



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

VÍTOR HENRIQUE DE OLIVEIRA AZEVEDO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS
SOBRE O COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE
UM CONCRETO LEVE**

**NATAL-RN
2018**

Vítor Henrique de Oliveira Azevedo

Estudo da influência da utilização de fibras sobre o comportamento físico e mecânico de um concreto leve

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Fred Guedes Cunha

Natal-RN
2018

Vítor Henrique de Oliveira Azevedo

Estudo da influência da utilização de fibras sobre o comportamento físico e mecânico de um concreto leve

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 04 de junho de 2018:

Prof. Msc. Fred Guedes Cunha – Orientador

Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Examinador interno

Prof. Msc. Hérbete Hálamo Rodrigues Caetano Davi – Examinador externo

Natal-RN

2018

Seção de Informação e Referência

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Azevedo, Vítor Henrique de Oliveira.

Estudo da influência da utilização de fibras sobre o comportamento físico e mecânico de um concreto leve / Vítor Henrique de Oliveira Azevedo. - 2018.

56 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Me. Fred Guedes Cunha.

1. Concreto leve - Monografia. 2. Argila expandida - Monografia. 3. Resistência à compressão - Monografia. 4. Resistência à tração na flexão - Monografia. 5. Fator de tenacidade - Monografia. 6. Índice de vazios - Monografia. I. Cunha, Fred Guedes. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.012.45

Ao meu avô, Gerson Florêncio de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Como todas as conquistas alcançadas em minha vida, esta que se aproxima é fruto de um caminho trilhado ao lado de pessoas que me fortalecem na busca constante para me tornar uma pessoa melhor. Portanto, gostaria de expressar o meu agradecimento a elas.

A Deus, por agir constante e perfeitamente em minha vida, me concedendo meios para a concretização das minhas metas.

À minha mãe, Geovânia, por todo o empenho em educar os filhos e por dividir comigo todas as dificuldades pelas quais passei até hoje.

Ao meu pai, Jorge, pela importância do seu incentivo e pelos valiosos ensinamentos.

Aos meus avós maternos, Gerson e Avani, por serem também meus pais. Não é possível mensurar os sentimentos de amor e gratidão que tenho por ter crescido sob a forte influência e os cuidados deles.

À minha irmã, Cristiane, pelo companheirismo, pelo suporte incondicional e pela referência de ser humano que é para mim.

Ao meu irmão, Marcelo, pelo apoio e torcida de sempre, e por dividir comigo tantos momentos marcantes de felicidade.

A minha namorada, Lisa, por toda a dedicação, paciência e carinho.

Ao meu cunhado, Jonas, pelo irmão que representa para mim e pelas orientações valiosas para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, presentes em tantos bons momentos da minha vida.

A toda a equipe da Construtora Licenge, pelo entusiasmo em compartilhar comigo toda a sua experiência profissional e pela confiança depositada no meu trabalho.

Ao Professor Fred Guedes Cunha, pelas imprescindíveis orientações e pelo comprometimento que teve comigo desde o início da realização desta pesquisa.

A Sandro Ricardo da Silva Andrade, técnico do Laboratório de Materiais de Construção da UFRN e aos bolsistas, pela atenção e suporte que me foram dados durante as atividades realizadas em laboratório.

Aos Professores Fagner Alexandre Nunes de França e Hérbete Hálamo Rodrigues Caetano Davi, pela presteza em atenderem ao convite de compor a banca de examinadores.

Vítor Henrique de Oliveira Azevedo

RESUMO

Estudo da influência da utilização de fibras sobre o comportamento físico e mecânico de um concreto leve

O concreto é um dos materiais de construção mais versáteis do mundo, entretanto apresenta limitações de caráter físico e mecânico cuja atenuação pode trazer melhorias à sua aplicação. Esta monografia trata de uma pesquisa sobre as alterações causadas pela adição de fibras de aço, carbono, polipropileno e vidro, com o teor de 0,6% do volume, nas propriedades físicas e mecânicas de um concreto leve utilizando argila expandida. Foram feitos ensaios de abatimento do tronco de cone, compressão axial, tração na flexão, tração na compressão diametral e determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os resultados obtidos para o traço com o uso de cada fibra diferente foram comparados entre si, para a compreensão de como as propriedades são afetadas pelas fibras. Algumas fibras conferiram ganhos significativos na resistência à tração na flexão, na resistência à tração na compressão diametral e no fator de tenacidade, mas apenas a fibra de carbono estudada apresentou aumento na resistência à compressão. As fibras também alteraram o teor de absorção de água, o índice de vazios e a massa específica do concreto. Finalmente, algumas sugestões para pesquisas futuras foram sugeridas.

Palavras-chave: Concreto leve reforçado com fibras. Agregado de argila expandida. Resistência à compressão. Resistência à tração na flexão. Fator de tenacidade. Índice de vazios.

ABSTRACT

Title: Study of the influence of fiber use on the physical and mechanical behavior of a lightweight concrete.

Concrete is one of the most versatile construction materials in the world, however it has physical and mechanical limitations whose attenuation can bring improvements to its application. This monograph deals with a research on the changes caused by the addition of steel, carbon, polypropylene and glass fibers, with a volume content of 0.6%, in the physical and mechanical properties of lightweight concrete using expanded clay. Slump tests, axial compression test, flexural tensile test, indirect tensile test and determination of water absorption, void ratio and mass density were performed. The results obtained for the concrete mixture with the use of each different fiber were compared to each other, for the understanding of how the properties were affected by the fibers. Some fibers gave significant gains in flexural tensile strength, indirect tensile strength and toughness factor, but only one showed increased compressive strength. The fibers also altered the concrete water absorption, void ratio and mass density. Finally, some suggestions for future research have been made.

Keywords: Lightweight fiber reinforced concrete. Expanded clay aggregate. Compressive strength. Flexural strength. Toughness factor. Void ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Navio americano da Primeira Guerra Mundial, SS Selma.	15
Figura 2 - Tipos de concretos leves.	16
Figura 3 – Argila expandida obtida em forno rotativo.....	18
Figura 4 - Ruptura do concreto.....	19
Figura 5 – Diagrama de tensão por deformação da matriz e de fibras de diferentes módulos de elasticidade e resistências à tração.	21
Figura 6 - Comparação da ruptura entre concretos sem fibras e com fibras de aço.	22
Figura 7 – Relação entre porosidade e permeabilidade.	23
Figura 8 – Diferença entre a disposição de fibras rígidas e flexíveis na matriz.	24
Figura 9 - Organograma do procedimento experimental	25
Figura 10 - Materiais usados no traço de referência.	26
Figura 11 - Agregados utilizados nos traços	26
Figura 12 – Quantidade de fibras usadas nos traços.....	26
Figura 13 - Fibras utilizadas nos traços.....	27
Figura 14 - Sequência de preparação do concreto	28
Figura 15 - <i>Slump test</i>	29
Figura 16 - Ensaio de compressão axial.....	30
Figura 17 – Ensaio de tração na flexão com carregamento no ponto central.....	32
Figura 18 – Esquema do ensaio de tração na flexão (cotas em centímetros).....	32
Figura 19 – Tenacidade à flexão.....	34
Figura 20 – Ensaio de compressão diametral.....	35
Figura 21 – Abatimento do tronco de cone (<i>slump</i>).	36
Figura 22 - Resistência à compressão axial.....	37
Figura 23 – Resistência à tração na flexão.	38

Figura 24 – Diagramas tensão-deformação do CLR.....	39
Figura 25 – Diagramas tensão-deformação do CLRFA.....	40
Figura 26 – Trecho ampliado do diagrama tensão-deformação do CP CLRFA 3.	40
Figura 27 – Diagramas tensão-deformação do CLRFC.....	41
Figura 28 – Trecho ampliado do diagrama tensão-deformação do CP CLRFC 1.....	41
Figura 29 – Diagramas tensão-deformação CLRFP.....	42
Figura 30 – Diagramas tensão-deformação do CLRFV.....	42
Figura 31 – Resistência à tração na compressão diametral.	43
Figura 32 – Índice de absorção de água.....	44
Figura 33 – Índice de vazios.....	44
Figura 34 – Massa específica.	45
Figura 35 - Fator de tenacidade.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do concreto leve quanto à massa específica	17
Tabela 2 – Características das fibras utilizadas no CLRF.....	27
Tabela 3 - Comparação percentual do <i>slump</i> dos CLRFs com a do CLR.....	36
Tabela 4 – Comparação percentual da resistência à compressão dos CLRFs com a do CLR.	37
Tabela 5 - Comparação percentual da resistência à tração na flexão dos CLRFs com a do CLR.....	38
Tabela 6 - Comparação percentual da resistência à tração na compressão diametral dos CLRFs com a do CLR.....	43
Tabela 7 - Comparação percentual do índice de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos CLRFs com a CLR.	45
Tabela 9 - Comparação percentual do fator de tenacidade dos CLRFs com o do CLR.	46

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
AE	Argila expandida
ASTM	American Society for Testing and Materials
CLR	Concreto leve referencial
CLRF	Concreto leve reforçado com fibras
CLRFA	Concreto leve reforçado com fibras de aço
CLRFC	Concreto leve reforçado com fibras de carbono
CLRFP	Concreto leve reforçado com fibras de polipropileno
CLRFV	Concreto leve reforçado com fibras de vidro
CP	Corpo de prova
EN	European Normalización
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
NBR	Norma brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.2 Estrutura do trabalho	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Concreto leve.....	15
2.2 Concreto leve reforçado com fibras.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 Preparação do concreto	28
3.2 Determinação da consistência do concreto	28
3.3 Cura do concreto.....	30
3.4 Ensaio de compressão axial.....	30
3.5 Ensaio de tração na flexão.....	31
3.6 Ensaio de tração na compressão diametral.....	34
3.7 Determinação do teor de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	35
4 RESULTADOS.....	36
4.1 Consistência do concreto	36
4.2 Resistência à compressão	37
4.3 Resistência à tração na flexão	38
4.4 Resistência à tração na compressão diametral	43
4.5 Teor de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	44
4.6 Fator de tenacidade	46
5 DISCUSSÕES.....	47
6 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o principal material de construção utilizado em todo o mundo. Portanto, as pesquisas com vista a estudar suas deficiências e encontrar alternativas que tragam melhorias à sua aplicação têm sido recorrentes. Dentre suas limitações, é possível destacar a baixa relação entre peso específico e resistência, o comportamento frágil do material, com baixa resistência à tração e sua baixa capacidade de deformação (MINDESS, YOUNG e DARWIN, 2002).

Uma alternativa que vem ganhando força no setor da construção civil é a produção de concretos com agregados leves, que resultam na diminuição da massa específica do material e, conseqüentemente, na redução dos esforços solicitantes e do peso da estrutura, além da diminuição dos custos com o transporte e a montagem de estruturas pré-fabricadas (ROSSIGNOLO, 2009).

Entretanto, os agregados leves não solucionam o problema da baixa resistência à tração do concreto. Para isso, pode-se utilizar o recurso de reforçar a matriz cimentícia com a adição de fibras, as quais são corriqueiramente acrescentadas a diversos tipos de compósitos visando um melhor desempenho à tração. Na construção civil têm-se os exemplos das fibras de vidro empregadas em reservatórios de água e das fibras de amianto, presentes por muito tempo na fabricação de placas de cobertura. Em ambos os casos, as fibras possibilitam a obtenção de peças com formatos diversificados, além de resistir às solicitações de tração às quais tais peças são comumente expostas.

Existem diversos tipos de fibras, cada uma com peculiaridades relacionadas ao seu desempenho no reforço mecânico do concreto leve. Portanto, é necessária uma análise minuciosa sobre o comportamento físico e mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, para a compreensão de quais delas serão oportunamente utilizadas em determinadas situações.

1.1 Objetivos

Na busca por novas tecnologias de construção, procuram-se desenvolver materiais que possam trazer melhorias às propriedades mecânicas do concreto leve. Nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo principal discutir as consequências da adição de quatro fibras – de aço, carbono, polipropileno e vidro – no comportamento físico e mecânico de um concreto leve produzido a partir de agregados de argila expandida em substituição aos agregados tradicionais de brita. Em específico, foram estudadas a consistência, a resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão, a resistência à tração na compressão diametral, a porosidade, o teor de absorção de água, a massa específica e o fator de tenacidade dos traços de concreto produzidos. Foram produzidos cinco traços, os quais serão chamados da seguinte forma: concreto leve referencial (CLR), sem adição de fibras, concreto leve reforçado com fibras de aço (CLRFA), concreto leve reforçado com fibras de carbono (CLRFC), concreto leve reforçado com fibras de polipropileno (CLRFP) e concreto leve reforçado com fibras de vidro (CLRFV).

1.2 Estrutura do trabalho

Esta monografia encontra-se dividida em 6 capítulos.

O capítulo 2 se refere à revisão bibliográfica. Na primeira parte, o concreto leve é abordado em uma perspectiva histórica e suas principais propriedades físicas caracterizadas. Em seguida, discorre-se sobre a natureza e as peculiaridades do concreto leve reforçado com fibras. O capítulo 3 traz a descrição dos materiais utilizados na realização da pesquisa, bem como os detalhes dos métodos aplicados na produção dos traços de concreto e na execução dos ensaios de obtenção da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, compressão axial, tração na flexão a três pontos, tração na compressão diametral e determinação de porosidade, teor de absorção de água e massa específica. No capítulo 4, os resultados obtidos na realização dos ensaios são apresentados esquematicamente.

O capítulo 5 destina-se à interpretação e análise crítica dos resultados apresentados, com discussões e comparações dos desempenhos dos diferentes traços produzidos nos testes aos quais foram submetidos. No capítulo 6 são resumidas as conclusões alcançadas após a realização desta pesquisa.

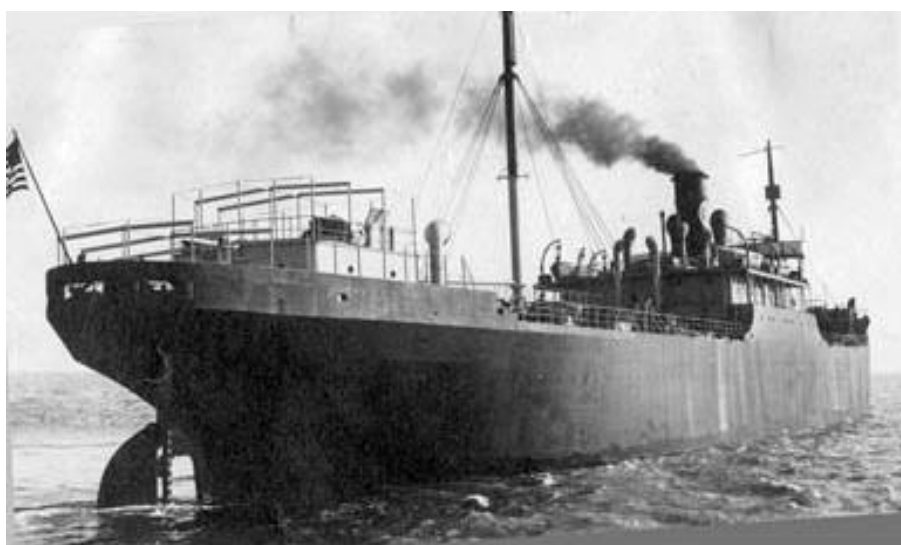
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto leve

O registro mais antigo do uso do concreto leve, de acordo com Rossignolo (2009) data de 1100 a.C., quando construtores pré-colombianos, de uma região correspondente ao atual México, misturaram pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para construir elementos estruturais. Posteriormente, registrou-se a aplicação do material nas construções do Porto de Cosa (273 a.C.), do Panteão de Roma (27 a.C.) e do Coliseu (75 d.C.), evidenciando a sua importância para o Império Romano. Além dessas importantes obras, a Catedral de Santa Sofia, construída durante o Império Bizantino (532 d.C.), em Istambul, também contou com o seu emprego.

Desde então, o uso do concreto leve foi inexpressivo, até o início do século XX, quando, em 1918, na cidade de Kansas, Estados Unidos, se desenvolveu a produção de agregados expandidos compostos por xisto, argila e ardósia, fabricados em fornos rotativos. Tal acontecimento alavancou o emprego do material, que compôs embarcações americanas nas duas grandes guerras mundiais, a exemplo do SS Selma (Figura 1 – Navio americano da Primeira Guerra Mundial, SS Selma), além de estruturas de edificações vultosas, como no ginásio da Westport High School, em Kansas e no hotel Chase-Park Plaza, em St. Louis.

