



CBT
COMITÊ
BRASILEIRO
DE TÚNEIS

PRÁTICA RECOMENDADA
**Concreto projetado
reforçado com fibras**

2020

**Antonio D. de Figueiredo
Renan P. Salvador
Renata Monte
Alan Renato Estrada**



CBT
COMITÊ
BRASILEIRO
DE TÚNEIS

PRÁTICA RECOMENDADA
**Concreto projetado
reforçado com fibras**

Antonio D. de Figueiredo
Renan P. Salvador
Renata Monte
Alan Renato Estrada

2020

APRESENTAÇÃO

O Comitê Brasileiro de Túneis é uma entidade de caráter técnico-científico ligada à Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Fundado em 1990, o CBT reúne profissionais, acadêmicos e empresas da área para discutir questões relativas a túneis e propor soluções subterrâneas para cidades e projetos de infraestrutura de diversas áreas e regiões, visando sempre ao bem-estar comum e à segurança da sociedade.

Esta publicação tem como objetivo disseminar as melhores práticas quanto ao uso do concreto projetado para construções subterrâneas, com diretrizes e artigos assinados por renomados profissionais do setor.

A concepção do projeto teve início na Diretoria 2017-2018 do CBT, composta por:

presidente

Werner Bilfinger

vice-presidente

Jairo Pascoal Júnior

secretário geral

Cássio Luis Abeid Moura

secretário executivo

Eloi Angelo Palma Filho

tesoureiro

Fernando Leyser Gonçalves

A conclusão das publicações e início da distribuição aconteceu em na Diretoria 2019-2020. No período, compõem a Diretoria do CBT:

presidente

Jairo Pascoal Júnior

vice-presidente

Fernando Leyser Gonçalves

secretário geral

Adriano Dornfeld Saldanha

secretário executivo

Felipe Gobbi

tesoureiro

Eloi Angelo Palma Filho

E a Diretoria da ABMS é formada por:

presidente

Alexandre Gusmão

vice-presidente

Maurício Martinez Sales

secretário geral

Gustavo Ferreira Simões

secretária executiva

Ana Cristina Castro Fontenla

Sieira

tesoureiro

William Roberto Antunes

AUTORES

Antonio Figueiredo

Professor Associado da área de materiais de construção no Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1989 onde fez mestrado (1993), doutorado (1997) e livre-docência (2011) abordando os temas de concreto projetado e o concreto com fibras.

Renan Salvador

Coordenador do programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu na área de materiais de construção e professor adjunto da mesma universidade. Bacharel em Química pelo Instituto de Química da Universidade de São Paulo (2007), Mestre em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2012), Doutor em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Politécnica da Catalunha, BarcelonaTech (2016) e Pós-doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2019). Atua principalmente em desenvolvimento de aditivos para misturas cimentícias, concreto projetado e durabilidade de materiais.

Renata Monte

Engenheira Civil atuando desde 2000 como Especialista em laboratório no Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo onde fez mestrado (2003) e doutorado (2015). Os principais temas de pesquisa são o concreto com fibras e a avaliação experimental de materiais e componentes de construção.

Alan Estrada

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidad Nacional del Altiplano - Peru (2010). Mestrado em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Brasil (2015), onde atualmente faz doutorado. Tem experiência na área de Construção Civil, com ênfase em Concreto Reforçado com Fibras e Concreto Projetado.

REVISORES

Professor Dr. Tarcísio Barreto Celestino

Professor Dr. Fernando Rebouças Stucchi

1. OBJETIVO

A prática recomendada aqui apresentada procura estabelecer os requisitos mínimos para a especificação do concreto projetado reforçado com fibras (CPRF) destinado à aplicação em revestimentos de túneis com finalidade estrutural, bem como proporcionar orientações para a garantia de sua aplicação em conformidade com a boa prática recomendada internacionalmente. Propõe-se aqui também uma metodologia de dosagem das fibras no concreto de modo a atender os referidos requisitos, além de um procedimento para controle da qualidade do mesmo durante a execução da obra.

2. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- ABNT NBR NM67:1998. Concreto - Determinação de Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.
- ABNT NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
- ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.
- ABNT NBR 7211:2009 - Agregados para concreto - Especificação.
- ABNT NBR 7222:2011 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.
- ABNT NBR 9778:2005 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.
- ABNT NBR 11768:2011 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos.
- ABNT NBR 15577-1:2018 - Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.
- ABNT NBR 15577-2:2018 - Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.
- ABNT NBR 15577-3:2018 - Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.
- ABNT NBR 15577-4:2018 - Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.
- ABNT NBR 15577-5:2018 - Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5:
- Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.
- Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.
- Fibras de aço para concreto - Especificações.
- Standard test method for flexural toughness of fiber-reinforced concrete (using centrally loaded round panel).
- Concreto - extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: resistência à compressão axial.
- Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity.
- European Specification for Sprayed Concrete. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, UK, 1996. www.efnarc.org
- Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures (EFNARC), Hampshire, UK, 2006. www.efnarc.org
- Testing sprayed concrete - Part 3: Flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fibre reinforced beam specimens.
- Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.
- Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não

Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. 2017a.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. 2017b.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Macrofibras de vidro álcali resistentes (AR) para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. 2017c.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. 2016.

3. ESCOPO

Este documento procura orientar projetistas, especificadores e executores de revestimentos de túneis com concreto projetado reforçado com fibras (CPRF) sobre as melhores práticas para abordar o material com finalidade estrutural. Aqui serão abordados os aspectos que devem ser respeitados segundo a normalização brasileira pertinente e as recomendações para a melhor prática de aplicação do concreto projetado. Vale ressaltar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas disponibiliza um conjunto de normas abordando o concreto projetado, listadas no item seguinte, que devem ser respeitadas para a correta aplicação do material.

