

Avaliação da tenacidade e capacidade de reforço de compósitos cimentícios com filamentos de diferentes metais

Tenacity evaluation and reinforcement capacity of cement composites with different metals

Henrique Pains Morais

Graduando do curso de Engenharia Civil (UNIPAM).
E-mail: henriquepains@hotmail.com

Rangel de Abreu Moreira da Silva

Graduando do curso de Engenharia Civil (UNIPAM).
E-mail: rangel.moreira@live.com

Eduardo Pains de Morais

Mestre em Estruturas e Construção Civil; Docente do curso de Engenharia Civil (UNIPAM).
E-mail: eduardopm@unipam.edu.br

Douglas Ribeiro Oliveira

Especialista em Engenharia Sanitária; Docente do curso de Engenharia Civil (UNIPAM).
E-mail: douglasro@unipam.edu.br

Resumo: O concreto é um dos materiais mais utilizados pelo ser humano em todo o mundo. Sua vasta utilização se dá pelas suas características físico-químicas que proporcionam a ele a capacidade de resistir a esforços elevados à compressão. Em contrapartida, apenas 10% dessa resistência corresponde aos esforços de tração, o que fez com que o aço se tornasse peça fundamental nos sistemas estruturais, com a função de compensar a baixa resistência à tração do concreto. Ainda assim, surgem fissuras ou trincas nos pontos mais frágeis do concreto onde o aço não consegue resistir, e uma forma de mitigar esse surgimento é reforçar o concreto com elementos de alta resistência à tração e alongamento. Neste estudo, analisou-se a capacidade de reforço de fibras produzidas a partir de fios de baixo e alto carbono, obtendo-se as tensões máxima, de colapso e energias de colapso e máxima.

Palavras-chave: Construção civil. Concreto. Tenacidade. Resistência à tração.

Abstract: Concrete is one of the most widely used materials in the world. Its vast use is due to its physico-chemical characteristics that allow it to withstand high compressive stresses. In contrast, only 10% of this resistance corresponds to tensile stresses, which made steel become a keystone in structural systems, with the function of compensating for the low tensile concrete strength. However, fissures or cracks appear in the most fragile areas of concrete where steel

cannot withstand, and one way to mitigate this emergence is to reinforce concrete with high tensile and elongation elements. In this study, the capacity of reinforcement of fibers produced from low and high carbon wires was analyzed, obtaining collapse maximum tensions and collapse energies and maximum.

Keywords: Civil Construction. Concrete. Tenacity. Tensile strength.

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas tecnologias aplicáveis ao concreto vem se tornando algo rotineiro na Engenharia Civil nos últimos anos devido ao vasto campo de pesquisas que esse material proporciona, sendo sua resistência mecânica em relação a esforços solicitantes uma das principais temáticas analisadas. Por meio de tais pesquisas, foram descobertos e aprimorados diferentes tipos de agregados, aglomerantes e adições visando à maior resistência e melhor comportamento nas diversas aplicações da construção civil. Esses estudos também constataram e investigam deficiências apresentadas pelo concreto convencional, como a baixa resistência a esforços de tração, que foi analisada no presente trabalho.

Na antiguidade, os romanos construíam pontes e aquedutos de pedra em arco, para que o material pudesse exercer apenas trabalho de compressão, possibilitando a passagem de vias sobre rios e o transporte de água por caminhos longos. Porém, quando o concreto estrutural passou a ser utilizado, abriu-se um vasto campo de estudos para que se pudesse desenvolver uma forma de transformá-lo resistente à tração. Dessa forma, no século XX, foi pensada e desenvolvida a execução do concreto em conjunto com o aço, dando origem ao concreto armado.

Desde então o concreto começou a fazer parte das estruturas de grande porte, até se tornar a principal matéria-prima utilizada nas construções do mundo inteiro. No entanto, com o passar dos anos, revelou-se, na Engenharia Civil, a preocupação com a durabilidade e vida útil das estruturas provenientes deste material. Manifestações patológicas passaram a ser recorrentes nos sistemas construtivos, dentre as quais se destacam as fissuras, que podem evoluir para trincas, rachaduras e fendas, os manchamentos, as corrosões e os destacamentos. As fissuras são majoritariamente oriundas de esforços de tração, para os quais o concreto é pouco resistente. Os esforços são majorados com a tentativa de obtenção de vãos e cargas cada vez maiores, induzindo momentos fletores que levam a parte tracionada do elemento estrutural a manifestar a deficiência.