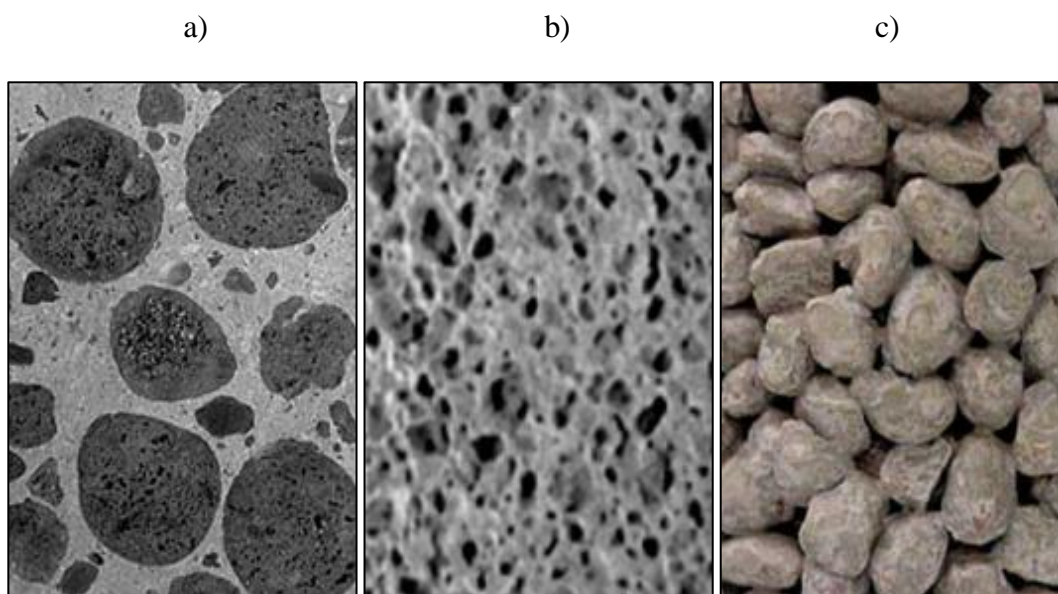
Figura 1 – Navio americano da Primeira Guerra Mundial, SS Selma.



Fonte: Hill (2014).

Comumente aplicado em enchimento e regularização de lajes, pisos e elementos de vedação, o concreto leve apresenta um maior potencial de isolamento térmico e acústico e massa específica reduzida, se comparado ao convencional. Tal redução é promovida pela substituição de parte do material sólido da mistura por vazios. São três os locais diferentes onde os vazios podem se encontrar: nas partículas dos agregados, conhecidos como agregados leves; na pasta de cimento, ficando esse tipo de concreto conhecido como concreto celular; e entre as partículas dos agregados, como ocorre no concreto sem finos (NEVILLE, 2016). A Figura 2 apresenta esses três tipos de concretos leves.

Figura 2 - Tipos de concretos leves. a) Com agregados leves, b) Celular, c) Sem finos.



Fonte: Rossignolo (2009).

Em concretos com agregados leves, estes determinam de forma preponderante as propriedades mecânicas do compósito, de acordo com suas características e quantidade utilizada, a qual comumente é de cerca de 70% do peso total (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Assim sendo, a escolha de um agregado de baixa densidade, em relação aos agregados comuns de areia e brita, é fundamental para o alcance do objetivo relativo ao peso da estrutura, por exemplo.

A massa específica do concreto leve e a sua resistência à compressão estão fortemente associadas, sendo possível classificar esse tipo de concreto em três categorias diferentes: concreto de baixa massa específica, concreto de moderada resistência e concreto leve estrutural (NEVILLE, 2016). A Tabela 1 traz os detalhes de tal classificação.

Tabela 1 - Classificação do concreto leve quanto à massa específica

Categoria	Massa específica	Resistência à compressão
Concreto de baixa massa específica	300 a 800 kg/m ³	Abaixo de 7 MPa
Concreto de moderada resistência	800 a 1.350 kg/m ³	Entre 7 e 17 MPa
Concreto leve estrutural	1.350 a 1.900 kg/m ³	Acima de 17 MPa

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

O ACI 213-R03 (2003) define o concreto leve estrutural como sendo aquele que apresenta resistência à compressão aos 28 dias maior que 17 MPa e uma massa específica entre 1120 e 1920 kg/m³.

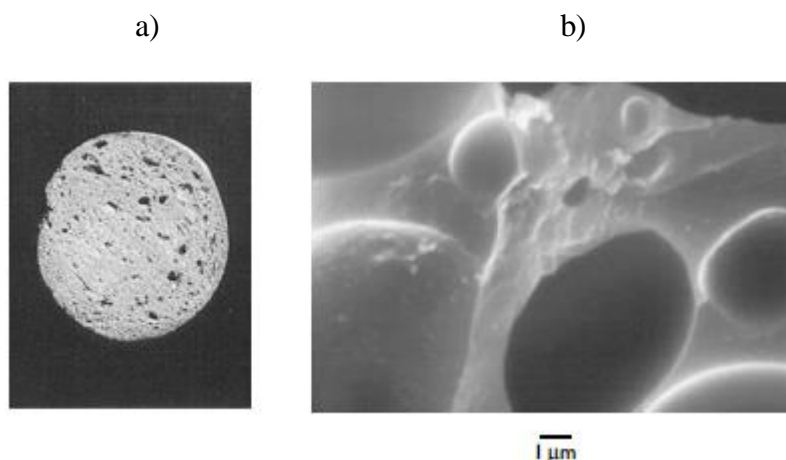
Há uma gama de agregados leves com reduzida massa específica e com diferentes graus de porosidade em sua estrutura celular, e de acordo com suas propriedades, determinadas aplicações são sugeridas. Há aqueles originados de rochas vulcânicas (pedrapomes e escória) e outros que são artificialmente produzidos através do aquecimento de matérias primas provenientes de, por exemplo, argilas, ardósia e folhelho (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Destacando-se por sua leveza, permeabilidade e durabilidade, a argila expandida é um material cerâmico de formato arredondado produzido pela queima da argila natural em fornos rotativos ou em fornos de sinterização (MORAVIA, OLIVEIRA, *et al.*, 2006). Em sua fabricação, a matéria-prima é esmagada até o tamanho desejado, ou moída e compactada. Quando é então aquecida a cerca de 1000-1200 °C, o material incha. Isto se deve à rápida geração de gás a partir da combustão de pequenas quantidades de material orgânico. A baixa viscosidade do material permite que ele se expanda, e um revestimento viscoso impermeável se forma no exterior, impedindo que o gás escape muito rapidamente. O material resultante pode então ser triturado e peneirado para obter a distribuição de tamanho de partícula desejada (ALEXANDER e MINDESS, 2005). A Figura 3 mostra os poros resultantes do processo de fabricação da argila expandida.

Os agregados produzidos em fornos rotativos, como as argilas expandidas, normalmente apresentam forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, possibilitando a obtenção de boa trabalhabilidade com baixas relações água/cimento. Entretanto, em função do formato esférico, esse tipo de agregado apresenta maior facilidade de segregação do que o produzido por sinterização (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 3 – Argila expandida obtida em forno rotativo.

a) Partícula de 16 mm; b) Micrografia da estrutura interna.



Fonte: Alexander e Mindess (2005).

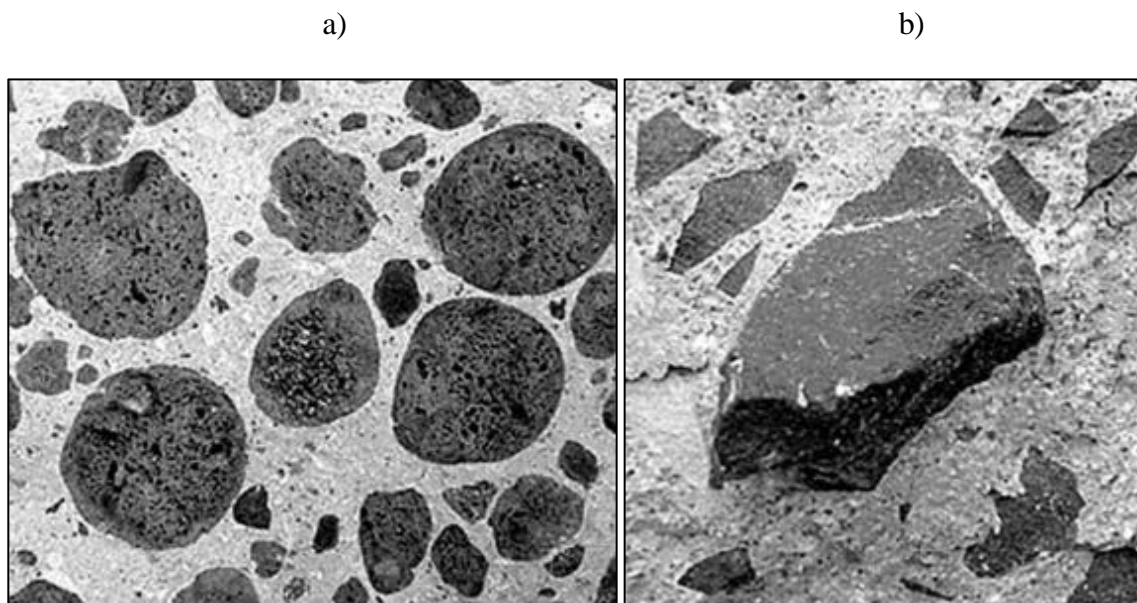
De acordo com Bremner e Holm (1995), o módulo de deformação da argila expandida semelhante ao da matriz cimentícia implica em uma distribuição mais uniforme da tensão no compósito. Desse modo, o agregado suporta apenas a tensão média aplicada ao concreto. Rossignolo (2009) traz que no concreto com brita basáltica, a ruptura se dá na interface entre matriz e agregado, afinal o módulo de deformação da brita é muito superior ao da matriz. Já no concreto com argila expandida a linha de fratura atravessa os agregados, não só pela semelhança do módulo de deformação, mas também pela melhor qualidade da zona de transição pasta-agregado.

Neville (2016) cita a forte aderência entre o agregado leve de argila expandida e a matriz devido à superfície áspera do agregado e ao fato de este reter parte da água de amassamento do concreto, a qual entra em contato com o cimento não hidratado, sobretudo na região de interface entre o agregado e a pasta de cimento.

O módulo de deformação do concreto leve se relaciona ao tipo e à quantidade de agregado leve nele contido. Quanto mais semelhantes os módulos de deformação do agregado e da pasta de cimento, melhor será o comportamento do concreto no regime elástico, podendo apresentar comportamento linear até cerca de 80% do carregamento último, enquanto em concretos convencionais esse comportamento se mantém até cerca de 60%. Entretanto, o módulo de deformação do concreto leve varia entre 50% e 80% do valor do concreto de massa específica normal, para concretos com resistência à compressão entre 20 e 50 MPa (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Rossignolo (2009), a resistência à tração dos concretos leves, tanto em ensaios de compressão diametral quanto em ensaios de flexão, apresenta valores mais baixos que os concretos convencionais para o mesmo nível de resistência à compressão. Isso se deve ao elevado volume de vazios dos agregados leves.

Figura 4 - Ruptura do concreto. a) Concreto com agregados leves, b) Concreto convencional.



Fonte: Rossignolo (2009).

2.2 Concreto leve reforçado com fibras

Entre as adições utilizadas para melhorar uma gama de propriedades físico-estruturais do concreto leve, as fibras naturais e sintéticas se destacam pela capacidade de minimizar o aparecimento das fissuras originadas pela retração plástica do concreto quando de seu processo de endurecimento. No caso, origina-se um material compósito reforçado, onde a matriz é o concreto de cimento Portland, ao qual são incorporadas fibras, elementos descontínuos e aleatoriamente distribuídos, em que o comprimento predomina sobre a seção transversal. Apesar de não serem tão eficientes a esforços de tração quanto as armaduras de aço, as fibras, por tenderem a se espalhar mais, são melhores no controle de fissuras (BENTUR e MINDESS, 2007).

Historicamente, o uso de fibras para fortalecimento de materiais com baixa resistência a tração acontece há cerca de 3500 anos, quando foram utilizados tijolos reforçados com palha para construir uma colina em Aqar Quf, próximo à atual cidade de Bagdá (BENTUR e MINDESS, 2007). Porém, somente no final da década de 60, os conhecimentos técnico-científicos relacionados às diferentes possibilidades de aplicações práticas do concreto com fibras possibilitaram o aparecimento das primeiras aplicações desse tipo de material compósito (MINDESS, YOUNG e DARWIN, 2002).

O tipo de fibra, a sua forma e tamanho, além da sua fração volumétrica na dosagem têm efeito significativo nas propriedades do concreto reforçado com esse material. Por exemplo, fibras curtas discretas aleatoriamente orientadas são capazes de prevenir ou controlar a propagação de fissuras. A fibra induz uma distribuição homogênea das tensões no concreto, o que provoca uma melhor exploração da matriz de elevada resistência (GENCEL, OZEL e MARTINEZ-BARRERA, 2011)

A adição de fibras pode afetar a consistência do concreto. As alterações sentidas nesse quesito estão relacionadas aos teores de fibra e argamassa, bem como ao tipo e ao comprimento das fibras. Fibras sintéticas conferem uma maior redução de *slump* ao concreto que fibras de metal. Quanto menor o teor de argamassa e maior o teor e o comprimento das fibras, menor tenderá a ser o *slump* do concreto (ZELLERS, 2009).

O aumento do teor de fibras no CLRFA acarreta na obtenção de uma consistência mais sólida. Por outro lado, as fibras de aço atuaram impedindo a segregação do agregado leve durante a compactação do concreto (DOMAGAŁA, 2011; HUBERTOVA e HELA, 2016).

Dessa forma, é conveniente destacar dois fatores preponderantes para a redução da fluidez do concreto leve reforçado com fibras (CLRF): o primeiro é que como a superfície específica das fibras é maior que a dos agregados leves, estas requerem maior quantidade de argamassa para envolvê-las; o segundo diz respeito à rede tridimensional formada pelas fibras, que restringe a mobilidade dos agregados (LI, NIU, *et al.*, 2017).

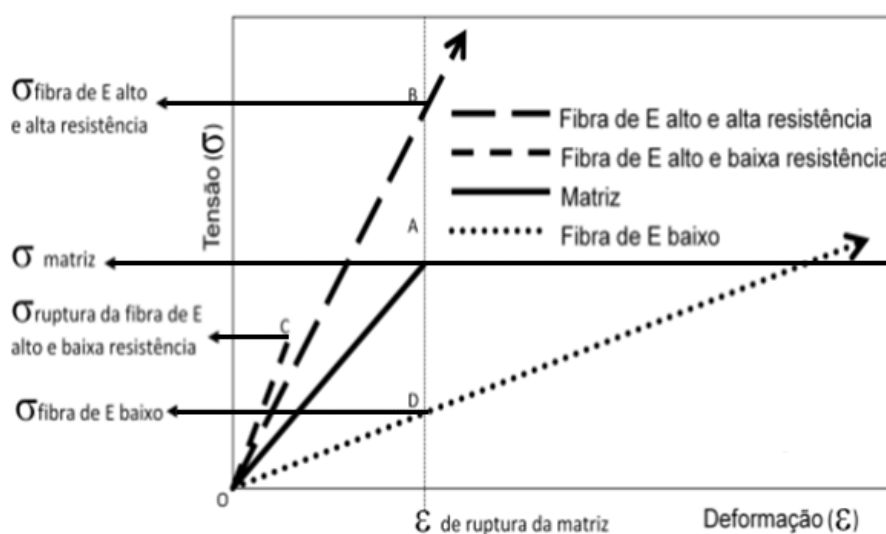
Com relação à resistência à compressão do concreto, a literatura apresenta resultados de diferenças significativas. Por isso, segundo o ACI 544.2R (1989), as fibras geralmente têm um efeito mínimo, podendo aumentar ou reduzir ligeiramente o resultado do teste em comparação com um traço equivalente sem o uso de fibras. Porém, apesar de haver pesquisas que ratifiquem essa ideia (MAZAHERIPOUR, GHANBARPOUR, *et al.*, 2011;

YIN, TULADHAR, *et al.*, 2015; KAYALI, HAQUE e ZHU, 2003), há relatos de casos nos quais as fibras aumentam significativamente a resistência à compressão do concreto (DÜZGÜN, GÜL e AYDIN, 2005; CAMPIONE, MIRAGLIA e PAPIA, 2001; RAO, KUMARI, *et al.*, 2013; DHAKAL, WANG e MANDER, 2005; A, S e NAJIM, 2013).