4. NORMAS ABNT SOBRE CONCRETO PROJETADO

É importante frisar que o comportamento do CPRF depende, fundamentalmente, da qualidade da matriz, ou seja, do próprio concreto projetado. Portanto, é fundamental que o material seja especificado como um todo para que seja capaz de atender aos requisitos inerentes à sua aplicação estrutural. Neste sentido, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem publicado um conjunto de normas técnicas abordando o concreto projetado, listadas a seguir:

- ABNT NBR 13044:2012 - Concreto Projetado - Reconstituição da mistura recém-projetada.
- ABNT NBR 13069:2012 - Concreto Projetado - Determinação dos tempos de pega em pasta de cimento Portland com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega.
- ABNT NBR 13070:2012 - Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados.
- ABNT NBR 13317:2012 - Concreto Projetado - Determinação do índice de reflexão por medição direta.
- ABNT NBR 13354:2012 - Concreto Projetado - Determinação do índice de reflexão em placas.
- ABNT NBR 13597:2012 - Procedimento para qualificação de mangoteiro de concreto projetado aplicado por via seca.
- ABNT NBR 14026:2012 - Concreto Projetado - Especificação.
- ABNT NBR 14278:2012 - Concreto Projetado - Determinação da consistência através da agulha de proctor.
- ABNT NBR 14279:1999 - Concreto Projetado - Aplicação por via seca - Procedimento.

5. REQUISITOS QUANTO AOS MATERIAIS

5.1. Cimento

O cimento a ser utilizado no CPRF deve estar de acordo com o recomendado pela norma ABNT NBR 14026:2012. A critério do projetista, poderão ser especificados outros requisitos para o cimento destinado à obra em que seja utilizado o CPRF.

A quantidade de cimento a ser utilizada na produção do CPRF deve ser determinada em estudo prévio de dosagem com caracterização de comportamento e comprovação de que tenha atendido aos requisitos especificados em projeto. Este estudo prévio deve ser realizado utilizando-se os equipamentos e mão de obra específicos da obra em questão, tal qual é definido pela norma ABNT NBR 14026:2012, que exige a execução de estudos prévios nessas condições.

5.2. Agregados

Os agregados a serem utilizados no CPRF devem estar de acordo com os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 14026:2012. Não há um limite pré-estabelecido para a dimensão máxima do agregado, mas recomenda-se que a mesma não ultrapasse um terço do diâmetro interno do mangote. Quanto maior for a dimensão máxima do agregado, maior também será o risco de bloqueios de fluxo e entupimentos do mangote. Portanto, recomenda-se diminuir ainda mais a dimensão máxima do agregado de modo a minimizar problemas durante o processo de projeção. Além disso, os agregados devem atender às exigências estabelecidas na série de normas ABNT NBR 15577: 2018 ou às demais exigências específicas que o projetista considerar relevantes.

A quantidade de agregados e suas devidas proporções a serem utilizadas na produção do CPRF devem ser determinadas em estudo prévio de dosagem com caracterização de comportamento e comprovação de que

tenha atendido aos requisitos especificados em projeto, conforme exigido pela norma ABNT NBR 14026:2012. Como sugestão para distribuição granulométrica da mistura de agregados, recomenda-se adotar as faixas apresentadas na **Tabela 1**. Recomenda-se que a dimensão máxima do agregado não ultrapasse 50% do comprimento da fibra utilizada.

Abertura de peneira (mm)	Porcentagens em massa retidas e acumuladas
12,5	0
9,6	0-10
6,3	5-20
4,8	10-30
2,4	20-50
1,2	30-65
0,6	40-75
0,3	70-90
0,15	90-98

Tabela 1: Faixa de distribuição granulométrica recomendada para a mistura de agregados para a matriz de concreto projetado.

5.3. Aditivos

Os aditivos a serem utilizados no CPRF devem estar de acordo com o recomendado pela norma ABNT NBR 11768:2011. A quantidade de aditivos e suas devidas proporções a serem utilizadas na produção do CPRF devem ser determinadas em estudo prévio de dosagem com caracterização de comportamento e comprovação de que tenha atendido aos requisitos especificados em projeto, conforme exigido pela norma ABNT NBR 14026:2012.

5.4. Fibras

As fibras de aço a serem utilizadas na produção do CPRF devem, ao menos, atender aos requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR 15530:2007. Não há um limite para as dimensões das fibras, mas deve-se ter em mente que fibras muito longas, com comprimentos superiores à metade do diâmetro interno do mangote, irão produzir um risco significativo de bloqueios. Por outro lado, fibras muito curtas apresentam menor capacidade de reforço, o que pode prejudicar a resistência residual pós-fissuração do material. A critério do projetista, podem ser estabelecidos outros requisitos complementares para as fibras de aço.

As macrofibras poliméricas com diâmetro superior a 0,3 mm a serem utilizadas na produção do CPRF com papel de reforço mecânico devem, ao menos, atender aos requisitos estabelecidos na Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade, publicada pelo CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. A critério do projetista, podem ser estabelecidos outros requisitos complementares para as macrofibras.

As microfibras poliméricas com diâmetro inferior a 0,3 mm a serem utilizadas na produção do CPRF com papel de proteção passiva quanto ao lascamento explosivo do material durante a ocorrência de um incêndio devem atender, minimamente, ao especificado na norma BS EN 14889-2:2006 para as fibras Classe Ia ou Ib, para fibras monofilamento e fibriladas, respectivamente. A critério do projetista, podem ser estabelecidos outros requisitos complementares para as microfibras.

As macrofibras de vidro a serem utilizadas na produção do CPRF com papel de reforço mecânico devem, ao menos, ser álcali-resistentes e atender aos requisitos estabelecidos na Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Macrofibras de vidro álcali resistentes (AR) para concreto destinado a aplicações estruturais: definições, especificações e conformidade, publicada pelo CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE

sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. A critério do projetista, podem ser estabelecidos outros requisitos complementares para as macrofibras de vidro.

A quantidade de fibras, macrofibras ou microfibras e suas devidas proporções a serem utilizadas na produção do CPRF devem ser determinadas em estudo prévio de dosagem com caracterização de comportamento e comprovação de que tenha atendido aos requisitos especificados em projeto, conforme exigido pela norma ABNT NBR 14026:2012.

5.5. Água

A água a ser utilizada no CPRF deve estar de acordo com o recomendado pela norma ABNT NBR 14026:2012.

6. REQUISITOS MÍNIMOS A SEREM ATENDIDOS PELO CPRF

6.1. Requisitos básicos associados à matriz

A matriz de concreto que receberá o reforço de fibras deverá atender aos mesmos requisitos especificados para o concreto projetado convencional em termos de exigências de resistência e parâmetros de durabilidade estabelecidos na norma ABNT NBR 14026:2012. Estes requisitos devem ser verificados previamente à aplicação do CPRF na obra através de estudo prévio comprobatório realizado com os mesmos equipamentos e mão de obra da obra e através da moldagem de placas, segundo a norma ABNT NBR 13070:2012. Devem ser respeitadas as tolerâncias de variação dessas propriedades estabelecidas na norma ABNT NBR 14026:2012.