Uma forma de mitigar o surgimento das trincas no concreto é reforçá-lo com elementos de alta resistência à tração e alongamento, sendo essa fusão denominada compósito. Entre eles, é comum a utilização de fibras cuja difusão como elementos de reforço no concreto tem se dado principalmente na execução de pavimentos rígidos, revestimento de túneis, elementos não estruturais, etc. Destacam-se, convencionalmente, as fibras de aço, utilizadas para combater o cisalhamento frequente no processo de fissuração de um elemento fletido. Dessa forma, as fibras agem como pontes de transferência de tensão entre as áreas adjacentes à matriz previamente fissurada (ISAIA, 2011).

Por meio desse estudo, foi possível desenvolver uma análise relevante sobre o desempenho das fibras oriundas de diferentes características físico-químicas, utilizando-se a norma NBR 15530 (ABNT, 2007a) para estabelecer parâmetros de formas geométricas e dimensões dessas fibras. Assim, foi possível perceber o desempenho mecânico do concreto quando este recebe esforços verticais que tendem a flexioná-lo, sendo feita a análise dos tipos de fibras utilizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO

De acordo com Isaia (2010), “o concreto de Cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade [...] e pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade”. Este apresenta propriedades que proporcionam um vasto campo de pesquisas, possibilitando avanços recorrentes, por meio de estudos que anseiam por inovações tecnológicas.

Constituído basicamente por aglomerante (cimento), agregados (miúdo e graúdo) e água, quando recém-produzido, o concreto deve apresentar alguns requisitos principais, como fluidez e trabalhabilidade, indispensáveis para o seu lançamento em fôrmas com malhas de aço. É importante também adquirir, com o tempo, coesão e resistência, ocasionadas por reações químicas, como menciona Petrucci (1993).

Descoberto no século XIX e intensivamente usado no século XX, tornou-se o segundo material mais consumido pelo homem, perdendo apenas para a água. Sua ascendência no mundo da engenharia se deu devido às características que o diferenciam de outros materiais “concorrentes”, como o aço e a madeira. Mehta e Monteiro (2014) apontam que o concreto apresenta melhor desempenho em relação à água, demonstra consistência plástica que o torna facilmente moldado de diversas formas e tamanhos, possui resistência ao fogo, baixo custo, entre outras diversas características.

Segundo Isaia (2010), o concreto também pode contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada vez mais frequentes nos concretos atuais. Dessa forma, é possível atingir diferentes classes de concreto, como o concreto leve, o pesado, o permeável, o colorido, o autoadensável, o de alta resistência, entre outros. Seu uso se difundiu, principalmente devido à criação de uma tipologia construtiva e estrutural chamada concreto armado, na qual se utiliza o aço combinado ao concreto para suporte das cargas e deformações das estruturas.

2.2 CONCRETO ARMADO

Logo que o concreto começou a ser utilizado na construção civil, alguns problemas foram detectados em seu comportamento mecânico em relação a alguns esforços aplicados em vigas ou lajes. Nessas estruturas, quando flexionadas, na zona comprimida o concreto se comporta suficientemente bem, porém, na parte tracionada,

manifesta fissuras e, posteriormente, o rompimento frágil devido à baixa resistência à tração. “Em média, o concreto resiste à compressão dez vezes mais do que à tração” (BOTELHO; MARCHETTI, 2013).

Assim, surgiu a necessidade de se reforçar o concreto na parte inferior quando é aplicada em elementos fletidos. No século XX, o jardineiro Joseph Monier (1823-1906), partindo da ideia de Joseph-Louis Lambot (1814-1887), que criou um barco de “cimento armado”, decidiu aplicar a técnica em seus vasos, buscando maior resistência e durabilidade com menor custo, obtendo muito sucesso. Anos mais tarde, construiu pontes e passarelas, ficando conhecido futuramente como o pai do concreto armado (CARVALHO, 2008).

A ótima aderência do concreto com o aço garante eficiência e segurança na transmissão dos esforços e deformações (PILOTTO NETO, 2017). Esse sistema transformou-se, então, no mais utilizado em construções de grande porte devido à capacidade de vencer vãos com deformações mínimas e imperceptíveis. Todavia, apesar dos benefícios já citados, o concreto armado apresenta alguns pontos negativos, como maior geração de resíduos e peso próprio elevado.

Muitos estudos são desenvolvidos buscando transformar o concreto em um material com características dúcteis, sendo capaz de resistir à abertura e propagação de fissuras e até resistir à flexão, mesmo pós-fissurado. A adição de fibras na matriz do concreto minimiza seu comportamento frágil característico, passando a ser um material pseudo-dúctil, ou seja, mesmo após a fissura, o material continua resistindo aos esforços nele aplicados (FIGUEIREDO, 2000).

2.3 FIBRAS

“A utilização de materiais fibrosos em construções não é recente. Muito antes da era cristã, cerca de 2500 a.C., na região onde hoje é conhecida como Finlândia, já se empregavam materiais à base de amianto” (FORTES, 2000). As fibras são constituídas por filamentos retirados de tecidos animais, vegetais ou minerais. Atualmente, na construção civil, as fibras de aço são mais comuns.

