

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

REBECA HIRATA DORIA

**EFEITO DA CURA POR CARBONATAÇÃO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TÊXTEIS**

SÃO PAULO - SP

2019

REBECA HIRATA DORIA

**EFEITO DA CURA POR CARBONATAÇÃO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TÊXTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu para obtenção do título de Mestre

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo

São Paulo - SP

2019

Nome: Rebeca Hirata Doria

Título: Efeito da cura por carbonatação em compósitos cimentícios reforçados com têxteis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em: 25 de junho de 2019.

Banca examinadora

Orientador: Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo

Instituição: Universidade São Judas Tadeu

Assinatura:

. Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador

Instituição: Universidade São Judas Tadeu

Assinatura:

Prof. Dr^a Maria Ernestina Alves Fidelis

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois foi Ele que me deu forças e mansidão para enfrentar os obstáculos e alcançar meus objetivos.

Aos meus pais Celso Doria e Solange H. Doria, que em todo o percurso estiveram ao meu lado me motivando e apoiando para que eu não desistisse. Um agradecimento especial ao meu irmão Fernando, que mesmo longe se mostrou presente.

Ao grande amigo Dr. Rui Barbosa de Souza, que sempre me auxiliou e respondeu minhas dúvidas.

Ao técnico Fernando Santana por ter me auxiliado em diversas atividades no laboratório da Universidade São Judas Tadeu.

Ao meu orientador Dr. Dimas Alan Strauss Rambo, que me auxiliou em tudo que precisei, com conhecimento técnico e ajuda laboratorial, e esteve sempre presente me amparando.

Aos colegas de curso, André Nascimento e Rafael Moraes, que me ajudaram quando precisei. Reconheço a participação técnica de ambos para a conclusão deste trabalho.

Um agradecimento à empresa Fibertex a qual forneceu as amostras de tecido de fibra de vidro e vidro AR, sem as mesmas não seria possível a execução do trabalho.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.
(Albert Einstein)

RESUMO

Reforços têxteis são utilizados em compósitos cimentícios pelo fato do tecido conferir maior capacidade de deformação ao conjunto, podendo também gerar acréscimos de carga e contribuir para a melhora da tenacidade. Visto que o fibrocimento é um insumo de grande consumo atualmente no setor da construção civil, torna-se necessário estudar meios de melhoria para o material, tanto para resistência mecânica quanto durabilidade. Entretanto, tecidos como os de fibras de vidro ou naturais sofrem degradação quando adicionados a matriz cimentícia em virtude da alta alcalinidade da mesma. Para que a durabilidade destes compósitos não seja comprometida, têm-se a necessidade de estudar maneiras de combater o ataque alcalino às fibras. Uma das soluções possíveis está no método de cura por carbonatação, o qual acarreta uma redução precoce da alcalinidade da matriz reduzindo assim as chances de ataque alcalino ao reforço fibroso. Neste contexto, o presente trabalho, buscou estudar a influência da cura por carbonatação nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos distintos utilizando como variáveis: os teores de cimento e o tipo do tecido empregado para reforço (tecido de fibra de vidro álcali-resistente, tecido de fibra de vidro comum e tecido de fibra de juta). Do ponto de vista mecânico, a cura por carbonatação se mostrou benéfica para os compósitos independentemente do teor de cimento empregado, contribuindo significativamente para ganho de resistência mecânica. Observou que para o reforço de tecido de fibra de vidro comum houve melhora no comportamento mecânico visto a redução do consumo de cimento para 35% e o método de cura por carbonatação, sendo possível atingir carga última superior ao compósito com 50% de cimento sem carbonatação, além de promover expressivas contribuições na capacidade de absorção de energia. Contudo a cura por carbonatação foi capaz de reduzir precocemente a alcalinidade e contribuir para a durabilidade da fibra de vidro comum, evitando a degradação precoce.

ABSTRACT

Textile reinforcements are used in cementitious composites because the fabric confers greater deformation capacity to the set, and can also generate load increases and contribute to the improvement of toughness. Since fiber cement is a high consumption material in the construction sector today, it is necessary to study means of improvement for the material, both for mechanical strength and durability. However, fabrics such as glass or natural fibers suffer degradation when added to the cementitious matrix due to its high alkalinity. So that the durability of these composites is not compromised, there is a need to study ways to combat the alkaline attack on the fibers. One of the possible solutions is the carbonation cure method, which leads to an early reduction of matrix alkalinity thus reducing the chances of alkaline attack to the fibrous reinforcement. In this context, the present work sought to study the influence of carbonation cure on the physical and mechanical properties of different composites using as variables: cement content and type of reinforcement fabric (acid-resistant fiberglass fabric, fiberglass and jute fiber fabric). From the mechanical point of view, carbonation curing proved to be beneficial for composites regardless of the cement content employed, contributing significantly to mechanical strength gain. It was observed that for the reinforcement of the common fiberglass fabric there was an improvement in the mechanical behavior as the cement consumption was reduced to 35% and the carbonation cure method, being possible to reach a final load higher than the 50% cement without carbonation composite. Besides promoting significant contributions in the energy absorption capacity. However, carbonation cure was able to reduce alkalinity early and contribute to the durability of the common fiberglass, avoiding early degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do comportamento à tração do compósito têxtil.....	5
Figura 2 - Representação do diagrama tensão-deformação do concreto reforçado com têxtil sob carregamento uniaxial e da curva tensão-deformação do tecido.	6
Figura 3 – Diferença entre tecido plano e malha.....	7
Figura 4 – Tipos de tecido - a) tecelagem plana; b) tecelagem giro inglês.	8
Figura 5 – Ilustração esquemática do mecanismo de formação da microestrutura de C_3S na pasta com cura por hidratação e cura por carbonatação.	18
Figura 6 – Fluxograma de variáveis do trabalho.	20
Figura 7 – Dispersão da celulose.	26
Figura 8 – mistura manual dos materiais em pó.....	27
Figura 9 – Fôrmas de moldagem dos compósitos.....	28
Figura 10 – Melhorias para rasamento do compósito na fôrma.	29
Figura 11 – Amostras embaladas prontas para o transporte.	30
Figura 12 – Aparato para apoio das amostras dentro da câmara de carbonatação. .	30
Figura 13 – Imagens da câmara de carbonatação até a estabilização do teor de umidade.....	31
Figura 14 – Amostras embaladas hermeticamente para cura sem carbonatação.....	32
Figura 15 – a) Aferição das massas secas e saturadas; b) Aferição da massa imersa.	33
Figura 16 – a) Disposição das amostras na estufa; b) Amostras embaladas hermeticamente.....	33
Figura 17 – Ensaio de flexão com 4 pontos de apoio.....	34
Figura 18 – Relação entre a porosidade e o consumo de cimento.	37
Figura 19 – Relação entre densidade e consumo de cimento.....	38
Figura 20 - Resistência à tração na flexão dos compósitos sem reforço têxtil (amostra de referência), em função do teor de cimento.....	39
Figura 21 – Resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro AR, em função do teor de cimento.	41
Figura 22 - Resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro, em função do teor de cimento.	44

Figura 23 - Resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com tecido juta, em função do teor de cimento.	48
Figura 24 – LOP em relação a porosidade do compósito.	50
Figura 25 – Módulo de ruptura dos compósitos reforçados com têxteis conforme o consumo de cimento.	51
Figura 26 – Ruptura do compósito reforçado com tecido de fibra de juta.	53
Figura 27 – Profundidade de carbonatação para os compósitos com cura ambiente; a) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR; b) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro V; c) Amostra reforçada com tecido de fibra de juta; d) Amostra sem reforço têxtil.....	54
Figura 28 – Profundidade de carbonatação para os compósitos com cura por carbonatação; a) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR; b) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro V; c) Amostra reforçada com tecido de fibra de juta; d) Amostra sem reforço têxtil.....	55
Figura 29 – Relação entre a porosidade e consumo de cimento divergindo o tipo de cura	56
Figura 30 – Correlação entre o teor de cimento em massa e as densidades aparente e real, para cura ambiente e cura por carbonatação.....	57
Figura 31 – Resistência à flexão das amostras sem reforço têxtil. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.	58
Figura 32 – Resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.	60
Figura 33 – Resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.	61
Figura 34– a) Imagem MEV da amostra carbonatada reforçada com tecido de fibra de vidro V; b) Imagem MEV da amostra não carbonatada reforçada com tecido de fibra de vidro V.	64
Figura 35– Resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de juta. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.....	65
Figura 36– Ilustração da fabricação de placas cimentícias.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa específica do calcário.	22
Tabela 2: Finura (%) do calcário.	23
Tabela 3: Especificação técnica do cimento CP-V.	23
Tabela 4: Especificação técnica do tecidos de fibra de vidro AR e vidro V.	24
Tabela 5: Relação A/C em função do consumo de cimento.	25
Tabela 6: Porosidade das amostras sem tecido em função do consumo de cimento.	36
Tabela 7: Densidade aparente e densidade real em função do consumo de cimento.	38
Tabela 8: Valores médios de LOP e tenacidade para as amostras sem reforço têxtil	39
Tabela 9: Valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR	42
Tabela 10: Valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro V.	45
Tabela 11: Valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de juta.	46
Tabela 12: Porosidade em função do consumo de cimento.	49
Tabela 13: Porosidade das amostras sem reforço carbonatadas em função do consumo de cimento	56
Tabela 14: Média do LOP e tenacidade das amostras sem reforço têxtil carbonatadas em função do consumo de cimento.	57
Tabela 15: Médio do LOP, MOR e tenacidade das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR e vidro V, carbonatadas e não carbonatadas em função do consumo de cimento.	62
Tabela 16: Médio do LOP, MOR e tenacidade das amostras reforçadas com tecido de fibra de juta, carbonatadas e não carbonatadas em função do consumo de cimento.....	66

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
SUMÁRIO.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM TÊXTIL	4
2.1.1 Tipos de tecidos.....	6
2.1.2 Placa cimentícia.....	12
2.2 CARBONATAÇÃO	13
2.2.1 Fenômeno da carbonatação	13
2.2.2 Cura por carbonatação	16
3 METODOLOGIA	18
3.1 PLANO DE TRABALHO E VARIÁVEIS.....	18
3.2 MATERIAIS.....	21
3.2.1 Caracterização do calcário	21
3.2.2 Cimento CP-V	23
3.2.3 Tecidos de fibra de vidro	23
3.3 PREPARO DA MATRIZ E MOLDAGEM DOS COMPÓSITOS	25
3.3.1 Mistura dos materiais.....	25
3.3.2 Produção dos compósitos	27
3.4 PROCESSOS DE CURA	29
3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO DO COMPÓSITO.....	32

3.5.1	Porosidade e densidade por princípio de Arquimedes	32
3.5.2	Resistência à flexão.....	34
3.5.3	Profundidade de carbonatação.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	EFEITO DO CONSUMO DE CIMENTO.....	36
4.2	EFEITO DO TIPO DE MATERIAL DO TECIDO DO COMPÓSITO.....	50
4.3	EFEITO DA CURA POR CARBONATAÇÃO	54
5	CONCLUSÕES.....	67
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	68
7	Viabilidade técnica.....	69
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	71
	ANEXO A	76

1 INTRODUÇÃO

A construção industrializada está em constante crescimento no Brasil. No entanto, esta tecnologia ainda é pouco difundida, persistindo muitas incertezas quanto à sua aplicabilidade e seu desempenho. O mercado da construção civil seca se intensificou na década de 90, sobretudo com a utilização do fibrocimento, gerando inúmeras pesquisas voltadas ao aprimoramento de técnicas de produção e melhoria dos materiais empregados.

O fibrocimento vem sendo utilizado na produção de placas cimentícias para fechamentos de fachadas e telhas para cobertura. Este tipo de material apresenta resistência a cargas suspensas e a impactos acidentais, sendo o nível dessa resistência mecânica dependente de fatores como: os materiais utilizados na composição da matriz, tipo de reforço (fibras naturais e sintéticas) e processo de cura empregado (SOUZA, 2014).

Em alguns países se tornou proibida a utilização do amianto em fibrocimento, portanto o substituíram total ou parcialmente por fibras celulósicas e/ou fibras artificiais de PVA e PP. Neste contexto, ainda se tem a necessidade de estudos para a correta substituição do amianto sem perda de desempenho. O uso de tecido de fibra de vidro ou outros reforços têxteis vem sendo empregado para contribuir no desempenho mecânico das placas cimentícias internacionais (REVISTA FINESTRA, 2010). O reforço têxtil atua preferencialmente após a formação de fissuras do compósito. Nesta etapa, as fibras criam pontes de tensão entre os segmentos da matriz de modo a impedir a propagação e a abertura generalizada das fissuras. Esta atuação tem por consequência, em geral, a formação de múltiplas fissuras resultando em grande tenacidade antes da ocorrência da ruptura (RAMBO et al., 2015).

Um dos grandes desafios ligados ao uso do fibrocimento no contexto da construção seca reside no grande consumo de cimento empregado neste tipo de compósito (cerca de 80% da massa total) (DIAS, 2011). A indústria cimenteira, dentro do setor da construção civil, é grande responsável por emissão de poluentes na atmosfera. Em todas as etapas de produção do cimento há um impacto ambiental significativo,

iniciando o ciclo pela extração da matéria prima, passando pela descarbonatação do calcário, até a distribuição (transporte). Para a mitigação do impacto negativo de emissões de gases do efeito estufa, é necessário empenho na melhoria da eficiência do uso dos ligantes nos compósitos cimentícios.

Objetivando a redução do consumo de cimento e a melhoria do comportamento mecânico do fibrocimento, o presente trabalho propõe combinar o uso de cura por carbonatação e o emprego de têxteis diversos (de fibra de vidro e fibra de juta) em seu processo produtivo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Sendo o cimento o mais importante insumo do concreto, fibrocimento e argamassa; a previsão é que sua produção continue em crescimento, devido à alta demanda do setor da construção civil. Para a mitigação do impacto negativo de emissões de gases do efeito estufa causados pela indústria cimenteira, é necessário modificar os processos produtivos, os quais encareceriam o produto final. Desta forma deve-se buscar introduzir novas técnicas para melhoria da eficiência do uso dos ligantes nos compósitos cimentícios.

Uma grande preocupação para a redução do consumo de cimento é a questão da durabilidade e desempenho do compósito, o que faz ter uma maior atenção principalmente em relação ao fibrocimento e placas cimentícias.

O mercado da construção civil vem crescendo nas tendências dos sistemas de vedação em drywall compostos por placas cimentícias. Atualmente, os produtos nacionais são reforçados apenas por fibras curtas randomicamente distribuídas. A utilização do reforço têxtil em placas cimentícias é uma solução aplicada em produtos internacionais, porém há a necessidade de estudar soluções para o uso do tecido de fibra de vidro ou natural, de modo a manter a sua durabilidade no meio alcalino gerado na hidratação do cimento.

Um meio para a redução do pH da matriz cimentícia e conseqüentemente possibilitar o uso desses tecidos de modo a não prejudicar sua durabilidade é a cura por

carbonatação, a qual reduz precocemente o pH da matriz criando um ambiente favorável para o uso de fibras que se degradam em meio alcalino.

Portanto o presente trabalho se justifica pela megatendência de ecoeficiência na melhoria dos materiais para construção civil, através de estratégias de redução no consumo de cimento nas formulações do fibrocimento e do sequestro de CO₂ por meio da cura por carbonatação.

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal do trabalho é estudar o efeito da cura por carbonatação nas características físicas e mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com têxteis. Além do processo de cura, também foram empregados como variáveis do estudo, o consumo de cimento da matriz e o tipo de tecido utilizado como reforço (vidro comum, vidro AR e juta). Abaixo, encontram-se os objetivos específicos do presente estudo:

- Investigar o efeito do consumo de cimento nas propriedades físicas e mecânicas do compósitos;
- Investigar o efeito da inclusão e do tipo de tecido (vidro comum, vidro AR e juta) nas propriedades mecânicas do compósitos;
- Investigar o efeito da cura por carbonatação nas propriedades físicas e mecânicas do compósitos, e na durabilidade das fibras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM TÊXTIL

A fim de buscar alternativas para reforços em concreto armado, os estudos sobre a utilização do reforço têxtil em concretos iniciou-se na década de 80 como possibilidade de substituição do reforço convencional de aço (SCHEERER et. al, 2015).

Nos anos 90, este material compósito foi intitulado como “TRC” (Textile Reinforced Concrete) tendo ele comparada ao concreto armado porém sendo reforçado com tecido plano de fibras poliméricas ou outros materiais adequados, tornando possível a não utilização da barra de aço como reforço (NAAMAN, 2010). Este compósito apresenta algumas vantagens em relação ao reforço convencional de aço, pois o aço no concreto armado que se torna vulnerável a corrosão.

O uso de têxteis na construção civil já vem sendo introduzido há alguns anos, principalmente na Alemanha, onde é empregado primordialmente em artefatos com altas resistências e de espessuras esbeltas.

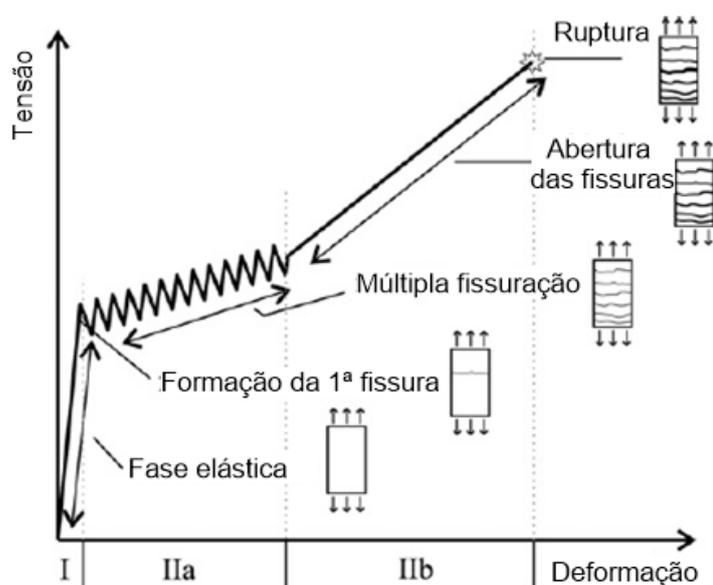
Este tipo de compósito requer matrizes com propriedades reológicas especiais e tamanhos de partículas compatíveis com as dimensões das peças e abertura dos tecidos. É comum o emprego de altas taxas de ligantes, adições de finos, tais como, cinza volante, sílica ativa e também aditivos superplastificantes. Além de pensar na composição dos finos têm-se a necessidade de pensar em técnicas para redução do consumo de cimento, uma vez que o mesmo durante sua fabricação gera grandes impactos ambientais.

Segundo PELED e MOBASHER (2005) o uso do reforço têxtil garante valores de tenacidade, resistência à tração e capacidade de deformação superiores aos reforços com fibras longas, alinhadas ou distribuídas aleatoriamente.

Os têxteis tem grande influência no comportamento dos TRC. Segundo Petre e Zapalowicz (2012), os filamentos mais longos são dispostos paralelamente à direção de tensão de tração e, desta forma, a estrutura é otimizada e as fibras utilizadas de forma eficiente.

Barhum e Mechtcherine (2014) descreve que o compósito têxtil pode apresentar comportamento *strain-hardening*, o qual normalmente se divide em três etapas, como mostrado na Figura 1. Primeiramente o comportamento elástico, que segundo Petre e Zapalowicz (2012), é governado pela rigidez do compósito e está diretamente ligado ao módulo de elasticidade da matriz cimentícia. O fim desta etapa se dá quando a resistência à tração da matriz é alcançada e acontece a primeira fissura. A segunda etapa é caracterizada pelo processo de múltipla-fissuração do compósito, explicado pelo fato da matriz cimentícia chegar várias vezes em seu limite de deformação e nesse momento, de múltipla-fissuração, o têxtil estar mais solicitante a tensão (RAMBO, 2016). Assim a terceira etapa, consiste pela abertura destas fissuras até a ruptura total do compósito.

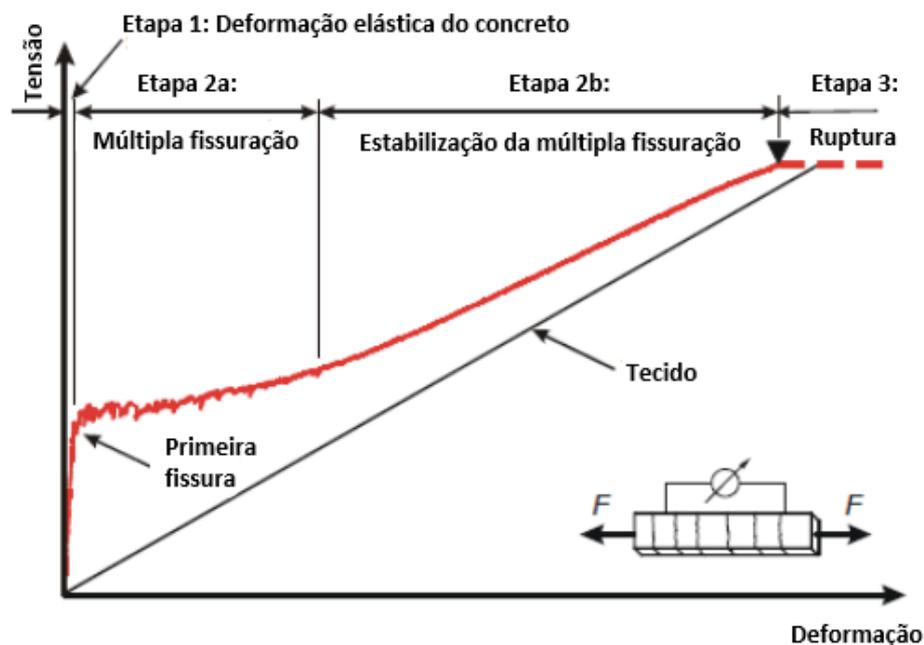
Figura 1 – Representação esquemática do comportamento à tração do compósito têxtil.



Fonte: Adaptado de Barhum e Mechtcherine (2014)

Petre e Zapalowicz (2012), explicam que a curva tensão-deformação do compósito têxtil progride quase paralela a curva do material têxtil utilizado, sendo a diferença entre as curvas ocasionada pelo comportamento *strain-hardening* advindo da interação matriz/têxtil. A ruptura do compósito ocorre quando o reforço têxtil atinge a tensão limite de tração, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 - Representação do diagrama tensão-deformação do concreto reforçado com têxtil sob carregamento uniaxial e da curva tensão-deformação do tecido.



Fonte: adaptado de BRAMESHUBER, (2006 apud, RAMBO, 2016)

Desta forma, entende-se que a curva de tensão-deformação do compósito possui significativa relação com o tipo de fibra utilizado para a composição da malha têxtil.

Entre as fibras comumente estudadas como reforço têxtil em matrizes frágeis, estão: fibras de vidro AR (álcali-resistente), fibras de carbono e de aramida. Assim como também existem as menos utilizadas como as fibras naturais, devido sua vulnerabilidade quanto à durabilidade em meio alcalino gerado com a hidratação do cimento. De uma forma geral os compósitos cimentícios reforçados com têxteis são reforçados com tecidos que possuem durabilidade em meio ao compósito.

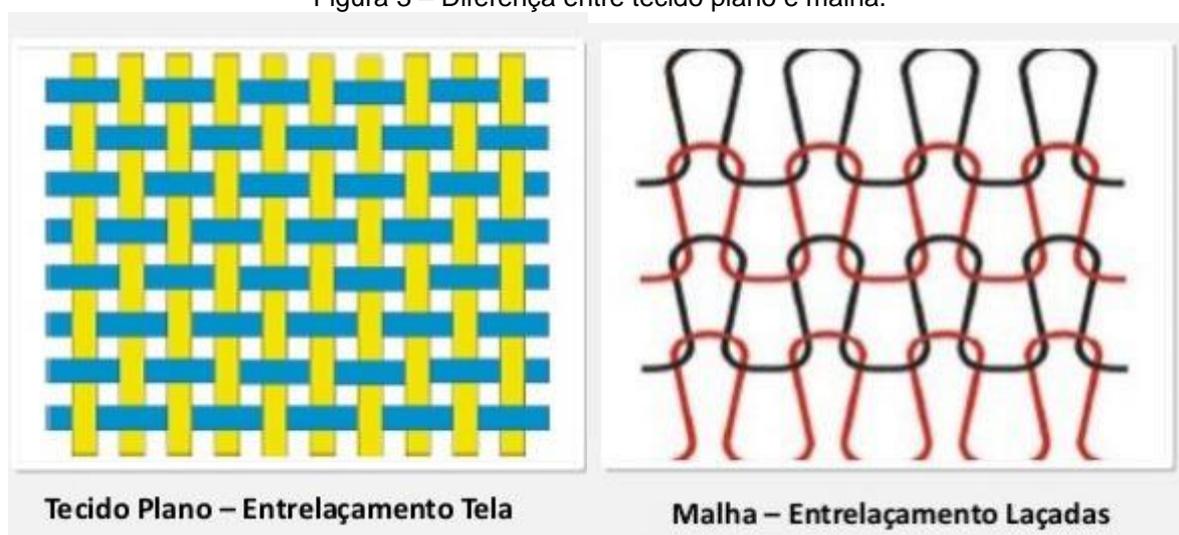
2.1.1 Tipos de tecidos

O material têxtil pode diferir pela forma de entrelaçamento em que os feixes são conectados uns aos outros. Estes entrelaçamentos afetam a geometria do tecido e também alteram suas propriedades mecânicas.

Os têxteis utilizados como material de reforço em compósitos necessitam de fibras de alto desempenho mecânico para suportar os esforços de tração exercidos sob o mesmo (JESSE et al., 2008). A tecnologia têxtil oferece flexibilidade em sua produção, modificando a gramatura das fibras, o tamanho da abertura da malha e o tipo de entrelaçamento, para influenciar na maleabilidade e resistência do material.