6.1.1. Resistência à compressão axial

O responsável pelo projeto deve especificar um valor mínimo para resistência à compressão axial do CPRF. Este valor poderá ser definido em termos de valor médio ou característico em função das premissas estabelecidas em projeto. Minimamente, esta resistência deverá ser determinada através do ensaio estabelecido pela norma ABNT NBR 5739:2018 durante os procedimentos de dosagem e pré-qualificação do concreto projetado e repetido durante os procedimentos de controle de qualidade. Qualquer que seja a situação, o ensaio deve ser realizado, pelo menos, a partir da extração de testemunhos (procedimento descrito no Anexo A) de placas moldadas segundo a norma ABNT NBR 13070:2012. Os valores de resistência devem ser corrigidos segundo os critérios apontados pela norma NBR 7680-1 (2015). É sempre facultado ao projetista e recomendável o estabelecimento de uma rotina de extração de testemunhos da estrutura, com critério de amostragem pré-estabelecido, de modo a garantir que não haja distanciamento entre as características do concreto projetado em placas e projetado no revestimento do túnel.

6.1.2. Absorção de água, massa específica e volume de vazios permeáveis

A critério do projetista poderá ser exigida a determinação da absorção de água por imersão e ferverura, da massa específica e do volume de vazios permeáveis do concreto projetado através do ensaio ABNT NBR 9778:2005. Esta determinação deverá ser realizada nos estudos prévios de dosagem e, nos casos em que o responsável pelo projeto julgar necessário, durante o controle regular de qualidade do CPRF. Qualquer que seja a situação, o ensaio deve ser realizado a partir da extração de testemunhos (procedimento descrito no Anexo A) de placas moldadas segundo a norma ABNT NBR 13070:2012.

6.1.3. Resistência à tração na flexão

A resistência à tração é, fundamentalmente, uma propriedade ligada à matriz de concreto. Portanto, havendo a especificação desta propriedade, deve-se executar estudos de dosagem prévios para a matriz de CPRF de modo a atender este requisito. O responsável pelo projeto deve especificar um valor mínimo para resistência à tração na flexão do CPRF. Este valor poderá ser definido em termos de valor médio ou característico em função das premissas estabelecidas em projeto. Esta resistência deverá ser determinada em conjunto com o ensaio de flexão em prismas, com deformação controlada, utilizado para determinação da resistência residual do CPRF. Os prismas para a realização do ensaio de flexão devem ser, obrigatoriamente, obtidos a partir de testemunhos extraídos de placas projetadas com o CPRF. Não é admissível adotar resultados obtidos a partir de prismas moldados ou não extraídos de placas moldadas. Como a geometria da fôrma definida na norma ABNT NBR 13070:2012 para a moldagem de placas não é adequada para a extração de testemunhos prismáticos para o ensaio de tração na flexão com deflexão controlada, recomenda-se aqui seguir o procedimento descrito no Anexo B para a produção das placas. Dado que este ensaio não se encontra normalizado no Brasil, o seu procedimento se encontra descrito no Anexo C. Vale aqui ressaltar o fato de que não é adequado controlar a resistência à tração do CPRF através do ensaio de compressão diametral (norma ABNT NBR 7222:2011) dado que é um ensaio tipicamente aplicável para

materiais frágeis e a utilização do material proporcionada pelas fibras acaba por gerar riscos de distorção dos resultados que podem ser superestimados. Apesar da norma ABNT NBR 14026:2012 recomendar este ensaio, o mesmo só é aplicável para concretos projetados sem fibras.

6.2. Requisitos associados ao reforço de fibras

Quando da utilização de Concreto Reforçado com Fibras (CRF) para finalidades estruturais deve-se estabelecer níveis mínimos de comportamento do material e a metodologia vinculada à sua determinação. Não se pode utilizar o CRF para finalidades estruturais baseando-se apenas em prescrições empíricas de consumos de fibras. Assim, o projetista deve definir os padrões de comportamento associados ao CRF para cada aplicação e o ensaio que deve ser utilizado para a sua verificação. Aqui ficam estabelecidos os dois ensaios, adequados para a condição laboratorial brasileira, disponíveis na normativa internacional para o CRF e dois ensaios específicos para o controle do CPRF.

6.2.1. Resistência residual na flexão

O ensaio a ser utilizado para a quantificação da resistência residual do CPRF é o descrito

no Anexo C. Este ensaio é equivalente ao recomendado pela EFNARC (1996) e norma europeia EN14488-3:2006, que também utiliza prismas serrados a partir de placas projetadas. A determinação das faixas de resistência residual do CPRF deve ser feita em testemunhos obtidos a partir do corte de prismas de placas projetadas conforme o descrito no Anexo B. A especificação da EFNARC (2006) define também as faixas de resistência residual conforme o apresentado na **Tabela 2**. A faixa de resistência residual a ser escolhida, bem como as classes de deformação a serem controladas, é critério do projetista da estrutura. As faixas de resistência irão depender do nível de competência de um maciço, para o caso de um túnel. Da mesma forma os níveis de deformação a serem controlados dependerão do nível de deformação previsto para o maciço até a sua estabilização.

Todas as classes de tenacidade especificadas correspondem ao definido pela Especificação Europeia para Concreto Projetado (EFNARC, 1996 - especificação encontrada no site www.efnarc.org), para um nível de deflexão normal do corpo de prova, ou seja, 2 mm. Os valores devem ser atendidos pelo menos por três corpos de prova de cada quatro ensaiados conforme o procedimento do Anexo C.

Classe de deformação	Deflexão do corpo de prova (mm)	Resistência residual por classe (MPa)			
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Inicial	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
Baixa	1	1,3	2,3	3,3	4,3
Normal	2	1	2	3	4
Alta	4	0,5	1,5	2,5	3,5

Tabela 2: Requisitos de resistência residual mínima especificada para o concreto projetado com fibras (EFNARC, 1996).

6.2.2. Absorção de energia

Para a qualificação do CPRF e nos estudos de dosagem, devem ser utilizados os ensaios de absorção de energia durante os estudos prévios à obra. Este ensaio também é recomendado pela EFNARC (1996) e deve ser realizado segundo a norma EN14488-3:2006. Este método de ensaio

se encontra apresentado no Anexo D, onde conta com um maior detalhamento e onde se incluem as otimizações propostas por FIGUEIREDO (1997).