Segundo ABNT (2007a), fibras de aço referem-se a filamentos de aço descontínuos produzidos especificamente para o uso em concretos. A norma tem como função estabelecer parâmetros de classificação, formas geométricas e tolerância quanto à resistência e às dimensões das fibras.

Além das fibras de aço, existem vários outros tipos de fibras aplicáveis ao concreto, cuja função principal é conter a retração, em menor escala, até a abertura e propagação de fissuras, em maior escala. Entre elas, citam-se as fibras poliméricas de Polipropileno, Polietileno e Poliamida, as fibras vegetais de Bambu e Sisal, além das inorgânicas como as fibras vidro e metálicas, em que se encaixam as fibras de aço.

2.3.1 Fibras Metálicas

Como menciona a ABNT (2007a), a classificação das fibras metálicas é estabelecida em relação à sua conformação e ao seu processo de produção, posteriormente distinguidas com base no tipo e classe pertencentes.

As fibras do tipo A possuem ancoragem nas extremidades e sua função é atuar como uma espécie de gancho, permitindo maior aderência à matriz, além de dificultar o caminho das tensões atuantes na fibra. Já as fibras do tipo C são corrugadas, ou seja, possuem o revestimento rugoso, permitindo que o composto adira com mais qualidade no concreto. Por fim, fibras do tipo R são retas, isto é, sem ancoragem nas extremidades.

Quanto à sua classe, as fibras são classificadas entre classe I, como sendo oriunda de arame trefilado a frio, classe II, proveniente de chapa laminada e cortada a frio e, por fim, classe III, derivada de arame trefilado e escarificado.

Figura 1 - Relação entre tipo, classe e geometria das fibras

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Isaia (2011).

Com base nesta classificação, calcula-se o fator de forma, que consiste na relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra (diâmetro de um círculo com área igual à área da seção transversal). Sucessivamente, em conjunto com o limite de resistência à tração de determinado aço, é possível determinar alguns parâmetros mínimos para produção das fibras.

Tabela 1 - Relação entre tipos e classes de fibras de aço produzidas especificamente para concreto

Tipo (geometria)	Classe da fibra	Fator de forma mínimo λ	Limite de resistência à tração do aço (Mpa)
A	I	40	1000
	II	30	500
C	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

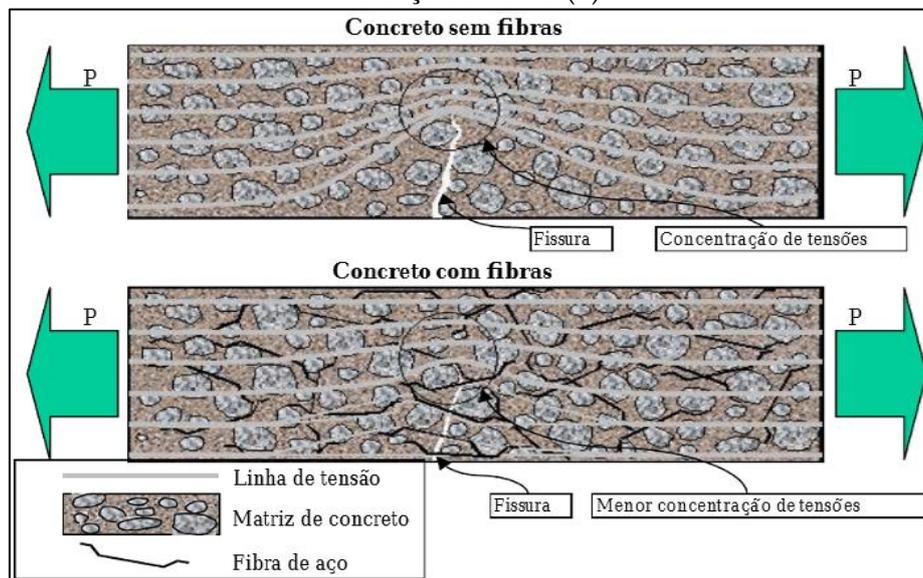
Fonte: ABNT (2007a)

De acordo com a Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho, (ANAPRE, 2012), as fibras podem ser dispostas homoganeamente de duas formas no concreto: soltas ou coladas. As fibras soltas são distribuídas de forma separada ou unitariamente; em contrapartida, as coladas são dispostas na forma de pentes colados ou unidas entre si por uma cola solúvel em água. As fibras são dispostas homoganeamente por toda a extensão da matriz cimentícia, porém essa vantagem não é tão relevante quando se trata de reforços pontuais, como em vigas biapoiadas. Desse modo, a utilização das fibras se torna mais útil em estruturas contínuas (ISAIA, 2011).