As nomenclaturas usuais para diferenciar os entrelaçamentos dos feixes são: Tecido Plano e Malha, a Figura 3 ilustra essa divergência.

Figura 3 – Diferença entre tecido plano e malha.



Fonte: JORDÃO, L. Tecido plano x malha (2016)

O tecido plano é o resultado do entrelaçamento de dois feixes que se cruzam e formam um ângulo de 90° , os ordenados no sentido horizontal são chamados de fios de trama, e os colocados no sentido vertical são chamados de fios de urdume.

Já a malha é constituída por feixes tramados na mesma direção, horizontal, o que a torna mais maleável do que o tecido plano, a qual não é usual para utilização em compósitos cimentícios.

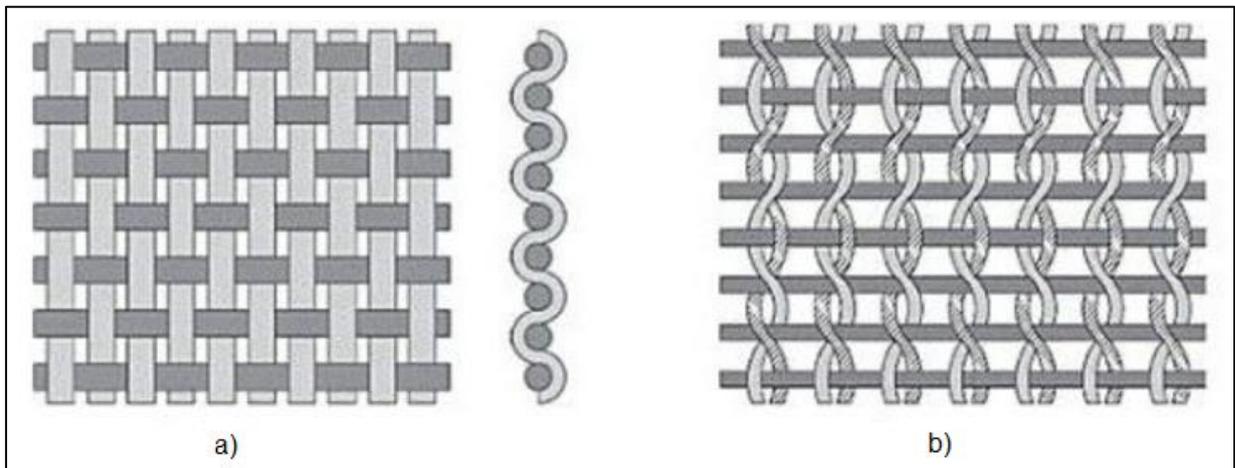
Este entrelaçamento dos feixes para formar um tecido não afeta somente a geometria do tecido, mas também a geometria individual dos fios (PELED;BENTUR, 2000).

Os tecidos são fabricados a partir do entrelaçamento perpendicular de dois conjuntos de fios, cruzando-se um sobre o outro de maneira alternada, podem diferir no tipo de tecelagem, sendo tecelagem plana ou tecelagem do tipo giro inglês.

Na tecelagem plana os fios são conectados por fricção nos pontos de junção, sendo necessário um número suficiente de pontos de conexão entre a trama e o urdume para manter o tecido unido e estável (PELED, A., MOBASHER B., BENTUR, A., 2017).

A tecelagem do tipo giro inglês possui uma estrutura diferenciada, onde dois fios de urdume são torcidos em torno dos fios de trama (conforme ilustrado na Figura 4), proporcionando um forte travamento, resultando em um tecido mais durável de modo que se torne mais resistente para o uso (PELED, A., MOBASHER B., BENTUR, A., 2017).

Figura 4 – Tipos de tecido - a) tecelagem plana; b) tecelagem giro inglês.



Fonte: Textile Reinforced Concrete, 2017, p. 2

Para uso na construção civil, as fibras que compõem os cordões, podem ser classificadas por ter alto ou baixo módulo de elasticidade ao se comparar ao módulo do concreto.

Em geral, a incorporação de fibra de alta resistência e alto módulo de elasticidade na produção do reforço têxtil, tais como vidro, aramida e carbono, aumenta a tenacidade do compósito cimentício bem como sua resistência à tração, proporcionando o comportamento *strain-hardening*. Em contrapartida, as fibras com baixo módulo, como polipropileno (PP) e polietileno (PE), quando utilizadas como

reforço aumentam principalmente a ductilidade do compósito mas não a sua resistência à tração, resultando em um comportamento elástico-plástico ou strain-softening (perda de resistência à tração na pós fissuração) (PELED, BENTUR, 2002)

Savastano Jr. (2000) observa que quando as fibras vegetais são utilizadas adequadamente na matrizes cimentícias, proporcionam maior resistência ao impacto e maior absorção de energia, desta forma há a possibilidade de trabalho no estágio pós-fissuração e contribuição para melhoria no isolamento termo-acústico. Mesmo as fibras vegetais apresentando baixo módulo de elasticidade e alta resistência à tração.

2.1.1.1. Tecido fibra de vidro AR

Segundo Gries et al (1998 *apud* BEZBRADICA, 2015), o desenvolvimento da fibra de vidro AR (álcali-resistente) começou nos anos 70 pela Pilkington. As fibras de vidro AR são constituídas, principalmente, por areia de sílica (SiO_2) e a adição de até 15-16% em peso de óxido de zircônio (ZrO_2) para fornecer uma resistência contra os álcalis. A produção dos fios de vidro AR consiste nos seguintes processos (BRAMESHUBER, 2006):

- Processo de fusão de matérias-primas entre 1250-1350 ° C → vidro fundido;
- Fiberização do vidro fundido, isto é, processo de fiação húmida (25-150 m / s) → filamentos (\varnothing 9-27 μm);
- Revestimento (polímeros orgânicos) no filamento → molhamento superficial e colagem filamentos;
- Agrupamento de filamentos → fios (por exemplo, 400-6600 número de filamentos).

O processo de produção desta fibra faz com que a sua superfície fique marcada por pequenos defeitos que podem levar a perda de resistência. Tais zonas são chamadas de zonas fracas e conseqüentemente essas zonas abrem caminho para corrosão e concentrações de tensões quando colocadas em um ambiente alcalino (ORLOWSKY et al., 2005).

Esses pontos de corrosão ocasionada em ambientes alcalinos ocorre com a fibra de vidro convencional, a qual sofre degradação das propriedades físicas, e

propriedades mecânicas acarretando em comprometimento principalmente em sua tenacidade, diminuindo a flexibilidade e tornando seu comportamento frágil (PERUZZI, 2002).

Os íons de hidróxido (OH⁻) presentes em uma solução alcalina reagem com os grupos de sílica (Si-O-Si) da rede da fibra de vidro que formam superfícies hidratadas e sílica dissolvida. Esta reação depende de diversos fatores, tais como, a composição da solução alcalina e da fibra de vidro, como também do tempo de exposição e temperatura (SCHEFFER et al., 2009).

ORLOWSKY e RAUPACH (2006) citam que a fibra de vidro perde resistência ao longo do tempo devido ao intemperismo, ocorrendo acima de um teor crítico de umidade e aumentando exponencialmente com temperaturas mais altas.

Vê-se através dos trabalhos acima citados a necessidade de estudar formas para melhorar a durabilidade desta fibra. Entre elas, estão a redução do valor do pH da matriz cimentícia, inclusão de uma camada de proteção hidrofóbica na fibra (SCHEFFER et al., 2009), ou incorporação de resinas epóxi insolúveis ou quimicamente reativa (BUTLER et al., 2010).

PURNELL et al, (2000) afirmam que o ataque químico do meio alcalino na fibra de vidro AR é mínimo, sendo a causa da perda da tenacidade da fibra é devido a interação matriz-fibra. Segundo Voss e Hegger (2006), o reforço de fibra de vidro AR obteve resistência média a tração em torno de 410MPa.

Para melhoria da matriz, PURNELL et al, (2000) citam possibilidades para modificar a matriz cimentícia, tais como, uso de cimentos de baixa alcalinidade, e adicionar sílica, cinza volante ou metacaulim para reduzir a formação dos hidróxidos de cálcio.

2.1.1.2 Tecido de fibra de juta

A fibra de juta, com nome científico de *Corchorus capsularis*, é uma fibra natural extraída do caule das plantas pertencentes ao gênero *Corchorus*, da família *Tiliaceae* (FIDELIS, 2014). Quando comparadas com as fibras sintéticas, possuem menor custo, pois requerem menor energia e/ou processos para sua produção, além de serem produzidas a partir de recursos naturais renováveis.

De acordo com PIKANÇO (2005) o processo de produção das fibras de juta se divide em quatro etapas, Na primeira etapa consiste na colheita e preparo das fibras, que ficam imersas em água entorno de 20 dias, passando assim para o processo de secagem que dura cerca de 3 dias. No amaciador, segunda etapa, uma máquina que suaviza a fibra começa o processo de fiação e na etapa seguinte penteia-se e desembaraça-se os fios, resultando em fios finos que são levados ao passador para serem organizados em grandes rolos. Após isso, se encerra com a quarta etapa onde os fios são torcidos e trançados, gerando os fios e cordas de diversas espessuras para determinados usos.

Por se tratar de uma fibra natural, suas propriedades mecânicas apresentam grande variabilidade de uma fibra para outra. As fibras podem divergir no diâmetro, na origem, na estrutura cristalina e até em função das condições de crescimento.

Assim como as fibras de vidro, fibras de juta também sofrem com ataques alcalinos quando imersas em uma matriz cimentícia convencional. Neste ambiente, a resistência da fibra de juta é reduzida devido a presença da água nos poros do compósito, a qual é altamente alcalina, ocasionando assim a dissolução da hemicelulose e lignina. Além desse fator, ocorre também a mineralização das fibras devido aos produtos de hidratação do compósito, em especial o hidróxido de cálcio, o qual migra para as paredes e vazios das fibras, tornando-as rígidas e frágeis (TOLEDO FILHO et al., 2003).

Agopyan et al, (2005) cita que a grande vantagem de se utilizar fibra natural como reforço é o comportamento final do compósito após o rompimento, as fibras por possuírem alta resistência a tração e tenacidade, diminuem os epeçamento das fissuras da matriz, ocasionando várias micro fissuras.

Segundo Fidelis (2014), com o aumento do número de camadas de tecido de juta, há aumento na formação de fissuras e com isso obtém-se maiores valores de tensão última a tração direta, obtendo um compósito com comportamento deflection hardening sendo reforçado com 5 camadas de tecido, atingindo a resistência a tração de 4,73MPa.

2.1.2 Placa cimentícia

A placa cimentícia pode-se ser usada como fechamentos em áreas molhadas, porém suas funções vão além disso devido a versatilidade do material, porém ela não atende à funções estruturais.

A principal vantagem da placa cimentícia dentre outros materiais de mesma função no mercado da construção civil, é a possibilidade de manutenções através de resinas e também quanto a sua produção que não há queimas (SPECK, 2014).

A produção de fibrocimento era composta por amianto, o qual se tornou proibido em alguns países. Em 1940, iniciaram os trabalhos para substituição do amianto (PIZZOL, 2013). Nos anos 70, Austrália e Nova Zelândia adequaram-se os processos de produção e extinguiram o uso do amianto (COUTTS, 2005).

O fibrocimento é composto por duas fases: matriz cimentícia e fibras (SOUZA, 2014) Sendo assim a fase da matriz cimentícia é composta por cimento Portland, calcário e adições minerais, e as fibras podem ser de celulose e/ou fibras sintéticas. Também utilizam agente floculante para aumentar a eficiência do processo produtivo (KUNITZ, 2017).

O processo de obtenção da fibra de celulose usada na indústrias de fibrocimento pode ser por sulfato (kraft), sulfito ou soda. A polpa celulósica não branqueada pode conter por volta de 3% de lignina em massa. Sendo necessário o processo de branqueamento para removê-la (Fengel e Wegener, 1989 apud KUNITZ, 2017).

A maioria das placas produzidas no Brasil, é composta por uma mistura de cimento Portland, agregados naturais, celulose e reforçada com fios sintéticos, algumas ainda podem receber uma camada adicional de impermeabilizante por imersão. Porém placas norte-americanas, já utilizam de outro conceito, sendo reforçadas com tela de fibra de vidro nas duas faces (REVISTA FINESTRA, 2010).

Como agregado natural, usa-se o calcário, como material inerte. Sua principal função é atuar como *filler*, afim de melhorar o empacotamento de partículas e diminuir os custos. Podendo reduzir propriedades como retração por secagem quando substituto do cimento, sendo que os melhores resultados são atingidos quando o calcário é do mesmo tamanho da partícula do cimento (KUNITZ, 2017).

2.2 CARBONATAÇÃO

2.2.1 Fenômeno da carbonatação

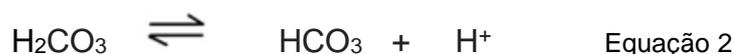
Após a exposição ao ar, os compósitos cimentícios reagem com o dióxido de carbono ao longo do tempo, durante sua vida útil ou até mesmo após sua demolição. Este processo é denominado de carbonatação. Os estudos pertinentes ao tema verificam o comportamento dos materiais cimentícios, em sua maioria, os compostos por armadura de aço, para que se entenda este fenômeno a fim de projetar adequadamente a proteção da armadura contra a corrosão por carbonatação (HOUST; WITTMANN, 2002).

Há também trabalhos, mais recentes, que discutem a capacidade de fixação do CO₂ por compósitos cimentícios através do mecanismo da carbonatação (ASHRAF, 2016; CASTELLOTE et al., 2009).

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização da fase líquida saturada de hidróxido de cálcio, contida na pasta de cimento, pelo dióxido de carbono, resultando em carbonato de cálcio (SILVA, 2007). A velocidade do fenômeno da carbonatação é influenciada por alguns fatores, tais como, a porosidade do compósito, o tipo de cimento, a umidade relativa, a temperatura e a concentração de CO₂ no ambiente.

O início do processo de carbonatação se dá quando o CO₂, por meio de difusão do gás, entra em contato com a água adsorvida nos poros. Este reage e forma o ácido carbônico (H₂CO₃), (ASHRAF, 2016; CASTELLOTE et al., 2009) conforme demonstrado na Equação 1.

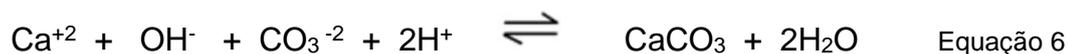
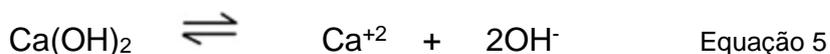
A Equação 2 expressa a reação em que o ácido H₂CO₃, em meio aquoso, se dissocia em bicarbonato (HCO₃⁻) e íons de hidrogênio (H⁺). O íon H₂CO₃ permanece em solução com pH entre 4 e 8, acima desse valor ele se dissolve em CO₃⁻² (íon carbonato), conforme demonstrado na Equação 3, a dissolução do ácido reduz o pH devido ao aumento da concentração de íons de CO₃⁻² (ASHRAF, 2016; NEVES JUNIOR et al., 2013).



Conforme demonstrado na Equação 4 os íons de cálcio (Ca^{+2}) reagem com os íons de carbonato (CO_3^{2-}) formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), um produto termodinamicamente mais estável, que modificará o pH nos poros entre os produtos de hidratação (NEVES JUNIOR et al., 2013).



Para a dissolução da portlandita (CH) é necessário um pH maior que 12, portanto quando as reações de carbonatação se iniciam e com isso o pH do meio reduz a valores abaixo de 12, se desestabiliza a CH e inicia a dissolução em íons de cálcio em hidroxila (OH^-), como demonstrado na Equação 5, contudo o Ca^{+2} reage com os íons de carbonato e assim neutralizando os íons de hidroxila pelo íons H^+ e liberando água, reação química demonstrada na Equação 6 (ASHRAF, 2016; BORGES et al.).



Quando o pH do meio fica abaixo de 11,6 inicia-se o processo de decomposição dos monossulfoaluminatos (AFm) em etringita e monocarbonatos (HARGIS et al., 2017). Já quando o pH fica menor que 10,5 os compostos que formam a etringita (AFt) começam a decompôr em sulfatos, aluminatos e íons de cálcio, esses íons de cálcio

reagem com os íons de carbonato resultando em carbonato de cálcio, gipsita, compostos de aluminatos e água (HARGIS et al., 2017).

O principal efeito negativo da carbonatação para o concreto armado é a despassivação da armadura a qual é ocasionada pela redução do valor do pH nos poros, prejudicando assim a resistência mecânica final.

Porém o efeito positivo da carbonatação se dá pelo fato da precipitação do carbonato de cálcio conferir um ganho de resistência mecânica ao compósito cimentício. Se a carbonatação ficasse restrita a uma espessura inferior à da camada de cobertura das armaduras, ela seria benéfica para o concreto, pois aumentaria sua resistência mecânica e à ataques químicos.

O processo de carbonatação favorece ao efeito do fenômeno de colmatação dos poros. A colmatação é o preenchimento dos poros pelos produtos gerados na reação química de carbonatação, devido o carbonato de cálcio possuir volume maior do que o hidróxido de cálcio.

Com a redução da porosidade conseqüentemente há um aumento da resistência mecânica a compressão do concreto. As conseqüências positivas da redução da porosidade não estão só relacionadas ao ganho de resistência mecânica, mas também pelo fato de estar dificultando o acesso de agente agressores para o interior do compósito.

O efeito do processo de carbonatação pode ser descrito como benéfico também para os compósitos reforçados com fibras vegetais, pois devido à sua alta porosidade a carbonatação da matriz é potencializada, e por conseqüência, obtém-se a diminuição da alcalinidade do meio e assim dá a existência de um ambiente menos agressivo para as fibras (SILVA, 2002)

Tonoli et al. (2010) defendem que uma alternativa para aumentar a durabilidade das fibras naturais em matriz cimentícia é a carbonatação. Toledo Filho et al. (2003), relatam que compósitos reforçados com fibras vegetais, após 109 dias de exposição ao dióxido de carbono obtiveram um aumento significativo na durabilidade.

Almeida et al. (2010) relacionaram a melhora das propriedades mecânicas do compósito após a carbonatação com a melhora da interface entre fibra-matriz, influenciado pela maior formação de CaCO_3 e redução do hidróxido de cálcio.

2.2.2 Cura por carbonatação

As tentativas de usar o dióxido de carbono logo após a mistura, conhecidas também como cura por carbonatação, obtiveram início levando em consideração a necessidade de um concreto com maior resistência ao intemperismo, desta forma objetivando a melhora da resistência mecânica, servindo também para acelerar as reações de hidratação dos compósitos cimentícios (ROSTAMI, et al., 2011). Outro ponto de estudo foi para o tratamento de substâncias agressivas ao concreto, através da redução da alcalinidade e diminuição da solubilidade de elementos químicos nocivos, conforme apresentado por Bertos et al. (2004).

Sabe-se que a carbonatação é responsável por retração após o uso, sendo necessário portanto a estabilização do material para que não ocorram tais retrações, desta forma a cura atua para estabilizar o material precocemente, além da importante ação de redução do pH da matriz, reduzindo possível degradação de material sem resistência ao meio alcalino.

Rostami, et. al (2011) afirma que o uso da cura por carbonatação foi estudada com sucesso para substituir parcialmente a cura a vapor, e obtendo uma melhor durabilidade. E comenta que a cura por carbonatação é financeiramente viável e mais ambientalmente correta do que a cura a vapor.

Pizzol (2013) ressalta que a cura por carbonatação acelerada é uma forma para reduzir prematuramente a alcalinidade da matriz cimentícia devido ao consumo de Ca(OH)_2 na pasta, resultando na densificação da matriz, portanto menor porosidade e menor absorção de água.

Utilizando a cura por carbonatação diretamente após a mistura, ocorrem reações químicas que geram $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (C-S-H) e carbonato de cálcio e nenhum hidróxido de cálcio (CH) (LERIGOLEUR, 2014). Young, et. al (1974 *apud* LERIGOLEUR, 2014) ressalta que esta reação faz com que dentro de alguns minutos à algumas horas, a resistência seja aumentada.

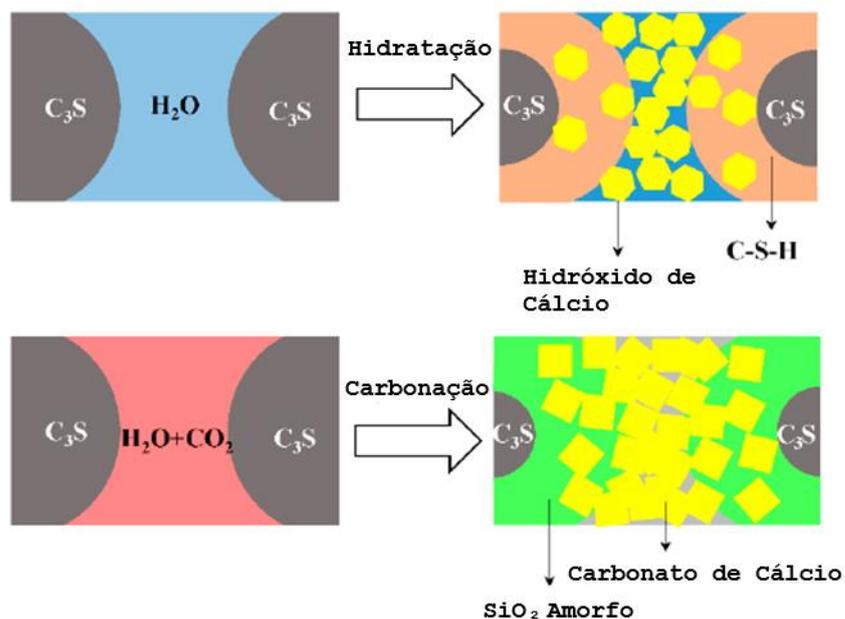
Porém o ganho de resistência pode ser prejudicado devido a existência de água livre na superfície dos grãos, a qual impede a absorção do dióxido de carbono. Este problema é diretamente relacionado quando a carbonatação é aplicada imediatamente após a mistura (LERIGOLEUR, 2014).

Almeida, et al. (2010) concluiu que os compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas que obtiveram carbonatação acelerada após dois dias de cura em câmara climatizada, apresentaram melhores resultados mecânicos e melhora na interface fibra-matriz, resultando na densificação da matriz.

Li, HE e SHAO (2018) comparam o método de cura por carbonatação ao processo de hidratação e concluem que o processo de reação de carbonatação é mais rápido, e o grau de reação maior. Portanto, a reação de carbonatação é um processo de hidratação acelerado.

A Figura 5 apresentada por (Li, HE e SHAO, 2018) é um diagrama esquemático onde apresenta a microestrutura da formação da pasta pelo processo de hidratação e pelo processo de carbonatação em idades iniciais. Observa que na reação com carbonatação o tamanho de partículas C_3S diminui, enquanto aumentam os produtos gerados pela carbonatação.

Figura 5 – Ilustração esquemática do mecanismo de formação da microestrutua de C_3S na pasta com cura por hidratação e cura por carbonatação.



Fonte: Li, He e Shao (2018)

Nota-se na Figura 5 que os cristais de carbonato de cálcio agem como um esqueleto, e o SiO_2 amorfo atua como uma matriz preenchendo os vazios, com isso obtém-se uma estrutura mais densa.

Pizzol (2013) explica que o compósito após a carbonatação acelerada obteve uma estrutura mais densa devido à precipitação do carbonato de cálcio, o qual reduziu a porosidade e melhorou a interface fibra-matriz.

3 METODOLOGIA

3.1 PLANO DE TRABALHO E VARIÁVEIS

O presente trabalho foi subdividido em três grandes etapas de investigação:

Efeito do consumo de cimento: A variação no consumo de cimento foi introduzida de modo a permitir a comparação da resposta mecânica dos compósitos de menor teor de cimento com a resposta mecânica daqueles carbonatados e reforçados com

tecidos. Neste contexto, buscou-se a compensação da redução do teor de cimento através da carbonatação e do uso de reforço têxtil. O consumo de cimento foi variado entre 50% e 35% da massa total do fibrocimento. Para a redução do consumo de cimento foi realizada a substituição da quantidade de cimento por filler calcário, mantendo fixo em 5% o teor de fibras de celulose. Conseqüentemente, a relação água/cimento (a/c) teve que ser alterada para cada teor de modo a manter-se a consistência da pasta ($\pm 300\text{mm}$).

Uma cor foi atribuída para cada teor de cimento visando uma melhor organização na produção dos compósitos. As composições dos compósitos encontram-se listadas abaixo:

- **Série Vermelha:** 50% cimento + 45% calcário + 5% celulose, $a/c = 1,05$
- **Série Amarela:** 45% cimento + 50% calcário + 5% celulose, $a/c = 1,14$
- **Série Azul:** 40% cimento + 55% calcário + 5% celulose, $a/c = 1,29$
- **Série Verde:** 35% cimento + 60% calcário + 5% celulose, $a/c = 1,50$

Efeito da inclusão e do tipo de reforço têxtil: Três diferentes têxteis foram empregados como reforço no fibrocimento: tecido de fibra de vidro com e sem proteção contra os álcalis e tecido de fibra de juta. Depois de concluídos os processos de cura (com e sem carbonatação), a contribuição de cada material para a melhoria das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos foi avaliada. A nomenclatura utilizada para os tecidos foi a seguinte: AR para o tecido de fibra de vidro álcali resistente, V para o tecido de fibra de vidro comum sem proteção contra álcalis e J para o tecido de fibra de juta. A nomenclatura R (referência) foi empregada para os compósitos sem reforço.