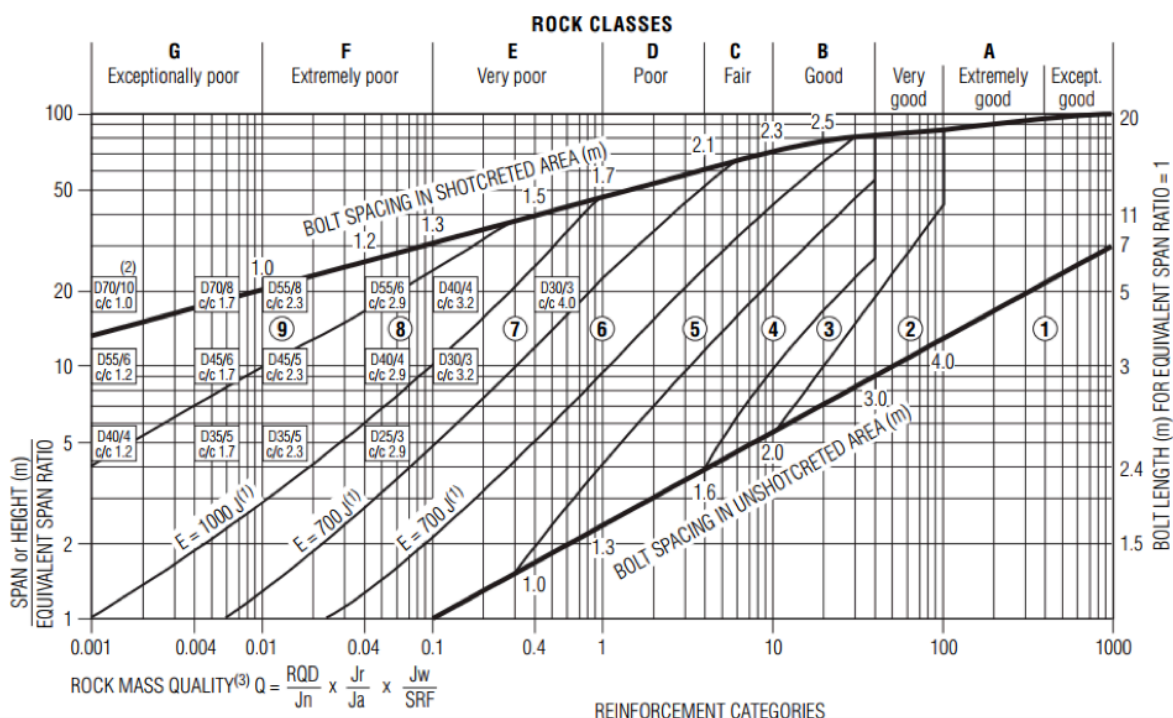
Fica a cargo do projetista a definição dos níveis de absorção de energia mínimos a serem especificados para o CPRF, seguindo o

mesmo raciocínio da definição dos requisitos de resistência residual apresentados no item anterior. A título de ilustração, está apresentado na **Figura 1** o diagrama recomendado pela Australian Shotcrete Society, através do Concrete Institute of Australia (2010) para a definição do nível de energia absorvida no ensaio de punção de placas quadradas em função da qualificação do maciço. Os níveis de absorção previstos estão apresentados na **Tabela 3**. No caso de haver capacitação laboratorial disponível, o método de ensaio a ser preferencialmente utilizado para a determinação do nível de absorção de energia é o ASTM C1550:2005. Os níveis de absorção de energia equivalentes¹ também estão apresentados na **Tabela 3**.

Classe de absorção de energia	Absorção de energia em Joule para uma deflexão de 25 mm	Absorção de energia em Joule ASTM C1550:2005
A	500	200
B	700	280
C	1000	400

Tabela 3 Requisitos de nível mínimo de absorção de energia especificados para o CPRF (EFNARC, 1996) e seus correspondentes para o ensaio de absorção de energia em placa circular ASTM C1550.

1 A definição dos níveis equivalentes de absorção de energia foi definida segundo GRANT; RATCLIFFE; PAPWORTH (2001) e PAPWORTH (2002).



- REINFORCEMENT CATEGORIES
- ① Unsupported
 - ② Spot bolting
 - ③ Systematic bolting
 - ④ Systematic bolting + unreinforced shotcrete (40–100 mm)
 - ⑤ Fibre-reinforced shotcrete (50–90 mm) + bolting
 - ⑥ Fibre-reinforced shotcrete (90–120 mm) + bolting
 - ⑦ Fibre-reinforced shotcrete (120–150 mm) + bolting
 - ⑧ Fibre-reinforced shotcrete (> 150 mm) + reinforced shotcrete ribs + bolting
 - ⑨ Cast concrete lining

NOTES:

- (1) Energy absorption in fibre-reinforced shotcrete at 25 mm deflection in EN 14488 square plate testing.
- (2) For further details in reading this Chart, see Grimstad, E. & Barton, N. "Updating the Q System for NMT" In the Proceedings of International Symposium on Sprayed Concrete. Fagernes, Norway, pp 21, 1993.
- (3) See text for explanation of terms

Figura 1 Estimativa de categorias de capacidade de suporte baseada no Índice Q de Qualidade do Maciço (adaptado de Grimstad & Barton, 1993).

6.2.3. Ensaio de duplo puncionamento

Para a realização do controle do CPRF também pode-se adotar o ensaio de duplo puncionamento, conforme o descrito na prática recomendada IBRACON/ABECE - Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. Este ensaio deve ser realizado em cilindros de 10 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Desta forma, recomenda-se proceder à moldagem de placas para extração dos testemunhos respeitando as dimensões e os procedimentos estabelecidos na norma NBR ABNT 13070:2012. A preparação dos corpos de prova a partir dos testemunhos cilíndricos extraídos deve ser complementada pelo corte dos topos e retificação dos mesmos de modo a garantir paralelismo e planicidade dessas superfícies. Para que seus resultados sejam passíveis de utilização no controle do CPRF, deve-se realizar prévia correlação dos resultados obtidos para a resistência residual pós-fissuração durante os estudos prévios de dosagem e qualificação do CPRF. Conforme o recomendado nesta prática, podem-se adotar as forças de pico e as resistentes pós-fissuração correspondentes a deslocamentos verticais de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm (Pf, P0,5, P1,5, P2,5 e P3,5) como correspondentes às resistências residuais pós-fissuração f_{ct} , $fr_{0,5mm}$, fr_{1mm} , fr_{2mm} e fr_{4mm} , respectivamente.