2.4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF)

O concreto reforçado com fibras está ficando cada vez mais comum no mercado da construção civil. Suas características são interessantes, voltadas para um problema dos compostos cimentícios que é sua característica frágil. Portanto, “quando se adicionarem fibras de resistência e módulo adequado ao concreto num teor apropriado, esse material deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isso ocorre pelo fato de a fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras” (ISAIA, 2011). Dessa forma, quanto maior a resistência da fibra, maior a capacidade da estrutura de receber cargas, em virtude da resistência do concreto mesmo após a fissuração.

Figura 1 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b)



Fonte: Isaia (2011)

O teor de fibras utilizado tem interferência direta na capacidade de reforço de uma viga, assim sendo apontado como principal parâmetro definidor do comportamento dos compósitos (FIGUEIREDO 2011). Além do teor e da resistência, a

geometria das fibras também é fundamental para o desempenho do concreto após a fissuração. À vista disso, utiliza-se o fator de forma (λ), que consiste na relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra. Por consequência, quanto maior o comprimento da fibra (até certo limite), ou menor o diâmetro equivalente, maior será o fator de forma; a partir disso, quanto maior for o fator de forma, maior a capacidade de resistência da fibra após a fissuração do concreto (ISAIA, 2011).

2.5 TENACIDADE

O concreto, no seu processo de recepção de cargas solicitantes, é sujeito a deformações e movimentações de suas partículas, sendo exigida grande aderência entre a matriz e agregados. Entretanto, o concreto convencional apresenta fragilidade neste ponto, proporcionando rápida propagação de fissuras e, por fim, o colapso. A tenacidade trabalha como sendo a capacidade de absorver energia antes da ruptura do material, garantido maior vida útil para as estruturas.

Villares (2001) obteve resultados de tenacidade proporcionais ao aumento do teor de fibras no concreto. Tais resultados foram obtidos independentemente da forma geométrica dos prismas ensaiados à flexão pura.

Quadro 1 - Influência do tamanho do corpo de prova na medida de tenacidade

Teor de fibra (kg/m ³)	Dimensão do corpo de prova (b x h x L) (mm)	Tenacidade à flexão (kN x mm)
20	150 x 150 x 450	29,15
	300 x 150 x 450	62,62
	450 x 150 x 450	112,8
30	150 x 150 x 450	44,84
	300 x 150 x 450	100,03
	450 x 150 x 450	168,13
40	150 x 150 x 450	60,26
	300 x 150 x 450	135,08
	450 x 150 x 450	226,13

Fonte: Villares (2001)

A tenacidade, na prática, é definida como sendo a área formada abaixo da curva no gráfico de tensão por deformação, que equivale à energia de deformação absorvida pelos elementos estruturais antes do colapso. O método mais utilizado no Brasil para a determinação da tenacidade é o Japan Society of Civil Engineers (JSCE- 1984). Trata-se de ensaios realizados com corpos de prova prismáticos submetidos a ensaios de flexão pura com quatro cutelos (ISAIA, 2011).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, foi necessário adquirir fios de aço baixo carbono e aço alto carbono com o mesmo diâmetro e forma geométrica. Foram efetuadas pesquisas para buscar fornecedores que possuíssem esses materiais com as devidas verificações.

Posteriormente, foram decididas as dimensões das fibras com base no seu diâmetro equivalente, de modo a obtê-las com fator de forma (λ) 40, calculado através da ABNT (2007a). As fibras foram produzidas através de corte manual com alicate específico para cortes de fios de aço.

Foi calculado o traço do concreto por meio do método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), utilizando-se resistência à compressão de 30 MPa, slump 16 cm e materiais disponíveis na região de Patos de Minas.

O concreto foi amassado, conforme a NBR 12665 (ABNT, 2015), no Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas e, posteriormente, utilizado para preenchimento das fôrmas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm conforme a ASTM C1609/C1609M-12 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2012, além dos moldes cilíndricos para ensaio de compressão, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016).

Nos traços com reforço de fibras, foram adicionadas 2 taxas de consumo de fibras durante o amassamento, sendo 15 kg/m³ e 30 kg/m³. A cura foi realizada conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2016), submerso em tanque com água.

Os ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração na flexão do concreto foram efetuados aos 28 dias de idade por meio das normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 12142 (ABNT, 2010), respectivamente.

No processo de rompimento das vigas, para avaliação da energia suportada e deformação máxima, foram aplicadas duas velocidades de carregamento, sendo uma próxima à normatizada pela NBR 12142:2010 (10 mm/min) e outra a máxima permitida pela prensa universal (500 mm/min), a fim de se simular o comportamento de ruptura lenta e ruptura por impacto.