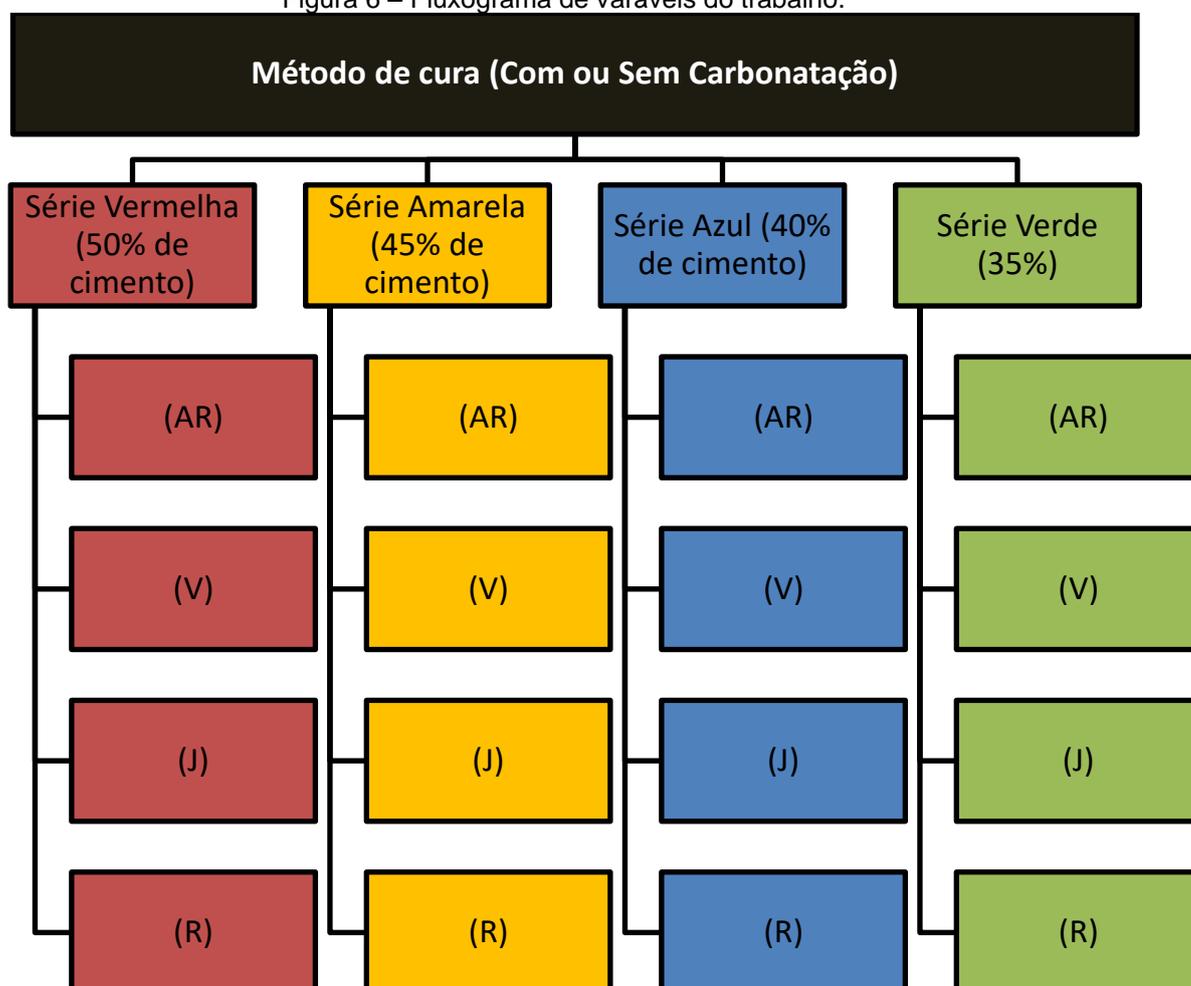
Efeito do método de cura: O método de cura por carbonatação acelerada foi introduzido no estudo a fim de beneficiar o comportamento mecânico dos compósitos, bem como, reduzir a alcalinidade dos mesmos em idades iniciais. A redução da alcalinidade, neste contexto, poderia contribuir para a durabilidade do reforço. A seguir estão as características dos processos de cura empregados no estudo:

- Cura com carbonatação com teor de 5% de CO₂, 65% de umidade e temperatura de 23°C;
- Cura sem carbonatação, mantida em ambiente fechado com temperatura controlada de 23°C e isolada de CO₂

É importante observar que as variáveis foram estudadas em conjunto. Para cada série (ou teor de cimento) foram utilizados todos os tipos de reforço têxtil e ambos os processos de cura.

O fluxograma apresentado na Figura 6, apresenta as variáveis estudadas no trabalho.

Figura 6 – Fluxograma de variáveis do trabalho.



Fonte: Autor

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Caracterização do calcário

3.2.1.1 Massa específica

A massa específica dos materiais seguiu a norma brasileira NBR NM 23/2001 (Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica), por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier.

O ensaio consiste em inserir querosene no frasco volumétrico de Le Chatelier até o nível entre as marcas 0 e 1 cm³, logo após colocar o frasco em banho maria na posição vertical e mantido submerso para estabilização da temperatura por aproximadamente 30 minutos. Após o banho maria registra-se a primeira leitura, denominada de V1 com aproximação de 0,1 cm³.

O material a ser caracterizado é pesado, e adicionado aos poucos no frasco, este é tampado e girado de forma suave para a posição horizontal até não haver mais bolhas de ar na superfície do líquido e então é dada a segunda leitura, denominada de V2 com aproximação de 0,1 cm³.

A massa específica é dada pela Equação 9 (Massa específica) a seguir:

$$\gamma = m/V \qquad \text{Equação 7}$$

Onde:

γ = massa específica do material ensaiado, dada em g/cm³;

m = massa do material ensaiado em gramas;

V = volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V2 - V1$) dado em cm³.

Resultado apresentado a seguir:

Tabela 1: Massa específica do calcário.

Material Calcário 325	Massa específica (g/cm³) 2,6755
---------------------------------	---

3.2.1.2 Finura

Este ensaio seguiu a norma brasileira NBR 11579/2012 (Cimento Portland – Determinação de finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200)).

A finura é calculada segundo Equação 8 (Finura) abaixo:

$$F = \left[\frac{R \cdot C}{M} \right] \cdot 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

F = índice de finura, em porcentagem (%);

R = resíduo retido na peneira N°200, dado em gramas;

M = massa inicial, dada em gramas;

C = fator de correção da peneira.

Para este ensaio foi coletado uma pequena amostra de aproximadamente 50g do material a ser ensaiado e colocado na peneira. Este material foi submetido a movimentos horizontais por cerca de 5 minutos. Após este processo, foram retirados o material que ficou retido no fundo da peneira e o material que ficou na superfície inferior da tela.

Posteriormente teve início novamente ao peneiramento, desta vez os movimentos duraram cerca de 20 minutos. Repetindo o processo de retirada do material retido na peneira e na tela, e em seguida iniciou-se um novo peneiramento com duração de 1 minuto, porém com movimentos mais rápidos e com a peneira parcialmente inclinada.

Ao final de todo o processo de peneiramento, o material retido foi pesado em uma balança com precisão de 1 casa decimal.

Resultado apresentado a seguir:

Tabela 2: Finura (%) do calcário.

Material	Finura (%)
Calcário 325	1,3201

3.2.2 Cimento CP-V

Para a fase ligante do compósito foi utilizado o cimento CP-V da marca Votoran, a qual especificação técnica segue a diante na Tabela 3, conforme informado pelo fabricante, exceto massa específica e finura que foi realizado ensaios conforme itens anteriores.

Tabela 3: Especificação técnica do cimento CP-V.

Cimento CP-V	
Al ₂ O ₃	4,35%
SiO ₂	18,91%
Fe ₂ O ₃	2,69%
CaO	60,59%
MgO	4,74%
SO ₃	2,86%
Massa específica	3,0879 g/cm ³
Finura (%)	0,2944

3.2.3 Tecidos de fibra de vidro

Abaixo encontra-se a tabela com as especificações dos tecidos de fibra de vidro AR e vidro comum empregados nesse trabalho, dados fornecidos pela empresa Fibertex.

Tabela 4: Especificação técnica do tecidos de fibra de vidro AR e vidro V.

Fibra 200 CRU – Tecido sem proteção álcali (V)	
Tipo de tecelagem	Tela
Tratamento	Cru
Urdume (fios/cm)	1,90 (+/- 0,2)
Trama (fios/cm)	1,80 (+/- 0,2)
Peso (g/m ²)	153 (+/- 5%)
Espessura (mm)	0,30
SiO ₂ (%)	55
Al ₂ O ₃ (%)	14
CaO (%)	23
Outros (%)	8
Fibra 200 BR Anti-álcalis – Tecido com proteção álcali (AR)	
Tipo de tecelagem	Giro Inglês
Tratamento	BR Branco
Urdume (fios/cm)	1,90 (+/- 0,2)
Trama (fios/cm)	1,80 (+/- 0,2)
Peso (g/m ²)	170 (+/- 5%)
Espessura (mm)	0,50
SiO ₂ (%)	55
Al ₂ O ₃ (%)	14
CaO (%)	23
Outros (%)	8

Para o tecido de fibra de juta foi feita a caracterização em laboratório, onde se verificou a densidade, determinada pelo método de porosidade de Arquimedes, onde a amostra ficou submersa em água satura pelo período de 48h e depois ficou em estufa a 70°C pelo período de 48h, assim mediu-se a massa submersa, massa saturada e massa seca para o cálculo da densidade, e o espaçamento entre os cordões foi feito a partir de medição com paquímetro.

Densidade: 1,62 g/cm³

Espaçamento entre cordões: 0,57 ± 0,02cm

3.3 PREPARO DA MATRIZ E MOLDAGEM DOS COMPÓSITOS

3.3.1 Mistura dos materiais

Nas formulações dos compósitos foram empregados o cimento CP-V da marca Votoran, calcário e celulose não branqueada.

Tentativas de manter constante a relação a/c foram realizadas, no entanto, as características reológicas das matrizes variaram muito, impossibilitando a mistura em alguns casos. Sendo assim, a série com menor consumo de cimento (35%) e maior teor de filler foi a que demandou a maior relação água/cimento ($a/c = 1,50$) conforme apresentado Tabela 5.

Tabela 5: Relação A/C em função do consumo de cimento.

SÉRIES	A/C
Vermelha (50%)	1,05
Amarela (45%)	1,14
Azul (40%)	1,29
Verde (35%)	1,50

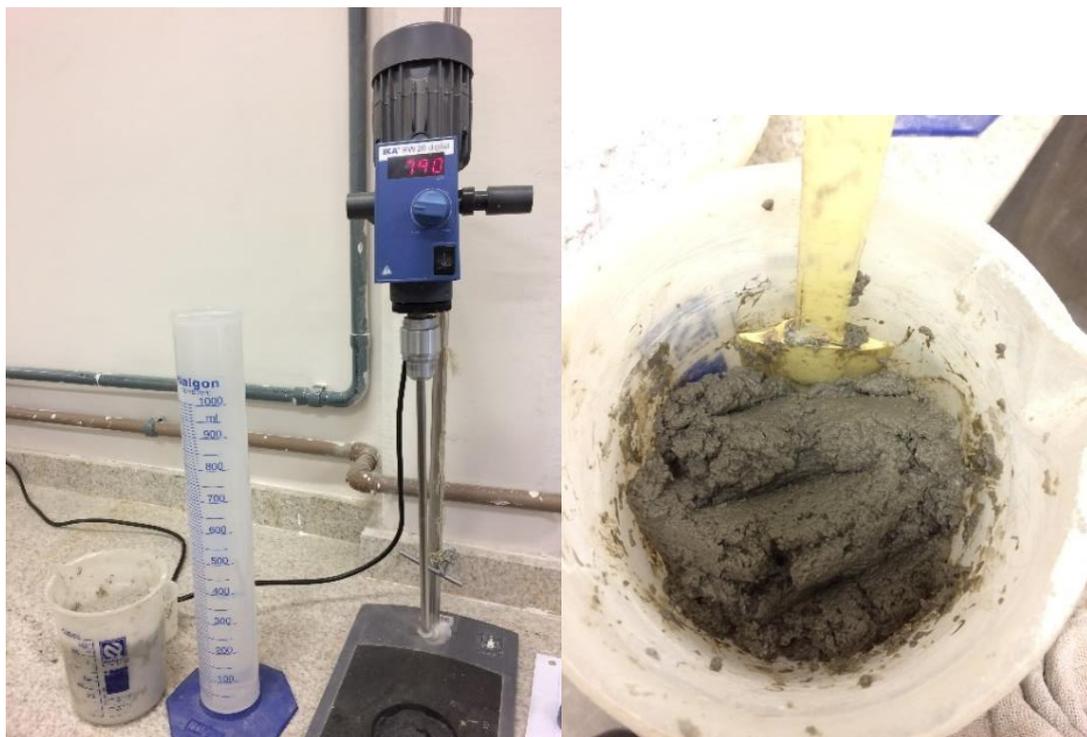
A mistura dos materiais seguiu em três etapas, as quais encontram-se listadas abaixo.

a) Dispersão da celulose:

A celulose, já adquirida triturada, foi dispersa em meio aquoso com o auxílio de um agitador suspenso da marca IKA, modelo RW 20 digital com velocidade de rotação 790 rpm. Este equipamento é equipado de um agitador hélice com 4 pás, cuja função está em recircular as misturas de fibras e água até a completa dispersão (Figura 7).

Foi utilizado 40% do total da água da mistura para realizar a dispersão da celulose e a mistura permaneceu no equipamento por 3 minutos.

Figura 7 – Dispersão da celulose.



Fonte: Autor

b) Mistura de cimento + filler calcário

Primeiramente o cimento e o calcário foram pesados separadamente e colocados em sacos com as identificações das cores dos traços estipulados, e nestas embalagens realizou-se uma mistura manual entre os dois materiais constituintes (Figura 8).

Figura 8 – mistura manual dos materiais em pó.



Fonte: Autor

c) Mistura da pasta + celulose dispersa em água:

Após a pré-homogeneização manual, os pós secos foram adicionados ao restante da água (60%) e estes se mantiveram em mistura durante 3 minutos, até completa homogeneização. Para finalizar as etapas de mistura, adicionou-se a celulose, dispersa, na mistura da pasta. A duração desta mistura se deu em 3 minutos.

3.3.2 Produção dos compósitos

Para execução da moldagem das amostras foi necessário a elaboração da fôrma de moldagem. O objetivo do aparato construído foi manter a malha têxtil fixa e esticada, e com a possível utilização do reforço têxtil nas duas superfícies do corpo de prova, sendo um bem colocado na extremidade inferior (devido esse ser esticado na base da fôrma) e o outro ficou a 2 mm da extremidade superior, devido a necessidade de rasamento do corpo de prova.

Portanto a fôrma elaborada para este trabalho foi executada com maderite impermeável de espessura 10mm. E utilizadas porcas tipo borboleta para fixar os tecidos e o maderite lateral da fôrma. Para que não ocorressem intervenções da fôrma sobre a amostra, a fôrma foi revestida com um papel adesivo plástico e fita crepe em sua borda lateral, conforme mostrado na Figura 9.

Cada fôrma foi identificada com um adesivo colorido de acordo com as cores estipuladas no traço, de modo que utilizou as mesmas fôrmas para os dois tipos de cura estudado e assim não houve alteração de fôrma e/ou eventuais defeitos para os traços estudados.

Durante a moldagem inicial observou-se a necessidade de melhorias no rasamento do corpo de prova, a solução encontrada foi usar régua para efetuar o rasamento das superfícies de moldagem sem danificar a malha têxtil (Figura 10).

A inserção do reforço têxtil se deu em duas etapas. Primeiramente o reforço têxtil da base foi preso nas duas extremidades da fôrma e devidamente esticado. Logo após, o reforço têxtil do topo foi preso em uma das extremidades da fôrma e, após o enchimento da mesma, este foi esticado e fixado na outra extremidade da fôrma. A fôrma construída foi executada no tamanho de 35 cm x 22 cm, de modo que foi possível moldar, em uma mesma forma, dois corpos de prova de 16 cm x 16 cm com espessura de 1,2 cm, e posteriormente cortá-los, com o auxílio de uma serra de mesa, nas dimensões de 4 cm x 16 cm x 1,2 cm (largura, comprimento, espessura).

Figura 9 – Fôrmas de moldagem dos compósitos.

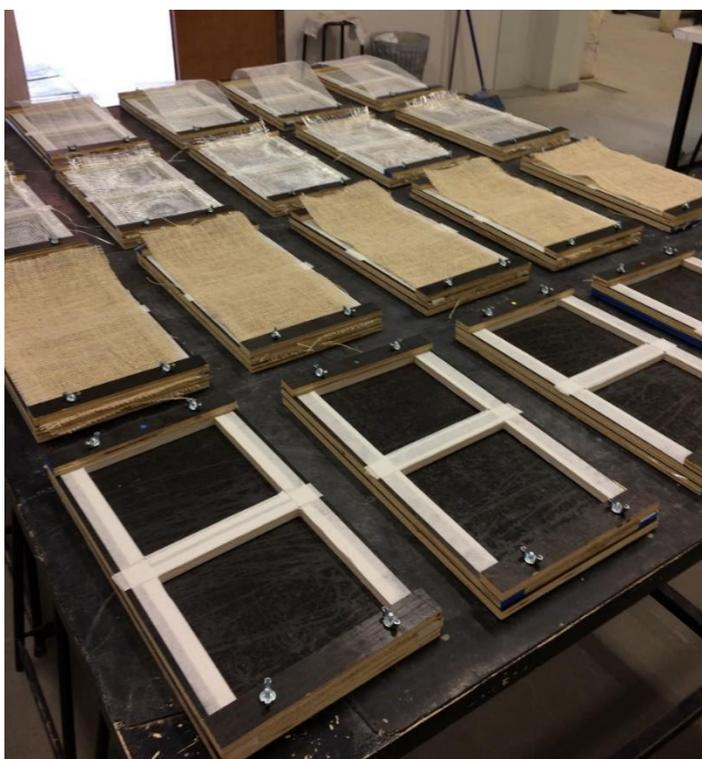
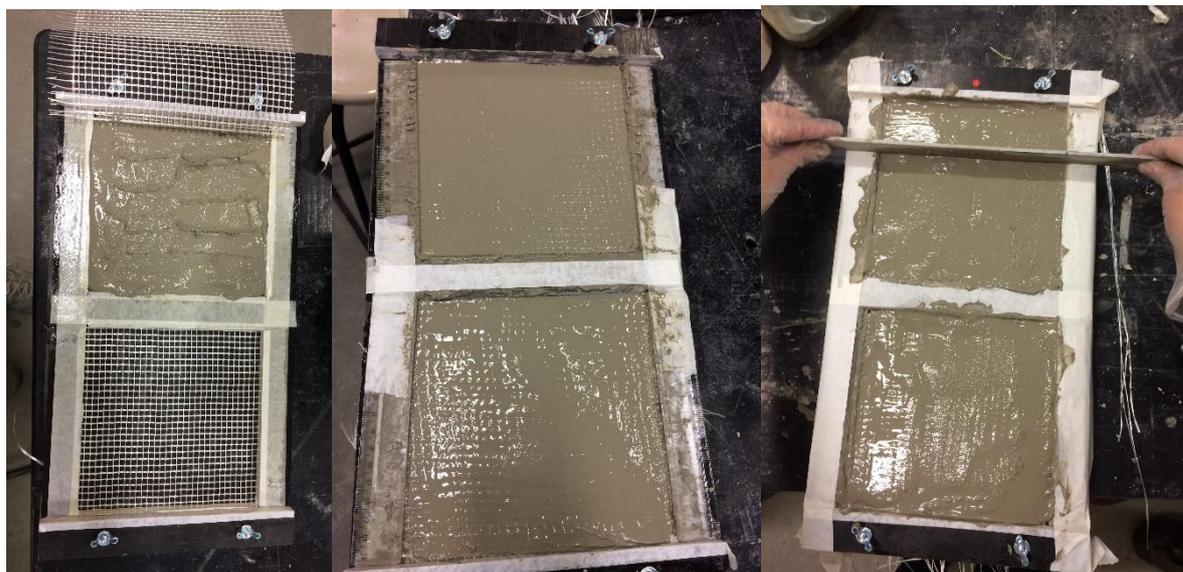


Figura 10 – Melhorias para rasamento do compósito na fôrma.



Fonte: Autor

3.4 PROCESSOS DE CURA

A carbonatação acelerada foi realizada em câmara de carbonatação, pelo período de 15 dias. Com os seguintes padrões: Concentração de CO₂ igual a 5%, temperatura de 23°C e umidade ambiente de 65%.

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram submetidos a câmara úmida por 24 horas, até a hora de sua desmoldagem. Após a desmoldagem as amostras foram embaladas para serem levadas à câmara de carbonatação.

Para o transporte das amostras, foi necessário embalá-las individualmente de forma hermética e colocá-las em caixa plástica, para que não ocorressem interferências com o meio ambiente. As mesmas só foram desembaladas quando foram inseridas na câmara de carbonatação e no seu retorno, foram desembaladas ao chegar no laboratório da Universidade São Judas Tadeu para corte dos corpos de prova, e início dos ensaios de porosidade e densidade (Figura 11).

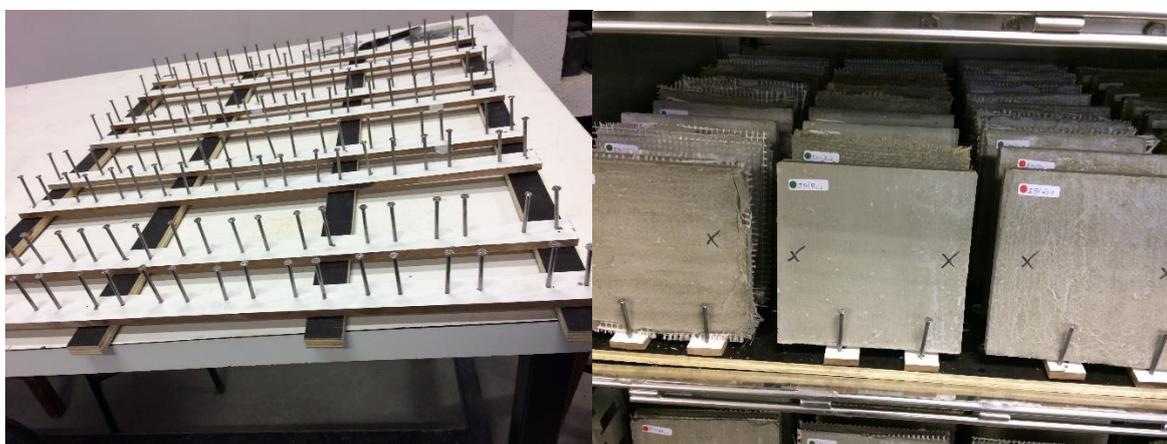
Figura 11 – Amostras embaladas prontas para o transporte.



Fonte: Autor

Para a distribuição das amostras na câmara de carbonatação, foi necessário um aparato para que as amostras fossem distribuídas de modo que o dióxido de carbono tivesse contato por todos os lados das amostras, conforme apresentado na Figura 12.

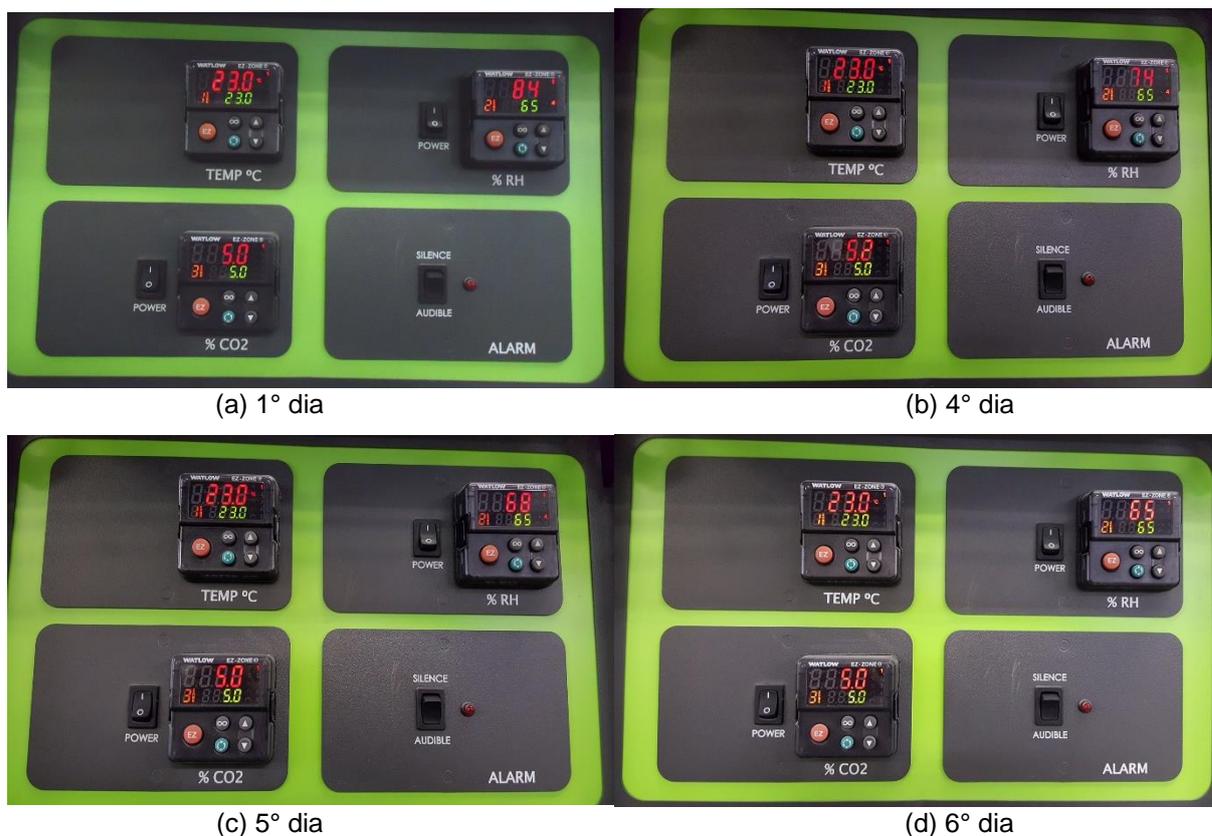
Figura 12 – Aparato para apoio das amostras dentro da câmara de carbonatação.