Da mesma forma, pode-se obter uma correlação entre a energia absorvida no ensaio de punção de placas com a tenacidade medida no ensaio de duplo puncionamento até o deslocamento de 3,5 mm. Vale ressaltar que são necessários, no mínimo, seis corpos de prova cilíndricos para a qualificação inicial do CPRF ou para a execução do procedimento de dosagem e, no mínimo, três corpos de prova para a execução do controle corriqueiro em cada determinação. Todos estes corpos de prova devem ser preparados a partir de testemunhos extraídos de placas moldadas segundo a norma ABNT NBR 13070:2012, não sendo admissível a utilização de corpos de prova moldados.

6.2.4. Teor de fibras efetivamente incorporado ao concreto

Este ensaio deve ser utilizado durante os estudos prévios de dosagem e qualificação do CPRF de modo a verificar o teor de fibras efetivamente incorporado ao material. Este teor é fortemente afetado pela reflexão e isto impacta diretamente no comportamento pós-fissuração do material. Também se deve utilizar este ensaio a intervalos regulares durante o procedimento de controle de aceitação do concreto. Este ensaio deve ser realizado segundo o procedimento descrito no Anexo E.

6.2.5. Resistência ao lascamento explosivo

A capacidade do revestimento de túnel executado com o CPRF de resistir à ação de altas temperaturas se dá, em boa medida, pela utilização de microfibras de polipropileno que minimizam pressões internas geradas pelo vapor e, dessa maneira, reduzem o risco de ruptura do revestimento. Este tipo de comportamento deve ser objeto de análise rigorosa nos estudos prévios recomendados pela normalização brasileira (ABNT NBR 14026:2012). Para a validação da solução, é fundamental a realização de estudo experimental de homologação do CPRF, o qual pode ser feito de acordo com o especificado pela EFNARC (2006). O uso de traços empíricos pode implicar em riscos de segurança para a estrutura e, portanto, todos os projetos de túneis onde há risco de ocorrência de incêndio devem prever avaliações prévias que homologuem a solução.

7. CONDIÇÕES GERAIS DE PROJEÇÃO

É dever do responsável pela execução do serviço garantir as boas condições de projeção para o concreto projetado, respeitando as recomendações estabelecidas na norma ABNT NBR 14026 (2012) quanto aos requisitos de execução e os procedimentos de controle do processo de projeção. Não se pode negligenciar as condições de manutenção do equipamento, devendo estar atento para o fato de que, quando da utilização de fibras de aço, ocorre maior desgaste de peças como disco de borracha e mangote, os quais devem ser periodicamente verificados.

Atenção especial deve ser dada à continuidade do fluxo e da vazão do material de modo a garantir boas condições de compactação, dado que isto é obtido pela própria energia do jato de projeção. Dessa maneira, é fundamental atender aos valores mínimos de capacidade do compressor estabelecidos pelo fabricante de equipamento de projeção. Vale ressaltar que, no caso de utilização de fibras, o fluxo do material é dificultado, devendo-se então prover um aumento de, pelo menos, 20% na capacidade do compressor estabelecida pelo fabricante como mínima.

É fundamental garantir que a equipe de projeção seja bem qualificada, recomendando-se especial atenção à qualificação do mangoteiro, principal responsável pela qualidade do material e economia da projeção.

8. PROGRAMA DE CONTROLE DE QUALIDADE

8.1. Estudos prévios

A realização de um programa de controle de qualidade eficaz para o concreto projetado destinado ao revestimento de túnel é muito dependente da realização de estudos prévios. Deve-se validar o traço do CRF e do CPRF a ser utilizado na obra por meio de um estudo de dosagem prévio à execução da mesma. A normalização brasileira (ABNT NBR 14026:2012) exige que estes estudos sejam realizados de modo a validar a solução previamente à execução da obra. Nestes estudos prévios, pode-se realizar a calibração das correlações entre os ensaios de flexão (Anexo C) e punção de placas (Anexo D) com o ensaio de duplo punção (Prática Recomendada CT303, 2017a), em termos de capacidade resistente residual e absorção de energia. Dessa forma é possível realizar toda a caracterização do material e familiarizar o pessoal responsável pela aplicação do CPRF com a operação do equipamento e as condições de aplicação do material. Os valores de caracterização desse traço devem ser submetidos à fiscalização da obra, responsável pela verificação do cumprimento dos requisitos estabelecidos pelo projetista.

Como elemento ilustrativo, se encontra apresentado no Anexo F um exemplo de dosagem experimental do CPRF. A dosagem das fibras no concreto deve ser feita segundo um procedimento experimental, sendo totalmente desaconselhável a utilização de traços pré-definidos dado que a interação entre fibra matriz proporciona uma grande diversidade de respostas. O procedimento de dosagem recomendado para o concreto projetado resume-se apenas à definição do consumo de fibra por metro cúbico de concreto que alimenta a máquina de projeção. Supõe-se que a matriz de concreto projetado já tenha sido sujeita a um procedimento de dosagem e avaliação prévio, de modo a garantir que a mesma atenda aos requisitos de resistência à compressão. Existem métodos propostos no Brasil para a realização de estudos de dosagem experimental do concreto projetado que podem ser adotados

segundo o discernimento dos responsáveis (PRUDÊNCIO Jr., 1993; FIGUEIREDO, 1997).

8.2. Avaliação dos requisitos associados à matriz

A matriz de CPRF deve ser controlada segundo as especificações originais para o material sem fibras em termos de evolução da resistência à compressão, absorção de água e outras propriedades exigidas pelo especificador. O projetista é responsável pelo estabelecimento do nível de controle e sua frequência, bem como os parâmetros relevantes para o programa de controle. No caso de grandes volumes, como ocorre com o revestimento de túneis em CPRF, pode-se utilizar a recomendação que consta da **Tabela 4**, adaptada a partir da recomendação da EFNARC (1996), como orientação para o estabelecimento dos lotes a serem julgados. Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo reduzido, normal ou rigoroso. É recomendável que a cada determinação dos valores de resistência e absorção de água seja feita através de três corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos. Na verificação do material quanto ao atendimento dos requisitos de resistência à compressão, em cada determinação, o valor médio obtido de três corpos de prova deve ser, no mínimo, superior a 95% do valor determinado nos estudos prévios, conforme o estabelecido na norma ABNT NBR 14026. A determinação da absorção para verificação de sua conformidade deve ser realizada em, no mínimo, dois corpos de prova e a tolerância do valor médio obtido em relação ao determinado nos estudos prévios é de 3%, conforme estabelece a norma ABNT NBR14026.