A Figura 5 apresenta um gráfico de tensão-deformação com uma reta referente à tensão numa matriz de concreto (O-A), e três retas representando fibras com diferentes características: uma com baixo módulo de elasticidade (O-D), outra com elevado módulo de elasticidade, mas baixa resistência à tração (O-C), e ainda outra que alia resistência à tração e módulo de elasticidade elevados (O-B).

Admitindo-se que tanto o embutimento da fibra na matriz quanto a aderência entre elas sejam perfeitos, quando a matriz cimentícia sofre uma tensão próxima à sua respectiva tensão de ruptura, a fibra de baixo módulo de elasticidade sente uma tensão bem menor que a da matriz. Dessa forma, caso o teor de fibras não seja muito elevado, esse tipo de fibra não apresenta capacidade de reforço. No caso da fibra O-C, apesar de apresentar alto módulo de elasticidade, as fibras já terão se rompido antes da ruptura da matriz, o que inviabiliza também a sua capacidade de suporte à matriz após a sua ruptura. A fibra O-B, entretanto, apresenta um elevado nível de tensão quando ocorre a ruptura da matriz, e após o início da fissuração, continua resistindo às tensões. Portanto, serão fibras com capacidade de reforço somente aquelas com maior capacidade de deformação na ruptura e maior resistência à tração que a matriz (FIGUEIREDO, 2011)

Figura 5 – Diagrama de tensão por deformação da matriz e de fibras de diferentes módulos de elasticidade e resistências à tração.

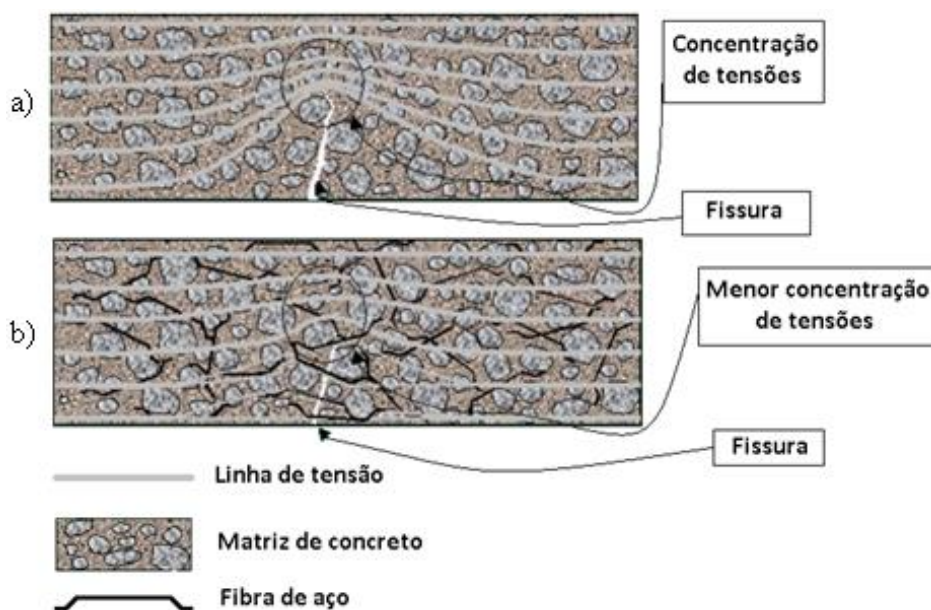


Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011).

Pode-se dizer assim que a eficiência de reforço das fibras de baixa resistência e baixo módulo de elasticidade será tão maior quando menores forem o módulo de elasticidade e a resistência do concreto, como ocorre quando este material está no estado fresco e no início de seu processo de endurecimento. Assim, fibras de baixo módulo de elasticidade, como as de polipropileno, servem para a redução do surgimento de fissuras por retração da pasta de cimento (TANESI e FIGUEIREDO, 2001).

Ao se adicionar fibras ao concreto, o compósito deixa de ser frágil, devido às fibras funcionarem como pontes de transferência das tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões em suas extremidades. Isso possibilita a redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto, e lhe dá um caráter pseudo-dúctil, com certa capacidade portante pós-fissura (FIGUEIREDO, 2000). A Figura 6 ilustra a distribuição de tensões no concreto promovida pelas fibras de aço.

Figura 6 - Comparação da ruptura entre concretos sem fibras e com fibras de aço. a) Concreto convencional, b) Concreto reforçado com fibras de aço.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

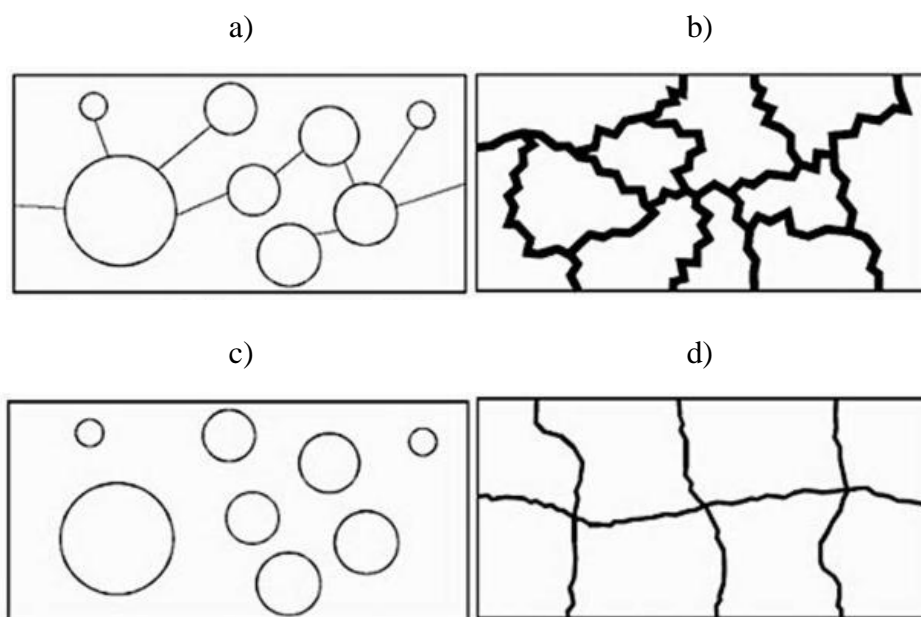
De acordo com Medeiros (2012), a resistência à tração na compressão diametral apresenta significativos aumentos devidos à incorporação de fibras ao concreto. Migliorini *et al.* (2010) alcançaram ganhos de 47,5% utilizando fibras de aço com o teor de 1% em um concreto convencional aos 28 dias.

Entretanto, no ACI 544.2R (1989) consta que o resultado do ensaio de compressão diametral deve considerar apenas a carga aplicada até o surgimento da primeira fissura sofrida pelo CP, e a identificação da ocorrência dessa primeira fissura é difícil de ser feita sem a utilização de extensômetros ou outro tipo de equipamento de detecção de fissuras.

Além de um bom desempenho mecânico, tem se buscado cada vez mais desde a fase de projeto de uma estrutura, a durabilidade do concreto. Nesse contexto, tem-se a permeabilidade do concreto como principal fator de deterioração, visto que a água traz consigo alguns íons e gases nocivos ao compósito (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Assim, surge a preocupação com a possibilidade da incorporação de vazios ao concreto pelo fato dos agregados leves induzirem a uma maior permeabilidade do concreto. Entretanto, de acordo com Rossignolo (2009), a distribuição uniforme de tensões internas, reduzindo a formação de microfissuras, a baixa porosidade da interface entre a argila expandida e a pasta de cimento e a alta ancoragem da pasta ao agregado, proporcionada pela rugosidade da superfície deste, conferem ao concreto leve com argila expandida baixa permeabilidade, apesar dos vazios nos agregados. A diferença entre porosidade e permeabilidade está ilustrada na Figura 7, que evidencia a necessidade da conectividade entre os poros do concreto para o transporte das substâncias deletérias, que afetam a durabilidade do material.

Figura 7 – Relação entre porosidade e permeabilidade. a) Alta porosidade, baixa permeabilidade, b) Poroso, alta permeabilidade, c) Poroso, não permeável, d) Baixa porosidade/ alta permeabilidade.

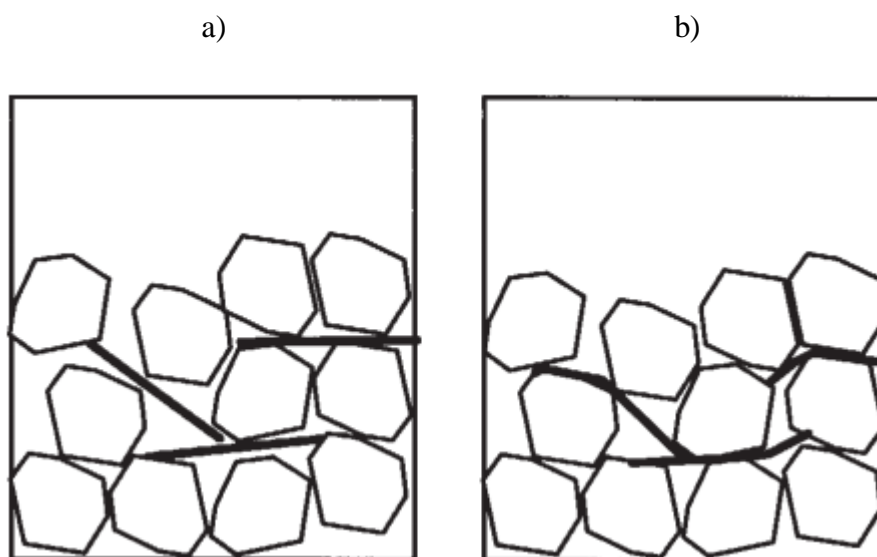


Fonte: Eurolightcon (1998 apud ROSSIGNOLO, 2009, p. 74).

Por outro lado, a adição de fibras à matriz de concreto pode reduzir o índice de empacotamento no compósito, e quanto menor esse índice, maior a sua porosidade. De acordo com Silva (2006), características como a flexibilidade das fibras contribuem para o aumento do empacotamento, pela facilidade que elas têm de se moldar aos espaços existentes entre os agregados. Dessa forma, as fibras mais rígidas tendem a conferir maior porosidade ao concreto.

Outros dois fatores influenciam na porosidade da região de interação entre fibra e matriz, sendo proporcionais a ela: o comprimento da fibra e o tamanho do agregado (LARRARD, 1999). A Figura 8 mostra a diferença da disposição das fibras rígidas e flexíveis na matriz.

Figura 8 – Diferença entre a disposição de fibras rígidas e flexíveis na matriz. a) Fibras rígidas, b) Fibras flexíveis.

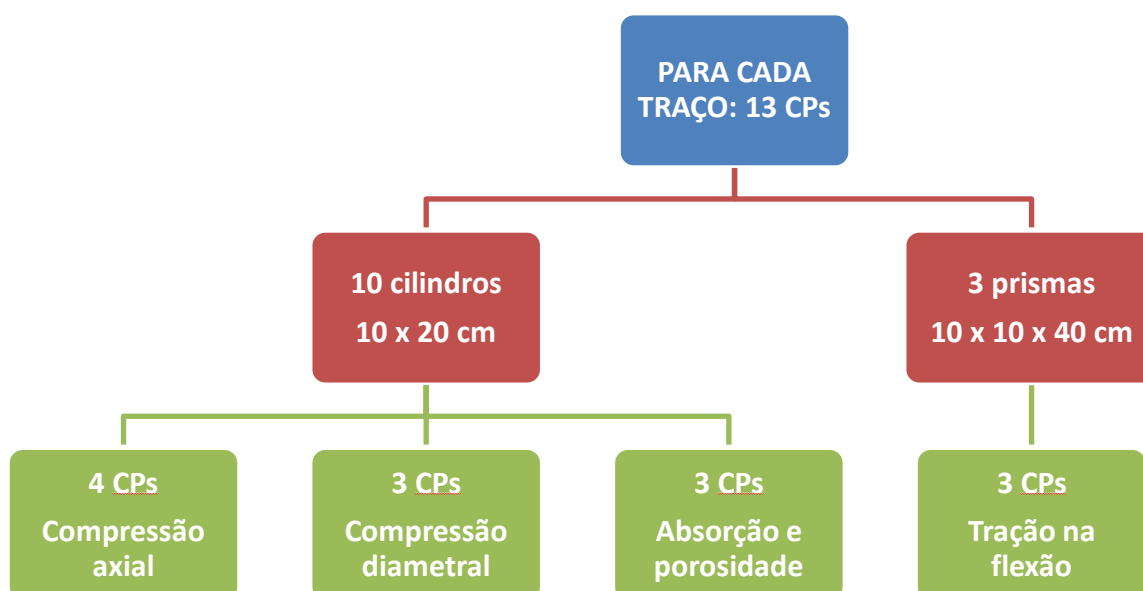


Fonte: Larrard (1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidos cinco diferentes traços de concreto, sendo um de referência, sem adição de fibras, e os outros quatro, cada um, com a mesma quantidade de cimento, agregados, água e aditivo plastificante, porém com adição de diferentes fibras. Foram elas: fibras de aço, carbono, polipropileno e vidro. Todos os procedimentos de produção de concreto e de ensaios de laboratório foram realizados no Núcleo de Tecnologia Industrial da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, no período de outubro de 2017 a janeiro de 2018. A Figura 9 traz o organograma do procedimento experimental, com as quantidades de corpos de provas (CPs) produzidos para cada ensaio.

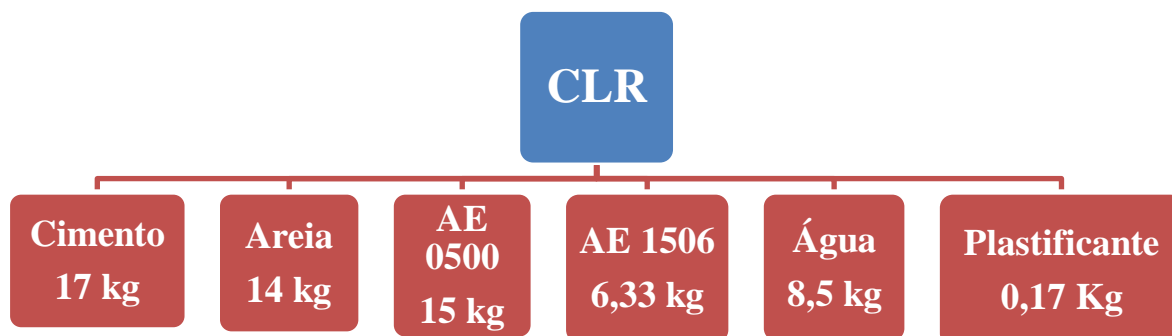
Figura 9 - Organograma do procedimento experimental



Fonte: Autor.

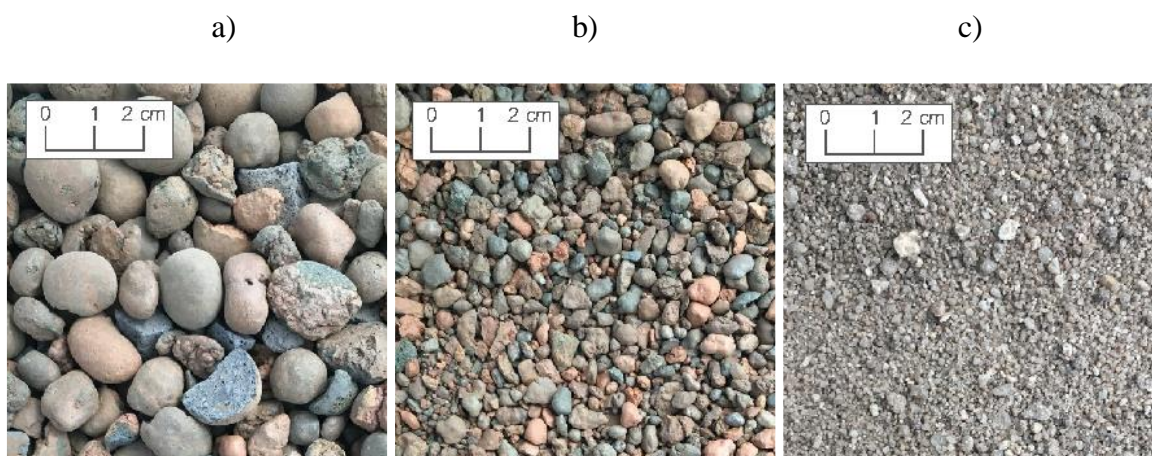
Para a produção do CLR, utilizaram-se os materiais e quantidades apresentados na Figura 10. Os agregados utilizados são mostrados na Figura 11.