Fonte: Autor

Durante os primeiros dias na câmara, a umidade ambiente oscilou até se tornar estável ao sexto dia em função da grande umidade inicial das amostras. Conforme imagens abaixo (Figura 13), a averiguação da estabilidade da câmara ocorreu ao 1º dia e também nos dias 4º, 5º e 6º dia.

Figura 13 – Imagens da câmara de carbonatação até a estabilização do teor de umidade.



Fonte: Autor

Para a execução do processo de cura sem carbonatação foi adotado o período de cura de 15 dias em ambiente fechado hermeticamente sem a presença de CO_2 e em uma sala com temperatura constante.

Os corpos de provas permaneceram em câmara úmida por 24 horas até a sua desmoldagem, após a desmoldagem as amostras foram embaladas individualmente e hermeticamente em um saco plástico, conforme ilustrado na Figura 14, e permaneceram assim embaladas no laboratório com temperatura de 23°C até o fim do período de cura pré determinado, porém não foi averiguado a temperatura de cada corpo de prova e nem a umidade relativa, pois os mesmos estavam embalados.

Mesmo que estas amostras não obtiveram contato com o dióxido de carbono, foi feito o uso da solução de fenolftaleína para a comprovação do pH das amostras.

Figura 14 – Amostras embaladas hermeticamente para cura sem carbonatação.



Fonte: Autor

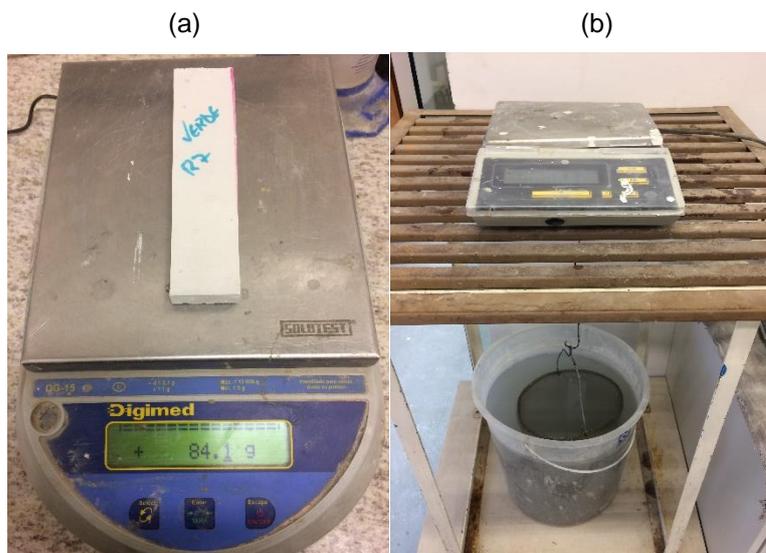
3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO DO COMPÓSITO

3.5.1 Porosidade e densidade por princípio de Arquimedes

A saturação das amostras para determinação da porosidade foi realizada após o corte do corpo de prova que ocorreu no décimo quinto dia após a moldagem, no dia da retirada da cura. Foram utilizados 8 corpos de prova para cada série e malha têxtil.

As amostras foram imersas em água saturada com cal pelo período de 72 horas. Dada a situação de saturação, foram determinadas as massas imersa e massa saturada. Para medição da massa imersa foi utilizada uma balança com precisão de uma casa decimal, com um gancho colocado na parte inferior o qual serviu de suporte para o porta amostra metálico que ficou totalmente submerso, conforme Figura 15.

Figura 15 – a) Aferição das massas secas e saturadas; b) Aferição da massa imersa.



Fonte: Autor

Para a medição da massa seca os corpos de prova foram submetidos a estufa por 48 horas em temperatura de 70°C, Figura 16-a demonstra o modo como foram dispostos na bandeja que se inseriu na estufa.

No término dessas medições os corpos de prova foram embalados de modo que não tivessem contato com o dióxido de carbono presente na atmosfera e outros componentes até a data da realização do ensaio de resistência à flexão, conforme segue Figura 16-b abaixo.

Figura 16 – a) Disposição das amostras na estufa; b) Amostras embaladas hermeticamente.



Fonte: Autor

$$\text{MOR} = \frac{P_{\text{máx}} \cdot L}{b \cdot e^2} \quad \text{Equação 10}$$

Equação para determinação do módulo de ruptura (MOR).

Onde:

$P_{\text{máx}}$ – Carga máxima de ensaio (N)

L – distância entre cutelos (mm)

b – largura do corpo-de-prova (mm)

e – espessura do corpo-de-prova (mm)

MOR – Módulo de ruptura (MPa)

$$\xi = \frac{A_p - \delta}{b \cdot e} \quad \text{Equação 11}$$

Equação para determinação da tenacidade ou energia específica (kJ/m²).

$A_p - \delta$: área total sob a curva carga versus flecha, em (N.mm);

b – largura do corpo-de-prova (mm)

e – espessura do corpo-de-prova (mm)

3.5.3 Profundidade de carbonatação

A verificação da ocorrência de carbonatação nas amostras, foi averiguada por titulação com solução de fenolftaleína 2%, a qual é usualmente utilizada para indicação do pH. Esta apresenta coloração violeta quando aplicada em contato com elementos básicos, ou seja pH maior que 8,5, e para os produtos de hidratação alcalinos (pH menor que 8,5, indicando ser ácidos) se mantém incolor.

A solução foi aplicada nas superfícies fraturadas das amostras após o ensaio de resistência à flexão, e assim foi possível medir a profundidade de carbonatação ao longo da espessura das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EFEITO DO CONSUMO DE CIMENTO

Na Figura 18 é apresentada uma relação inversa e não-linear entre o teor de cimento da amostra e a sua porosidade medida por princípio de Arquimedes. Observa-se através da figura que a redução do consumo de cimento na formulação da matriz acarreta aumento na porosidade. Isto se dá principalmente devido à relação da porosidade da pasta com o fator a/c empregado na matriz. Como ressaltado anteriormente, neste trabalho houve a necessidade de alterar relação a/c para os diferentes teores de cimento, de modo a manter constante a condição reológica da matriz.

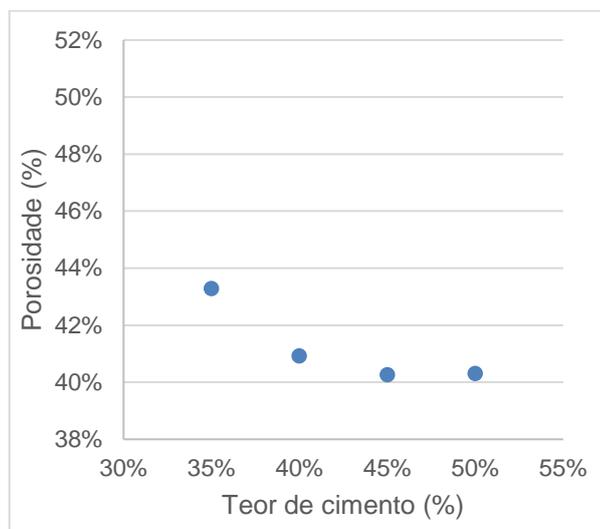
De acordo com a Tabela 6 é possível observar que as misturas contendo o menor consumo de cimento e o maior consumo de filler, representada pela série verde (35%), foram as que demandaram maior fator a/c (1,50) e conseqüentemente as que obtiveram maior índice de porosidade.

Tabela 6: Porosidade das amostras sem tecido em função do consumo de cimento.

SÉRIES	A/C	H (%)	POROSIDADE AMOSTRAS SEM TECIDO (%)
Vermelha (50%)	1,05	52,5	40%
Amarela (45%)	1,14	51,3	40%
Azul (40%)	1,29	51,6	41%
Verde (35%)	1,50	52,5	43%

Os aumentos de porosidade observados entre a amostra de maior teor de cimento (50%) e as demais com menor teor, 45, 40 e 35% foram de, respectivamente, 0%, 2,5% e 7,50%.

Figura 18 – Relação entre a porosidade e o consumo de cimento.



Fonte: Autor

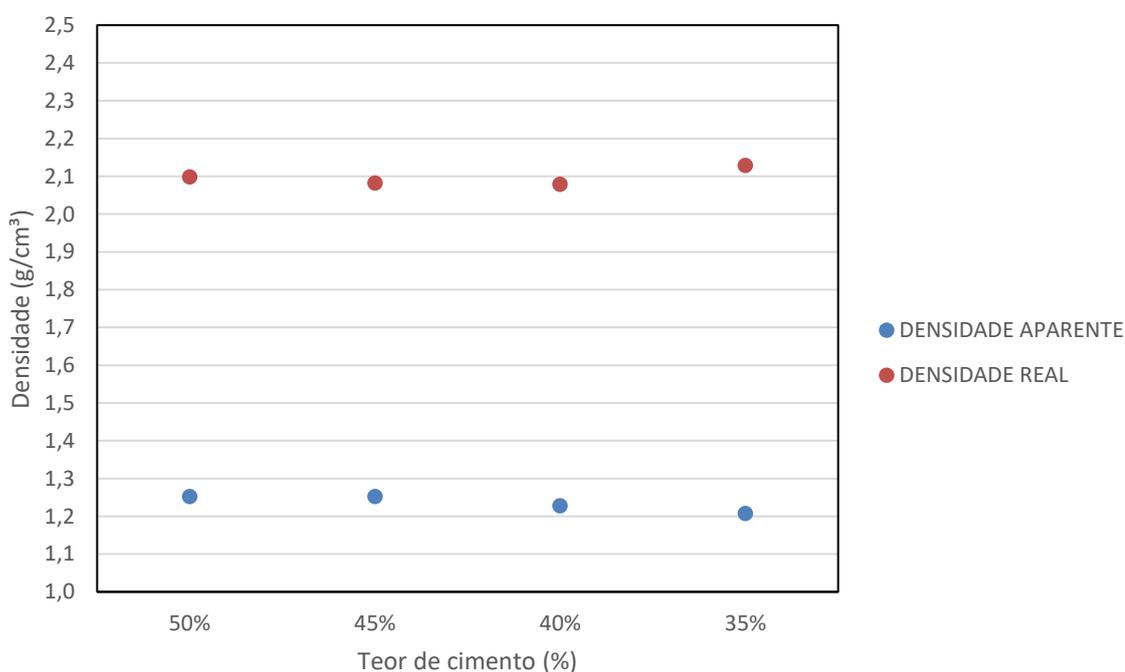
A Figura 19 relaciona o consumo de cimento com as densidades real e aparente das amostras endurecidas. Visto que a densidade aparente apresenta correlação com a porosidade devido esta considerar o volume total da amostra.

O comportamento observado na porosidade é o mesmo comportamento observado na densidade, onde esta reduz com o acréscimo no teor de cimento nas amostras. Na Tabela 7 é possível verificar que a densidade aparente aumenta com o acréscimo de cimento, porém este aumento é discreto, de 1,21 g/cm³ para 1,25 g/cm³, com o acréscimo de 35% para 50% no teor de cimento da formulação. Este comportamento é coerente com a redução da porosidade observada na Figura 18, e com a maior proporção de uma fase mais densa na amostra, que é o cimento, em comparação com o calcário, presente em maior quantidade na amostra com 35% de cimento, e também devido a maior proporção de água e vazios quando comparado as demais amostras.

Tabela 7: Densidade aparente e densidade real em função do consumo de cimento.

SÉRIES	DENSIDADE APARENTE AMOSTRA SEM TECIDO (g/cm ³)	DENSIDADE REAL AMOSTRA SEM TECIDO (g/cm ³)
Vermelha (50%)	1,25	2,10
Amarela (45%)	1,25	2,08
Azul (40%)	1,23	2,08
Verde (35%)	1,21	2,13

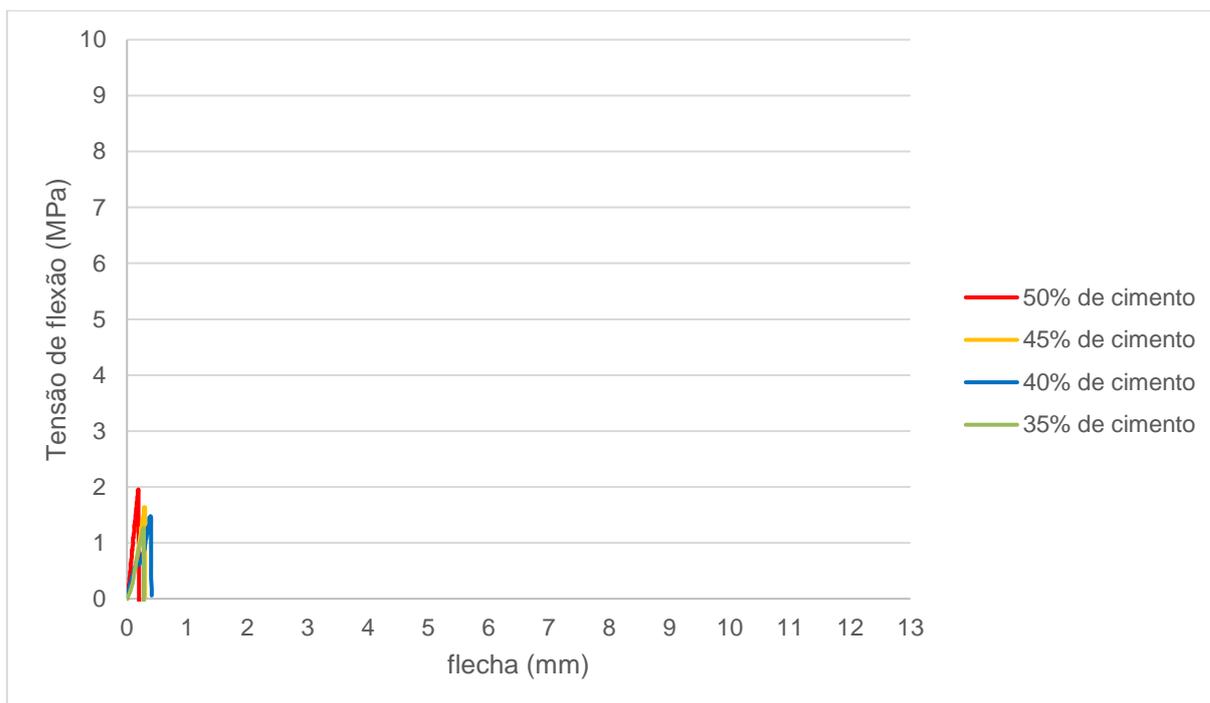
Figura 19 – Relação entre densidade e consumo de cimento.



Fonte: Autor

Em seguida são apresentados os efeitos da variação do teor de cimento no comportamento mecânico dos vários compósitos produzidos nesta pesquisa. Os gráficos apresentam curvas típicas de tensão *versus* deslocamento obtidas para cada tipo de reforço têxtil. Ou seja, de uma nuvem de resultados contendo 8 amostras, adotou-se como curva tipo, aquela que é representativa do conjunto de amostras (próxima da média).

Figura 20 - Resistência à tração na flexão dos compósitos sem reforço têxtil (amostra de referência), em função do teor de cimento.



Fonte: Autor

Ao analisar as amostras de referência, as quais não possuem tecido, o comportamento se dá de forma frágil (Figura 20).

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de LOP (Limite de Proporcionalidade, referente ao valor máximo de tensão do trecho elástico) para as amostras sem reforço têxtil, uma vez que neste compósito o LOP é igual o MOR (módulo de ruptura), pois houve ruptura total do compósito devido a ausência de reforço têxtil, a tabela apresenta também a tenacidade do compósito. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão da amostra.

Tabela 8: Valores médios de LOP e tenacidade para as amostras sem reforço têxtil

	AMOSTRAS SEM REFORÇO TÊXTIL	
	LOP (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	2,22 (0,36)	0,06 (0,02)
Série amarela (45%)	1,70 (0,48)	0,03 (0,02)
Série azul (40%)	1,92 (0,38)	0,04 (0,02)
Série verde (35%)	1,59 (0,34)	0,03 (0,01)

A medida que há a redução no teor de cimento há também a redução na tensão LOP, observa que há reduções da tensão média em 23% e 28% em comparação com a série referência (50%) para os teores de 45% e 35% de cimento, respectivamente, conforme Tabela 8.

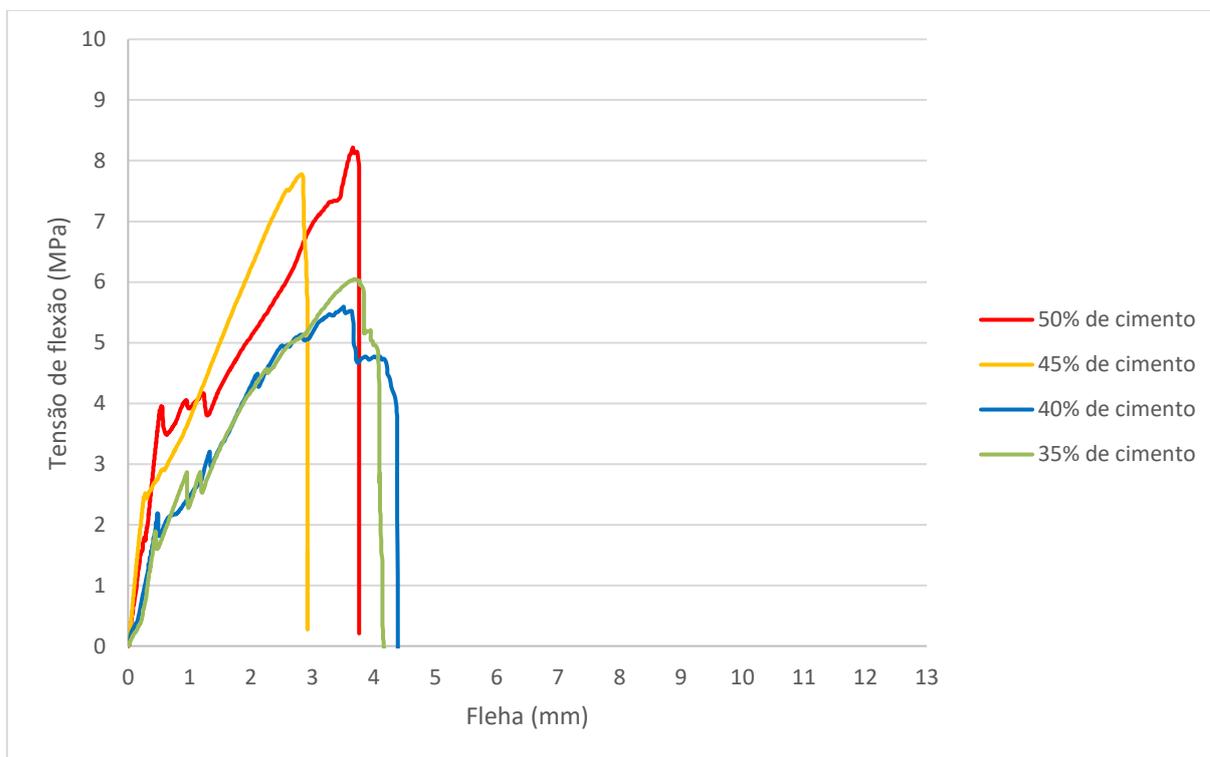
Observa-se que o valor de tensão, em termos de LOP, da série azul se destacou, uma vez que a tendência de redução de tensão ao reduzir o consumo de cimento não se comportou de forma linear, atingindo 1,92 MPa, sendo 13,5% inferior ao valor da amostra de referência.

Outro fator importante sobre a tendência de redução de tensão é o fato de que a série verde, por conter uma grande redução de cimento em sua matriz, apresentou valor de tensão muito abaixo quando comparado com os demais.

Segundo a análise estatística apresentada no Anexo A deste trabalho, não houve alterações significativas nas variações de tensões LOP em função do teor de cimento quando considerado o desvio padrão, desta forma pode-se dizer que para os teores de cimento estudada o compósito obteve valores de LOP aproximados que não pode gerar grandes divergências.

Já quando se compara a tenacidade, observa a redução significativa quando se reduz o consumo de cimento, a análise estatística demonstrou que a série com 50% de cimento é a que representou a variação mais significativa dentre os demais consumo de cimento, representando assim um compósito mais tenaz. Concluindo que a redução do consumo de cimento acarreta em um compósito mais frágil e que não suporta grandes deformações.

Figura 21 – Resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro AR, em função do teor de cimento.



Fonte: Autor

A Figura 21 apresenta os resultados de resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR. O objetivo deste gráfico é mostrar o efeito do teor de cimento no desempenho mecânico do compósito com reforço de vidro AR.

O primeiro trecho reto observado nas curvas é referente ao trecho elástico, onde a lei de Hooke é válida, ou seja, onde a deformação apresenta uma relação linear e direta com a tensão aplicada ao material. O valor máximo de tensão do trecho elástico (LOP), índice que reflete majoritariamente o comportamento mecânico da fase matriz cimentícia, especialmente quanto as fibras e tecidos de reforço apresentam valores de rigidez e resistência inferiores aos da matriz.

No trecho ascendente seguinte ocorre a etapa de múltipla fissuração dos compósitos. Neste trecho a matriz cimentícia pode apresentar fissuração em um ou mais pontos. Ambos os materiais, fibras e matriz, deformam consideravelmente com grande acréscimo na tenacidade dos compósitos. O comportamento observado no trecho pós-fissuração reflete majoritariamente o comportamento do reforço têxtil (ou reforço de fibras).

O valor máximo de tensão observado na curva é chamado de Módulo de Ruptura – MOR. Para o caso de valores de MOR superiores a LOP, diz-se que o comportamento do compósito é “*deflection hardening*”. Caso o LOP se mantenha como o maior valor de resistência, diz-se que o compósito apresenta comportamento “*deflection softening*”.

A Figura 21 mostra que o aumento do teor de cimento melhorou o desempenho do compósito reforçado com tecido de fibra de vidro AR. O tecido de fibra AR foi capaz de garantir à matriz de fibrocimento comportamento *deflection hardening*, com aumentos de tensão depois de formada a primeira fissura. As quedas de tensão observadas ao longo de todas as curvas demonstram o processo de múltipla fissuração das amostras, característica clássica de compósitos reforçados com têxteis.

A Tabela 9 é composta pelo valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR em função do consumo de cimento, os valores entre parênteses representam o desvio padrão.

Tabela 9: Valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR

	AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO FIBRA DE VIDRO AR		
	LOP	MOR	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	3,72 (0,67)	7,63 (0,76)	2,66 (1,28)
Série amarela (45%)	3,63 (1,02)	7,29 (0,80)	1,77 (0,51)
Série azul (40%)	2,78 (0,93)	6,53 (0,60)	3,44 (1,44)
Série verde (35%)	3,57 (1,03)	5,68 (0,79)	3,44 (1,52)

Ao analisar as médias dos valores de MOR das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR em função da variação do consumo de cimento, apresentadas na Tabela 9, é possível observar que com a redução do consumo de cimento para 45%, 40% e 35%, obteve-se uma redução de 4,5%, 14,4% e 25,6% no MOR, respectivamente, quando comparado com a amostra de referência (50% de consumo de cimento). Afirmando então, que a grande redução no consumo de cimento acarretou em uma perda de resistência MOR gerada pela redução da fase

ligante da matriz e por consequência o aumento de vazios na interface fibra-matriz, ocasionando o enfraquecimento da adesão tecido-matriz.

Levando em consideração as médias do LOP demonstradas na Tabela 9, é possível observar que também houve uma redução de tensão, porém não tão significativa, ao se reduzir o consumo de cimento do compósito, assim como ocorreu com o MOR. Considerando a amostra da série vermelha (50%) como a referência, as reduções observadas foram de 2,4% e 4% para os consumos de cimento de 45% e 35%, respectivamente. Uma vez que LOP está diretamente relacionado ao valor de tensão da matriz cimentícia do compósito, esta redução de tensão se deu em função do aumento da porosidade, gerado pela menor quantidade de ligante e também pelo excesso de água presente nas misturas onde houveram grandes substituições de cimento por calcário, porém estas substituições que não afetaram drasticamente o a resistência da matriz cimentícia do compósito.