8.2.1. Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão mínima especificada para o CPRF pode ser controlada em conjunto com o ensaio de determinação da tenacidade em prismas. A frequência de realização deste ensaio deve ser estabelecida pelo projetista. No caso de grandes volumes, pode-se utilizar a recomendação EFNARC (1996) como referência, cujos volumes máximos produzidos entre eventos de avaliação se encontram apresentados na

Tabela 4. Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo reduzido, normal ou rigoroso. A determinação da resistência à tração na flexão deve ser feita em, no mínimo, quatro corpos de prova. O valor médio obtido no ensaio deve ser, no mínimo, equivalente a 90% do valor obtido durante os estudos preliminares. Na eventualidade da ruptura do material ocorrer fora do terço central do corpo de prova, o valor médio pode ser determinado a partir dos três corpos de prova remanescentes.

8.2.2. Resistência residual na flexão

A determinação da resistência residual ou da tenacidade à flexão em prismas especificada para o CRF ou CPRF deve ser controlada na frequência de realização de ensaio estabelecida pelo projetista. No caso de grandes volumes, pode-se utilizar a recomendação EFNARC (1996) como referência, cujos volumes máximos produzidos entre eventos de avaliação se encontram apresentados na **Tabela 4**. Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo reduzido, normal ou rigoroso. Vale ressaltar que o controle reduzido só é admissível para o CPRF que não tem finalidade estrutural. Além disso, é possível optar pela substituição do ensaio de tração na flexão pelo ensaio de duplo punção, contanto que a correlação entre os valores a serem obtidos na resistência residual tenham sido pré-determinados nos estudos prévios. Desta maneira, o projetista pode optar pelo controle do CPRF do Tipo 2 (**Tabela 4**) como substituição ao do Tipo 1. A determinação da resistência residual na flexão deve ser feita em, no mínimo, quatro corpos de prova prismáticos. Na eventualidade da ruptura do material ocorrer fora do terço central do corpo de prova, pode-se considerar os três corpos de prova remanescentes. Nessa situação, o valor de resistência residual média obtida para os níveis especificados de deflexão deve ser superior a 85% do valor determinado nos estudos prévios.

8.2.3. Absorção de energia em placas

A determinação da absorção de energia em placas deve ser controlada apenas para o CPRF e na frequência de realização

de ensaio estabelecida pelo projetista ou seguindo a recomendação EFNARC (1996) como referência, cujos volumes máximos produzidos entre eventos de avaliação se encontram apresentados na **Tabela 4**. Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo reduzido, normal ou rigoroso. Da mesma forma que no caso anterior, é possível optar pela substituição do ensaio de punção de placas pelo ensaio de duplo puncionamento, contanto que a equivalência entre os valores a serem obtidos em termos de absorção de energia tenha sido pré-determinada nos estudos prévios. Desta maneira, o projetista pode optar pelo controle do CPRF do Tipo 2 (**Tabela 4**) como substituição ao do Tipo 1. A determinação da absorção de energia deve ser feita em, no mínimo, três placas. O valor médio obtido no ensaio deve ser, no mínimo, equivalente a 90% do valor obtido durante os estudos preliminares.

8.2.4. Ensaio de duplo puncionamento

A determinação da força de pico, forças resistentes residuais e tenacidade pelo ensaio de duplo puncionamento é uma forma complementar ou alternativa aos ensaios de absorção de energia em placas e flexão em prismas destinados ao controle do CPRF. Assim, a opção pelo ensaio de duplo puncionamento implicará na escolha do Tipo 2 de controle do CPRF (**Tabela 4**). Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo normal ou rigoroso, dado que este não é um ensaio aplicável ao CPRF sem função estrutural. Desta maneira, o projetista pode optar pelo controle do CPRF do Tipo 2 (**Tabela 4**) como substituição ao do Tipo 1. Além disso, este ensaio pode ser realizado em corpos de prova preparados a partir de testemunhos extraídos do revestimento do túnel de modo a esclarecer qualquer dúvida de não conformidade indicada pelo programa de controle regular. A determinação da energia absorvida e das resistências residuais deve ser feita em, no mínimo, seis corpos de prova para cada determinação. O valor médio obtido no ensaio, em termos de energia, deve ser, no mínimo, equivalente a 90% do valor obtido durante os estudos preliminares. Quando a opção de ensaio de controle for o de duplo puncionamento, os valores médios de resistências residuais determinados no

procedimento de controle não podem ficar abaixo de 85% dos valores definidos durante os estudos prévios.

8.2.5. Conteúdo incorporado de fibras

A determinação do teor efetivamente incorporado de fibras ao CPRF deve ser controlada na frequência de realização de ensaio estabelecida pelo projetista. No caso de grandes volumes, pode-se utilizar a recomendação EFNARC (1996) como referência para o controle do CPRF, cujos volumes máximos produzidos entre eventos de avaliação se encontram apresentados na **Tabela 4**. Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo reduzido, normal ou rigoroso. Os executores podem realizar este tipo de controle com maior frequência no sentido de se obter uma maior precisão do controle do processo de projeção e, em caso de dúvida, pode-se solicitar a determinação do teor de fibras incorporado ao CPRF incorporado à estrutura conforme o método apresentado no Anexo G. A tolerância para o teor de fibra obtido neste ensaio é de 20% em relação ao valor especificado.

8.2.6 Espessura da camada projetada

A determinação da espessura de camada projetada deve ser controlada apenas para o CPRF e na frequência de realização de ensaio estabelecida pelo projetista ou seguindo a recomendação EFNARC (1996) como referência, cujos volumes máximos produzidos entre eventos de avaliação se encontram apresentados na **Tabela 4**. Para este controle pode-se utilizar o mesmo procedimento estabelecido na recomendação EFNARC (1996). Cabe ao projetista a definição do nível de controle, ou seja, se o controle deve ser feito no modo reduzido, normal ou rigoroso.