4 RESULTADOS

Para que as atividades práticas pudessem ser iniciadas, foram adquiridos os materiais, sendo estes os agregados, o cimento e os fios. Posteriormente, foram realizados os ensaios de caracterização para que se pudesse ser efetuado o cálculo da dosagem do concreto com as devidas proporções a fim de se obter a resistência e a trabalhabilidade desejada.

O processo de caracterização desses materiais se deu através dos seguintes passos:

- Massa específica do cimento Portland (ABNT NBR NM 23:2016);
- Massa específica do agregado miúdo (ABNT NBR NM 52:2009);
- Massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo (ABNT NBR NM 53:2009);
- Massa unitária do cimento Portland (alteração da ABNT NBR 12127:2017);
- Massa unitária dos agregados em conformidade com a norma (ABNT NBR NM 45:2006);
- Análise granulométrica dos agregados (ABNT NBR NM 248:2003).

4.1 MASSA ESPECÍFICA E UNITÁRIA

A determinação da massa específica dos componentes do concreto é de extrema importância para cálculo de dosagem a fim de se obter o consumo dos materiais utilizados na mistura (CARRIJO, 2005). Já a massa unitária se enquadra na aplicação de concretos dosados em volume ou para controle de recebimento e estocagem de materiais. Ambas as definições se baseiam na relação da massa pelo volume, sendo que, na massa específica, são desprezados quaisquer tipos de vazios, diferentemente da massa unitária. Com base nisso, para um material com as mesmas origens e características, a massa específica não sofrerá alteração se for ensaiada com diferentes granulometrias.

Neste estudo, foram executados ensaios de massa específica e massa unitária do cimento, da areia e da brita, obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 2 – Massa específica e massa unitária dos materiais estudados

Material	Massa Unitária (g/cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)
Cimento Portland	1,43	3,05
Areia Média	1,62	2,63
Brita	1,55*	2,85**

* Valor da massa unitária no estado compactado

**Brita se encontra no estado saturado com superfície seca

Fonte: O próprio autor

Para o ensaio de massa específica do aglomerante, utilizou-se cimento CII-E-32, frasco graduado Le Chatelier e querosene como líquido não reagente, resultando em 3,05 g/cm³. Cervo (2004), obteve, em seu trabalho, massa específica do cimento de 3,02 g/cm³ e Battagin *et.al.*(2002) obteve 3,1 g/cm³.

Para a realização da massa unitária do cimento, empregou-se o modelo da norma NBR 12127 (ABNT, 2017), prevista para a determinação das propriedades físicas do gesso na forma de pó. Comparada com a massa específica, essa relação da massa pelo volume diminui drasticamente na massa unitária. Nesse estudo, obteve-se 1,43 g/cm³, resultando em uma diferença de 46,88%. Em seu trabalho, Nascimento (2012) encontrou massa específica do cimento de 3,09 g/cm³ e massa unitária de 1,01 g/cm³. Comprovou-se então que existe elevada diferença entre as duas relações no cimento, graças à alta porosidade deste.

Já para massa específica e a massa unitária da areia, os valores são mais próximos entre si. No presente trabalho, obteve-se 2,63 g/cm³ e 1,62 g/cm³, respectivamente. Cervo (2004) obteve o mesmo valor de massa específica e massa unitária de 1,52 g/cm³. Constatou-se que a areia utilizada neste estudo, denominada areia média, possui grãos com dimensões menores que as convencionais, fato que contribuiu para o alto valor da massa unitária que, normalmente, gira em torno de 1,5 g/cm³, assim como nas pesquisas de Silva, Buest e Campiteli (2005), com 1,57 g/cm³, e Carasek *et.al.* (2016), com 1,53 g/cm³.

Para análise do agregado graúdo, utilizou-se brita de origem calcária disponível na região de Patos de Minas. Suas características são grãos angulosos e lamelares, que

podem diminuir o consumo de cimento do concreto. Por meio do processo de determinação da massa específica, foi necessária a obtenção da massa do agregado saturado com superfície seca e submerso, utilizando-se pano absorvente e cesto hidrostático com malha, respectivamente, resultando em

$$ds = \frac{Ms}{Ms - Ma}$$

ds = Massa específica do agregado saturado à superfície seca;

Ms = Massa do agregado saturado com superfície seca;

Ma = Massa do agregado submerso.

$$ds = 2,85 \text{ g/cm}^3$$

Conforme o item 6.2 da NBR NM 53 (ABNT, 2003), quando os agregados forem utilizados para dosagem de concreto, em que o amassamento é realizado com eles úmidos, a determinação massa específica seca não se faz necessária, visto que, com o agregado saturado com superfície seca, não haverá a absorção de água, evitando-se a alteração da quantidade de água necessária ao amassamento. Por esse motivo, neste estudo, considerou-se a massa específica da brita saturada com superfície seca.