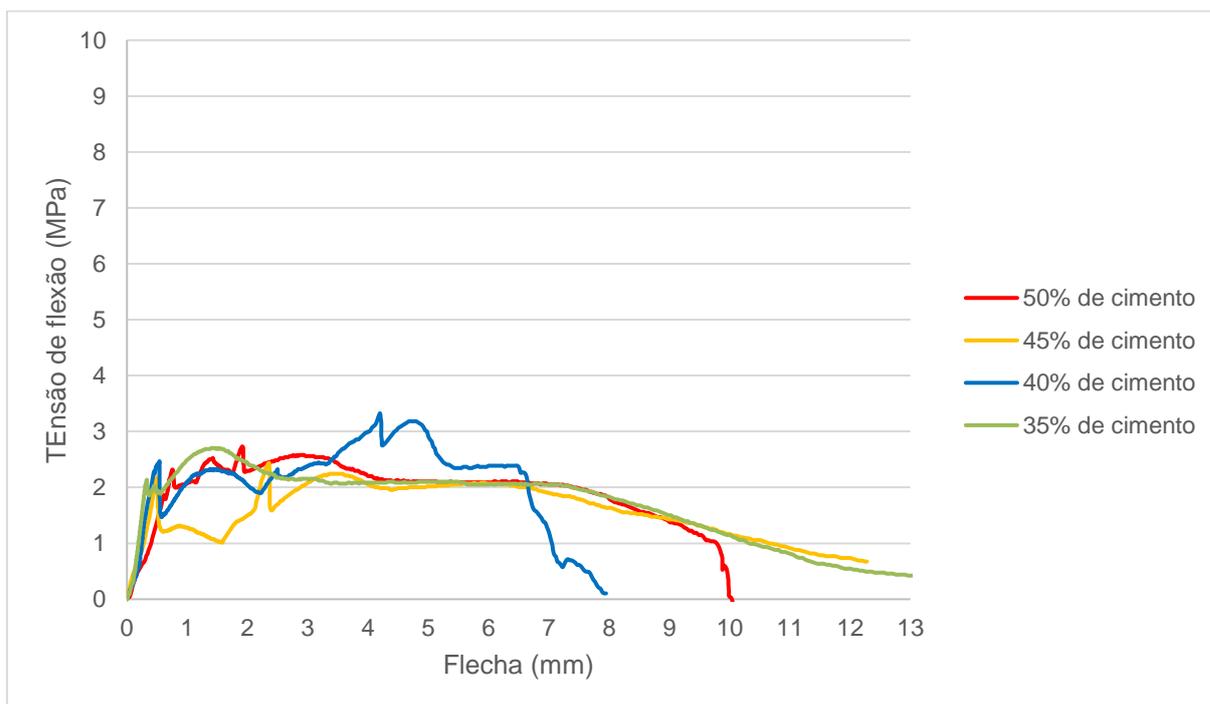
Segundo a análise estatística realizada para os valores de LOP, MOR e tenacidade (Anexo A) onde foi analisado a variação do consumo de cimento para o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro comum, houve divergência significativa apenas em relação ao MOR sobressaindo os valores da série com 50% de cimento, a qual obteve o valor de divergência, demonstrando que a redução do cimento, independente do teor utilizado, tem grande influência apenas na resistência MOR do compósito podendo ser acarretado pela maior quantidade de vazios presentes na amostra prejudicando a aderência do reforço têxtil.

Ainda segundo a análise estatística não houve divergências significativas para os valores de tenacidade, demonstrando que independente do teor de cimento o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro AR tende a deformar da mesma maneira, alterando apenas o valor de resistência final (MOR). Além de demonstrar que o teor de cimento não teve grandes impactos na resistência da matriz cimentícia, uma vez que não houve alterações significativas no LOP.

Os compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro convencional (V) (Figura 22) não alcançaram resistências tão altas quando comparados aos compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro AR (Figura 21). Esta divergência de tensões deve-se ao fato de que o tecido de fibra de vidro AR possui um revestimento (resina), o qual une os filamentos (principalmente os externos) fazendo com que

estes sejam solicitados mais “igualmente” durante os ensaios de flexão, gerando acréscimos de tensão. Além disso, há também a divergência na fração volumétrica de cada tecido, maior para o tecido AR, a qual resulta em elevada capacidade de carga para os compósitos reforçados com este tipo de tecido.

Figura 22 - Resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro, em função do teor de cimento.



Fonte: Autor

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro convencional (V), os valores entre parênteses representam o desvio padrão.

A tendência de que a redução do consumo de cimento acarreta pequenas reduções nos valores de tensões LOP, também são observadas para os compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro convencional (V), na Tabela 10 é possível averiguar que há uma redução de 3%, 6,5% e 8,6% de tensão LOP para os consumos de cimento de 45%, 40% e 35%, respectivamente, em comparação com a amostra de referência (50%).

Tabela 10: Valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro V.

	AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO FIBRA DE VIDRO V		
	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	2,32 (0,21)	2,83 (0,30)	4,53 (1,07)
Série amarela (45%)	2,25 (0,24)	2,54 (0,27)	4,25 (1,23)
Série azul (40%)	2,17 (0,39)	3,09 (0,28)	3,54 (0,51)
Série verde (35%)	2,12 (0,38)	3,67 (0,29)	4,57 (0,69)

Os baixos níveis de MOR observados na Tabela 10 ao ser comparados com os valores de MOR para o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro AR e o maior deslocamento pós-fissuração observados nas amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro convencional (Figura 22), são indicativos de menor aderência entre as fases tecido-matriz. É importante perceber que nos compósitos reforçados com tecido AR, a ruptura das amostras se dá de forma brusca, através do rompimento do reforço fibroso. Nos compósitos reforçados com tecido de vidro convencional, a energia é dissipada através do atrito entre matriz e fibras em um processo de arrancamento (*pull-out* do tecido), provavelmente associado a ruptura telescópica dos cordões, onde os filamentos que estão ligados a matriz tendem a fraturar e os internos sofrem *pull-out* (BARTOS,1987 apud BENTUR; MINDESS, 2007).

Os maiores níveis de tenacidade encontrados para o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro comum em comparação com o tecido de fibra de vidro AR são indicativos relacionados ao *pull-out* do tecido. E segundo a análise estatística o consumo de cimento não influenciou de modo a melhorar a aderência do tecido e ocasionar uma ruptura bruta.

O aumento do teor de cimento não foi capaz de causar grandes alterações nos valores de MOR, visto pelo comportamento mecânico similar entre todas as amostras (Figura 22).

Levando em consideração os valores médios apresentados na Tabela 10, houve um aumento de tensão MOR em 8% e 23% em relação ao teor de referência (50%) para os teores de 40% e 35%, respectivamente. Este aumento de tensão pode ter sido

ocasionado pela redução do consumo de cimento, uma vez que o cimento é o responsável em gerar um ambiente alcalino, sua redução pode ter por consequência a redução na quantidade de produtos hidratados e assim pode ter gerado uma redução no ataque alcalino no tecido, e desta forma pode ter evitado grandes danos ao reforço têxtil.

Ao analisar a análise estatística, apresentada no Anexo A, elaborada para entender o efeito do consumo de cimento no comportamento mecânico do compósito reforçado com tecido de fibra de vidro comum, foi concluído que o consumo de cimento afetou apenas os valores de MOR. O que faz acreditar que a redução no consumo de cimento influenciou de forma benéfica para a durabilidade da fibra de vidro comum, uma vez que a série com 35% de cimento apresentou divergência significativa de aumento de tensão em comparação com as demais séries, podendo ser explicado pela não degradação da fibra.

A Tabela 11 representa os valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de juta, os valores entre parênteses representam o desvio padrão. Nesta tabela é possível observar que o MOR e o LOP obtidos pelo compósito reforçado com tecido de fibra de juta diminuíram conforme houve a redução no teor de cimento.

Tabela 11: Valores médios de LOP, MOR e tenacidade para as amostras reforçadas com tecido de fibra de juta.

	AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO FIBRA DE JUTA		
	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (Kj/m²)
Série vermelha (50%)	2,13 (0,25)	2,13 (0,25)	0,96 (0,3)
Série amarela (45%)	1,77 (0,52)	2,05 (0,28)	1,52 (0,42)
Série azul (40%)	1,88 (0,35)	2,22 (0,20)	1,52 (0,67)
Série verde (35%)	1,39 (0,30)	1,52 (0,19)	0,81 (0,45)

Como apresentado na Tabela 11, houve decréscimos de tensões LOP e MOR ao modo que se aumentou o consumo de cimento do compósito. Ao comparar os valores de tensão LOP nota-se uma tendência de redução de tensão LOP a medida que se reduz a o consumo de cimento, observando que há redução de tensão em 16%, 11% e 34% para as séries de 45%, 40% e 35%, respectivamente, ao fazer o

comparativo com a série vermelha (50%). Também é possível observar que o valor de LOP se mantém aproximado ao valor de MOR, representando que não houve uma boa união entre o reforço e a matriz.

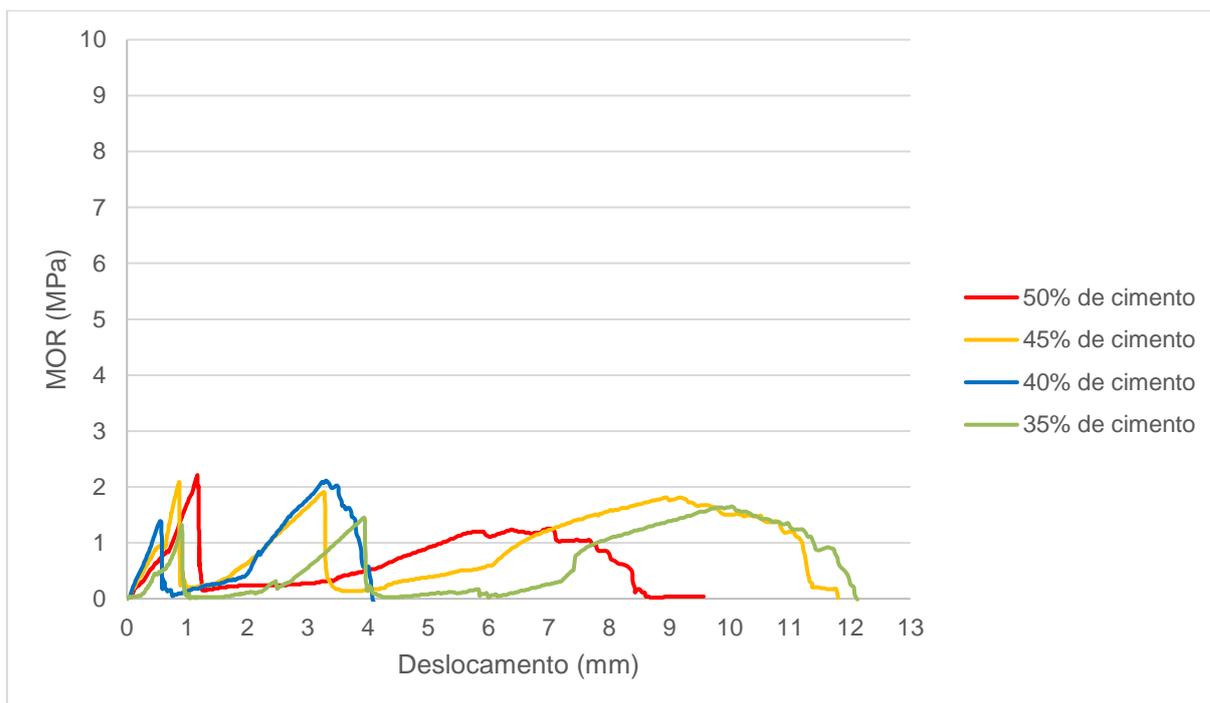
Os valores de MOR seguem a mesma tendência observada para o LOP, exceto a série azul (40%) que obteve um ganho de 4% de tensão MOR quando comparado com a série de referência (série vermelha). As demais séries obtiveram redução de tensão MOR em 3,8% e 28% para as séries de 45% e 35% de consumo de cimento, respectivamente, tendo como referência a série de 50%.

A Figura 23 compara o compósito reforçado com tecido de fibra de juta variando os teores de cimento empregados na matriz. Mais uma vez nota-se a maior resistência para a série vermelha (50% de cimento), e comportamento tensão-deslocamento bastante similar para todos os teores. Para o tecido de fibra de juta, vê-se que o teor com 35% de cimento obteve a menor resistência mecânica.

A curva de tensão *versus* deslocamento do compósito reforçado com tecido de fibra de juta representa a baixa adesão do tecido, mostrando que não houve múltipla fissuração generalizada, mas sim, ruptura abrupta com duas fissuras nos pontos de carregamento (Figura 26). Este comportamento é característica comum em compósitos reforçados com tecidos de fibras naturais, outro ponto importante para tal acontecimento deve-se ao fato de que para esta pesquisa não foi feito a saturação em água deste tecido, o que gera problemas de aderência entre tecido-matriz, uma vez que o tecido absorveu a água de mistura.

Assim como apresentado na Figura 23, em geral, as curvas apresentaram dois picos de tensões referente a formação de duas fissuras ocasionadas nos pontos de carregamento. Após esta ruptura o tecido passou de forma mais isolada, conferindo ao compósito uma resistência maior que a tensão de primeira fissura e assim igualando ao comportamento *deflection hardening*.

Figura 23 - Resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com tecido juta, em função do teor de cimento.



Fonte: Autor

Na série verde (35% de cimento) observa-se que o compósito atinge tensão máxima de 1,52 MPa e a tensão de primeira fissura ocorre em 1,39 MPa, conforme dados da Tabela 11 e exemplificado na Figura 23. Concluindo que houve uma queda abrupta de tensão ocasionada por fissuras da matriz cimentícia e após isso observa o tecido atuando de modo mais significativo até a ruptura do mesmo.

Ao analisar os valores MOR em função do consumo de cimento, a análise estatística apresentada no Anexo A, comprova que a série com 35% de consumo de cimento é a que representou maior divergência em comparação com as demais. Podendo ser considerado que as outras variações de consumo de cimento não influenciou de forma negativa para os valores MOR.

Portanto a conclui-se pela análise estatística que o consumo de cimento influencia apenas a resistência MOR do compósito, não acarretando em alterações significativas para a resistência LOP e tenacidade. Que mesmo para o tecido de juta que não apresentou valores altos para MOR, o consumo de cimento elevado apresenta de modo a melhorar a resistência mecânica.

A Tabela 12 apresenta os valores das porosidades das amostras com os variáveis tecidos estudados em função do consumo de cimento. Ao analisar esta tabela, nota-se que não há grandes variações na porcentagem da porosidade das amostras.

Tabela 12: Porosidade em função do consumo de cimento

	Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR	Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro V	Amostra reforçada com tecido de fibra Juta	Amostra sem reforço têxtil
Série Vermelha (50%)	39%	38%	42%	40%
Série Amarela (45%)	39%	41%	42%	40%
Série Azul (40%)	39%	41%	42%	41%
Série verde (35%)	42%	42%	44%	43%

A Figura 24 apresenta a tensão média última da parte elástica do compósito – LOP *versus* porosidade de cada compósito, valores resultante a partir da média dos dados coletados. Nota-se que para a amostra sem tecido a série vermelha (50% de cimento) foi a que obteve maior resistência mecânica. O que é comprovado pelo índice de porosidade e relação de a/c , conforme comentado no Figura 18 e apresentado na Tabela 6.

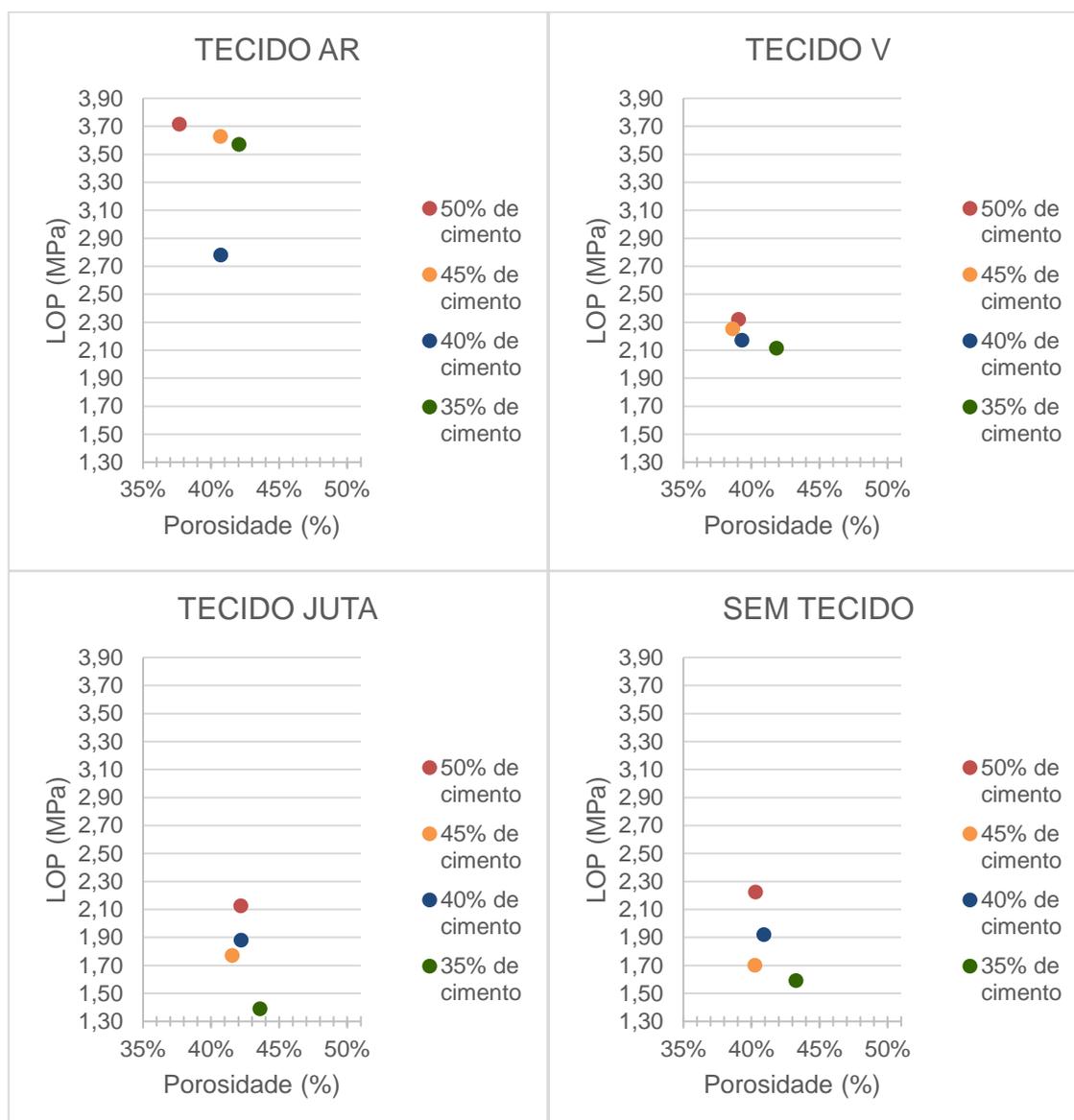
Independentemente do tecido utilizado no compósito, a taxa de porosidade se mantém conforme previsto, uma vez que a porosidade é uma propriedade da matriz. Contudo os tipos de fibras não tiveram grande influência no teor de porosidade do compósito.

Em todos os resultados apresentados na Figura 24 observa-se a correlação inversa entre porosidade e LOP, indicando que o aumento da porosidade causa redução da resistência máxima da matriz cimentícia. Teoricamente é sabido que esta relação é exponencial, descrita pela lei de Abrams nos concretos, no entanto, para os níveis de porosidade das amostras estudadas, os resultados indicam uma relação praticamente linear entre estas duas variáveis.

Na amostra com reforço de tecido de fibra de vidro AR a maior fração volumétrica, a resina utilizada como tratamento anti-álcali e o tipo de costura do tecido, influenciaram para que este compósito apresentasse aumento do trecho elástico na

flexão, refletindo em tensões superiores a referência (amostra sem tecido com 50% de cimento) mesmo para as séries com menores consumo de cimento.

Figura 24 – LOP em relação a porosidade do compósito.



Fonte: Autor

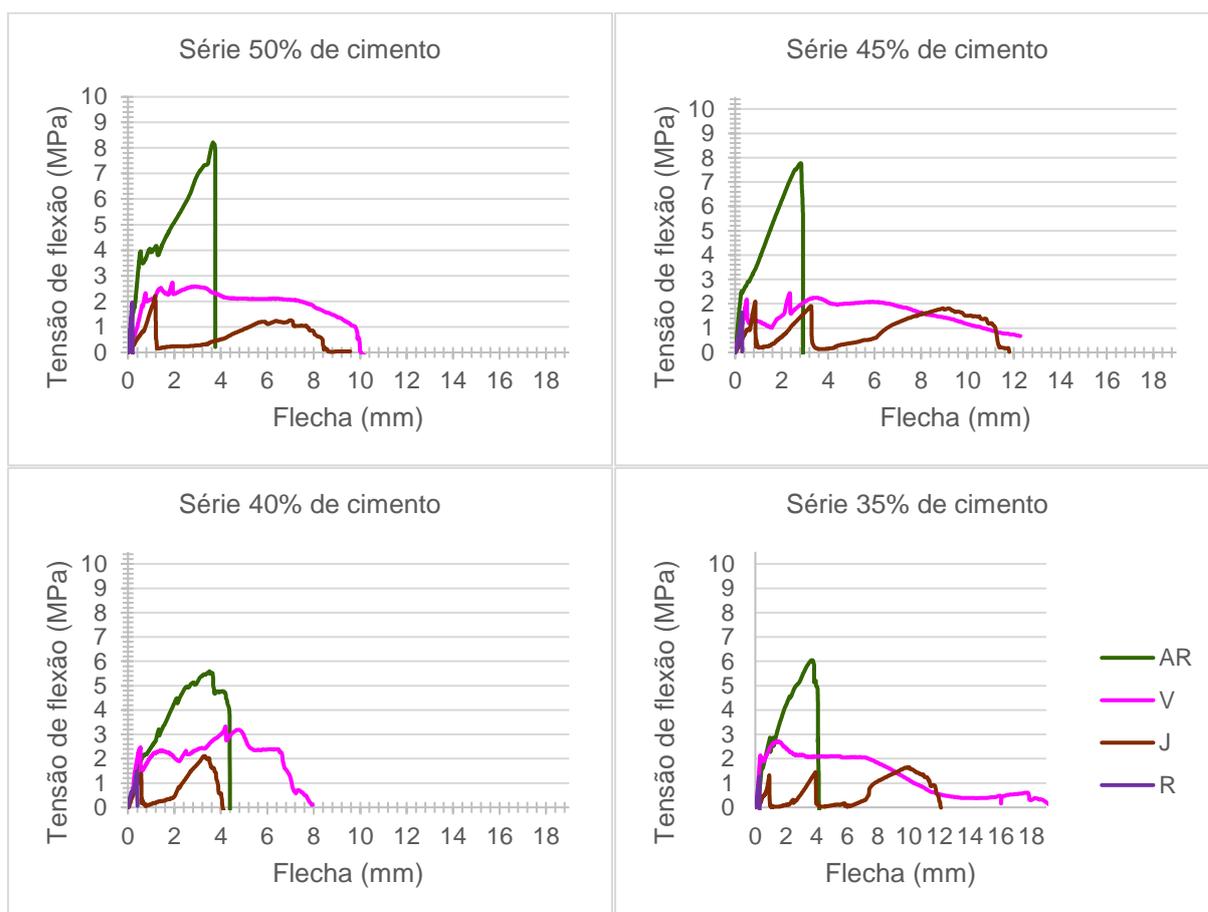
4.2 EFEITO DO TIPO DE MATERIAL DO TECIDO DO COMPÓSITO

No presente trabalho foram estudados 2 tipos de material que compõe o reforço têxtil, sendo um inorgânico (fibra de vidro), com alta resistência e rigidez; e outro natural (fibra de juta), com alta resistência, porém menor rigidez (entre 4,83 e 6,42GPa, varia conforme a direção que é colocado o tecido (FIDELIS, 2014). Entre

os tecidos de fibra de vidro, as divergências entre eles estão no fato de que um possui maior fração volumétrica de fibras, além de ter uma camada externa de revestimento (*coating*), cujo objetivo é tornar o material álcali-resistente, e desta forma aumentar a durabilidade deste no meio cimentício. Os tecidos de fibra de vidro e de juta apresentam o aspecto negativo da baixa durabilidade, especialmente devido à sua degradação em meio alcalino.

Observa-se que ao analisar os tecidos de acordo com o teor de cimento, pode-se notar a divergência do gráfico de tensão entre eles, como demonstrado na Figura 25. O módulo de ruptura (MOR) representa o trabalho em conjunto da fibra e da matriz, o qual relaciona a resistência da matriz com a tenacificação da interface fibra-matriz.

Figura 25 – Módulo de ruptura dos compósitos reforçados com têxteis conforme o consumo de cimento.



Fonte: Autor

Assim como observado na Figura 25 os compósitos reforçados por tecido de fibra de vidro AR, apresentam comportamento elástico até sua primeira fissura. Posteriormente, inicia-se a formação de múltiplas pequenas fissuras, processo este que é acompanhado de ganho de resistência mecânica (*deflection hardening*). E assim se prossegue com o aumento consecutivo da resistência até que a trinca começa a se abrir muito até e a ruptura da amostra, estas tensões após a primeira fissura é desempenhada pelo tecido utilizado.

Para o tecido de fibra de vidro convencional observou um compósito onde houve *pull-out* porém obteve menores tensões de ruptura quando comparado com o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro AR. A divergência entre as tensões de ruptura do tecido com proteção álcali e sem a proteção álcali, está relacionada com a fração volumétrica, tipo de costura do tecido, e também devido a presença do *coating* que reveste os cordões contribuindo para um melhor comportamento mecânico dos cordões que compõe o tecido.

A resina, que reveste os cordões do tecido de fibra de vidro AR, aumenta sua resistência mecânica devido a união dos fios, fazendo com que o cordão se comporte com um único filamento quando solicitado à tração (ativação mais uniforme dos monofilamentos) (RAMBO, 2015). Este fato faz com que a resistência mecânica do compósito com tecido AR seja superior ao do compósito com vidro comum. Outro fato importante é que o volume de fibras empregado nos compósitos reforçados com tecido de vidro AR foi maior. Embora o mesmo número de camadas de reforço tenha sido empregado em ambos os compósitos (com tecido AR e V), a massa de fibras por cm² de tecido AR é superior em aproximadamente 11% (ver Tabela 4). Por fim, há que se ressaltar a configuração geométrica distinta dos referidos tecidos, giro inglês para o tecido AR e tela para o tecido V. É provável que as ondulações do tecido AR, proporcionadas pelo método de tecelagem, tenham contribuído para uma melhor aderência à matriz em relação ao tecido V, com costura mais plana.