Tipo de ensaio de controle		Área máxima em m ² de concreto produzido entre testes		
		Controle Reduzido	Controle Normal	Controle Rigoroso
Resistência à compressão nas primeiras idades (até 24 horas)		100	50	20
Resistência à compressão nas maiores idades		500	250	100
Controle do CPRF - Tipo 1	Resistência à tração na flexão		500	250
	Resistência residual na flexão		1000	500
	Absorção de energia em placas		1000	500
Controle do CPRF - Tipo 2	Ensaio de duplo funcionamento		500	250
Conteúdo incorporado de fibra			250	100
Espessura da camada projetada		50	25	10

Tabela 4 Volumes de concreto associados à frequência de realização de ensaios de controle do CPRF (EFNARC, 1996).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTRALIAN INSTITUTE OF CONCRETE. Recommended Practice: Shotcreting in Australia. By AuSS Australian Shotcrete Society. Second Edition. 2010. 84p.

ESTRADA, A. R. C.; SANTOS, F. P.; FIGUEIREDO, A. D. Parâmetros para especificação e controle do concreto projetado com fibras aplicado como revestimento de túneis. CONCRETO & CONTRUÇÃO, v. 88, p. 79-85, 2017.

FIGUEIREDO, A.D. Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1997. 342p.

GRANT, N. B.; RATCLIFFE, R; PAPWORTH, F. Design guidelines for the use of SFRRS in ground support. Proceedings of the International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Hobart, Tasmania, Australia, Apr. 2-4, 2001.

GRIMSTAD, E. & BARTON, N. "Updating the Q System for NMT" in Proceedings of International Symposium on Sprayed Concrete. Fagernes, Norway, pp 21, 1993.

PAPWORTH. F. Design guidelines for the use of fiber-reinforced shotcrete in ground support. Shotcrete magazine. American Shotcrete Association (ASA). Spring, 2002. p.16-21.

PRUDÊNCIO Jr., L.R. Contribuição à dosagem do concreto projetado. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1993. 224p.

ANEXO A

EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS CILÍNDRICOS DE PLACAS MOLDADAS DE CONCRETO PROJETADO - PROCEDIMENTO

1. OBJETIVO

Este procedimento tem por objetivo descrever os procedimentos de extração de testemunhos cilíndricos de placas moldadas com concreto projetado segundo a norma ABNT NBR 13070:2012.

2. DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

ABNT NBR 13070:2012 - Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados.

ABNT NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

ABNT NBR 9778:2005 - Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras.

3. PRINCÍPIOS BÁSICOS

Este procedimento consiste na extração de testemunhos cilíndricos para a realização dos ensaios de caracterização do concreto projetado e do CPRF. Esses testemunhos podem ser destinados à execução de ensaios como o de determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2007), da absorção de água por imersão, do volume de vazios, da massa específica (ABNT NBR 9778:2005) e do comportamento do CPRF segundo o ensaio de duplo puncionamento ou ensaio Barcelona (Prática Recomendada IBRACON/ABECE). O diâmetro dos testemunhos deve ser de, no mínimo, 7,5 cm e com altura igual ao dobro do diâmetro para os ensaios de determinação da resistência à compressão e determinação da absorção de água e massa específica do concreto projetado. Os corpos de prova preparados a partir dos testemunhos cilíndricos extraídos devem ter, no mínimo, 10 cm de diâmetro e de altura para o ensaio de duplo puncionamento.

4. APARELHAGEM

O equipamento a ser utilizado para a extração de testemunhos deve possibilitar a obtenção de corpos de prova íntegros e homogêneos da placa, não podendo gerar danos aos mesmos durante o processo de extração.

Para a extração dos testemunhos, deve-se utilizar um conjunto composto por extratora provida de cálice e coroa diamantada, que torne possível realizar o corte dos testemunhos nas dimensões nominais estabelecidas. Ou seja, o diâmetro interno da coroa deve ser equivalente ao diâmetro estabelecido para o corpo de prova.

O equipamento deve ser dotado de sistema de refrigeração a água e ter sistema de fixação que garanta o mínimo de vibrações durante a realização da extração de modo a minimizar ondulações superficiais no testemunho.

5. EXTRAÇÃO DO TESTEMUNHO E PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

A operação de extração deve ser realizada de acordo com as recomendações gerais de uso do fabricante do equipamento de extração. A distância entre furos de extração deve ser de, no mínimo, 1 cm. Uma vez extraído o testemunho, o mesmo deve ter as suas superfícies de topo serradas de modo a formar planos ortogonais ao eixo do cilindro. Os corpos de prova preparados a partir dos testemunhos devem apresentar-se íntegros, isentos de fissuras, laminações, ondulações e outros defeitos que claramente comprometam o resultado de ensaio.

ANEXO B

RECOMENDAÇÕES PARA A MOLDAGEM DE PLACAS DESTINADAS À DOSAGEM DO CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS

1. OBJETIVO

O objetivo desta recomendação é orientar o procedimento para moldagem de placas para a extração de prismas ou para a produção de placas para os ensaios de qualificação do CPRF.

2. NORMAS DE REFERÊNCIA 3. PROCEDIMENTOS

ABNT NBR 13044:2012 - Concreto Projetado - Reconstituição da mistura recém-projetada.

ABNT NBR 13070:2012 - Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados.

ABNT NBR 13354:2012 - Concreto Projetado - Determinação do índice de reflexão em placas.

ABNT NBR 14278:2012 - Concreto Projetado - Determinação da consistência através da agulha de proctor.

ABNT NBR 13597:2012 - Procedimento para qualificação de mangoteiro de concreto projetado aplicado por via seca

As placas produzidas pelo processo de projeção deverão seguir as seguintes recomendações:

- Produzir as fôrmas para as moldagens das placas de acordo com as recomendações preconizadas pela norma ABNT NBR 13070:2012 e nas dimensões definidas na **Figura 1** deste Anexo. Recomenda-se a utilização de fôrmas produzidas com compensado naval ou metálicas para se garantir elevada rigidez.
- Para cada teor de fibra deverá ser moldada, no mínimo, uma placa destinada à extração de prismas para a determinação da tenacidade na flexão (Anexo C) e, no mínimo, três placas destinadas à determinação da absorção de energia mediante ensaio de puncionamento estático (Anexo D)
- Antes de ser lançado na máquina de projeção deve-se determinar a consistência do concreto pelo abatimento de tronco de cone (NBR NM97:1998).
- A moldagem da placa deve seguir a mesma sequência recomendada pela norma ABNT NBR 13070:2012 e ser realizada por mangoteiro qualificado, preferencialmente que tenha sido certificado de acordo com a norma ABNT NBR13597:2012, caso o processo utilizado seja o de via seca.
- Após a moldagem da placa, deve-se determinar a consistência do concreto recém projetado pelo método preconizado na norma ABNT NBR 14278:2012.
- As placas devem ser moldadas cuidando-se para que as mesmas permaneçam fixas na posição estabelecida para receber o jateamento e posicionando-as segundo os cuidados estabelecidos pela norma NBR ABNT 13070:2012.
- Utilizar, de preferência, uma betonada por variável analisada, ou seja, cada teor de fibra deve ser dosado para uma betoneira.
- Logo após a moldagem da placa deve-se