A massa unitária da brita foi realizada por meio de dois métodos: estado solto e estado compactado. No estado solto, obteve-se 1,49 g/cm³, e no estado compactado, 1,55 g/cm³.

A dimensão e o formato dos agregados têm influência direta no resultado deste ensaio, visto que a quantidade de vazios é elevada quando se trata de granulometria uniforme, grãos arredondados ou qualquer fator que possa afastar as partículas. Essas características podem afetar, também, o abatimento e a fluidez do concreto ou argamassa (FABRO *et.al*, 2011).

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Por meio da análise granulométrica dos agregados, foi possível realizar a determinação do módulo de finura e do diâmetro máximo característico, dados essenciais para a realização do cálculo de dosagem do concreto.

Tabela 2 - Diâmetro máximo e módulo de finura dos agregados

Material	D (máx)	MF
Agregado miúdo	6,3	2,72
Agregado graúdo	9,5	6,06

Fonte: O próprio autor

Para efeito de cálculo de dosagem de concreto, o diâmetro máximo que possui verdadeira relevância é o do agregado graúdo que, conseqüentemente, será o diâmetro máximo de todos os agregados presentes na matriz cimentícia. Já o módulo de finura,

torna-se mais considerável para o agregado miúdo. Sua caracterização classificará a amostra em fina, média ou grossa.

Vieira, Dal Molin e Lima (2004) obtiveram 2,46 como módulo de finura para o agregado miúdo natural analisado e 2,73 para agregado miúdo reciclado. Para o agregado graúdo, obtiveram dimensão máxima característica de 19 mm tanto para o agregado graúdo natural, quanto para o agregado graúdo reciclado.

4.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Para a realização do cálculo da dosagem do concreto empregado neste estudo, utilizou-se o método da Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP), com o auxílio do livro Roteiro Prático para a Dosagem dos Concretos Estruturais de Helene e Terzian (1992). A partir de dados iniciais, foram dispostas caracterizações e resistências, objetivando o seguinte traço definitivo em proporção:

$$1:1,8:2,17:0,54$$

A partir do consumo de cimento, constatou-se que, conforme a norma, o concreto dosado pode ser utilizado para ambientes de até classe IV de agressividade, considerado muito agressivo pela norma NBR 12665(ABNT, 2015). O fator argamassa, ou teor de argamassa encontrado, foi de 46,9%, valor que se encaixa dentro dos limites propostos pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), cujos teores variam de 30% a 90% (ISAIA, 2011).

4.4 AQUISIÇÃO E CORTE DOS FIOS

A classificação das fibras metálicas é estabelecida quanto à sua conformação e seu processo de produção, posteriormente distinguidas com base no tipo e classe pertencentes (ABNT, 2007a). Nesse estudo, foram estabelecidas fibras do tipo R, que correspondem às fibras retas, isto é, sem ancoragem nas extremidades devido ao fato de serem produzidas sem a execução de processos industriais, e sim através do simples corte de fios. Quanto à sua classe, as fibras utilizadas pertencem à classe I, classificação condizente com a produção por meio de arame trefilado a frio.

Após a aquisição de fios de arame galvanizado e arame recozido, as fibras foram cortadas, visando à obtenção de um fator de forma (λ) 40, calculado com base na ABNT (2007a). A obtenção de misturas uniformes é completamente afetada quando o fator de forma empregado é superior a 100 (CHANH, 2005 *apud* GÓIS, 2010). Todos fios foram adquiridos com o mesmo diâmetro, sendo este obtido por meio da classificação britânica Birmingham Wire Gauge (BWG) de 18, correspondente a 1,25mm.

Tendo os valores de fator de forma e diâmetro definidos, obteve-se, então, o comprimento necessário para cada fibra, por meio da seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{C}{D}$$

λ = Fator de forma
C= Comprimento
D= Diâmetro

Dessa forma, obteve-se um comprimento de 50 mm para cada fibra. Figueiredo (2011) recomenda que o comprimento do filamento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo empregado no concreto. As fibras, então, foram produzidas através de corte manual com alicate específico para cortes de fios de aço. Como, na dosagem, foi proposto um volume de 31,52 litros de concreto e, na metodologia deste trabalho, foram propostas taxas de consumo de fibras de 15 kg/m³ e 30 kg/m³, foi necessário o corte de 1,42 kg de cada tipo de cada arame utilizado.

Figura 2 - Fios e Alicates



Fonte: O próprio autor

Em seguida, foi realizado o amassamento do concreto e a moldagem das vigas, conforme a ASTM C1609/C1609M-12 e dos corpos de prova, de acordo com a ABNT NBR 5738:2008. O processo de cura do concreto se deu por meio de sua submersão em um tanque de água.