Para o traço de 35% de cimento a tensão LOP da amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR permaneceu próxima a tensão de ruptura do compósito de referência (50%) sem reforço têxtil (Tabela 9 e Tabela 8). Tal fato indica que este tipo de reforço têxtil é capaz de contribuir na fase elástica das curvas tensão *versus*

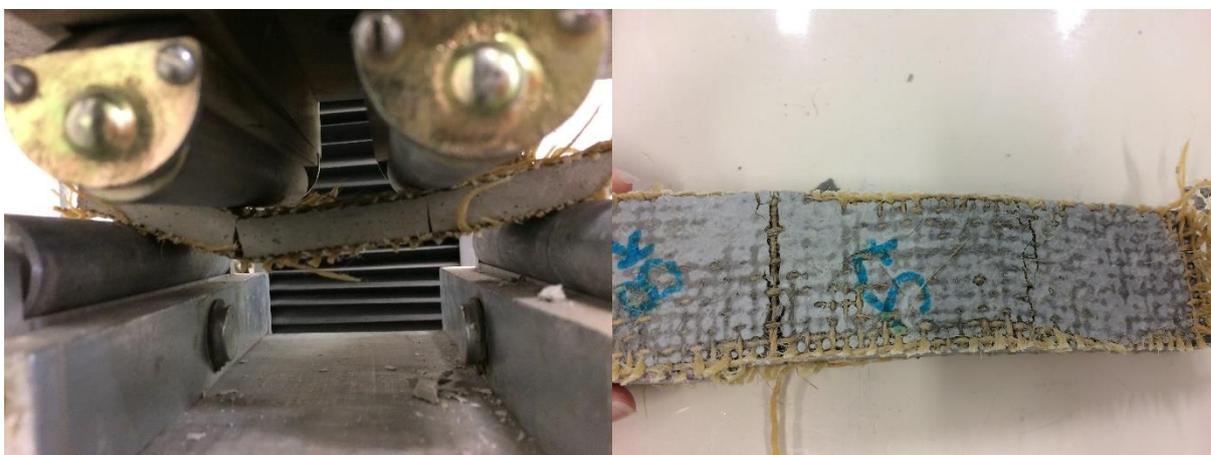
deslocamento, podendo talvez ser utilizado como agente compensador de resistência em caso de redução de consumo de cimento na matriz e também teria uma contribuição na pós fissuração.

O tecido de fibra de juta não obteve grande aderência com a matriz cimentícia, ocasionado pela falta do tratamento adequado para o uso da fibra de juta no compósito cimentício, visto não houve uma boa interação entre fibra-matriz (conforme apresentado os valores de MOR da Tabela 11). Portanto observa que sua curva tensão deformação é diferenciada quando comparada a outros tecidos, podendo ser considerada como *deflection softening*.

A Figura 26 abaixo demonstra as duas rupturas comprovadas na Figura 23 que a amostra reforçada com tecido de fibra de juta rompeu em dois pontos distintos. O modo de ruptura dos compósitos reforçados com tecido de fibra de juta foi ocasionado pela baixa aderência do tecido na matriz cimentícia, desta forma observa as duas fissuras localizadas e posteriormente um efeito conjunto de arrancamento (em inglês *pull-out*) e ruptura do tecido.

Optar por não utilizar técnicas de melhorias para o uso do tecido de fibra de juta, acarretou em uma baixa resistência mecânica para este tipo reforço. Sabendo que o tecido natural possui bastante variabilidade nos cordões, tanto em resistência como em quantidade de monofilamentos, os resultados são muito adversos para se tirar conclusões assertivas.

Figura 26 – Ruptura do compósito reforçado com tecido de fibra de juta.



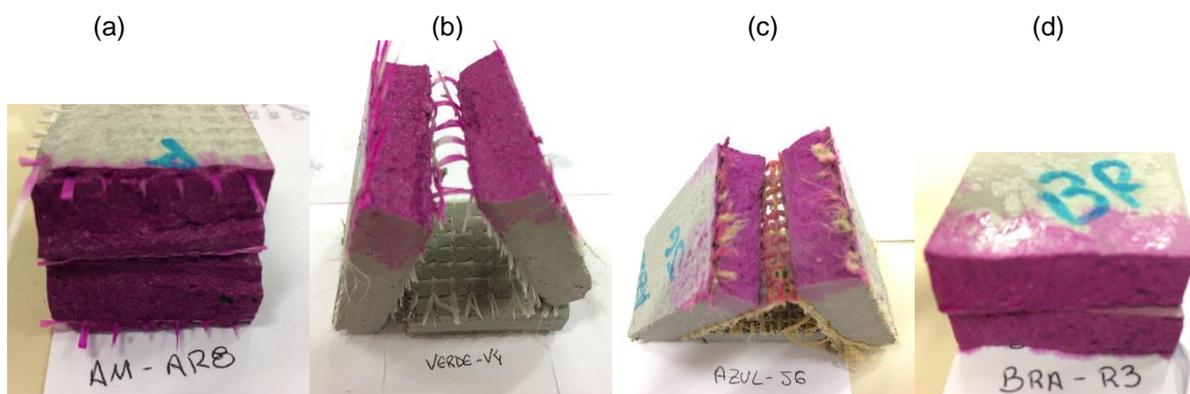
Fonte: Autor

4.3 EFEITO DA CURA POR CARBONATAÇÃO

A baixa durabilidade de tecidos de fibra de vidro, ou de tecidos de fibras naturais, é conhecida e discutida em vários estudos sobre compósitos com fibras ou tecidos naturais. Como alternativa para mitigar ou resolver este problema de desempenho, optou-se por aplicar um processo de cura por carbonatação nas amostras estudadas, para desta forma, reduzir o pH da água de poros da matriz cimentícia, e assim eliminar os efeitos de degradação que os álcalis causam nestes tipos de material de reforço. Outro efeito desejado deste tipo de cura é o sequestro de CO₂ que ocorre devido à reação química de carbonatação, e consequente redução da pegada de carbono dos compósitos.

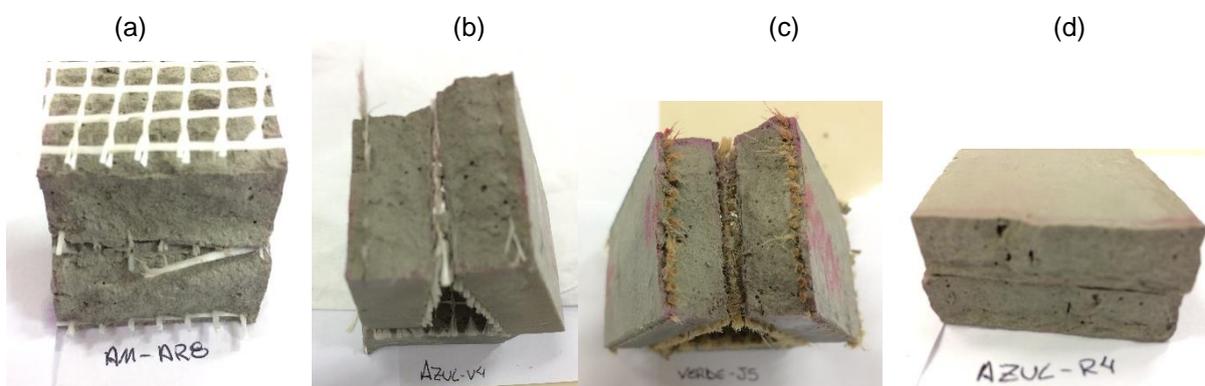
As amostras que foram submetidas à cura por carbonatação foram totalmente carbonatadas, ou melhor, o pH de todas as amostras foi reduzido a valor inferior a 10, já as amostras que foram mantidas sob cura ambiente sem contato com o CO₂ não possuíram profundidade de carbonatação, assim como exemplificado na Figura 27 e Figura 28 demonstradas abaixo:

Figura 27 – Profundidade de carbonatação para os compósitos com cura ambiente; a) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR; b) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro V; c) Amostra reforçada com tecido de fibra de juta; d) Amostra sem reforço têxtil.



Fonte: Autor

Figura 28 – Profundidade de carbonatação para os compósitos com cura por carbonatação; a) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR; b) Amostra reforçada com tecido de fibra de vidro V; c) Amostra reforçada com tecido de fibra de juta; d) Amostra sem reforço têxtil.



Fonte: Autor

Os dados foram tomados como amostras totalmente carbonatadas e amostras não carbonatadas, uma vez que as amostras apresentaram em sua totalidade a carbonatação ou a não carbonatação, influenciado pelo processo de cura.

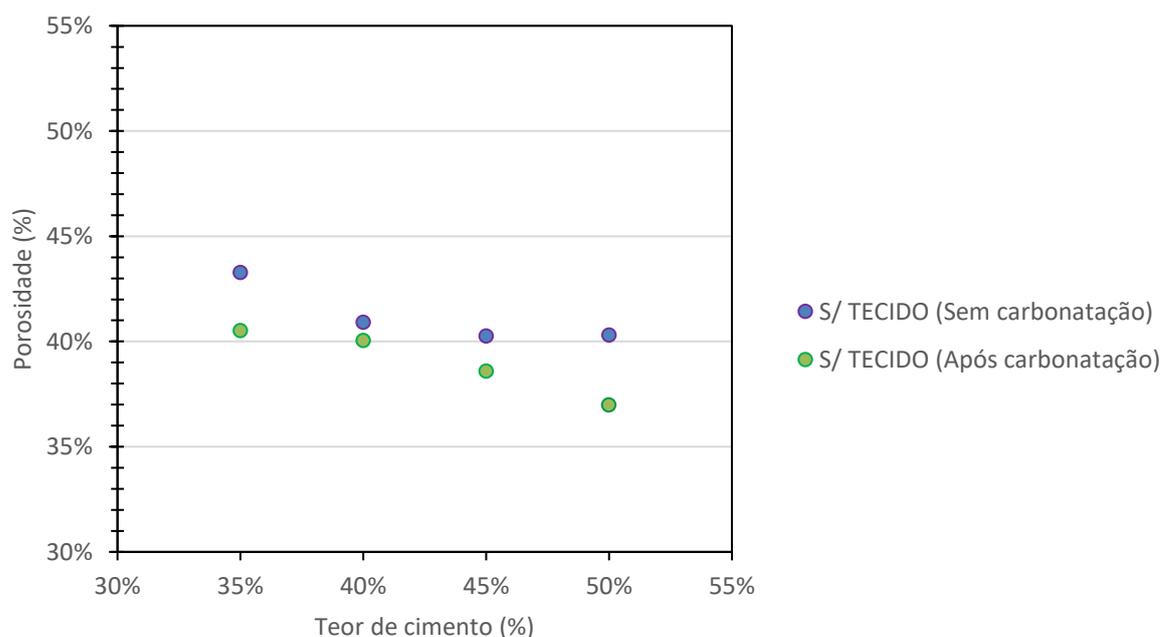
O primeiro fator de grande importância para verificação da carbonatação é a porosidade das amostras, uma vez que a carbonatação produz produtos que preenchem os poros e esses atuam de forma a reduzir a porosidade, exatamente como está demonstrado na Figura 29, onde independente do teor de cimento, as amostras carbonatadas apresentaram redução de porosidade.

Na Tabela 13 são apresentados os valores referentes a porosidade das amostras carbonatadas e não carbonatadas em função do consumo de cimento. Como observado a porosidade das amostras carbonatadas sem reforço têxtil foram reduzidas em 7,5%, 2,5%, 2,44% e 4,65%, respectivamente para os traços de 50%, 45%, 40% e 35% de cimento. Houve esta variação quanto à redução da porosidade, devido principalmente à presença do hidróxido de cálcio na matriz cimentícia, decorrente do processo de hidratação do cimento. Com menor quantidade de hidróxido de cálcio presente, a quantidade de dióxido de carbono incorporado pela carbonatação é menor, reduzindo também os efeitos desta carbonatação nas propriedades físicas e mecânicas das amostras.

Tabela 13: Porosidade das amostras sem reforço carbonatadas em função do consumo de cimento

SÉRIES	A/C	POROSIDADE – AMOSTRAS SEM REFORÇO TÊXTIL NÃO CARBONATADAS (%)	POROSIDADE – AMOSTRAS SEM REFORÇO TÊXTIL CARBONATADAS (%)
Vermelha (50%)	1,05	40%	37%
Amarela (45%)	1,14	40%	39%
Azul (40%)	1,29	41%	40%
Verde (35%)	1,50	43%	41%

Figura 29 – Relação entre a porosidade e consumo de cimento divergindo o tipo de cura

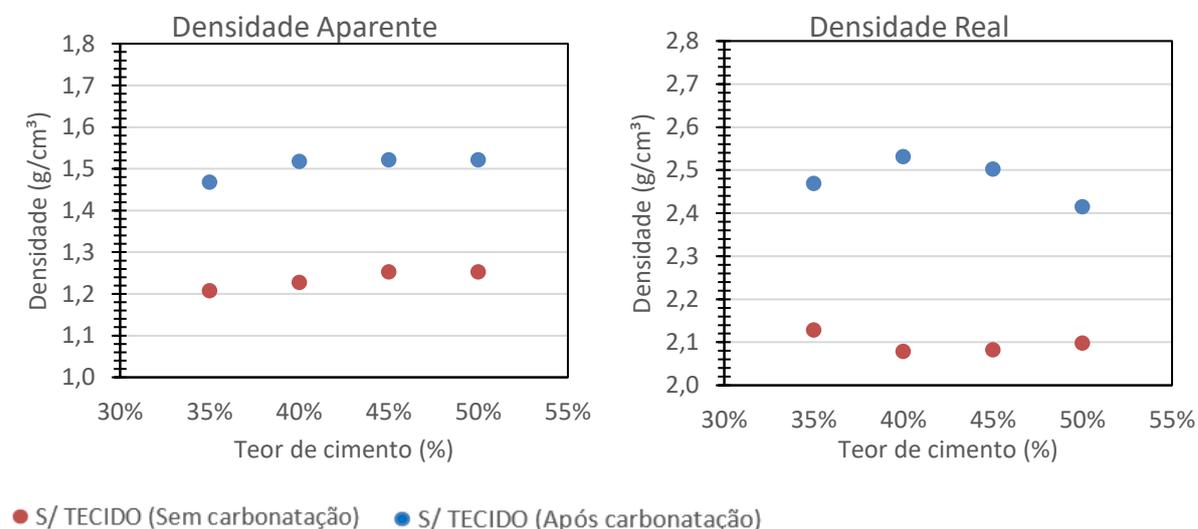


Fonte: Autor

Outro fator importante para analisar na carbonatação, é referente à densidade do compósito. A carbonatação densifica a matriz cimentícia com a formação dos produtos da reação. A Figura 30 apresenta os dados obtidos para a densidade aparente e real, comprovando que após a carbonatação as amostras se tornaram mais densas, independente do consumo de cimento. O efeito da carbonatação foi

maior que o efeito da variação no teor de cimento, na densificação do compósito cimentício.

Figura 30 – Correlação entre o teor de cimento em massa e as densidades aparente e real, para cura ambiente e cura por carbonatação.



Fonte: Autor

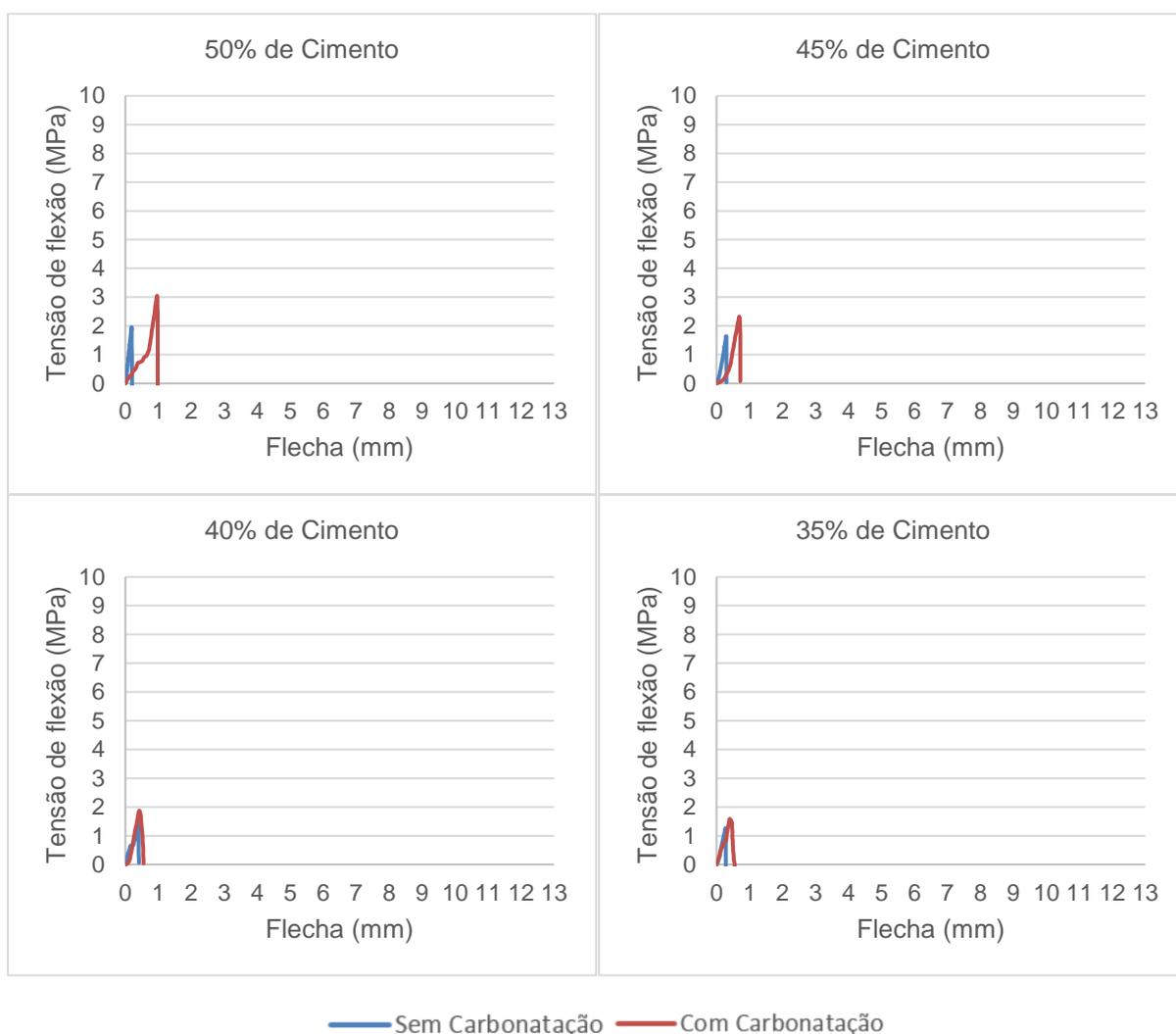
A Tabela 14 representa os valores de tensão média LOP e tenacidade das amostras sem reforço têxtil fazendo comparativo entre as amostras que foram carbonatadas e as que não foram, os valores entre parênteses representam o desvio padrão. Ao analisar esta tabela, verifica-se que os resultados obtidos para as amostras carbonatadas ficaram muito próximos dos resultados das amostras que não passaram pelo processo de carbonatação.

Tabela 14: Média do LOP e tenacidade das amostras sem reforço têxtil carbonatadas em função do consumo de cimento.

	AMOSTRAS SEM REFORÇO TÊXTEL NÃO CARBONATADAS		AMOSTRAS SEM REFORÇO TÊXTEL CARBONATADAS	
	LOP (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)	LOP (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	2,22 (0,36)	0,06 (0,02)	2,23 (0,45)	0,04 (0,02)
Série amarela (45%)	1,70 (0,48)	0,03 (0,02)	2,00 (0,39)	0,04 (0,02)
Série azul (40%)	1,92 (0,38)	0,04 (0,02)	1,99 (0,19)	0,04 (0,01)
Série verde (35%)	1,59 (0,34)	0,03 (0,01)	1,48 (0,19)	0,04 (0,01)

Ao analisar estatisticamente os valores de LOP e tenacidade para as amostras sem reforço têxtil carbonatadas, apenas a série com 35% de cimento que diferiu das demais em relação ao LOP, apresentando uma redução significativa de tensão de 33% quando comparado com a série de 50% de cimento, já quanto a tenacidade, independente do teor de cimento utilizado obteve-se o mesmo comportamento.

Figura 31 – Resistência à flexão das amostras sem reforço têxtil. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.



Fonte: Autor

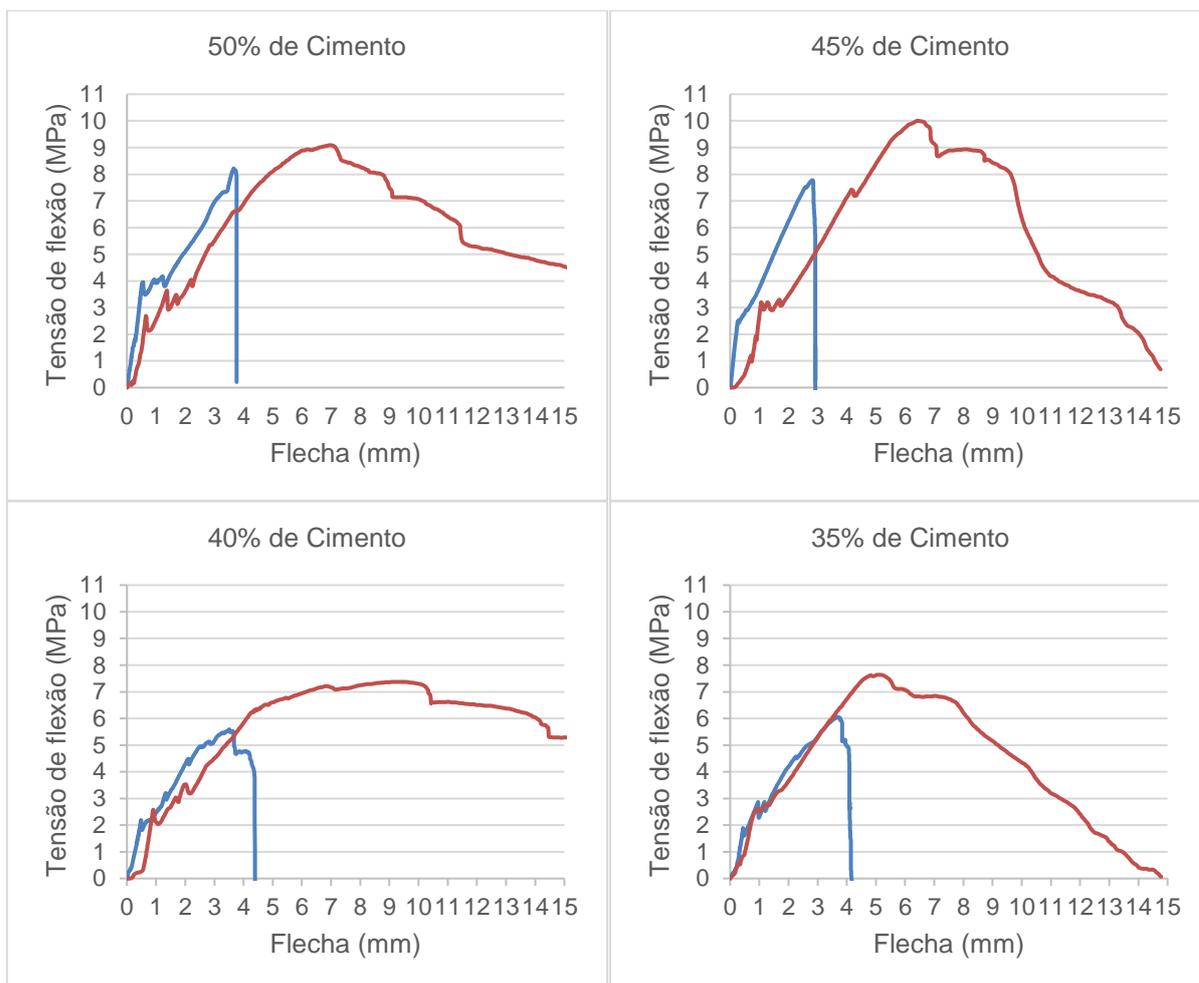
Na Figura 31 foi escolhida uma curva típica para cada teor de cimento, portanto é possível notar que as tensões de ruptura das amostras se deram em valores próximos quando comparados a série não carbonatada com a carbonatada.

Contudo a carbonatação se comporta a obter ganho de resistência devido ao preenchimento dos poros, porém conforme a Tabela 14 não foi possível observar esse ganho notório de resistência.

Foi realizado a análise estatística, apresentada no Anexo A, para verificar as divergências entre as séries não carbonatadas e as séries carbonatadas, observou que não houveram alterações significativas para nenhuma série. Observou que não houve variância estatística entre a série com 50% não carbonatada e a série com 35% carbonatada. De forma a concluir que para os valores de LOP, independente das variáveis, nenhuma influenciou de modo a causar grandes impactos no valores de LOP.

Para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR e com tecido de fibra de vidro, observou-se uma melhora no comportamento mecânico destas amostras, ilustrados pelas Figura 32 e Figura 33, respectivamente. Acredita-se que a carbonatação atuou na melhoria das interfaces do compósito, entre cordão e matriz, e entre os fios que compõe o cordão para as amostras com tecido de fibra de vidro V. Isto é concluído pelo fato de todas as amostras apresentarem aumento de MOR (Tabela 15).

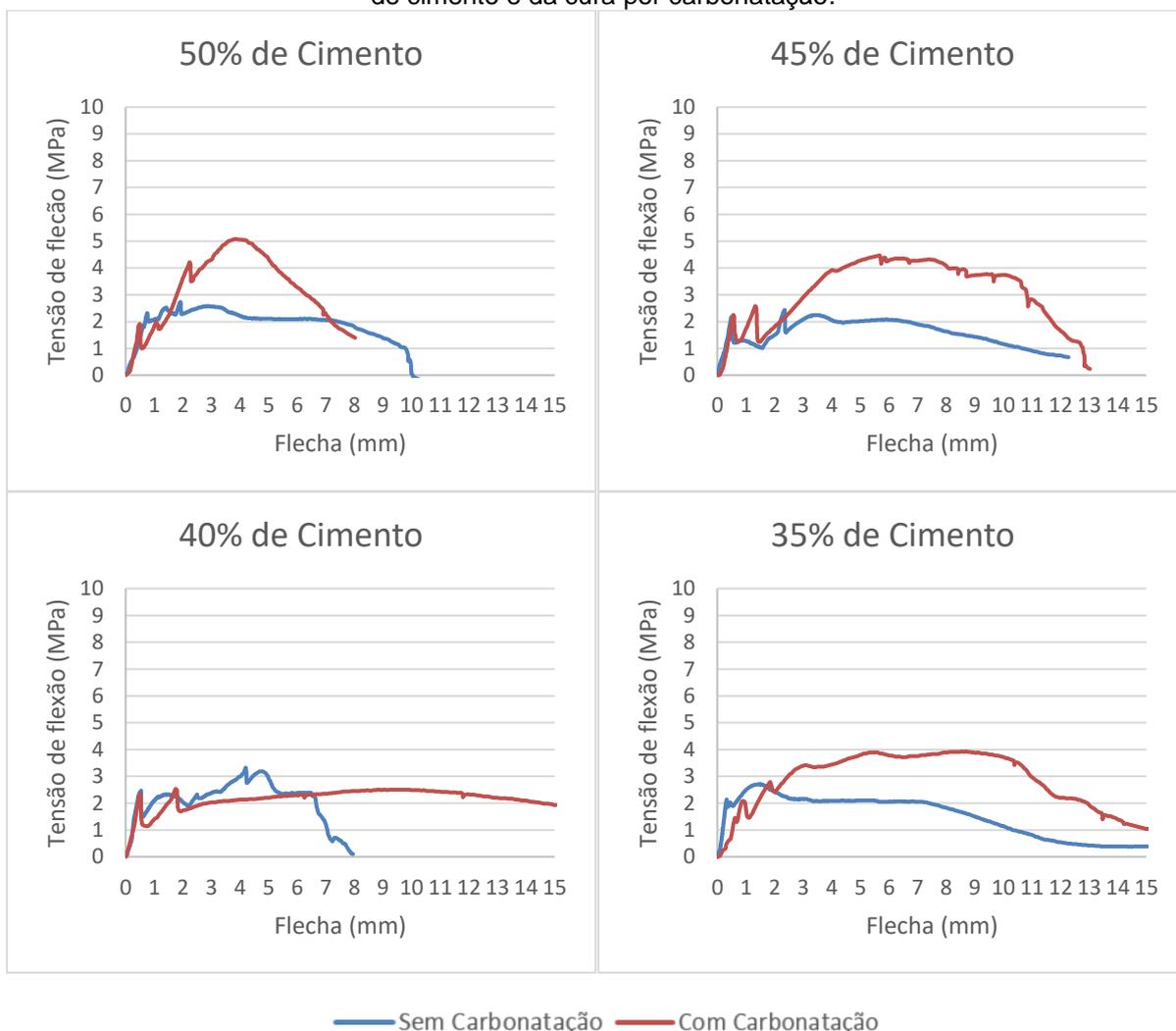
Figura 32 – Resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.



— Sem Carbonatação — Com Carbonatação

Fonte: Autor

Figura 33 – Resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.



Fonte: Autor

A Tabela 15 apresenta o comparativo entre as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro convencional (V) e tecido de fibra de vidro AR, para situações carbonatadas e não carbonatadas, em função do consumo de cimento, os valores entre parênteses representam o desvio padrão.

No caso das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro (V), onde os níveis de deslocamento são grandes devido ao *pull-out* dos cordões, a carbonatação provavelmente melhorou a aderência nestas interfaces, claramente observado pelo aumento do MOR (Tabela 15), além de ter aumentado a energia mecânica necessária para ruptura do material, tenacidade.

Tabela 15: Médio do LOP, MOR e tenacidade das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro AR e vidro V, carbonatadas e não carbonatadas em função do consumo de cimento.

	AMOSTRAS AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO DE FIBRA DE VIDRO AR NÃO CARBONATADAS			AMOSTRAS AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO DE FIBRA DE VIDRO AR CARBONATADAS		
	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	3,72 (0,67)	7,63 (0,76)	2,66 (1,28)	2,78 (0,36)	7,78 (1,20)	6,29 (1,06)
Série amarela (45%)	3,63 (1,02)	7,29 (0,80)	1,77 (0,51)	2,52 (0,60)	8,59 (0,83)	4,74 (0,97)
Série azul (40%)	2,78 (0,93)	6,53 (0,60)	3,44 (1,44)	2,23 (0,29)	5,47 (1,04)	5,64 (1,11)
Série verde (35%)	2,76 (0,84)	5,68 (0,79)	3,44 (1,52)	2,75 (0,99)	6,49 (1,00)	4,06 (0,86)
	AMOSTRAS AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO DE FIBRA DE VIDRO V NÃO CARBONATADAS			AMOSTRAS AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO DE FIBRA DE VIDRO V CARBONATADAS		
	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	2,32 (0,21)	2,83 (0,30)	4,53 (1,07)	2,57 (0,53)	4,54 (0,84)	7,48 (0,62)
Série amarela (45%)	2,25 (0,24)	2,54 (0,27)	4,25 (1,23)	2,29 (0,31)	3,7 (0,51)	6,27 (1,06)
Série azul (40%)	2,17 (0,39)	3,09 (0,28)	3,54 (0,51)	2,48 (0,44)	2,79 (0,41)	7,20 (0,70)
Série verde (35%)	2,12 (0,38)	3,67 (0,29)	4,57 (0,69)	2,09 (0,50)	3,58 (0,60)	6,85 (1,02)

Conforme demonstrado na Tabela 15, a amostra reforçada com tecido de fibra de vidro AR após cura por carbonatação teve aumento de tensão MOR em 9% para o teor de 45% de consumo de cimento, e obteve uma redução de 29,7% e 16,6% para os teores de 40% e 35% de consumo de cimento. E segundo a análise estática aplicada para analisar o efeito do consumo de cimento para a carbonatação, apresentada no Anexo A, indicou que houve divergência significativa apenas para a série de 40% de cimento em comparação com a série de 50% e para as séries de 40% e 35% de cimento quando comparado com a série de 45%. Indicando que o consumo de cimento atua de forma a reduzir o valores de MOR mesmo quando utilizado o método de cura por carbonatação.

Ao analisar as divergências comparando os tipos de cura, por carbonatação e sem carbonatação, segundo a análise estatística apresentada no Anexo A, observou que não houve divergência para o teor de 50% de cimento, a cura por carbonatação não mostrou ganhos significativos de resistência quando comparados as mesmas séries. Porém vale ressaltar que não houve divergências significativas ao comparar a série de 50% sem carbonatação com a série de 35% carbonatada, o que prova que a cura por carbonatação é capaz de manter os valores de MOR mesmo para uma grande redução do consumo de cimento no compósito reforçado com tecido de fibra de vidro AR.

Obteve redução de tensão MOR, para as amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro comum carbonatadas conforme se reduziu o consumo de cimento, tais reduções foram de 18,5%, 38,5% e 21,1% para os teores de 45%, 40% e 35% de consumo de cimento. Observou um aumento de resistência MOR de 38% quando comparado a série com 50% carbonatadas e não carbonatadas, conforme apresentado por Pizzol (2013), a carbonatação causou um aumento no MOR para o compósito de fibrocimento em 34%, explicado pela densificação do material. Segundo Bentur e Mindess (2007) esse aumento do MOR indica a participação conjunta da matriz e fibras, sendo esta propriedade mecânica relacionada com a resistência mecânica da matriz e os mecanismos de tenacificação entre fibra e matriz.

Conforme a análise estatística apresentada no Anexo A, averiguou que a carbonatação propôs um aumento de resistência mecânica ao compósito reforçado com tecido de fibra de vidro comum, com exceção da série com 40% de cimento que não obteve ganhos significativos, porém a série carbonatada com 35% de cimento superou a resistência MOR para a série não carbonatada com 50% de cimento. Portanto pode-se dizer que a cura por carbonatação atuou de modo a compensar o consumo de cimento, pois os valores de tensões MOR das amostras carbonatadas ficaram superiores ao valor de referência (50%) das amostras não carbonatadas.

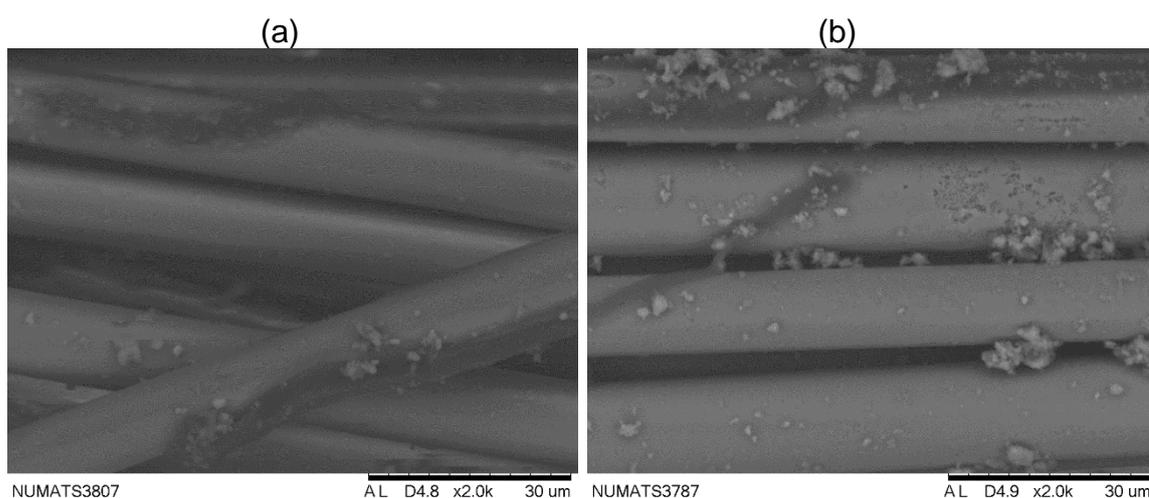
Ao analisar a divergência da tenacidade, tanto para o compósito reforçado com fibra de vidro comum V e o reforçado com fibra de vidro AR, observa-se que a carbonatação tornou ambos os compósitos mais tenaz, a análise estatística apresentada no Anexo A indica que há uma variância significativa para a série de

40% de cimento reforçada com tecido de fibra de vidro AR carbonatada, a qual se sobressai em valores de tenacidade superiores aos valores da amostra de referência (série 50% sem carbonatação). Analisando estatisticamente a tenacidade das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro V, observa-se que as amostras obtiveram valores de tenacidade maiores em comparação com qualquer teor de cimento das séries não carbonatadas, com exceção da série com 45% de cimento.

A carbonatação atuou de forma a beneficiar o comportamento mecânico do compósito reforçado com tecido de fibra de vidro V, uma vez que se observou aumento do MOR e da tenacidade, além de contribuir para a melhoria na interface do tecido matriz, e para o beneficiamento em reduzir o pH do meio e tornar um ambiente mais propício às fibras sem resistência aos álcalis.

A Figura 34, representa imagens realizadas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura das amostras reforçadas com tecido de fibra de vidro comum (V), a fim de averiguar o efeito da cura por carbonatação nas fibras. Como observado, a carbonatação atuou de modo a prevenir contra a danificação da fibra no meio alcalino, aumentando sua durabilidade e desta forma tornando o compósito carbonatado com comportamento mecânico superior ao sem carbonatação.

Figura 34– a) Imagem MEV da amostra carbonatada reforçada com tecido de fibra de vidro V; b) Imagem MEV da amostra não carbonatada reforçada com tecido de fibra de vidro V.



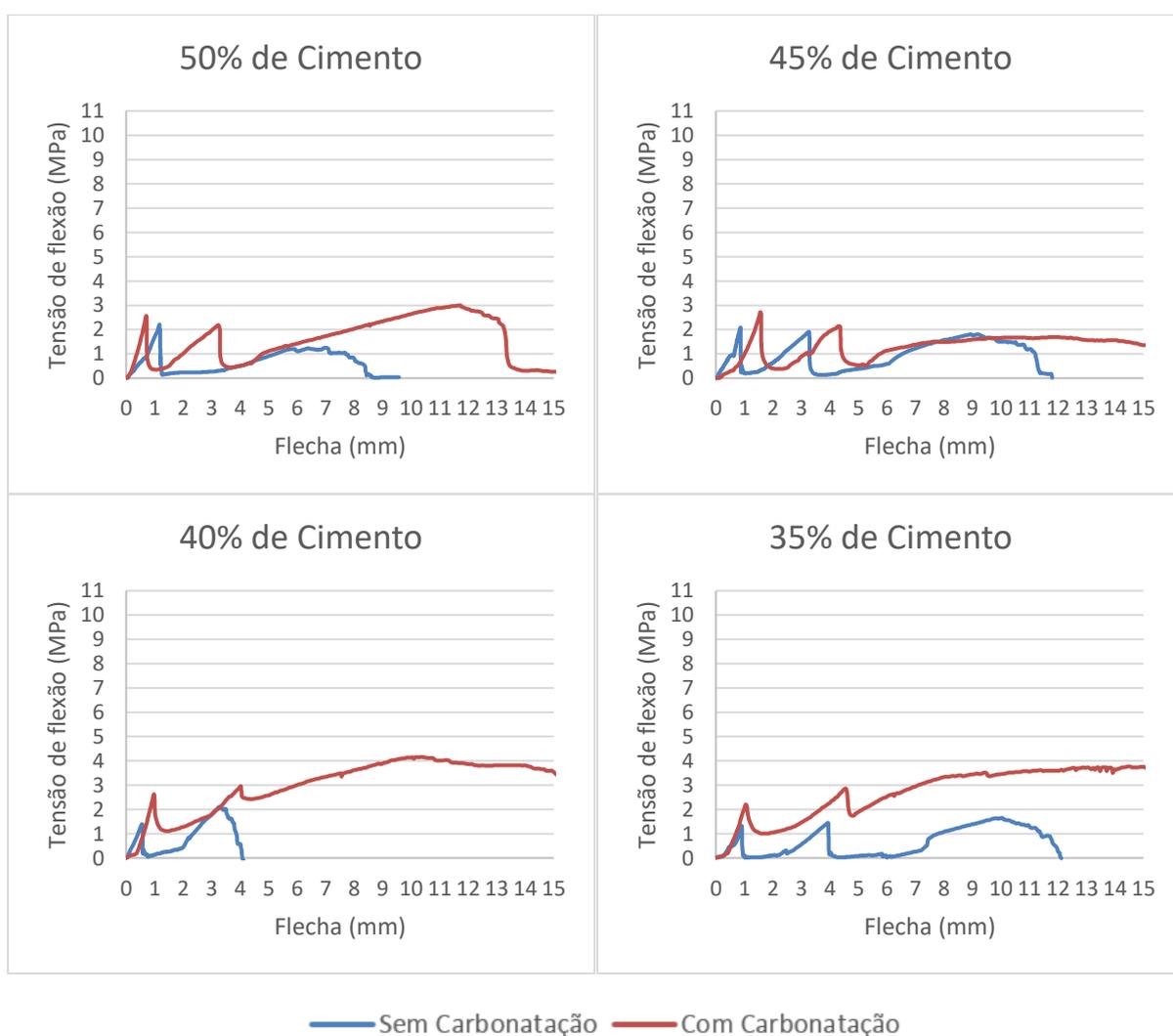
Fonte: Autor

Portanto é possível observar na Figura 34.b) pontos de degradação na fibra, ocasionada pela presença do meio alcalino. Por sua vez a cura por carbonatação

não contribui apenas para o ganho de resistência MOR de modo a auxiliar na interface tecido-matriz, mas também atuou de modo a agir precocemente para a não degradação da fibra em meio ao cimento, tornando-a um material mais resistente.

Para o tecido de fibra de juta também se observou a melhora no comportamento frente a cura por carbonatação, para as séries com menores consumo de cimento, conforme ilustrado na Figura 35. Ao comparar com as amostras de referência (50% de cimento) sem tecido e com cura sem carbonatação, verifica-se que as amostras carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de juta, alcançam valores superiores da tensão LOP que foi em torno de 2,60 MPa (Figura 35).

Figura 35– Resistência à flexão das amostras reforçadas com tecido de fibra de juta. Efeito do teor de cimento e da cura por carbonatação.



Fonte: Autor

Verificou que o uso do reforço do tecido de fibra de juta, independente da opção de cura, ocorreu de modo que houve primeiramente dois rompimentos das partes do compósito e posteriormente a ruptura do tecido, prejudicando a visualização do efeito da carbonatação neste compósito.

Tabela 16: Médio do LOP, MOR e tenacidade das amostras reforçadas com tecido de fibra de juta, carbonatadas e não carbonatadas em função do consumo de cimento

	AMOSTRAS AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO DE FIBRA DE JUTA NÃO CARBONATADAS			AMOSTRAS AMOSTRAS REFORÇADAS COM TECIDO DE FIBRA DE JUTA CARBONATADAS		
	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)	LOP (MPa)	MOR (MPa)	TENACIDADE (kJ/m ²)
Série vermelha (50%)	2,13 (0,25)	2,13 (0,25)	0,96 (0,30)	2,79 (0,33)	3,16 (0,21)	4,51 (0,99)
Série amarela (45%)	1,77 (0,52)	2,05 (0,28)	1,52 (0,42)	2,65 (0,36)	3,32 (0,77)	7,54 (2,46)
Série azul (40%)	1,88 (0,35)	2,22 (0,20)	1,52 (0,67)	2,66 (0,32)	4,07 (0,21)	11,06 (1,45)
Série verde (35%)	1,39 (0,30)	1,52 (0,19)	0,81 (0,45)	1,81 (0,24)	2,78 (0,75)	7,64 (1,52)

Contudo o melhor desempenho, em termos de MOR conforme Tabela 16 do compósito reforçado com tecido de fibra de juta foi encontrado para o traço de 40% de cimento. Atingindo 4,07 MPa para a amostra carbonatada, obtendo um ganho de 45,5% de tensão MOR após a cura por carbonatação.

Segundo a análise estatística realizada e apresentada no Anexo A, as séries carbonatadas apresentaram variância significativa em relação ao aumento de resistência MOR comparado a todas séries sem carbonatação, a única exceção se deu para a série com 35% de cimento que não obteve resistência MOR tão elevada. Pode observar também que houve variância para a tenacidade, que obteve valores superiores para as séries submetidas a cura por carbonatação. Concluindo que a cura por carbonatação beneficiou, também de modo significativo, para a durabilidade da fibra de juta, uma vez que esta precisa de tratamentos de suas fibras para melhorar seu desempenho mecânico dentro do compósito cimentício, podendo então a cura por carbonatação ser um tipo de tratamento para esta fibra.

5 CONCLUSÕES

O método de cura por carbonatação atendeu as expectativa de ter carbonatado totalmente as amostras, independente do teor de cimento utilizado, tornando possível a redução precoce da alcalinidade dos compósitos cimentícios e ganho de resistência pós fissuração para os compósitos têxteis. Observou o ganho de tensão para a série com 35% de consumo de cimento reforçadas com tecido de fibra de vidro comum carbonatadas, a qual superou os valores de MOR obtidos pelas séries não carbonatadas, superando até mesmo a série de referência com 50% de cimento sem carbonatação.

Portanto, concluiu que a cura por carbonatação atuou de modo a proteger a fibra de vidro comum e fibra de juta, por meio da redução precoce da alcalinidade, fazendo que estas fibras não se degradassem e por consequência tivessem perca das propriedades mecânicas antes mesmo de serem solicitadas.

Observou que o aumento do teor de cimento teve influências positivas para o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro AR, refletindo em uma boa combinação entre matriz e reforço têxtil, proporcionando melhora no desempenho mecânico do compósito e ganho de resistência MOR. Porém a variação do consumo de cimento, não teve as mesmas influências nas resistências dos compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro convencional (V). Os baixos valores de MOR e o maior deslocamento indicam que o tecido de fibra de vidro comum não obteve uma boa aderência na matriz ocasionando o *pull-out*, além de que o compósito reforçado com fibra de vidro comum com menor consumo de cimento, foi o que apresentou maior valor de tensão MOR, justificando que esta fibra não sofre tanta degradação quando está em meios com baixa alcalinidade, uma vez que o com a redução do consumo de cimento houve, por consequência, a redução dos hidróxidos hidratados e por fim gerando a redução da alcalinidade do meio.

A divergência no tecido de fibra de vidro AR em comparação com o tecido de fibra de vidro comum gerou grandes acréscimos de resistência ao compósito, estando associado a resina que reveste o tecido AR a qual reflete em ganho de tensões LOP e MOR, devido os múltiplos filamentos trabalharem melhor em conjunto.

Contudo o tecido de fibra de vidro comum não é resistente ao meio alcalino, e observou que houve melhora no comportamento mecânico do compósito com menores teores de cimento e/ou após ser submetido ao processo de cura por carbonatação devido ao aumento do MOR deste compósito.

Para o uso do reforço têxtil de fibra de juta apenas a cura por carbonatação não foi suficiente para obter ganhos positivos no comportamento mecânico, porém foi observado melhora neste compósito carbonatado, mas ainda há a necessidade de utilizar meios de tratamento das fibras em paralelo para promover um alto desempenho mecânico ao compósito.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa possui diversas variáveis, varrendo um grande leque de análises. Portanto, a sugestão para trabalhos futuros é no sentido de realizar análises mais profundas em cada uma das variáveis apresentada no trabalho. Podem ser listados os tópicos como sugestão para pesquisas futuras:

- Realização de um pesquisa para determinar a profundidade de carbonatação mínima para atingir um ambiente que contribua para a durabilidade das fibras naturais;
- Estudar as alterações microestruturais da matriz cimentícia frente a variação da composição da fase ligante com alteração no consumo de cimento;
- Realizar estudo comparativo dos meios de tratamento da fibra de juta inserido ao método de cura por carbonatação;
- Estudar a durabilidade do compósito cimentício reforçado com têxtil após cura por carbonatação em meio a intempéries e ao uso e aplicação dos compósitos.

7 Viabilidade técnica

Este estudo é de fácil aplicabilidade dentro das indústrias de placas cimentícias brasileiras, podendo ser utilizado sem a necessidade de modificar o processo de produção. Uma vez que se faz a substituição da cura padrão do material, que normalmente ocorre nos pátios das fábricas, pela cura por carbonatação realizada em câmara específica.

Portanto para a viabilidade desta pesquisa, inicia-se com a implantação de uma câmara de carbonatação dentro das indústrias que atenda ao requisitos de controle de umidade, temperatura e quantidade de dióxido de carbono.

Conforme foi estudado nesta pesquisa, as condições aplicadas de umidade relativa em 65%, temperatura em 23°C e 5% de CO₂, foi suficiente para que ocorresse a carbonatação no período de 15 dias. Porém para a aplicabilidade dentro do setor industrial, vê-se a necessidade de reduzir esses dias de período de cura, de modo que acompanhe a linha de produção de cada fábrica.

Ao realizar os estudos futuros, será possível determinar o período mínimo para que este compósito permaneça em cura por carbonatação. Feito isso, e podendo este ser reduzido para o período de 1 dia ou horas. É possível locar uma câmara de carbonatação nas extremidades de cada esteira de produção das placas, de modo que a medida que as placas fiquem prontas, essas sejam dispostas em camadas em aparatos de modo que fiquem separadas a uma distância para que o dióxido de carbono consiga penetrar, e após 24 horas de espera as mesmas entrem automaticamente na câmara e quando saírem da câmara já possam ser estocadas.

Tal procedimento acarretará custos para a fabricação da câmara e logística inicial para modificar o sistema de estocagem. Porém será possível reduzir o consumo de cimento que por sua vez contribui para o meio ambiente, e, além de este fator ser relevante para diminuição dos custos, uma vez que o cimento é o insumo mais importante para o fibrocimento (placas cimentícias).

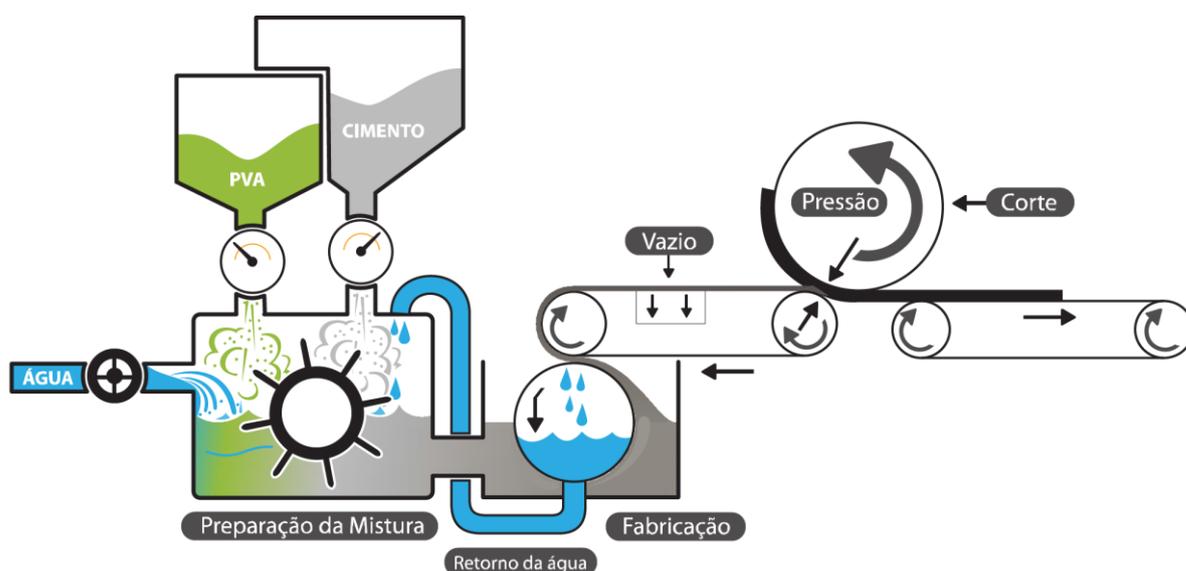
A redução dos custos pode ser aplicado também referente a redução em materiais de reforços, tais como as fibras poliméricas, que podem ser substituídas pelo reforço têxtil e por consequência, este pode ser utilizado em menor quantidade devido ao

seu entrelaçamento que garante maiores resistências mecânicas e aderência a matriz cimentícia.