Figura 10 – Materiais e quantidades usados no traço de referência.



Fonte: Autor.

Figura 11 - Agregados utilizados nos traços. a) AE 1506, b) AE 0500, c) Areia.

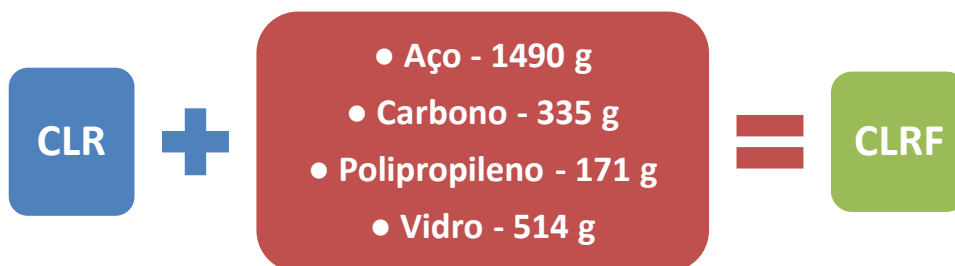


Fonte: Acervo pessoal.

O teor de fibras foi fixado em 0,6% do volume total de concreto de cada traço, sendo elas usadas nas quantidades apresentadas na

Figura 12. A Figura 13 traz as imagens das fibras utilizadas.

Figura 12 – Quantidade de fibras usadas nos traços



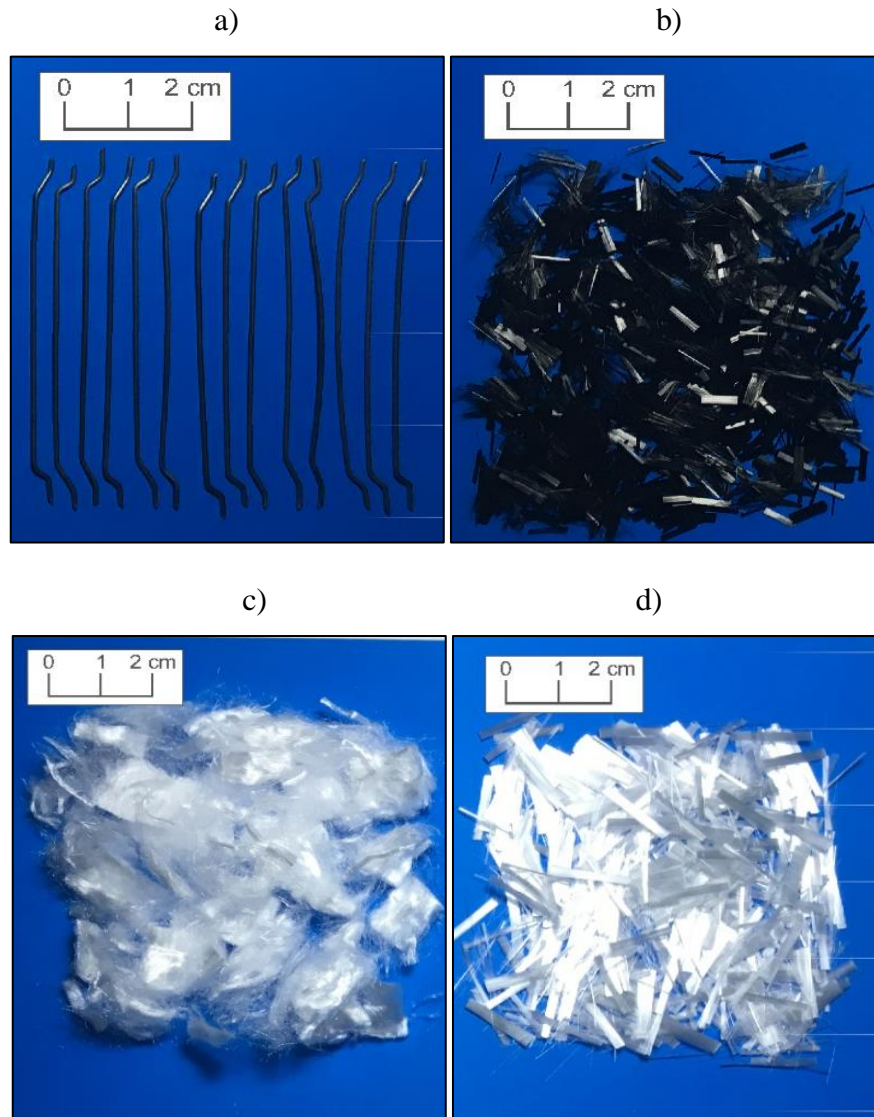
Fonte: Autor.

Tabela 2 – Características das fibras utilizadas no CLRF

Característica	Fibra			
	Aço	Carbono	Polipropileno	Vidro
Comprimento (mm)	60	6	12	12
Diâmetro equivalente (mm)	0,75	0,007	0,018	0,015
Densidade (g/cm ³)	7,84	1,8	0,9	2,7
Fator de forma	80	857	667	800
Resistência à tração (MPa)	1100	3530	300	1698
Módulo de elasticidade (GPa)	210	240	3	72

Fonte: Fichas técnicas das fibras utilizadas.

Figura 13 - Fibras utilizadas nos traços. a) Aço, b) Carbono, c) Polipropileno, d) Vidro.

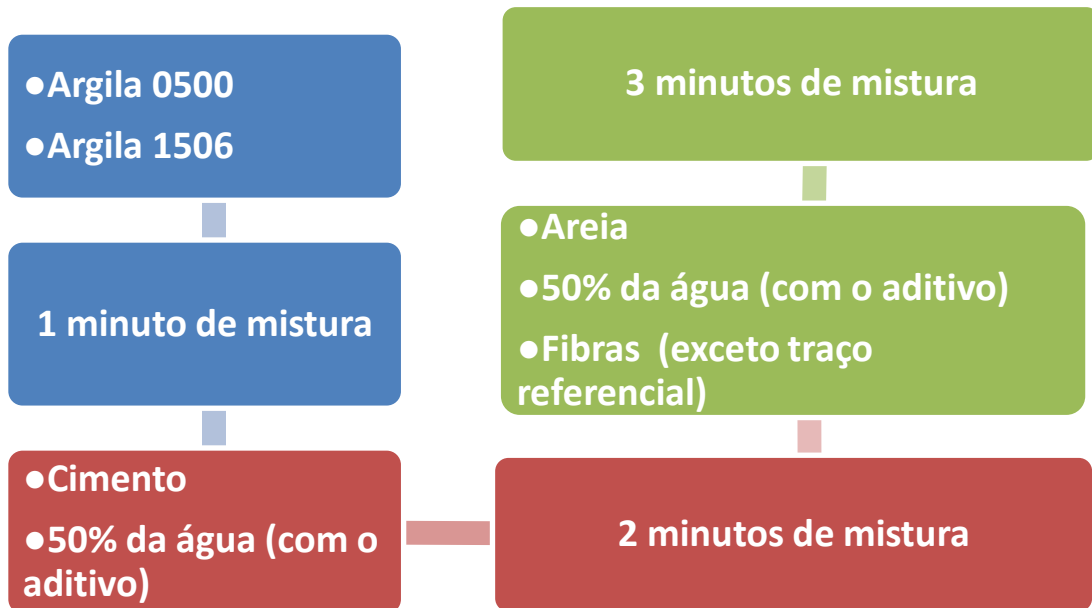


Fonte: acervo pessoal.

3.1 Preparação do concreto

A preparação do concreto ocorreu em uma betoneira de 120 litros, obedecendo à ordem de adição de materiais e tempo de mistura mostrados na Figura 14:

Figura 14 - Sequência de preparação do concreto



Fonte: Autor.

As fibras foram espalhadas manualmente na betoneira com o objetivo de que se distribuíssem da forma mais homogênea possível por todas as porções do material, evitando acúmulo de fibras em determinada região, que poderia vir a dificultar o seu empacotamento pela matriz cimentícia.

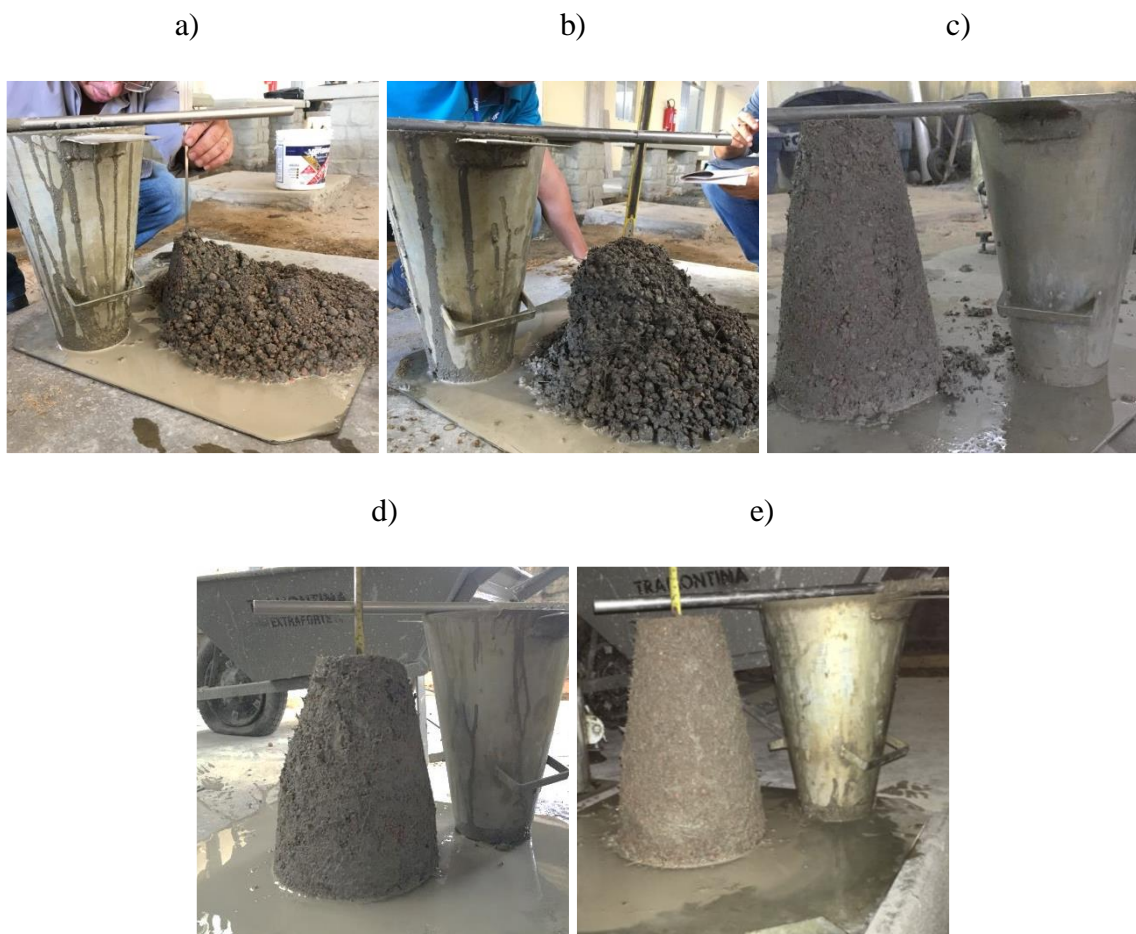
3.2 Determinação da consistência do concreto

Existem diferentes métodos normatizados destinados a mensurar a consistência do concreto, como o espalhamento pelo cone de Abrams, tratado pela NBR 15823-2 (2017), o abatimento do tronco de cone, descrito na NBR NM 67 (1998), e o consistômetro VeBe, presente na norma NBR 16312-3 (2015). Cada um desses métodos se aplica a concretos de diferentes características.

No consistômetro VeBe, mede-se o tempo de vibração necessário para que um tronco de cone seja remodelado, assumindo a forma cilíndrica. Esse ensaio é indicado para concretos de consistência seca, cuja compactação é feita com rolo. Já o espalhamento pelo cone de Abrams é destinado a concretos auto adensáveis. No ensaio, é medido o diâmetro final da massa de concreto acomodada após a retirada do molde. O abatimento do tronco de cone, por sua vez, é empregado em uma faixa intermediária de concretos plásticos e coesivos, que apresentem no mínimo 10 mm de assentamento. Neste ensaio é medida a diferença entre a altura do molde e a da massa de concreto após o desmolde.

Para este trabalho foi realizado o ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*) em todos os traços (Figura 15), não só por ser esse o ensaio aplicável aos concretos de uma faixa intermediária de consistência, mas também pela necessidade de comparação da consistência dos diferentes traços entre si.

Figura 15 - Slump test. a) Referencial, b) Aço, c) Carbono, d) Polipropileno, e) Vidro.



Fonte: Acervo pessoal.

3.3 Cura do concreto

A cura é um processo cuja importância reside em impedir a evaporação precoce da água de amassamento, garantindo a disponibilidade da água para a reação de hidratação do cimento, que é responsável pelo ganho de resistência do concreto. Por essa razão, para a realização de ensaios em concreto endurecido é necessário submeter os corpos de provas à cura.

Dessa forma, os corpos de prova foram submetidos à cura por imersão em tanques contendo água com temperatura média de 26°C. Os CPs foram levados ao tanque logo após o desmolde e permaneceram assim até os dias de realização do ensaio (28 dias após a produção do concreto). Os cilindros e os prismas foram desmoldados, respectivamente, 24 e 48 horas após a moldagem.

3.4 Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial (Figura 16) consiste em submeter um CP cilíndrico à compressão na direção longitudinal. A carga marcada no momento da ruptura do CP é utilizada para a obtenção da resistência à compressão axial.

Para cada traço, foram ensaiados 4 corpos de prova com diâmetro e altura de 10 e 20 centímetros, respectivamente, aos 28 dias de idade, de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (2007).

Figura 16 - Ensaio de compressão axial



Fonte: Acervo pessoal.

3.5 Ensaio de tração na flexão

Diferentes normas técnicas em todo o mundo tratam do ensaio de tração na flexão do concreto, entre elas a norma brasileira NBR 12142 (2010). Seu procedimento estabelece a ruptura de corpos de prova prismáticos simulando uma viga simplesmente apoiada, com duas cargas concentradas nos terços do vão. A norma NBR 12142 (2010) traz o cálculo da resistência à tração na flexão.

A japonesa JSCE-SF4 (1984) é destinada especificamente ao concreto reforçado com fibras de aço e traz procedimentos de cálculo para o fator de tenacidade e para a resistência à tração na flexão, apresentando carregamentos concentrados nos terços do vão.

A norma europeia EN 14651 (2005), para concreto reforçado com fibras de aço, traz um método de ensaio com carregamento aplicado no centro do vão, com medição de deformação por um extensômetro instalado em um entalhe centralizado na face inferior do CP. Como resultados do ensaio, além da resistência à tração na flexão, são contempladas a resistência à tração na flexão residual, indicativo da ação das fibras, e o limite de proporcionalidade do concreto.

A ASTM C 293 (2002), dos Estados Unidos, estabelece um ensaio de tração na flexão a três pontos com um carregamento concentrado no meio do vão para a obtenção da resistência da tração na flexão.

Devido às necessidades de controlar a taxa de carregamento, medir a deformação do CP no ponto de aplicação da carga e exportar arquivos de dados deste ensaio para um *software* editor de planilhas, foi escolhida a máquina Shimadzu Autograph AG-X 300 kN (Figura 17) para a realização dos ensaios de tração na flexão.