Figura 3 - Materiais separados (a), processo de amassamento (b) e teste de slump (c)



Fonte: O próprio autor

No que se refere à trabalhabilidade, quanto maiores os teores de fibras empregados, menos trabalhável será o concreto (GUIMARÃES, 1999). O concreto confeccionado obteve slump de 160 mm, sendo uma trabalhabilidade avaliada positiva para a utilização de reforços com fibras.

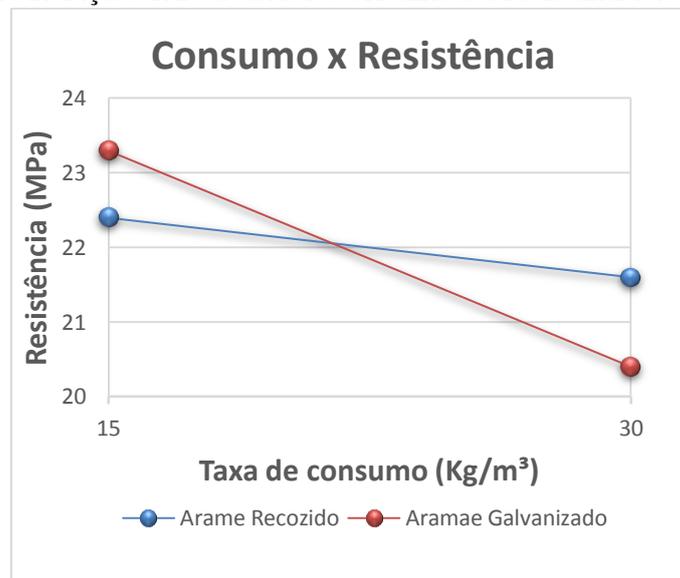
4.5 ROMPIMENTO

Após o processo de cura, as vigas e os corpos de prova foram levados à prensa Universal EMIC, situada no Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção, no Centro Universitário de Patos de Minas. Os corpos de prova foram rompidos com taxa de tensão de 0,45 MPa/s, em conformidade com a ABNT NBR 5739:2018. Já as vigas, foram rompidas em duas velocidades de carregamento, sendo a primeira 10 mm/min (carregamento quase-estático) e 500 mm/min (carregamento dinâmico)

4.5.1 Compressão

Em média, o concreto resiste à compressão, aproximadamente dez vezes mais do que à tração (BOTELHO; MARCHETTI, 2013). Nesse estudo, foram ensaiados concretos produzidos com taxas de 15 kg/m³ e 30 kg/m³ de fibras produzidas a partir de arames de aço galvanizado (alto carbono) e aço recozido (baixo carbono). As resistências obtidas podem ser analisadas com base no gráfico a seguir:

Gráfico 1 - Relação entre a taxa de consumo e a resistência à compressão



Fonte: O próprio autor

Nota-se que, em ambos os tipos de fibras, as resistências diminuíram com a maior taxa de consumo de fibras, sendo que, no caso do aço galvanizado, a resistência diminuiu em maior proporção. Apesar das insignificantes variações, o decréscimo da

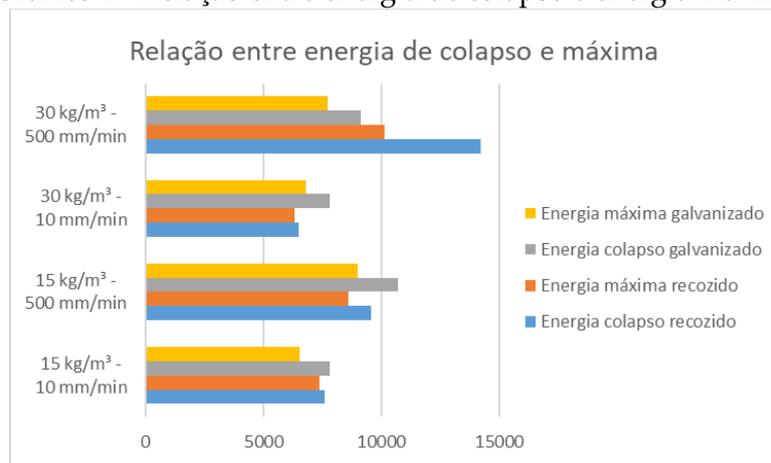
resistência pode ser observado como o aumento do teor de ar provocado pela adição das fibras (MEDEIROS, 2012).

4.5.2 Flexão

O ensaio de flexão das vigas foi realizado conforme a ASTM C1609/C1609M-12, com adaptação no método de rompimento para três pontos devido às pequenas dimensões da viga, sendo dois apoios e um cutelo de carregamento, o que implica um momento máximo no centro das vigas, correspondente a $PL/4$ (carga x vão / 4)

Foram empregadas duas velocidades de carregamento para cada taxa de consumo, sendo uma velocidade lenta de 10 mm/min, para que todas as taxas se mantivessem entre 15 MPa/min e 25 MPa/min e, por fim, uma velocidade máxima permitida pela prensa utilizada, de 500 mm/min, com o intuito de se obter energia próxima de cargas dinâmicas. Para cada taxa de consumo, foram ensaiadas três vigas com dimensões 10cm x 10 cm x 40cm.