Como demonstrado nos resultados desta pesquisa, a combinação da cura por carbonatação e a redução do consumo de cimento para o compósito reforçado com tecido de fibra de vidro comum, foi de extrema importância para garantir ao compósito uma melhora de comportamento mecânico, devido a prevenção aos danos causados pelo meio alcalino em suas fibras.

Para a utilização do reforço têxtil dentro das fábricas de placas cimentícias, é necessário substituir o modo de mistura da matriz, de modo que não utilize mais as fibras dispersas, conforme ilustrado na Figura 36 a mistura das fibras e da matriz cimentícia ocorre em processo inicial. Portanto, não há mais a necessidade de utilizar as fibras durante a mistura, e sim o reforço têxtil, podendo ser este do material que melhor atender a necessidade da indústria. O reforço têxtil deverá ser aplicado durante a esteira de rolagem, a qual molda as placas, e após isso ser aplicado a pressão para que ocorra a melhor aderência do reforço têxtil na matriz cimentícia, uma vez que não será posicionado o tecido anteriormente ao processo de moldagem.

Figura 36– Ilustração da fabricação de placas cimentícias.



Fonte: Fribalite, 2019.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fiber-cement based materials in São Paulo, Brazil: Overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, 2005.

ALMEIDA, A. E. F. et al, Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído**, v. 10, 2010.

ARRUDA FILHO, A. B. A., **Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

ASHRAF, W. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 120, 2016.

BENTUR, A., MINDESS, S. – **Fibre Reinforced Cementitious Composites**, 2^o Ed, p. 1 - 601, 2007.

BERTOS, M. et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, 2004.

BEZBRADICA, M. **Analysis of ferrocement and textile reinforced concrete for shell structures**, Dissertação de Mestrado, Lund University, Faculty of Engineering LTH. Sweden, 2015.

BORGES, P. H. R. et al. Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement and Concrete Research**, v. 40, 2010.

BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete – State of the art**. RILEM Technical Committee 201-TRC, v. 36, 2006.

BUTLER, M. et al. Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition. **Materials and Structures**, v. 43, 2010.

CASTELLOTE, M. et al. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, 2009.

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fibre cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, 2005.

DIAS, C.M.R., **Fibrocimentos com gradação funcional**, Tese Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIDELIS, M. E. A., **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**, Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FIBRALITE. **Processo de produção**. Disponível em: <http://www.fibrolite.pt/pt/processos-de-producao>. Acesso em: 17 de agosto de 2019.

HARGIS, C. W. et al. Carbonation of calcium sulfoaluminate mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, 2017.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, 2002.

JESSE, F.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. **Tensile Stress-Strain Behaviour of Textile Reinforced Concrete**, international Association for Bridge and Structural Engineering - IABSE Symposium Report. 86. 127-134, 2002.

JORDÃO, L. **Tecido plano x malha**. Disponível em: <http://lilianjordao.com.br/tecido-plano-x-malha/#>. Acesso em: 13 de novembro de 2018.

KUNITZ, P. E., **Otimização de processo Hatschek pelo uso de polímeros flocculantes na produção de fibrocimento**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2017.

KULAS, C.; GMBH, S. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. In: GRCA CONGRESS, Germany, 2015.

LERIGOLEUR, E., **Effect of early age carbonation curing on the microstructure of cement paste**, Dissertação de Mestrado, McGill University, Canada, 2014.

LI, Z., HE. Z., SHAO, Y., **Early age carbonation heat and products of tricalcium silicate paste subject to carbon dioxide curing**. *Material*, v. 11, 2018.

MEDEIROS, H. **Sem amianto, produto recupera Mercado**. Revista Finestra, ed. 60, 2010.. Disponível em: <https://www.arcoweb.com.br/finestra/tecnologia/tecnologia--placas-cimenticias> . Acesso em: 20 de maio de 2018.

NAAMAN, A. E. **Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions**. v.1 International Conference Textile Reinforced Concrete - ICTRC, 2010.

NEVES JR, A. et al. CO₂ sequestration by high initial strength Portland cement pastes. **Journal of Thermal Analysis**, v. 113, 2013.

ORLOWSKY, J., RAUPACH, M. Modelling the loss in strength of AR-glas fibres in textile-reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 39. 2006.

PELED, A., MOBASHER, B. "Pultruded fabric–cement composites". **ACI Materials Journal**, v. 102, 2005.

PELED, A., BENTUR, A., MOBASHER B. – **Textiles**. Textile Reinforced Concrete, 1º Ed., p. 1 - 47, 2017.

PELED, A.; BENTUR, A. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 30, 2000.

PELED, A.; BENTUR, A. Fabric structure and its reinforcing efficiency reinforced cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 34, 2003.

PETRE, D; ZAPALOWICZ, I. **Analysis of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforcement**. Dissertação de Mestrado, Chalmers University of Technology. Sweden, 2012.

PERUZZI, A, P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2002.

PICANÇO, M. S., **Compósitos cimentícios reforçados com fibra de curauá**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), Rio de Janeiro, 2005.

PIZZOL, V. D. **Carbonatação acelerada: nova tecnologia de cura para fibrocimento sem amianto**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2013.

PORTAL, N. W. **Usability of textile reinforced concrete: Structural performance, durability and sustainability**, Tese Doutorado, Chalmers University of Technology, Sweden. Thesis (Doctor), 2015.

PURNELL, P. et al. Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement. **Cemente and Concrete Research**, v. 30 (2000).

RAMBO, D. A. S. **Efeito da temperatura no comportamento mecânico de compósitos refratários reforçados com tecidos de basalto e carbono**, Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

RAMBO, D. A. S. et al, Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory. **Materials & Design**, v. 65, 2015.

ROSTAMI, V., SHAO, Y., BOYD, A. J., Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing. **JCBM Construction and Building Materials**, v. 25, 2011.

SAVASTANO JR, H. **Sistema de cobertura para construção de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. **Textile reinforced concrete – from the idea to a high performance material**. In: 11th International Symposium on Ferrocement and Textile Reinforced Concrete, 2015.

SCHEFFLER, C., et al. Interphase modification of alkali-resistente glass fibres and carbon fibres for textile reinforces concrete. **Composites Science and Technology**, v 69, 2009.

SILVA, A. C., **Estudo da durabilidade de compósito reforçados com fibra de celulose**, Dissertação de Mestrado Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, V. M., **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construída em escala natural e reduzida**, Tese Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SOUZA, V. C. M. RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, Pini, 1998.

SOUZA, R. B., **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**, Tese Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SPECK, J. A., **Análise de desempenho de placas cimentícias através da adição de fibras e telas, visando a redução de deformações térmicas e patologias**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TOLEDO FILHO, R. D. et al., Development of Vegetable Fibre–Mortar Composites of Improved Durability, **Cement and Concrete Composites**, v. 25, 2003.

VOSS, S., HEGGER, J. **Dimension of textile reinforced concrete structures**. In: 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC), 2006.

ANEXO A

TABELAS ANOVA – Análise de variância

- 1) Para compósito sem reforço têxtil, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1,87746	3	0,62582	1,418	0,2583
Within groups:	12,3548	28	0,441244		
Total:	14,2323	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0230719

Var(error): 0,441244

ICC: 0,0496902

omega2: 0,03774

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,5554

Levene's test, from medians p (same): 0,6886

Welch F test in the case of unequal variances: F=1,224, df=15,07, p=0,3353

- 2) Para compósito sem reforço têxtil, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,0072375	3	0,0024125	5,34	0,004898
Within groups:	0,01265	28	0,000451786		
Total:	0,0198875	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,000245089

Var(error): 0,000451786

ICC: 0,351698

omega2: 0,2892

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,0846

Levene's test, from medians p (same): 0,337

Welch F test in the case of unequal variances: $F=3,638$, $df=14,22$, $p=0,03907$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,007534	0,04071	0,01349
B	4,99		0,894	0,9953
C	3,992	0,998		0,9649
D	4,657	0,3327	0,6653	

- 3) Para compósito reforçados com fibra de vidro AR, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	4,37729	3	1,4591	0,8402	0,4842
Within groups:	45,15	26	1,73654		
Total:	49,5273	29			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): -0,0371573
 Var(error): 1,73654
 ICC: -0,0218652
 omega2: 0

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,8843
 Levene's test, from medians p (same): 0,9591

Welch F test in the case of unequal variances: F=0,8498, df=13,68, p=0,49

- 4) Para compósito reforçados com fibra de vidro AR, considerando as variâncias de resistência MOR para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	14,3716	3	4,79055	5,004	0,007777
Within groups:	22,9776	24	0,957399		
Total:	37,3492	27			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,547593
 Var(error): 0,957399
 ICC: 0,363851
 omega2: 0,3002

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,6712
 Levene's test, from medians p (same): 0,7894

Welch F test in the case of unequal variances: F=4,302, df=13,02, p=0,02578

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,9164	0,3273	0,007092
B	0,9116		0,6973	0,03162
C	2,457	1,545		0,2644
D	5,111	4,199	2,654	

- 5) Para compósito reforçados com fibra de vidro AR, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	11,8278	3	3,94259	1,223	0,3205
Within groups:	87,0452	27	3,2239		
Total:	98,8729	30			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0928307

Var(error): 3,2239

ICC: 0,0279887

omega2: 0,02112

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,2064

Levene's test, from medians p (same): 0,3429

Welch F test in the case of unequal variances: F=2,295, df=12,79, p=0,1267

- 6) Para compósito reforçados com fibra de vidro V, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,196409	3	0,0654698	0,3259	0,8066
Within groups:	5,62496	28	0,200892		
Total:	5,82137	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): -0,0169277

Var(error): 0,200892

ICC: -0,0920166

omega2: 0

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,4843

Levene's test, from medians p (same): 0,4729

Welch F test in the case of unequal variances: F=0,2909, df=15,19, p=0,8313

- 7) Para compósito reforçados com fibra de vidro V, considerando as variâncias de resistência MOR para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	5,51816	3	1,83939	12,95	1,73E-05
Within groups:	3,97709	28	0,142039		
Total:	9,49525	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,212168

Var(error): 0,142039

ICC: 0,598995

omega2: 0,5284

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,9937
 Levene's test, from medians p (same): 0,9991

Welch F test in the case of unequal variances: $F=12,54$, $df=15,5$, $p=0,0002025$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,4476	0,4942	0,0006567
B	2,129		0,03177	1,136E-05
C	2,017	4,146		0,02484
D	6,313	8,443	4,297	

8) Para compósito reforçados com fibra de vidro V, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	5,54126	3	1,84709	1,293	0,2962
Within groups:	39,9987	28	1,42852		
Total:	45,5399	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0523202
 Var(error): 1,42852
 ICC: 0,0353313
 omega2: 0,02673

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,1488
 Levene's test, from medians p (same): 0,4306

Welch F test in the case of unequal variances: $F=2,587$, $df=14,66$, $p=0,09259$

- 9) Para compósito reforçados com fibra de juta, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	2,13581	3	0,711937	2,51	0,0799
Within groups:	7,65701	27	0,283593		
Total:	9,79282	30			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0553278

Var(error): 0,283593

ICC: 0,163247

omega2: 0,1275

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,4707

Levene's test, from medians p (same): 0,4719

Welch F test in the case of unequal variances: $F=3,275$, $df=14,85$, $p=0,05086$

- 10) Para compósito reforçados com fibra de juta, considerando as variâncias de resistência MOR para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	2,30196	3	0,767319	5,774	0,003477
Within groups:	3,5882	27	0,132896		
Total:	5,89015	30			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0819463

Var(error): 0,132896
 ICC: 0,381425
 omega2: 0,316

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,8902
 Levene's test, from medians p (same): 0,8992

Welch F test in the case of unequal variances: $F=8,948$, $df=14,37$, $p=0,001365$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,9766	0,9614	0,01771
B	0,5769		0,7914	0,03635
C	0,688	1,309		0,003874
D	4,512	4,073	5,383	

11) Para compósito reforçados com fibra de juta, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	2,9565	3	0,985499	2,861	0,05541
Within groups:	9,30078	27	0,344473		
Total:	12,2573	30			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0827991
 Var(error): 0,344473
 ICC: 0,193785
 omega2: 0,1526

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,08395
 Levene's test, from medians p (same): 0,2681

Welch F test in the case of unequal variances: $F=2,783$, $df=14,76$, $p=0,0776$

12) Para compósito sem reforço têxtil carbonatadas, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	2,44143	3	0,813811	4,528	0,01039
Within groups:	5,03294	28	0,179748		
Total:	7,47437	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,079258

Var(error): 0,179748

ICC: 0,306009

omega2: 0,2485

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,06131
 Levene's test, from medians p (same): 0,1179

Welch F test in the case of unequal variances: $F=6,106$, $df=14,94$, $p=0,006371$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,6979	0,6732	0,006933
B	1,543		1	0,08689
C	1,601	0,05837		0,09452
D	5,037	3,494	3,436	

13) Para compósito sem reforço têxtil carbonatadas, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	0,0002	3	6,66667E-05	0,1562	0,9248
Within groups:	0,01195	28	0,000426786		
Total:	0,01215	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): -4,50149E-05

Var(error): 0,000426786

ICC: -0,117911

omega2: 0

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,2518

Levene's test, from medians p (same): 0,2533

Welch F test in the case of unequal variances: F=0,1824, df=15,03, p=0,9067

14) Para compósito reforçados com fibra de vidro AR carbonatadas, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1,50761	3	0,502536	0,6987	0,5608
Within groups:	20,1403	28	0,719295		
Total:	21,6479	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): -0,0270948

Var(error): 0,719295

ICC: -0,039143
 omega2: 0

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,05254
 Levene's test, from medians p (same): 0,2157

Welch F test in the case of unequal variances: $F=2,182$, $df=14,54$, $p=0,1339$

15) Para compósito reforçados com fibra de vidro AR carbonatadas, considerando as variâncias de resistência MOR para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	45,8288	3	15,2763	8,248	0,0004346
Within groups:	51,8622	28	1,85222		
Total:	97,691	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 1,678
 Var(error): 1,85222
 ICC: 0,475325
 omega2: 0,4046

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,8368
 Levene's test, from medians p (same): 0,9483

Welch F test in the case of unequal variances: $F=10,33$, $df=15,23$, $p=0,0005855$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,6345	0,01047	0,2512
B	1,691		0,0004659	0,02171
C	4,803	6,495		0,4526
D	2,686	4,377	2,117	

16) Para compósito reforçados com fibra de vidro AR carbonatadas, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	17,5507	3	5,85022	3,086	0,04936
Within groups:	39,8108	21	1,89575		
Total:	57,3615	24			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,639192

Var(error): 1,89575

ICC: 0,252152

omega2: 0,2002

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,9615

Levene's test, from medians p (same): 0,9571

Welch F test in the case of unequal variances: F=3,125, df=10,8, p=0,07079

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,1892	0,8589	0,04714
B	2,954		0,6688	0,7939
C	1,115	1,614		0,2597
D	3,982	1,303	2,682	

17) Para compósito reforçados com fibra de vidro V carbonatadas, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1,11201	3	0,37067	0,7765	0,517
Within groups:	13,3666	28	0,47738		
Total:	14,4786	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): -0,0133388

Var(error): 0,47738

ICC: -0,0287448

omega2: 0

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,8202

Levene's test, from medians p (same): 0,7671

Welch F test in the case of unequal variances: F=0,6213, df=15,2, p=0,6119

18) Para compósito reforçados com fibra de vidro V carbonatadas, considerando as variâncias de resistência MOR para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	12,4005	3	4,1335	6,816	0,001363
Within groups:	16,9808	28	0,606456		
Total:	29,3813	31			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,440881

Var(error): 0,606456

ICC: 0,420954

omega2: 0,3528

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,233

Levene's test, from medians p (same): 0,2422

Welch F test in the case of unequal variances: F=6,453, df=15,32, p=0,004887

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,1602	0,0005804	0,08725
B	3,051		0,1101	0,9893
C	6,379	3,328		0,1972
D	3,491	0,4404	2,887	

19) Para compósito reforçados com fibra de vidro V carbonatadas, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	4,45869	3	1,48623	1,105	0,3743
Within groups:	22,8641	17	1,34495		
Total:	27,3228	20			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0271367

Var(error): 1,34495

ICC: 0,0197777

omega2: 0,01478

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,5535

Levene's test, from medians p (same): 0,6844

Welch F test in the case of unequal variances: F=0,9905, df=9,155, p=0,4395

20) Para compósito reforçados com fibra de juta carbonatadas, considerando as variâncias de resistência LOP para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	4,8927	3	1,6309	9,283	0,0002191
Within groups:	4,74339	27	0,175681		
Total:	9,63608	30			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,187966

Var(error): 0,175681

ICC: 0,516891

omega2: 0,4449

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,7914
 Levene's test, from medians p (same): 0,7618

Welch F test in the case of unequal variances: $F=9,706$, $df=14,84$, $p=0,0008562$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,9082	0,9298	0,0003648
B	0,9447		1	0,002104
C	0,8545	0,05821		0,002695
D	6,664	5,719	5,583	

21) Para compósito reforçados com fibra de juta carbonatadas, considerando as variâncias de resistência MOR para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	6,44374	3	2,14791	4,616	0,009858
Within groups:	12,5629	27	0,465291		
Total:	19,0066	30			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,217339

Var(error): 0,465291

ICC: 0,318385

omega2: 0,2592

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,0006078

Levene's test, from medians p (same): 0,0006236

Welch F test in the case of unequal variances: $F=12,37$, $df=14,29$, $p=0,0002944$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted

	A	B	C	D
A		0,9682	0,07134	0,6841
B	0,6427		0,1688	0,4127
C	3,635	3,014		0,005793
D	1,576	2,218	5,158	

22) Para compósito reforçados com fibra de juta carbonatadas, considerando as variâncias de tenacidade para os quatro teores de cimento utilizados.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	117,279	3	39,0929	7,444	0,001914
Within groups:	94,5291	18	5,25162		
Total:	211,808	21			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 6,16995

Var(error): 5,25162

ICC: 0,540202

omega2: 0,4677

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,2879

Levene's test, from medians p (same): 0,4547

Welch F test in the case of unequal variances: F=11,26, df=9,211, p=0,001967

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D
A		0,1372	0,0008899	0,1456
B	3,24		0,08719	0,9999
C	6,681	3,591		0,1212
D	3,193	0,1036	3,339	

23) Considerando as variâncias de resistência LOP para as amostras carbonatadas e não carbonatadas sem reforço têxtil.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	4,38912	7	0,627017	2,019	0,06855
Within groups:	17,3878	56	0,310496		
Total:	21,7769	63			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,0395651

Var(error): 0,310496

ICC: 0,113023

omega2: 0,1003

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,2234

Levene's test, from medians p (same): 0,335

Welch F test in the case of unequal variances: F=3,011, df=23,7, p=0,02061

24) Considerando as variâncias de resistência MOR para as amostras carbonatadas e não carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de vidro AR.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	64,5817	7	9,22596	6,465	1,518E-05
Within groups:	77,0658	54	1,42715		
Total:	141,648	61			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 1,00675

Var(error): 1,42715

ICC: 0,413637

omega2: 0,3816

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,776

Levene's test, from medians p (same): 0,8976

Welch F test in the case of unequal variances: $F=7,079$, $df=22,92$, $p=0,0001505$

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A		0,9995	0,6357	0,05126	1	0,7703	0,02012	0,5932
B	0,7467		0,9176	0,1794	0,9929	0,4237	0,08289	0,895
C	2,518	1,747		0,8485	0,43	0,02209	0,6407	1
D	4,445	3,674	1,995		0,01931	0,0002586	1	0,8778
E	0,3472	1,118	2,965	4,96		0,8699	0,006705	0,3893
F	2,209	2,98	4,892	6,887	1,927		7,313E-05	0,01831
G	4,939	4,168	2,507	0,512	5,472	7,399		0,6837
H	2,609	1,838	0,0947	1,9	3,06	4,987	2,412	

25) Considerando as variâncias de resistência MOR para as amostras carbonatadas e não carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de vidro V.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	24,0505	7	3,43578	9,181	1,659E-07
Within groups:	20,9579	56	0,374248		
Total:	45,0083	63			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,382692

Var(error): 0,374248

ICC: 0,505578

omega2: 0,4722

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,01298

Levene's test, from medians p (same): 0,02008

Welch F test in the case of unequal variances: F=8,772, df=23,81, p=2,511E-05

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A		0,982	0,9868	0,1292	1,746E-05	0,1008	1	0,2322
B	1,312		0,6186	0,01159	5,524E-07	0,008351	0,9929	0,02618
C	1,243	2,554		0,5755	0,0003975	0,5028	0,9705	0,7567
D	3,889	5,201	2,647		0,1017	1	0,0952	1
E	7,929	9,241	6,687	4,04		0,1304	1,065E-05	0,05073
F	4,046	5,357	2,803	0,156	3,884		0,07322	0,9999
G	0,1907	1,121	1,433	4,08	8,12	4,236		0,1781
H	3,485	4,797	2,242	0,4046	4,444	0,5606	3,676	

26) Considerando as variâncias de tenacidade para as amostras carbonatadas e não carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de vidro AR.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	106,77	7	15,2528	6,142	3,99E-05
Within groups:	116,723	47	2,48346		
Total:	223,492	54			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 1,86502

Var(error): 2,48346

ICC: 0,42889

omega2: 0,3956

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,5922

Levene's test, from medians p (same): 0,7502

Welch F test in the case of unequal variances: F=10,85, df=18,5, p=2,087E-05

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A		0,9445	0,9739	0,9835	0,002256	0,1688	0,03514	0,7264
B	1,611		0,4132	0,5147	7,295E-05	0,00979	0,001976	0,151
C	1,398	3,009		1	0,03154	0,7191	0,2454	0,9959
D	1,289	2,781	0,004847		0,05432	0,7878	0,3136	0,9972
E	6,033	7,525	4,739	4,438		0,6068	0,9969	0,2378
F	3,729	5,34	2,331	2,163	2,581		0,9726	0,992
G	4,681	6,094	3,455	3,257	0,9742	1,41		0,7139
H	2,314	3,805	1,02	0,9585	3,479	1,138	2,343	

27) Considerando as variâncias de tenacidade para as amostras carbonatadas e não carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de vidro V.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	100,854	7	14,4077	10,31	1,229E-07
Within groups:	62,8628	45	1,39695		
Total:	163,717	52			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 1,97828

Var(error): 1,39695

ICC: 0,586117

omega2: 0,5516

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,3428

Levene's test, from medians p (same): 0,7299

Welch F test in the case of unequal variances: F=14,48, df=17,09, p=4,711E-06

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A		0,9997	0,6934	1	0,00171	0,1446	0,01323	0,01538
B	0,685		0,926	0,9993	0,0004471	0,05181	0,004213	0,004229
C	2,39	1,705		0,6519	1,35E-05	0,002276	0,0001906	0,0001241
D	0,09273	0,7777	2,483		0,002041	0,164	0,01535	0,01817
E	6,184	6,785	8,28	6,102		0,6901	1	0,9862
F	3,839	4,474	6,052	3,754	2,398		0,9216	0,9887
G	5,205	5,764	7,156	5,129	0,5039	1,725		0,9998
H	5,128	5,762	7,341	5,042	1,248	1,205	0,6472	

28) Considerando as variâncias de resistência MOR para as amostras carbonatadas e não carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de juta.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	36,3769	7	5,19669	17,37	8,203E-12
Within groups:	16,151	54	0,299093		
Total:	52,5279	61			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 0,63223

Var(error): 0,299093

ICC: 0,678851

omega2: 0,649

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 4,387E-05

Levene's test, from medians p (same): 5,21E-05

Welch F test in the case of unequal variances: F=46,78, df=22,86, p=4,569E-12

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A		1	1	0,4116	0,01238	0,002316	4,135E-07	0,3019
B	0,3845		0,9985	0,5438	0,00358	0,0005654	6,668E-08	0,1501
C	0,4586	0,8727		0,2024	0,0223	0,004189	6,133E-07	0,4491
D	3,008	2,715	3,588		4,7E-06	5,804E-07	7,053E-11	0,0006393
E	5,18	5,76	4,887	8,475		0,9991	0,04358	0,858
F	5,955	6,562	5,689	9,277	0,8016		0,1582	0,5198
G	9,406	10,1	9,256	12,72	4,534	3,76		0,0007672
H	3,282	3,795	2,922	6,51	1,965	2,767	6,433	

29) Considerando as variâncias de resistência tenacidade para as amostras carbonatadas e não carbonatadas reforçadas com tecido de fibra de juta.

Test for equal means:

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	630,07	7	90,0099	39,01	4,701E-17
Within groups:	103,83	45	2,30733		
Total:	733,899	52			

Components of variance (only for random effects):

Var(group): 13,3024

Var(error): 2,30733

ICC: 0,852186

omega2: 0,8339

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,0003779

Levene's test, from medians p (same): 0,007738

Welch F test in the case of unequal variances: F=24,74, df=17,09, p=9,406E-08

Turkey's Q below the diagonal, p (same) above the diagonal. Significant comparisons are highlighted.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A		0,9992	0,9993	1	0,004646	3,266E-08	6,197E-13	8,021E-08
B	0,7825		1	0,9795	0,01502	9,001E-08	9,126E-13	2,239E-07
C	0,7803	0,002328		0,9797	0,01496	8,955E-08	9,097E-13	2,228E-07
D	0,5104	1,338	1,336		0,001111	4,748E-09	3,044E-13	1,358E-08
E	5,718	5,14	5,142	6,379		0,02436	1,793E-07	0,02783
F	10,79	10,37	10,37	11,61	4,889		0,008632	1
G	15,86	15,58	15,58	16,75	10,08	5,418		0,01834
H	10,41	9,987	9,989	11,16	4,818	0,1563	5,037	