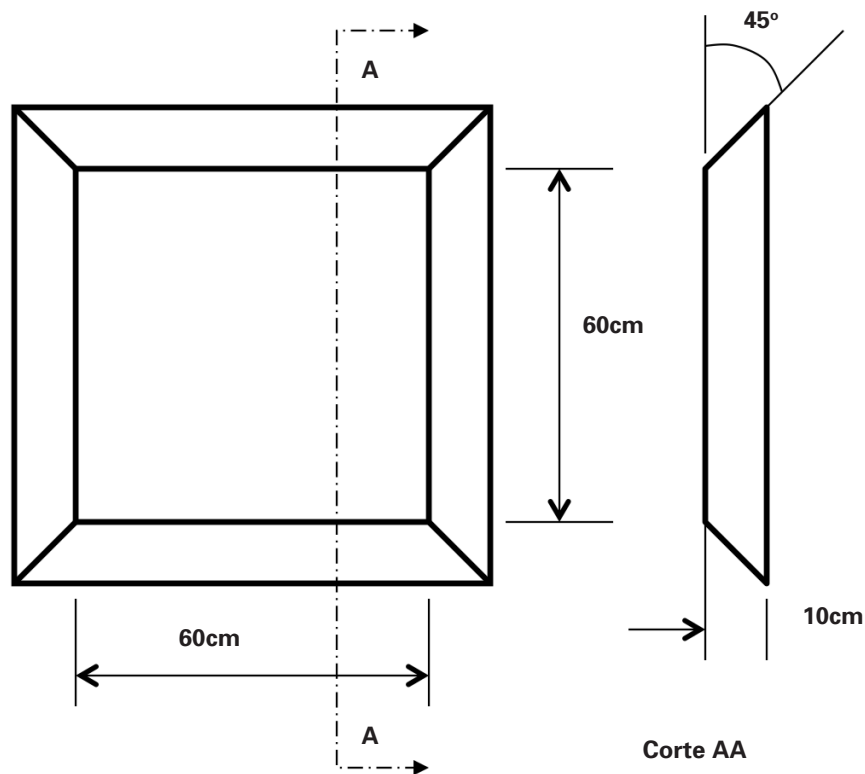


Figura 1 dimensões previstas para a fôrma destinada à moldagem das placas destinadas à extração de testemunhos prismáticos e produção de placas para o ensaio de puncionamento.

realizar a determinação do teor de fibra através do procedimento apresentado na Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras.

Todas as placas destinadas a uma análise experimental deverão ser moldadas por um único mangoteiro. De preferência, todo o conjunto de placas destinado ao estudo de dosagem deverá ser moldado em um único dia, em uma sequência o mais contínua possível, de modo a manter as condições de moldagem com a maior uniformidade possível. As placas que mostrarem sinais claros de defeitos logo após a projeção deverão ser rejeitadas e projetadas novamente. As placas destinadas ao ensaio de puncionamento (Anexo D) deverão receber acabamento superficial de modo a minimizar irregularidades.

ANEXO C

MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E DA RESISTÊNCIA RESIDUAL EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS DE CONCRETO PROJETADO REFORÇADO COM FIBRAS - MÉTODO DE ENSAIO

1. OBJETIVO

Este método de ensaio tem por objetivo determinar os valores da resistência à tração na flexão e da resistência residual do concreto projetado reforçado com fibras a partir de corpos de prova prismáticos obtidos de prismas serrados de placas levados ao ensaio de tração na flexão com deformação controlada.

2. DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

EN 14488-3. Testing sprayed concrete - Part 3: Flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fibre reinforced beam specimens. European Standard. CEN/TC 104. 2004.

3. PRINCÍPIOS BÁSICOS

Neste ensaio são utilizados corpos de prova prismáticos serrados a partir de placas moldadas com concreto projetado reforçado com fibras. Estes prismas são submetidos a um momento fletor constante em seu terço central pela imposição de uma taxa de deformação fixa com o objetivo de se obter a curva de força (kN) por deflexão (mm) dos mesmos. A partir da curva de força por deflexão são determinadas as forças de pico, ou força de primeira fissura, e as forças residuais para determinados níveis de deflexão. A partir destas forças são calculadas as correspondentes resistências à flexão e resistências residuais pós-pico.

4. APARELHAGEM

A aparelhagem necessária para a execução do ensaio é a seguinte:

a) Prensa hidráulica servo-controlada dotada de sistema de carregamento baseado na seleção e fixação de uma dada velocidade de deslocamento de cutelos. O controle da taxa de deslocamento deve ser feito, preferencialmente, por sistema fechado, ou seja, a partir de uma taxa de deformação constante imposta aos valores lidos no LVDT.

b) Sistema de cutelos articulados que permitam o contato contínuo dos roletes com o corpo de prova. Tais cutelos devem possuir roletes de modo a permitir a livre rotação de seus topos para evitar concentração de forças no contato com o corpo de prova e qualquer atrito que gere força normal ao prisma durante o ensaio. O diâmetro do cutelo deve estar na faixa de 20 mm a 40 mm. O seu comprimento deve ter, no mínimo, 10 mm a mais que a largura do corpo de prova. Três desses cutelos, incluindo os dois superiores, devem possuir sistema que permita rotação em torno de seus eixos e inclinação em um plano normal ao eixo longitudinal do corpo de prova prismático.

c) Transdutor eletrônico de deslocamento do tipo LVDT (Transdutor diferencial de voltagem linear) calibrado e com resolução mínima de 0,02 mm.

d) Sistema de suporte para o transdutor com apoio no corpo de prova segundo o apresentado na **Figura 1**. O sistema pode permitir a instalação de dois transdutores posicionados um de cada lado do corpo de prova conforme o indicado na **Figura 2**.

e) Um sistema eletrônico de aquisição de dados para levantamento dos pares ordenados de força e deslocamento lido no LVDT fixado ao corpo de prova.

f) