16	1,29	0,11	22,22
CP04	7,24	0,27	0,23	5,74	1,29	0,18	33,86
CP05	4,32	1,09	0,14	3,67	1,15	0,12	7,20
CP07	3,45	0,37	0,16	2,61	1,12	0,12	16,06
CP09	4,30	0,70	0,18	1,86	1,19	0,08	17,70
Média	4,70	0,53	0,18	3,21	1,21	0,12	19,41
Desv. Pad	1,35	0,36	0,04	1,57	0,08	0,04	9,75
CV (%)	28,7	68,8	19,9	49,0	6,5	29,8	50,2

2) N + Fibra tratada							
	Força adesional (N)	Deslocamento adesional (mm)	Tensão adesional (MPa)	Força friccional (N)	Deslocamento friccional (mm)	Tensão friccional (MPa)	Rigidez (N/mm)
CP01	6,00	2,04	0,18	2,01	2,42	0,06	12,53
CP02	6,20	0,34	0,23	4,22	0,37	0,15	26,26
CP03	3,68	0,55	0,10	1,95	0,91	0,05	19,39
CP04	3,49	0,75	0,12	2,86	1,29	0,10	15,47
CP08	3,57	0,70	0,10	2,72	2,27	0,08	14,74
Média	4,59	0,88	0,15	2,75	1,45	0,09	17,68
Desv. Pad	1,38	0,67	0,06	0,92	0,88	0,04	5,40
CV (%)	30,2	76,5	39,2	33,3	60,6	45,0	30,5

3) AR1 (25%) + Fibra natural							
	Força adesional (N)	Deslocamento adesional (mm)	Tensão adesional (MPa)	Força friccional (N)	Deslocamento friccional (mm)	Tensão friccional (MPa)	Rigidez (N/mm)
CP02	6,74	0,39	0,18	6,37	0,43	0,17	29,88
CP03	1,58	0,32	0,06	1,06	0,83	0,04	9,24
CP04	1,35	0,32	0,06	1,16	0,47	0,05	8,47
CP05	4,21	1,01	0,28	3,00	2,07	0,20	19,46
CP06	8,81	0,67	0,17	6,26	1,80	0,12	31,24
CP07	1,84	0,17	0,04	1,25	0,72	0,03	17,28
CP08	3,36	0,63	0,13	2,20	1,45	0,09	7,86
CP09	7,51	0,66	0,17	5,20	0,86	0,12	22,67
CP10	2,74	0,48	0,15	1,92	1,52	0,11	9,45
Média	4,24	0,52	0,14	3,16	1,13	0,10	17,28
Desv. Pad	2,78	0,25	0,08	2,20	0,60	0,06	9,22
CV (%)	65,7	49,1	55,0	69,6	52,9	56,0	53,3

Resultados dos ensaios de arrancamento (*pull-out*) - continuação

4) AR1 (25%) + Fibra tratada							
	Força adesional (N)	Deslocamento adesional (mm)	Tensão adesional (MPa)	Força friccional (N)	Deslocamento friccional (mm)	Tensão friccional (MPa)	Rigidez (N/mm)
CP02	2,49	0,62	0,09	1,62	0,77	0,06	7,64
CP03	3,08	1,12	0,15	1,60	1,85	0,08	8,34
CP05	1,80	1,73	0,04	1,63	1,85	0,04	11,28
CP08	4,58	1,20	0,18	2,24	1,94	0,09	20,09
CP10	1,81	0,71	0,10	0,96	1,52	0,05	7,15
Média	2,75	1,08	0,11	1,61	1,59	0,06	10,90
Desv. Pad	1,15	0,44	0,05	0,45	0,48	0,02	5,38
CV (%)	41,9	41,2	48,7	28,1	30,5	32,4	49,4

5) AR2 (50%) + Fibra natural							
	Força adesional (N)	Deslocamento adesional (mm)	Tensão adesional (MPa)	Força friccional (N)	Deslocamento friccional (mm)	Tensão friccional (MPa)	Rigidez (N/mm)
CP01	2,65	0,43	0,06	2,22	0,74	0,05	13,25
CP02	3,68	1,94	0,15	3,17	0,97	0,13	13,99
CP04	3,32	2,28	0,16	2,72	1,68	0,13	8,16
CP05	2,16	2,50	0,13	2,16	2,50	0,13	5,63
CP06	1,88	0,66	0,09	1,30	0,99	0,07	3,63
CP07	2,27	0,71	0,07	1,94	0,99	0,06	19,18
CP08	2,93	0,52	0,13	2,06	1,00	0,09	8,20
CP09	4,38	1,05	0,11	2,91	1,99	0,07	7,42
Média	2,91	1,26	0,11	2,31	1,36	0,09	9,93
Desv. Pad	0,85	0,84	0,04	0,60	0,63	0,03	5,12
CV (%)	29,1	66,9	32,5	26,0	46,1	37,2	51,6

6) AR2 (50%) + Fibra tratada							
	Força adesional (N)	Deslocamento adesional (mm)	Tensão adesional (MPa)	Força friccional (N)	Deslocamento friccional (mm)	Tensão friccional (MPa)	Rigidez (N/mm)
CP01	3,39	2,64	0,10	3,39	2,64	0,10	7,33
CP03	1,29	0,27	0,05	1,58	1,26	0,06	5,72
CP04	7,92	0,93	0,26	5,38	0,97	0,18	17,85
CP05	1,72	0,46	0,04	1,50	0,59	0,04	8,01
CP07	1,89	1,20	0,07	1,59	1,54	0,06	14,49
CP09	6,83	0,69	0,15	5,30	0,73	0,11	19,40
CP11	2,14	1,70	0,12	1,56	2,33	0,09	7,31
Média	3,60	1,13	0,11	2,90	1,44	0,09	11,44
Desv. Pad	2,68	0,82	0,08	1,80	0,79	0,05	5,66
CV (%)	74,5	72,7	67,0	61,9	54,8	50,7	49,5

Resultados dos ensaios de compressão

Mistura	Tensão máxima (MPa)				
	CP01	CP02	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Natural	-	-	33,56	1,47	4,4
8) Matriz AR1 (25%)	39,18	-	39,18	-	-
9) Matriz AR2 (50%)	43,17	45,33	44,25	1,53	3,5

Mistura	Deformação máxima (‰)				
	CP01	CP02	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Natural	-	-	5,27	0,07	1,4
8) Matriz AR1 (25%)	0,22	-	0,22	-	-
9) Matriz AR2 (50%)	0,61	0,56	0,59	0,03	5,7

Mistura	Módulo de Elasticidade (GPa)				
	CP01	CP02	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Natural	-	-	13,27	0,31	2,3
8) Matriz AR1 (25%)	12,57	-	12,57	-	-
9) Matriz AR2 (50%)	11,48	13,15	12,32	1,18	9,6

Resultados dos ensaios de tracção

Mistura	Tensão 1ª Fissura (MPa)					Média	Desv. Pad	CV (%)
	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05			
7) Matriz Normal	1,70	1,67	-	-	-	1,69	-	-
8) Matriz AR1 (25%)	-	1,56	0,76	2,02	-	1,45	0,64	44,1
9) Matriz AR2 (50%)	-	1,02	0,42	-	-	0,72	-	-
16) Matriz N + 4% FN	-	0,67	0,69	0,69	0,75	0,70	0,03	4,9
18) Matriz AR2 + 4% FN	0,65	0,57	0,68	1,27	1,14	0,86	0,32	37,0
19) Matriz N + 4% FT	1,57	-	0,92	1,37	-	1,29	0,33	25,9
21) Matriz AR2 + 4% FT	1,05	1,77	1,34	1,12	1,40	1,34	0,28	21,2

Mistura	Deformação 1ª Fissura (‰)					Média	Desv. Pad	CV (%)
	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05			
7) Matriz Normal	0,25	0,27	-	-	-	0,26	-	-
8) Matriz AR1 (25%)	-	0,03	0,07	0,21	-	0,10	0,09	92,4
9) Matriz AR2 (50%)	-	0,13	0,86	-	-	0,50	-	-
16) Matriz N + 4% FN	-	-	-	0,23	0,43	0,33	0,14	42,5
18) Matriz AR2 + 4% FN	0,22	0,08	0,10	0,24	0,20	0,17	0,07	42,9
19) Matriz N + 4% FT	0,16	-	0,11	0,18	-	0,15	0,04	24,4
21) Matriz AR2 + 4% FT	0,16	0,12	0,13	0,19	0,20	0,16	0,03	21,1

Mistura	Módulo de elasticidade (GPa)					Média	Desv. Pad	CV (%)
	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05			
7) Matriz Normal	6,50	6,01	22,26	-	-	11,59	-	-
8) Matriz AR1 (25%)	-	18,82	12,40	9,63	-	13,62	4,71	34,6
9) Matriz AR2 (50%)	-	8,01	0,58	-	-	4,29	-	-
16) Matriz N + 4% FN	4,61	4,64	4,64	3,95	2,61	4,09	0,88	21,5
18) Matriz AR2 + 4% FN	8,23	6,93	6,45	5,14	6,02	6,55	1,15	17,5
19) Matriz N + 4% FT	9,01	-	8,34	7,89	-	8,41	0,56	6,7
21) Matriz AR2 + 4% FT	7,60	16,17	9,83	5,92	6,59	9,22	4,16	45,1