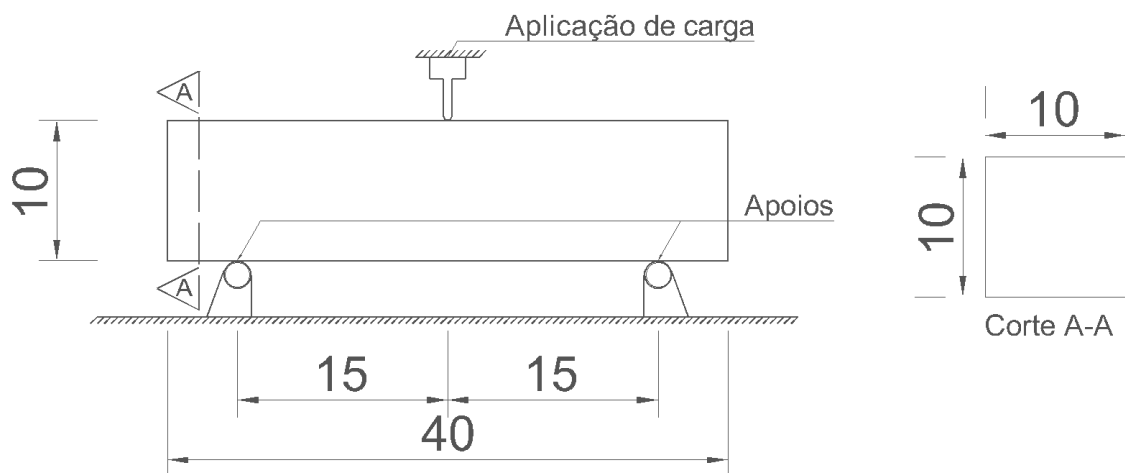
Figura 17 – Ensaio de tração na flexão com carregamento no ponto central



Fonte: Acervo pessoal.

Nesse trabalho, optou-se por seguir a norma ASTM C 293 (2002) para a determinação da taxa de carregamento do ensaio e para o cálculo da resistência à tração na flexão, pelo fato da máquina escolhida apresentar aplicação de carregamento igual à determinada pela norma. O esquema do ensaio é mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Esquema do ensaio de tração na flexão (cotas em centímetros)



Fonte: Autor.

O cálculo da taxa de carregamento é apresentado a seguir, de acordo com a ASTM C 293 (2002).

$$r = \frac{2sbd^2}{3L}$$

Onde:

r = taxa de carregamento (N/min);

s = taxa de incremento da tensão extrema nas fibras (MPa/min);

b = largura média do prisma (mm);

d = altura média do prisma (mm);

L = comprimento do vão (mm).

Assim, em obediência ao intervalo de 0,9 a 1,2 MPa/min estabelecido pela ASTM C 293 (2002), para a taxa de incremento da tensão extrema nas fibras, fixou-se o valor em 1,0 MPa/min, obtendo-se o seguinte valor de taxa de carregamento:

$$r = \frac{2 \times 1,0 \text{ MPa/min} \times 100 \text{ mm} \times (100 \text{ mm})^2}{3 \times 300 \text{ mm}} = 2222 \text{ N/min}$$

Ainda de acordo com a ASTM C 293 (2002), tem-se a seguinte equação para o cálculo da resistência à tração:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

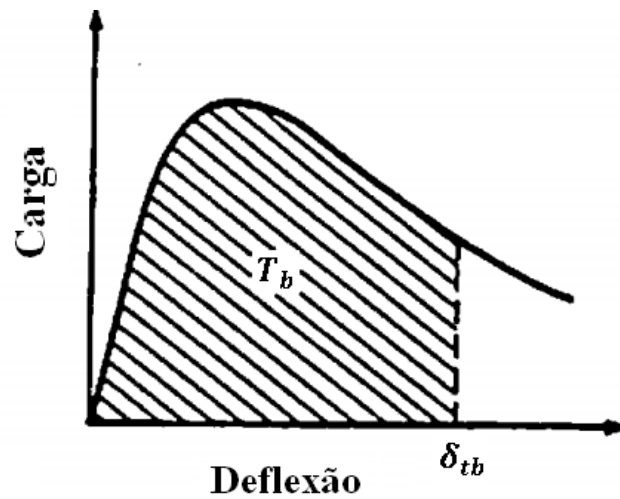
Onde:

R = resistência à tração na flexão (MPa);

P = carga máxima do ensaio (N).

Para o cálculo do fator de tenacidade, parâmetro interessante à análise da capacidade de suporte da fibra à matriz de concreto, foi seguido o procedimento determinado pela norma JSCE-SF4 (1984). O cálculo de tenacidade à flexão se iguala à área sob a curva do gráfico de tensão-deformação, conforme mostra a Figura 19. O limite de deformação do CP considerado para a obtenção da área é estabelecido pela norma como L/150 do comprimento do vão de teste, que para o ensaio realizado é de 2,0 mm. A partir do resultado da tenacidade, foi calculado o fator de tenacidade, conforme a equação a seguir.

Figura 19 – Tenacidade à flexão.



Fonte: Adaptado da JSCE-SF4 (1984).

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2}$$

Onde:

l : comprimento do vão (mm);

b : largura da seção transversal do CP (mm);

h : altura da seção transversal do CP (mm);

$\bar{\sigma}_b$: fator de tenacidade à flexão (MPa);

T_b : tenacidade à flexão (J);

δ_{tb} : deflexão igual a $l/150$ (mm).

3.6 Ensaio de tração na compressão diametral

O ensaio de tração na compressão diametral (Figura 20), desenvolvido pelo professor brasileiro Lobo Carneiro, consiste em uma forma alternativa de obtenção da resistência à tração, pois apesar de ser solicitado à compressão, o CP se rompe devido aos esforços de tração que surgem perpendicularmente à direção da aplicação da carga. Para este ensaio foram moldados corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento. Foi seguido o que determina a NBR 7222 (2011).

Os resultados deste ensaio foram obtidos pelo valor de carga indicado pelo ponteiro marcador da prensa quando este sofreu a primeira deflexão, indicando ruptura da matriz. Porém, é necessário ressaltar que não se dispunha de extensômetros nem de detectores de fissuras que pudessem identificar o momento da ruptura com exatidão.

Figura 20 – Ensaio de compressão diametral



Fonte: Acervo pessoal

3.7 Determinação do teor de absorção de água, índice de vazios e massa específica

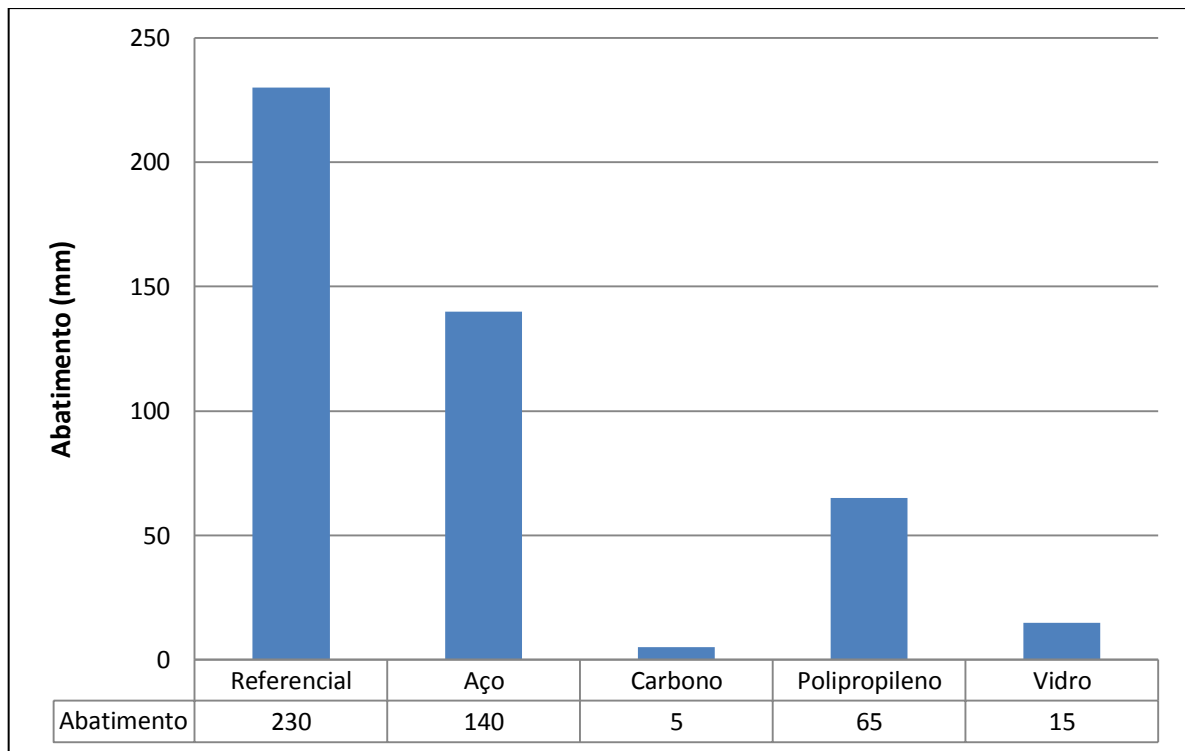
Devido à importância em se conhecer o concreto com relação à porosidade, visto que o concreto leve estudado foi essencialmente concebido pela incorporação de poros ao agregado leve, foram realizados ensaios para a determinação do teor de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos traços produzidos, em conformidade com a NBR 9778 (2005).

4 RESULTADOS

4.1 Consistência do concreto

Os resultados dos *slump tests* estão expressos na Figura 21, para cada traço produzido.

Figura 21 – Abatimento do tronco de cone (*slump*).



Fonte: Autor.

Tabela 3 - Comparação percentual do *slump* dos CLRFs com a do CLR.

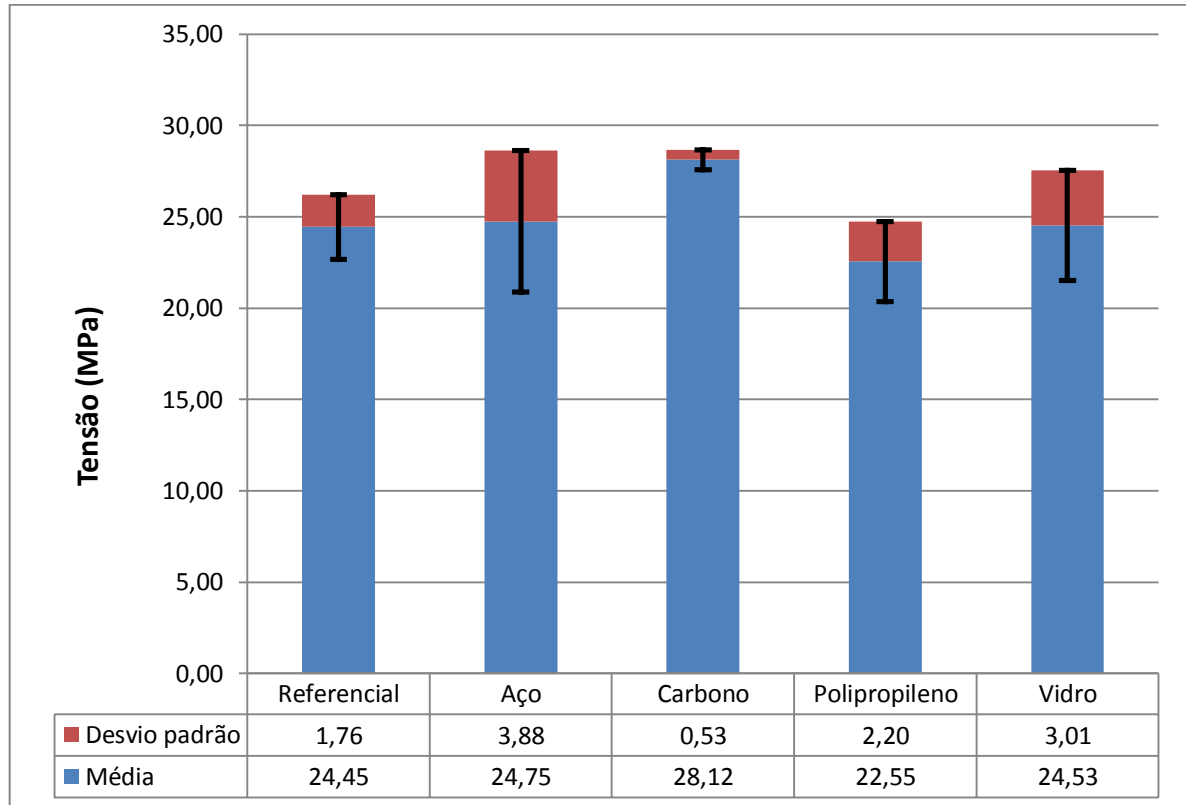
Traço	Comparação com o CLR
Aço	-39,1%
Carbono	-97,8%
Polipropileno	-71,7%
Vidro	-93,5%

Fonte: Autor.

4.2 Resistência à compressão

A Figura 22 traz os resultados para o ensaio de compressão axial aos 28 dias.

Figura 22 - Resistência à compressão axial.



Fonte: Autor.

Para efeitos comparativos, são expressos na Tabela 4 os ganhos ou perdas percentuais de resistência à compressão axial dos traços de CLRf em relação ao traço referencial:

Tabela 4 – Comparação percentual da resistência à compressão dos CLRf com a do CLR.

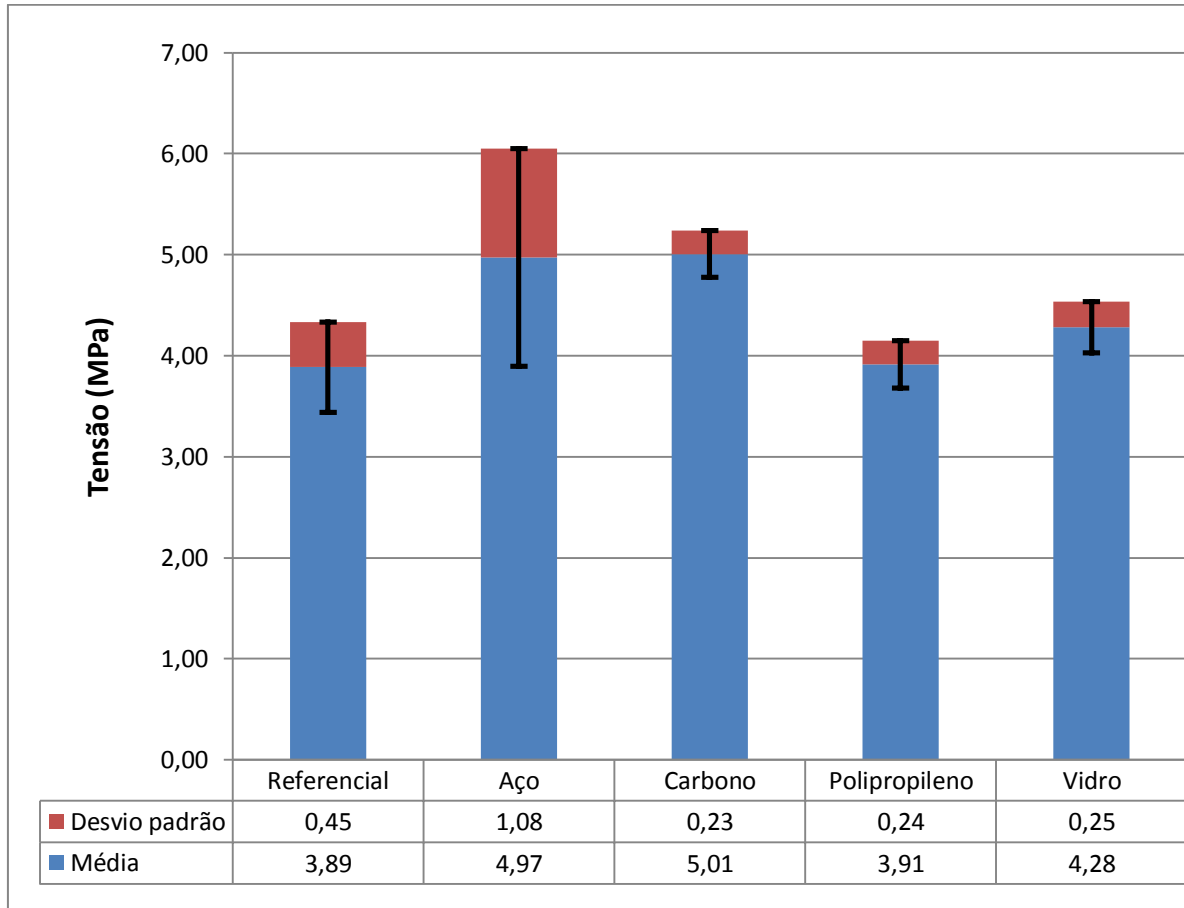
TRAÇO	COMPARAÇÃO COM O CLR
Aço	+1,2%
Carbono	+15,0%
Polipropileno	-7,8%
Vidro	+0,3%

Fonte: Autor.

4.3 Resistência à tração na flexão

A Figura 23 mostra os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão.