Gráfico 2 - Relação entre energia de colapso e energia máxima



Fonte: O próprio autor

Nota-se que, em todos os casos, as velocidades de carregamento de 500 mm/min apresentaram valores de energia maiores que as de 10 mm/min tanto a de colapso, quanto a máxima. Whatch (2001) menciona que a velocidade de carregamento em ensaios de flexão de vigas influencia diretamente nas energias de recebidas pelas vigas.

Percebeu-se grande proximidade entre as energias máximas e de colapso para todas as amostras, com exceção das do concreto com 30 kg/m³ de arame recozido ensaiado a 500 mm/min, em que é possível verificar grande acréscimo de energia absorvida entre a ruptura e o colapso da carga, o que demonstra um ganho de tenacidade após ruptura.

Percebeu-se também que as resistências se mantiveram constantes entre todas as taxas de consumo, variando, dessa forma, as resistências entre as velocidades de carregamento. Nas maiores velocidades, as energias aumentaram proporcionalmente em todos os ensaios.

5 CONCLUSÕES

A metodologia de dosagem se mostrou adequada à obtenção de concreto de cimento Portland, com resistência adequada e consistência fluida.

A inserção das fibras metálicas reduziu sobremaneira a resistência à compressão, devido, possivelmente, ao aumento do teor de vazios na matriz do concreto. A redução de resistência à compressão foi mais acentuada para o concreto com fios de arame galvanizado, sendo da ordem de 12%.

Com a presença de fibras, obtiveram-se energias de colapso e força máxima da ordem de 6 a 10 kN.mm, sendo mais pronunciada a energia de colapso obtida pelas vigas com arame recozido quando ensaiadas a taxa de 500 mm/min, o que demonstra sua boa aplicação para reforço de concretos que serão submetidos a solicitações de impacto ou vibrações acentuadas.

Mais estudos são necessários para determinação do comportamento estrutural desses concretos na construção civil, de modo a avaliar a propagação de fissuras, a durabilidade frente a diferentes ambientes e a resistência de elementos de concreto armado com reforço de fibras na matriz de concreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**. Fibras de aço para concreto: especificações. Rio de Janeiro, 2007a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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 12665**. Concreto de Cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**. Gesso para construção civil: determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. **Fibras de Aço para Concreto em Pisos Industriais**: especificações. São Paulo, 2012. 4 p.

BATTAGIN, Arnaldo Forti *et al.* Influência das condições de Cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho. **Instituto Brasileiro do Concreto**: 44^o Congresso Brasileiro, Belo Horizonte, v. 1, p.5-5, 17 ago. 2002.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 7 ed. São Paulo: Blucher, 2013. v. 1.

CARASEK, Helena *et al.* Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, Goiânia, p.719-719, 18 fev. 2016.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduo de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, v.17, n.1, p19-28. 2008.

CERVO, Tatiana Cureau; CERVO, Tatiana Cureau. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação**. 2004. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, São Paulo, 2004.

FABRO, Fabiana *et al.* Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Instituto Brasileiro do Concreto**: Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 4, n. 2, p.211-211, nov. 2011. Bimestral.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Epusp, 2000. 71 p.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2011.

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GÓIS, Fernanda Alves Pinto. **Avaliação experimental do comportamento do concreto fluido reforçado com fibras de aço**: influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GUIMARÃES, Ana Elisabete Paganelli. **Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo - SP. 1999.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. 1992. **Manual de dosagem e controle do concreto**, São Paulo, SP, Ed. Pini

ISAIA, C, G. **Concreto**: ciência e tecnologia: a evolução do concreto estrutural. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1.

ISAIA, C, G. **Concreto**: ciência e tecnologia: a evolução do concreto estrutural. São Paulo: IBRACON, 2011. v. II.

MEDEIROS, Artur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

NASCIMENTO, T. G. *et al.* **Modelagem de misturas em uma argamassa mista de cimento, cal e areia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, 2012.

PETRUCCI, Eladio G. R.. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Globo, 1973.

PILOTTO NETO, Egidio. **Caderno de receitas de concreto armado**. São José dos Campos: Gen, 2017. 202 p.

SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAMPITELI, Vicente C. **Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis, 2005.

TERZIAN, P.; HELENE, P. **Manual da dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, v. 19, p. 5-18, 2004.

VILLARES, Ana Maria Oliveira. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado) - Unicamp. Campinas, 2001.