Resultados dos ensaios de flexão

Mistura	Tensão 1ª fissura (MPa)					
	CP01	CP02	CP03	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Normal	5,42		6,44	5,93	0,72	12,1
8) Matriz AR1 (25%)	5,20	3,49	3,01	3,90	1,15	29,5
9) Matriz AR2 (50%)	3,25	6,77	4,96	4,99	1,76	35,2
10) Matriz N + 2% FN	-	-	-	-	-	-
11) Matriz AR1 + 2% FN	3,25	3,43	3,17	3,28	0,13	4,0
12) Matriz AR2 + 2% FN	4,08	4,50		4,29	0,29	6,8
13) Matriz N + 2% FT	4,64	3,31	3,35	3,77	0,75	20,0
14) Matriz AR1 + 2% FT	5,04	3,86		4,45	0,83	18,7
15) Matriz AR2 + 2%FT	-	4,62	3,66	4,14	0,68	16,4
16) Matriz N + 4% FN	-	-	-	-	-	-
17) Matriz AR1 + 4% FN	1,72	1,20	1,51	1,48	0,26	17,7
18) Matriz AR2 + 4% FN	2,19	2,72	2,90	2,60	0,37	14,1
19) Matriz N + 4% FT	3,50	2,81	3,09	3,13	0,34	11,0
20) Matriz AR1 + 4% FT	3,49	3,27	4,35	3,70	0,57	15,5
21) Matriz AR2 + 4% FT	3,95	3,03	2,27	3,08	0,84	27,3

Tensão máxima pós fissuração (MPa)					
CP01	CP02	CP03	Média	Desv. Pad	CV (%)
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
1,87	1,79	2,06	1,91	0,14	7,3
1,50	2,43		1,97	0,66	33,5
1,89	0,72	1,84	1,48	0,66	44,6
1,99	1,94		1,97	0,04	1,8
-	1,62	1,42	1,52	0,14	9,3
-	-	-	-	-	-
2,36	1,63	2,24	2,08	0,39	18,8
2,44	2,89	2,84	2,72	0,25	9,1
1,94	2,52	1,99	2,15	0,32	14,9
3,34	3,12	2,31	2,92	0,54	18,6
2,91	2,35	2,21	2,49	0,37	14,9

Mistura	Deslocamento 1ª fissura (mm)					
	CP01	CP02	CP03	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Normal	0,56	-	0,57	0,57	0,01	1,3
8) Matriz AR1 (25%)	0,35	0,31	0,21	0,29	0,07	24,9
9) Matriz AR2 (50%)	0,28	0,49	0,39	0,39	0,11	27,2
10) Matriz N + 2% FN	-	-	-	-	-	-
11) Matriz AR1 + 2% FN	0,33	0,32	0,34	0,33	0,01	3,0
12) Matriz AR2 + 2% FN	0,36	0,34	-	0,35	0,01	4,0
13) Matriz N + 2% FT	0,28	0,34	0,35	0,32	0,04	11,7
14) Matriz AR1 + 2% FT	0,40	0,37	-	0,39	0,02	5,5
15) Matriz AR2 + 2%FT	-	0,43	0,48	0,46	0,04	7,8
16) Matriz N + 4% FN	-	-	-	-	-	-
17) Matriz AR1 + 4% FN	0,41	0,37	0,25	0,34	0,08	24,3
18) Matriz AR2 + 4% FN	0,26	0,35	0,36	0,32	0,06	17,0
19) Matriz N + 4% FT	0,36	0,40	0,50	0,42	0,07	17,2
20) Matriz AR1 + 4% FT	0,27	0,36	0,35	0,33	0,05	15,1
21) Matriz AR2 + 4% FT	0,36	0,23	0,27	0,29	0,07	23,2

Deslocamento máximo (mm)					
CP01	CP02	CP03	Média	Desv. Pad	CV (%)
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
2,91	4,77	5,03	4,24	1,16	27,3
2,12	3,30	-	2,71	0,83	30,8
2,33	7,61	4,05	4,66	2,69	57,7
1,85	3,44	-	2,65	1,12	42,5
-	1,57	2,62	2,10	0,74	35,4
-	-	-	-	-	-
6,95	4,93	8,32	6,73	1,71	25,3
1,09	3,24	1,48	1,94	1,15	59,1
2,47	3,70	1,88	2,68	0,93	34,6
2,30	2,38	1,69	2,12	0,38	17,8
2,34	1,84	1,30	1,83	0,52	28,5