Figura 23 – Resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor.

A Tabela 5 traz a comparação entre a tração na flexão do CLR e dos traços de CLRF.

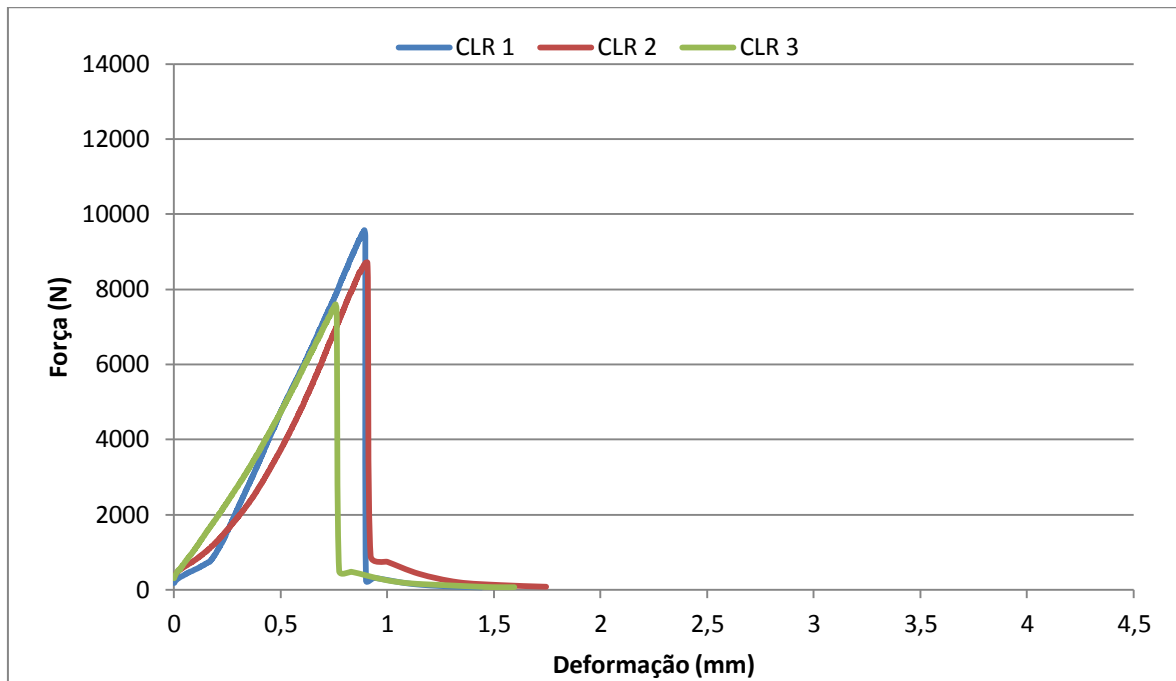
Tabela 5 - Comparação percentual da resistência à tração na flexão dos CLRFs com a do CLR.

TRAÇO	COMPARAÇÃO COM O CLR
Aço	+27,9%
Carbono	+28,8%
Polipropileno	+0,7%
Vidro	+10,1%

Fonte: Autor.

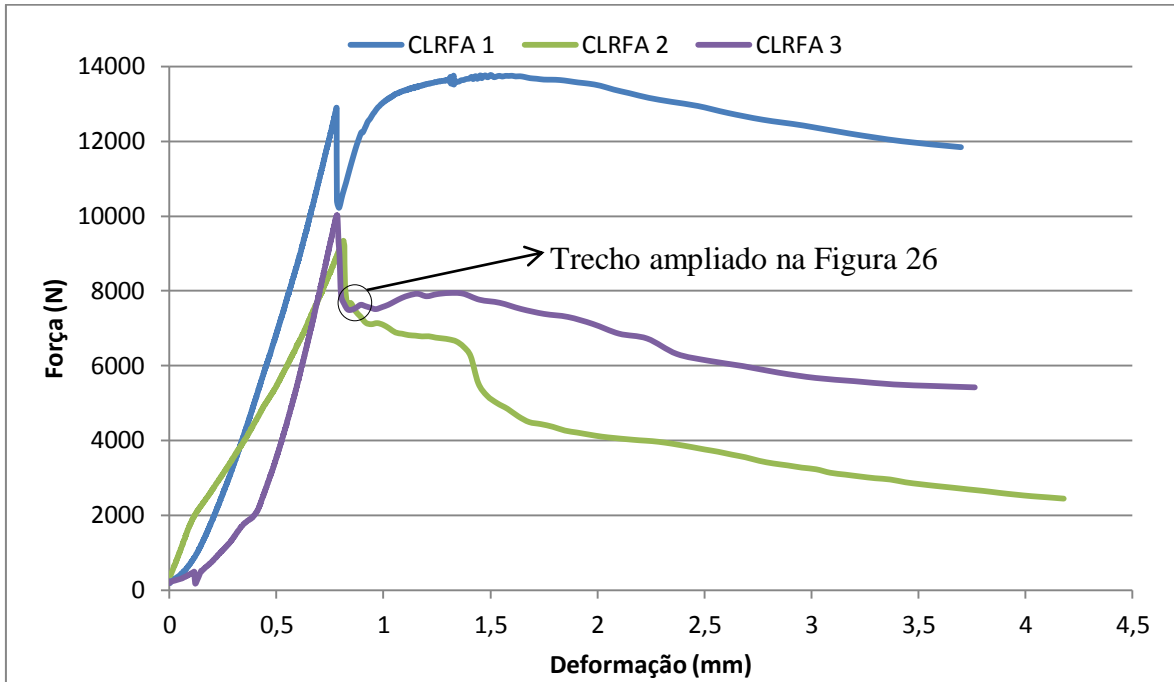
Obtidos pelo ensaio de tração na flexão, os diagramas de tensão-deformação fornecem dados para a análise da interação das fibras com a matriz cimentícia, não só na fase que precede a ruptura do CP, mas também no trecho pós-ruptura, pelo qual se pode investigar a capacidade de suporte das fibras. A seguir é apresentado para cada traço o seu diagrama de tensão-deformação correspondente (Figura 24, Figura 25, Figura 27, Figura 29 e Figura 30). As Figura 26 e Figura 28 mostram ampliações de trechos pós-ruptura da matriz do diagrama tensão-deformação dos CPs CLRFA 3 e CLRFC 1.

Figura 24 – Diagramas tensão-deformação do CLR.



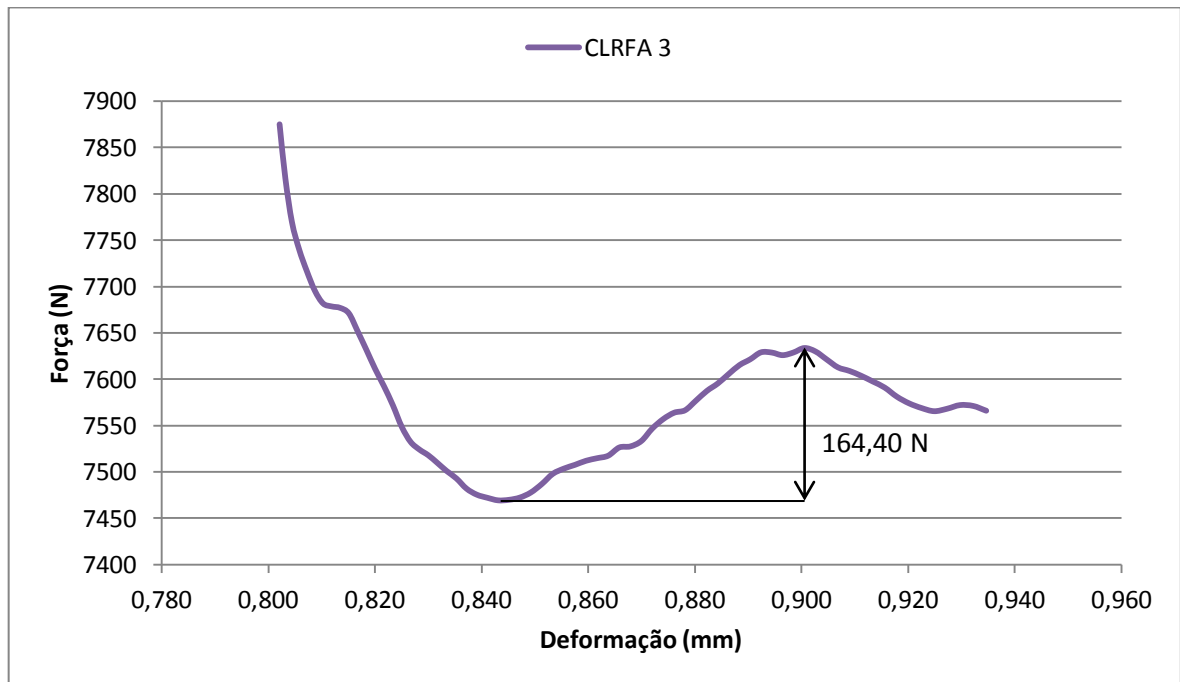
Fonte: Autor.

Figura 25 – Diagramas tensão-deformação do CLRFA.



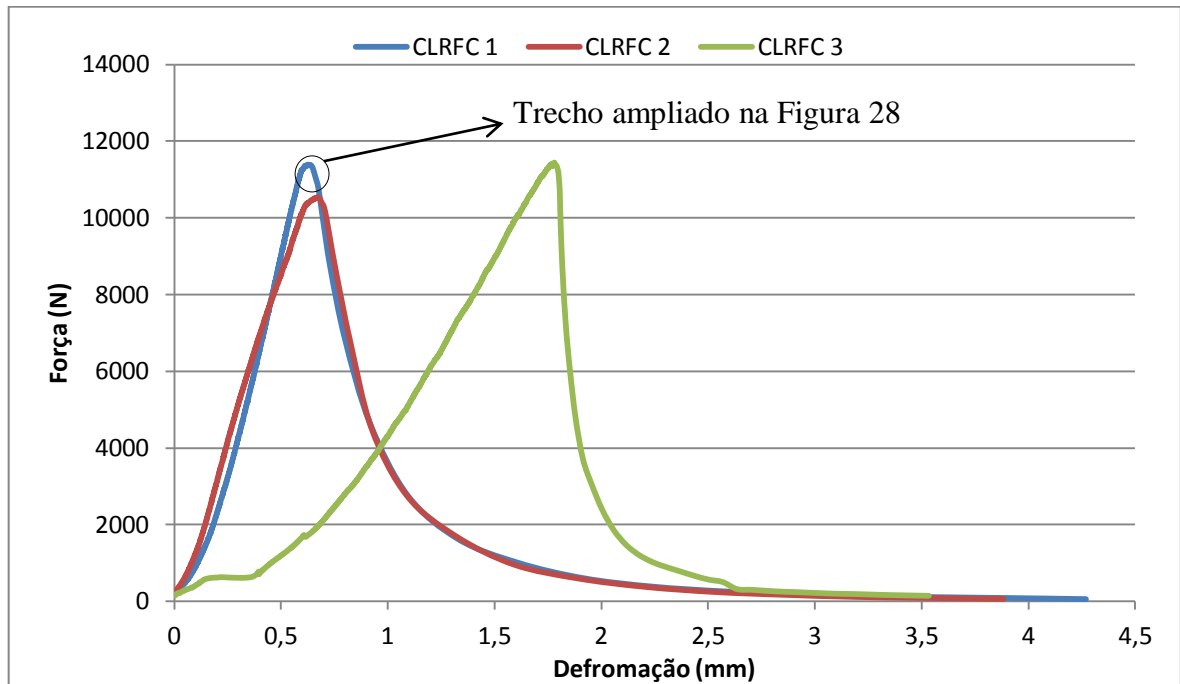
Fonte: Autor.

Figura 26 – Trecho ampliado do diagrama tensão-deformação do CP CLRFA 3.



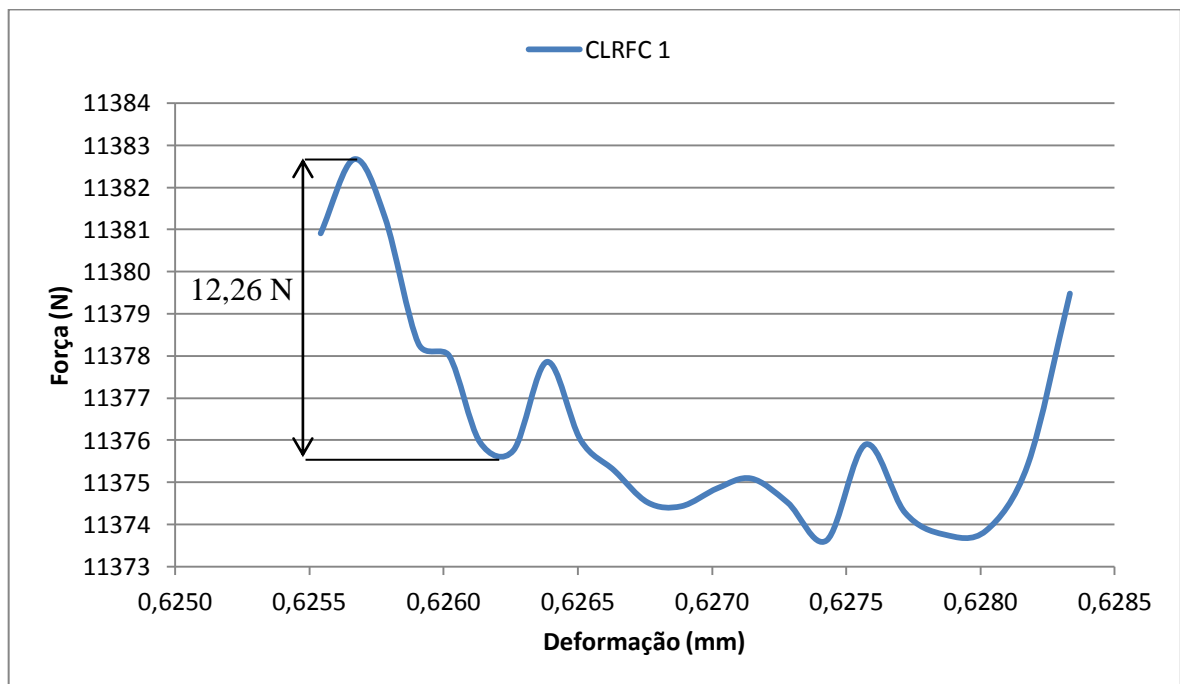
Fonte: Autor.

Figura 27 – Diagramas tensão-deformação do CLRFC.



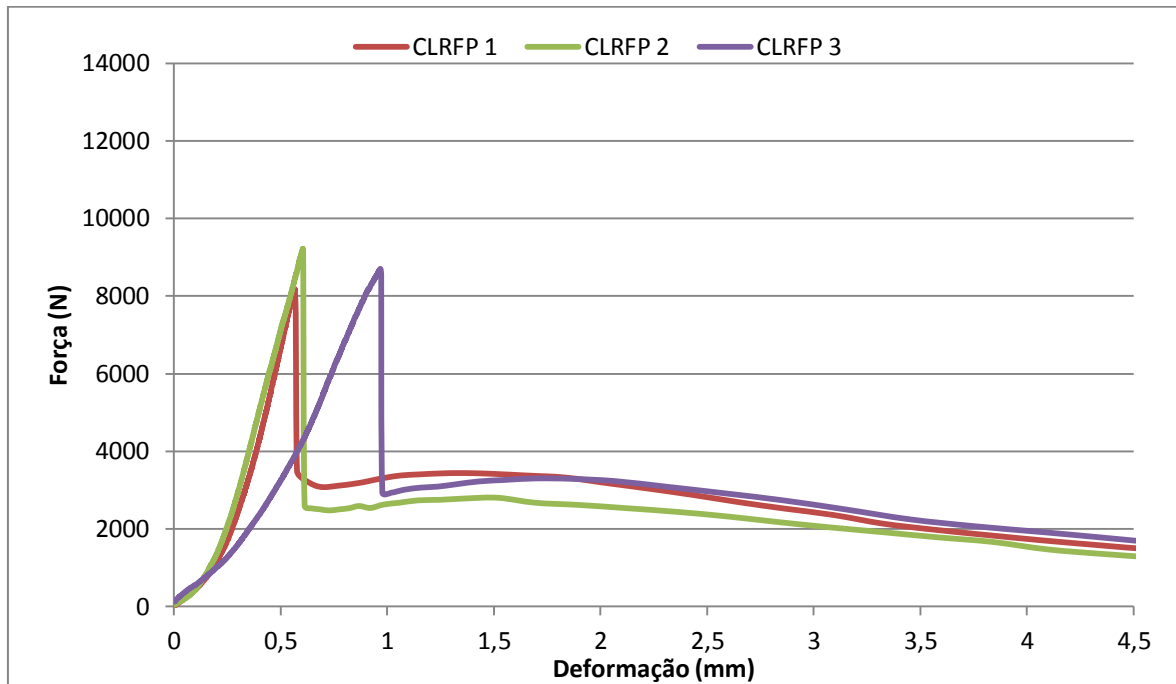
Fonte: Autor.

Figura 28 – Trecho ampliado do diagrama tensão-deformação do CP CLRFC 1.



Fonte: Autor.

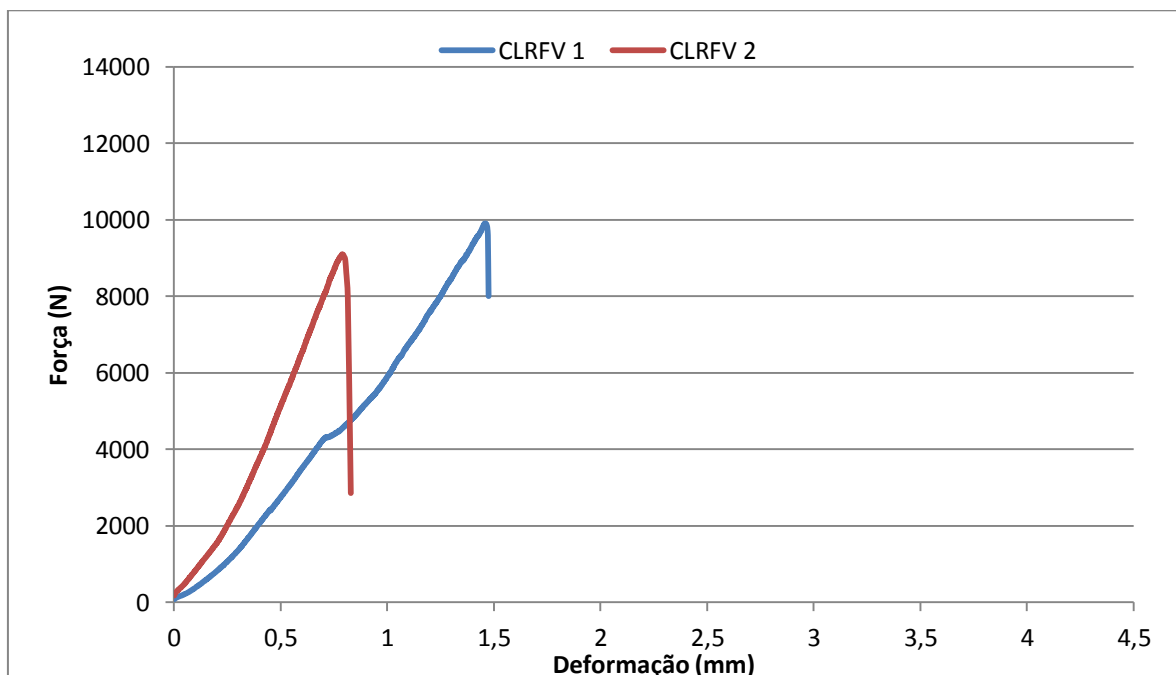
Figura 29 – Diagramas tensão-deformação CLRFP.



Fonte: Autor.

Foi descartado o resultado de uma amostra do CLRFV pelo fato de ter apresentado desempenho muito discrepante dos demais. Considerou-se que uma possível falha na produção do CP acarretou um desempenho incompatível com as características do traço produzido.

Figura 30 – Diagramas tensão-deformação do CLRFV.

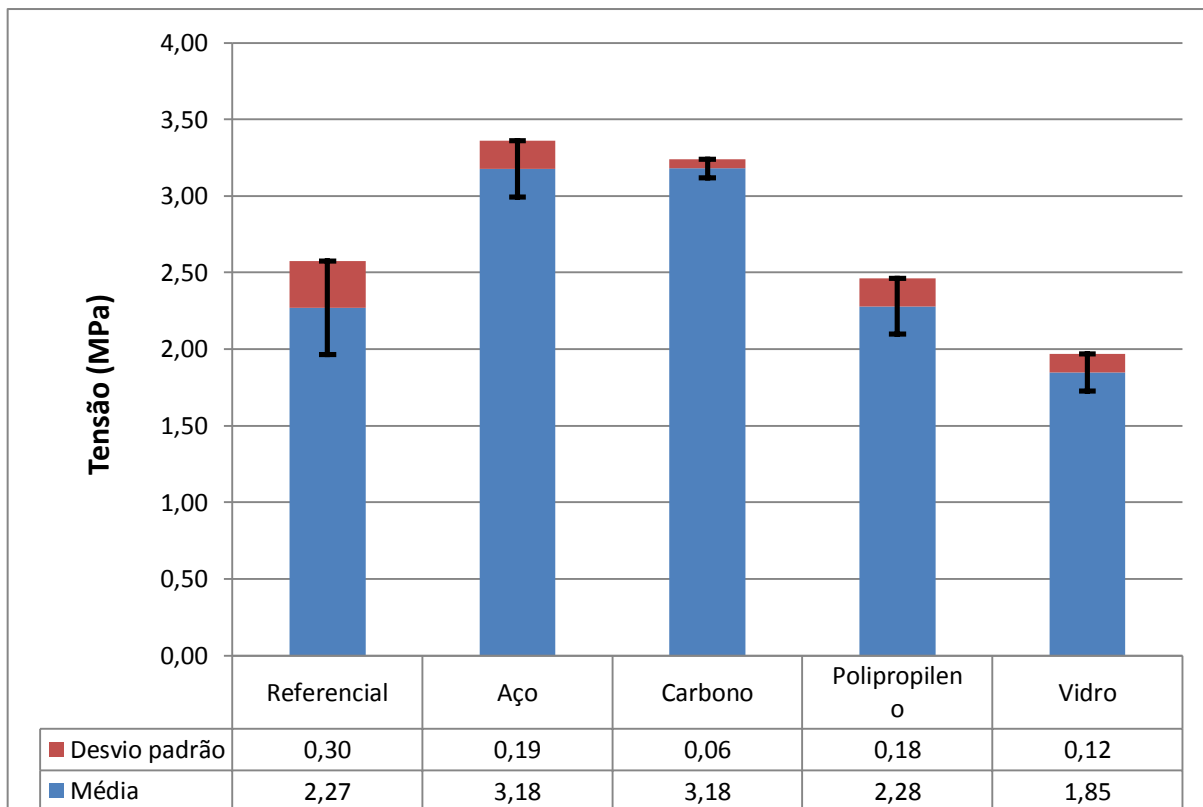


Fonte: Autor.

4.4 Resistência à tração na compressão diametral

Na Figura 31 são apresentados os resultados da resistência à tração na compressão diametral. A Tabela 6 - Comparação percentual da resistência à tração na compressão diametral dos CLRFs com a do CLR. traz a comparação percentual do desempenho dos CLRFs com o CLR.

Figura 31 – Resistência à tração na compressão diametral.



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Comparação percentual da resistência à tração na compressão diametral dos CLRFs com a do CLR.

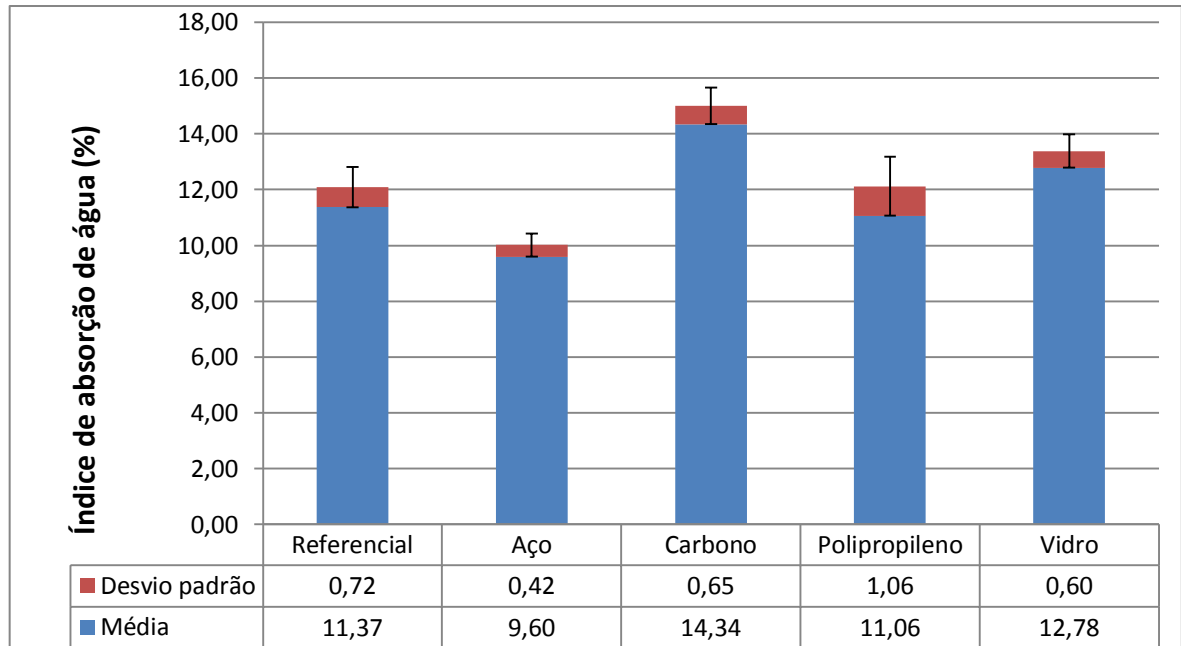
Traço	Comparação com o CLR
Aço	+39,9%
Carbono	+40,1%
Polipropileno	+0,4%
Vidro	-18,6%

Fonte: Autor.

4.5 Teor de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados para o índice de absorção de água estão indicados na Figura 32.

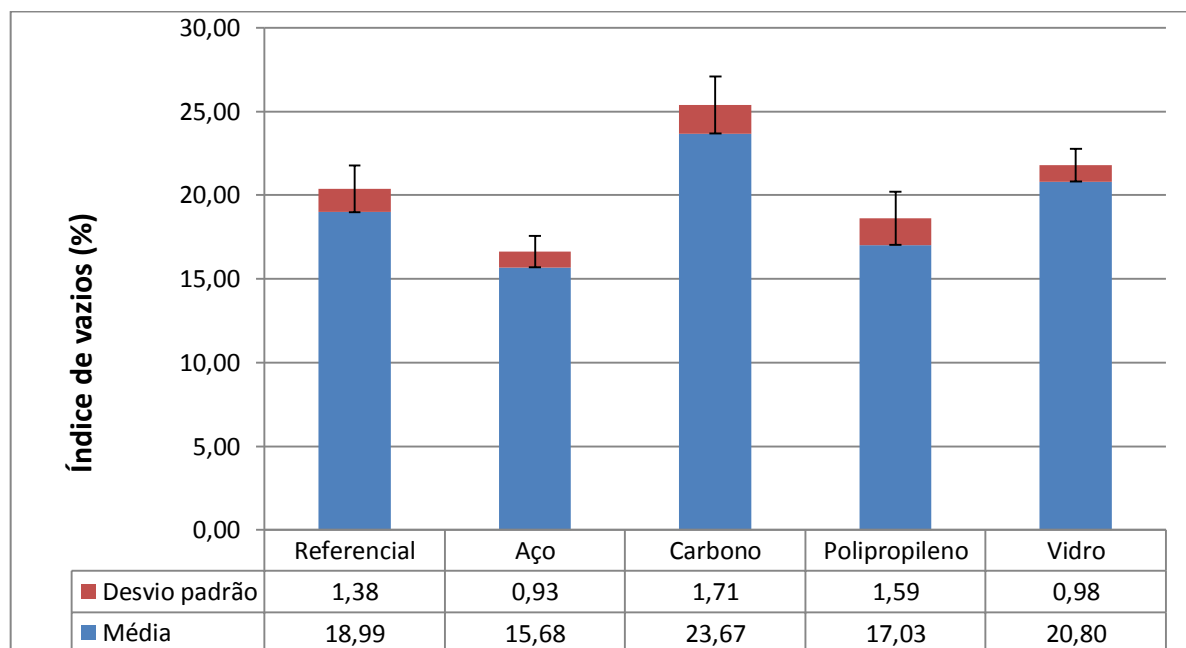
Figura 32 – Índice de absorção de água.



Fonte: Autor.

Os valores obtidos para o índice de vazios estão expressos na Figura 33.

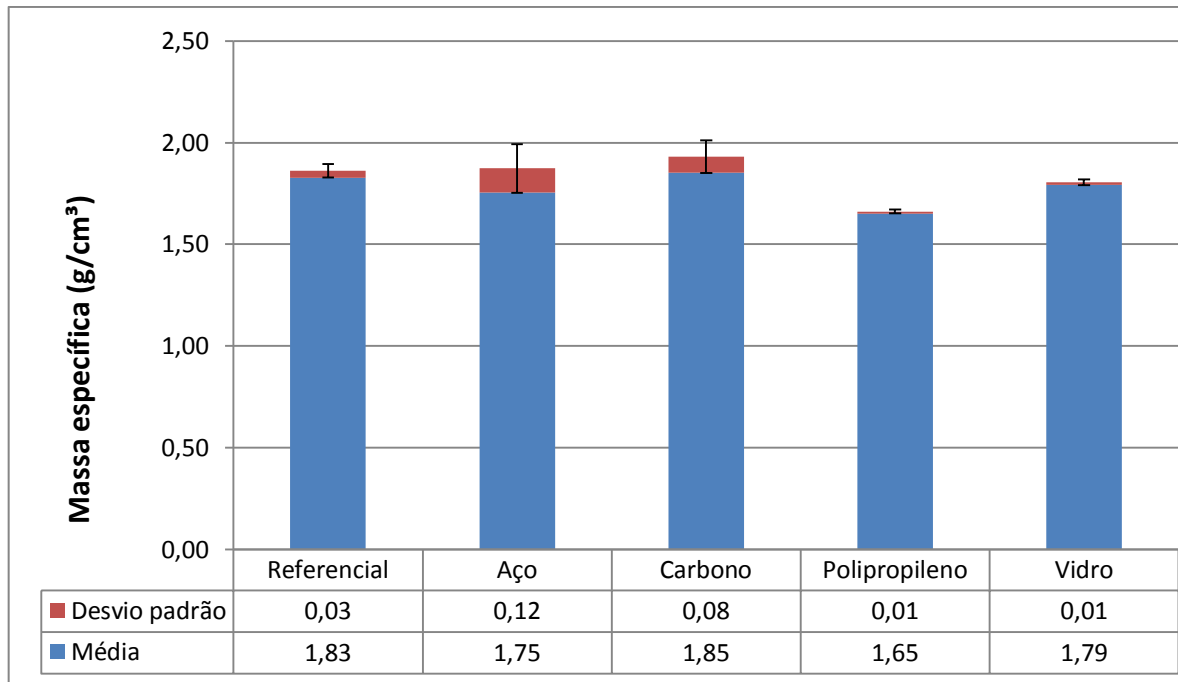
Figura 33 – Índice de vazios.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para a massa específica são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Massa específica.



Fonte: Autor.

Tabela 7 - Comparação percentual do índice de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos CLRFs com a CLR.

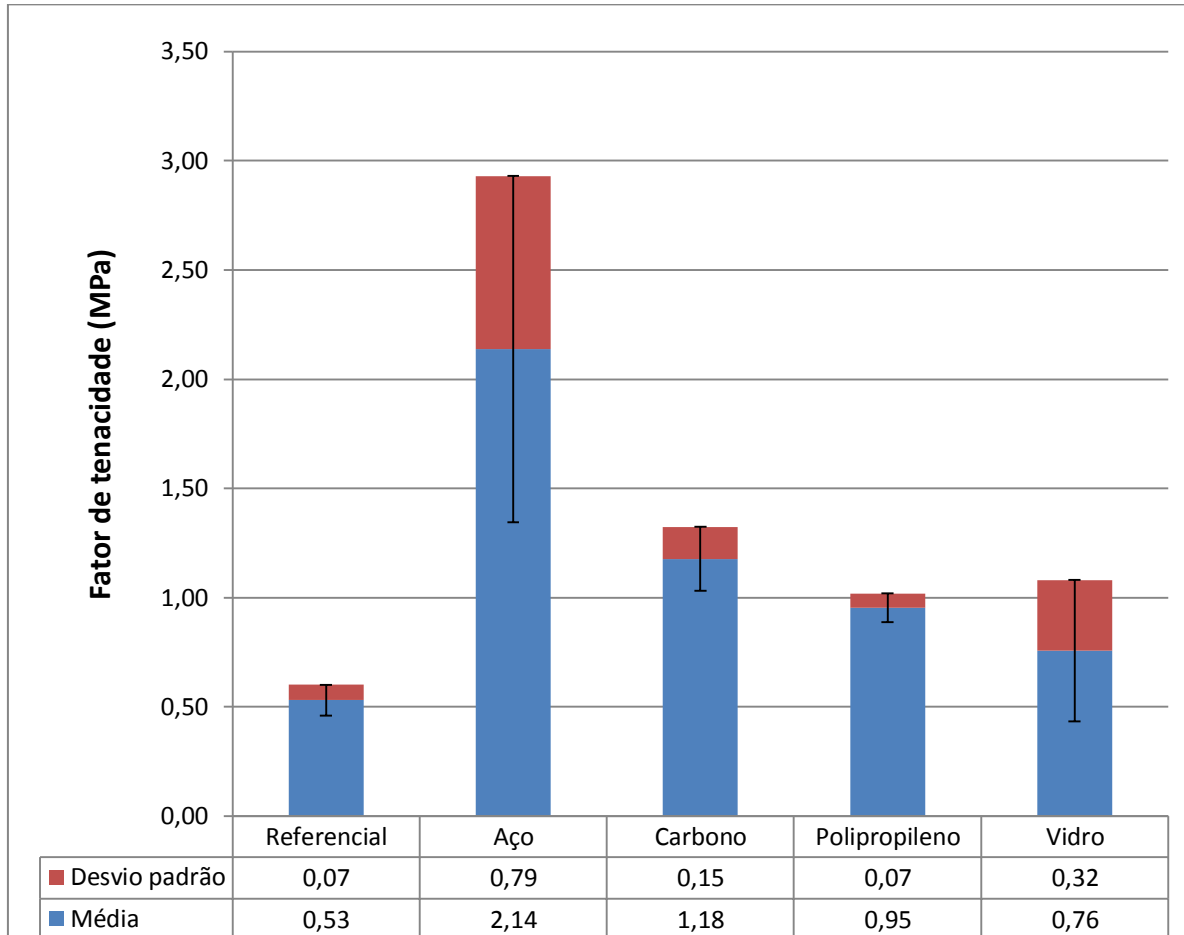
Traço	Índice de absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm ³)
Aço	-15,6%	-17,4%	-4,1%
Carbono	+26,2%	+24,6%	+1,3%
Polipropileno	-2,7%	-10,3%	-9,7%
Vidro	12,4%	+9,5%	-2,0%

Fonte: Autor.

4.6 Fator de tenacidade

Os resultados para o fator de tenacidade são apresentados na Figura 35.

Figura 35 - Fator de tenacidade.



Fonte: Autor.

Tabela 8 - Comparação percentual do fator de tenacidade dos CLRFs com o do CLR.

TRAÇO	COMPARAÇÃO COM O CLR
Aço	+302,4%
Carbono	+121,6%
Polipropileno	+79,4%
Vidro	+21,7%

Fonte: Autor.

5 DISCUSSÕES

A partir da análise dos resultados do *slump test*, percebeu-se que a adição de fibras ao concreto leve conferiu alterações ao compósito no quesito consistência. O aço mostrou não reduzir tanto o *slump* quanto as demais fibras, apesar de apresentar, em conformidade com o que diz Zellers (2009), uma redução notável em relação ao traço referencial, de 39,1%.

A superfície específica das fibras demonstrou ter forte influência no *slump*, visto que as fibras de menor diâmetro resultaram em concretos de consistência mais rija que as de maior diâmetro. Tal situação pode estar relacionada ao fato de uma grande superfície de contato entre fibras e matriz cimentícia resultar em uma rede tridimensional coesa, que estrutura o concreto no sentido de impedir que este se deforme.

A resistência à compressão do concreto leve não demonstrou ser significativamente modificada pela adição de fibras à matriz cimentícia, exceto para o CLRFC. Este traço, para o qual os resultados demonstraram ganhos expressivos mesmo considerando o desvio padrão das amostras, apresentou resistência à compressão média 15% maior que o CLR.

Esse resultado corrobora com o obtido por Kizilkanat (2016), que alcançou um incremento de 9% na resistência à compressão de um concreto de alto desempenho, com a utilização de um teor de 0,75% de fibras de carbono. O autor atribuiu tal aumento a uma maior resistência de deslizamento das microfissuras pré-existentes, que atuou na redução da força responsável pelo crescimento das fissuras.

Li e Mishra (1992 apud BENTUR e MINDESS, 2007, p. 402) perceberam que ao incrementar o teor de fibras de carbono em até 3%, a resistência à compressão do concreto sofre um leve aumento. Entretanto, para teores maiores que 3%, a resistência começa a diminuir, provavelmente pela dificuldade de empacotamento das fibras pela matriz de concreto.

Os resultados deste estudo para a resistência à tração na flexão apontaram um ganho de desempenho satisfatório pelos CLRFA e CLRFC, com médias maiores que as do CLR em respectivamente, 27,9% e 28,8%; uma melhoria discreta propiciada pelo CLRFV, com aumento de 10,1% em relação ao CLR, enquanto que a fibra de polipropileno não melhorou o CLRFP neste aspecto (Figura 23). Os valores ratificam o que aponta Figueiredo (2011), pois apesar de as fibras utilizadas apresentarem resistência à tração em níveis elevados, apenas as

de maior módulo de elasticidade garantiram melhorias ao desempenho do concreto em relação à tração na flexão. Já a de menor módulo de elasticidade, polipropileno, não se mostrou capaz de reforçar satisfatoriamente a matriz. Entretanto, ainda de acordo com Figueiredo (2011), estas fibras servem para o controle de fissuração plástica em pavimentos, pois no estado fresco o concreto apresenta baixa resistência à tração e baixo módulo de elasticidade.

Outro fator importante para a eficiência do suporte da fibra à matriz de concreto, observado a partir dos trechos com o comportamento pós-ruptura dos diagramas de tensão-deformação do CLRFA e CLRFC (Figura 26 e Figura 28), é o comprimento da fibra. Isso se dá porque a evolução das fissuras pode ocorrer não só pelo rompimento das fibras, mas também pelo seu desprendimento da matriz, e quanto maior for o comprimento de uma fibra, maior será a superfície de contato entre esta e a matriz do compósito, sendo necessária uma carga mais elevada para desprendê-la. Nas Figura 26 e Figura 28, percebe-se nos gráficos que a amplitude das perturbações ocasionadas pela ação das fibras é bem maior para o CLRFA (164,40 N) que para o CLRFC (12,26 N). Ou seja, as fibras de aço utilizadas, mesmo com uma resistência à tração inferior às de carbono, apresentaram uma maior capacidade de reforço à matriz por desenvolver melhor o papel de ponte de tensões, explicado por Figueiredo (2000).

A relevância do comprimento da fibra é evidenciada pelo resultado do cálculo do fator de tenacidade, parâmetro que se mostrou, para os resultados obtidos nesta pesquisa, mais intimamente relacionado à capacidade de suporte da fibra após a fissuração da matriz. Percebe-se, pelos gráficos de tensão-deformação, que todos os concretos se romperam antes de atingir 2 mm de deformação, valor limitante da área considerada no cálculo. Mesmo assim, a fibra de aço conseguiu manter a carga do ensaio em patamares bem maiores que as demais fibras, inclusive que a de carbono, que apesar de aumentar o desempenho do concreto à tração, foi arrancada da matriz mais facilmente, por ser muito curta. Com isso, o CLRFA apresentou ganho percentual em relação ao CLR, de 302,4%, enquanto o CLRFC, com o segundo melhor desempenho, obteve um aumento de 121,6%.

Para o fator de tenacidade, pode-se destacar também que todas as fibras apresentarem, mesmo que em níveis diferentes, melhoras significativas ao desempenho, em relação ao do CLR. Porém, o CLRFB demonstrou-se menos eficiente que os outros traços com adição de fibra. Isso se deve à sua ruptura frágil, que pode estar relacionada ao fato de ser um material cerâmico, do qual a fragilidade é característica marcante.

Os ensaios de tração na compressão diametral apontaram novamente as fibras de aço e carbono como as duas, dentre as estudadas, mais propícias ao aumento da resistência à tração do concreto. Entretanto, como neste ensaio não há acompanhamento do comportamento pós-ruptura, os desempenhos dessas duas fibras esteve bem mais semelhante.

Os resultados obtidos na tração por compressão diametral para o CLRFA, com aumento de 39,9% em relação ao CLR, corroboram com o de Migliorini *et al.* (2010), que com um teor de fibras maior que o aplicado nesta pesquisa, obtiveram ganhos de 47,5% com a adição de fibras de aço ao concreto.

Os resultados para os índices de vazios, teor de absorção de água e massa específica indicam que quanto maior a superfície específica das fibras, maior a tendência à formação de vazios entre elas. A fibra de carbono, com a maior superfície específica, por ter o menor diâmetro entre as fibras utilizadas, proporcionou ao CLRFC o maior índice de vazios e absorção de água, resultando em aumento de 24,6% em relação ao CLR; já o aço, com menor superfície específica, conferiu ao CLRFA valores menores que os do CLR, com redução de 17,4%. Outro fator que influenciou os resultados, e que corrobora com o que diz Silva (2006), é a rigidez da fibra, visto que dentre as fibras de maior superfície específica (carbono, vidro e polipropileno), a de polipropileno, por ser a mais flexível, foi a única que conferiu ao concreto um índice de vazios inferior ao do CLR, com redução de 10,3%.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou a comparação do desempenho físico e mecânico de um concreto leve produzido a partir do uso de argila expandida, em substituição ao agregado graúdo de um concreto convencional, com adição de quatro diferentes tipos de fibras. A padronização dos procedimentos empregados na produção dos concretos e nos ensaios evidenciou a influência das características das fibras nos resultados obtidos. Com isso, foi fornecida uma base para a compreensão de quais características tornam uma fibra adequada à aplicação no concreto leve.

Diante de todo o exposto, e tomando como base os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, é possível fazer as seguintes observações:

- As fibras estudadas demonstraram contribuição para a diminuição do *slump* do concreto leve, sendo tal diminuição maior para as fibras de maior superfície específica. Isso se deveu, provavelmente, ao seu empacotamento pela matriz resultante de uma maior superfície de interação fibra-matriz que a das fibras de menor superfície específica;
- A resistência à compressão do CLR não demonstrou ser afetada significativamente pela adição de fibras utilizadas neste trabalho, exceto para o CLRFC;
- A resistência à tração na flexão do CLR foi aumentada significativamente com o uso das fibras que combinam elevada resistência à tração e elevado módulo de elasticidade. Nesta pesquisa, as fibras que reuniram tais características foram as de carbono e de aço;
- O fator de tenacidade do CLR foi aumentado pela adição das fibras que combinam alta resistência à tração, alto módulo de elasticidade, maior comprimento e boa ancoragem à matriz, devido ao fato de resistirem às tensões de tração impostas ao concreto e, pela boa aderência à matriz, servindo como pontes de transferência das tensões;
- A resistência à tração na compressão diametral do CLR foi incrementada pelo uso das fibras que combinam alto módulo de elasticidade e resistência à tração. Entretanto, o ensaio pode ser considerado pouco conclusivo devido a não indicar o momento exato do surgimento da primeira fissura do CP;

- O índice de vazios dos traços de CLRF sofreu aumentos mais expressivos pelo uso de fibras que combinam maior superfície específica e rigidez elevada, pois a elevada superfície específica exige um maior teor de argamassa para o empacotamento das fibras, e a elevada rigidez dificulta a deformação da fibra para se moldar aos espaços existentes entre os agregados.

Para o aprofundamento do tema abordado nesta monografia, são sugeridos os estudos da variação de comprimento das fibras (i), do posicionamento das fibras em regiões da peça submetidas a solicitações mais intensas, no ensaio de flexão (ii), da variação do teor de cada uma das fibras estudadas, para conhecimento do volume crítico relacionado à propriedade que se deseja melhorar (iii) e da variação de argamassa nos traços (iv).

REFERÊNCIAS

- A, A. I.; S, I. A.; NAJIM, N. S. Mechanical Properties of Carbon Fiber Lightweight Aggregate Concrete Containing Acrylic Polymer. **Anbar Journal for Engineering Sciences**, Ramadi, 2013.
- ALEXANDER, M.; MINDESS, S. **Aggregates in concrete**. 1ª. ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2005.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544: Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete**. Detroit. 1989.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 213: guide for structural lightweight-aggregate concrete**. Farmington Hills. 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 293: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)**. West Conshohocken. 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 31: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field**. West Conshohocken. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16312-3: Concreto compactado com rolo parte 3: Ensaio de laboratório em concreto fresco**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro. 2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2^a. ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2007.

BREMNER, T. W.; HOLM, T. A. High Performance Lightweight Concrete - a Review. **Special Publication**, v. 154, p. 1-20, 1995.

CAMPIONE, G.; MIRAGLIA, N.; PAPIA, M. Mechanical properties of steel fibre reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates. **Materials and Structures**, v. 34, p. 201-210, Maio 2001.

DHAKAL, R. P.; WANG, C.; MANDER, J. B. **Behavior of steel fibre reinforced concrete in compression**. International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil. Nanjing: [s.n.]. 2005.

DOMAGAŁA, L. Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres. **Journal of Civil Engineering and Management**, Varsóvia, 2011. 36-44.

DÜZGÜN, O. A.; GÜL, R.; AYDIN, A. C. Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. **Materials Letters**, v. 59, p. 3357-3363, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651: Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)**. Bruxelas. 2005.

FIGUEIREDO, A. D. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: [s.n.], 2000.

FIGUEIREDO, A. D. D. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo. 2011.

GENCEL, O.; OZEL, C.; MARTINEZ-BARRERA, W. B. G. Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. **Materials Research Innovations**, v. 15, p. 216-225, Junho 2011.

HILL, W. J. S.S. Selma. **Encyclopedia of Alabama**, 2014. Disponível em: <<http://www.encyclopediaofalabama.org/article/h-3597>>. Acesso em: 05 maio 2018.

HUBERTOVA, M.; HELA, R. **Lightweight Fibre Reinforced Concrete**, Brno, 2016.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4: Method of test for flexural strength and flexural toughness**. [S.l.]. 1984.

KAYALI, O.; HAQUE, M. N.; ZHU, B. Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 207-213, 2003.

KIZILKANAT, A. B. Experimental Evaluation of Mechanical Properties and Fracture Behavior of Carbon Fiber Reinforced High Strength Concrete. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 60, n. 2, p. 289-296, 2016.

LARRARD, F. D. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. Londres: E & FN Spon, 1999.

LI, J. et al. Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials** **157**, Chengdu, 2017.

MAZAHERIPOUR, H. et al. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, p. 351-358, 2011.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Rio de Janeiro. 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 3ª. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MIGLIORINI, A. V. et al. Verificação das resistências do concreto exposto ao ambiente marítimo com inserção de fibras de aço em teor próximo ao volume crítico. **4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, Rio Grande/RS, Novembro 2010.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2ª. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.

MORAVIA, W. G. et al. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve, São Paulo, v. 52, n. 322, p. 193-199, Junho 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVSKY, A. et al. **Improvement of Cement Concrete Strength Properties by Carbon Fiber Additives**. AIP Conference Proceedings. [S.l.]: AIP Publishing. 2016. p. 070005.

RAO, N. S. et al. Fibre Reinforced Light Weight Aggregate (Natural Pumice Stone) Concrete. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 5, Maio 2013.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: Pini, 2009.

SILVA, R. D. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno - estudo do comportamento reológico e mecânico**, São Paulo, 2006.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. Polypropylene fiber reinforced concrete: shrinkage cracking. **Composites in Construction**, Porto, 2001. 39-42.

YIN, S. et al. Use of macro plastic fibres in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 180-188, May 2015.

ZELLERS, R. C. How Do the Fibers Affect the Workability of Concrete? **ABC Polymer**, 17 Dezembro 2009. Disponível em: <<https://abcpolymerindustries.com/fibers-affect-workability-concrete/>>. Acesso em: 31 Maio 2018.