Resultados dos ensaios de flexão - continuação

Mistura	Módulo de elasticidade (GPa)					
	CP01	CP02	CP03	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Normal	12,18	-	15,30	13,74	2,21	16,1
8) Matriz AR1 (25%)	15,84	9,41	9,92	11,72	3,57	30,5
9) Matriz AR2 (50%)	6,52	14,75	10,04	10,44	4,13	39,6
10) Matriz N + 2% FN	-	-	-	-	-	-
11) Matriz AR1 + 2% FN	6,70	8,82	7,28	7,60	1,10	14,4
12) Matriz AR2 + 2% FN	5,06	12,08	-	8,57	4,96	57,9
13) Matriz N + 2% FT	9,50	6,23	9,46	8,40	1,88	22,3
14) Matriz AR1 + 2% FT	8,00	7,30	-	7,65	0,49	6,5
15) Matriz AR2 + 2% FT	-	9,65	6,70	8,18	2,09	25,5
16) Matriz N + 4% FN	-	-	-	-	-	-
17) Matriz AR1 + 4% FN	3,23	3,27	3,28	3,26	0,03	0,8
18) Matriz AR2 + 4% FN	3,05	2,03	5,12	3,40	1,57	46,3
19) Matriz N + 4% FT	4,87	4,57	4,92	4,79	0,19	4,0
20) Matriz AR1 + 4% FT	7,24	5,50	8,27	7,00	1,40	20,0
21) Matriz AR2 + 4% FT	8,85	3,09	5,30	5,75	2,91	50,6

Mistura	Área sob gráfico					
	CP01		CP02		CP03	
	OACI	OAG	OACI	OAG	OACI	OAG
7) Matriz Normal	0,00	-	0,00	-	0,00	-
8) Matriz AR1 (25%)	0,00	-	0,00	-	0,00	-
9) Matriz AR2 (50%)	0,00	-	0,00	-	0,00	-
10) Matriz N + 2% FN	-	-	-	-	-	-
11) Matriz AR1 + 2% FN	0,26	0,06	0,23	0,05	0,25	0,05
12) Matriz AR2 + 2% FN	0,27	0,06	0,32	0,07	-	-
13) Matriz N + 2% FT	0,22	0,05	0,19	0,05	0,25	0,05
14) Matriz AR1 + 2% FT	0,34	0,09	0,26	0,06	-	-
15) Matriz AR2 + 2% FT	-	-	0,32	0,08	0,35	0,09
16) Matriz N + 4% FN	-	-	-	-	-	-
17) Matriz AR1 + 4% FN	0,39	0,05	0,26	0,03	0,22	0,03
18) Matriz AR2 + 4% FN	0,29	0,04	0,44	0,06	0,46	0,06
19) Matriz N + 4% FT	0,31	0,06	0,41	0,06	0,45	0,07
20) Matriz AR1 + 4% FT	0,32	0,05	0,46	0,06	0,33	0,06
21) Matriz AR2 + 4% FT	0,48	0,08	0,23	0,03	0,30	0,04

Mistura	Índice de Tenacidade					
	CP01	CP02	CP03	Média	Desv. Pad	CV (%)
7) Matriz Normal	-	-	-	0,00	-	-
8) Matriz AR1 (25%)	-	-	-	0,00	-	-
9) Matriz AR2 (50%)	-	-	-	0,00	-	-
10) Matriz N + 2% FN	-	-	-	-	-	-
11) Matriz AR1 + 2% FN	4,60	4,45	5,39	4,81	0,51	10,5
12) Matriz AR2 + 2% FN	4,21	4,74	-	4,48	0,38	8,4
13) Matriz N + 2% FT	4,43	3,86	4,66	4,32	0,41	9,5
14) Matriz AR1 + 2% FT	3,93	4,10	-	4,01	0,12	3,0
15) Matriz AR2 + 2% FT	-	3,98	4,11	4,05	0,09	2,2
16) Matriz N + 4% FN	-	-	-	-	-	-
17) Matriz AR1 + 4% FN	8,48	10,23	8,75	9,15	0,95	10,3
18) Matriz AR2 + 4% FN	7,78	7,48	7,57	7,61	0,15	2,0
19) Matriz N + 4% FT	5,26	7,23	6,69	6,39	1,02	16,0
20) Matriz AR1 + 4% FT	6,92	7,14	5,15	6,41	1,10	17,1
21) Matriz AR2 + 4% FT	6,29	7,33	7,93	7,18	0,83	11,6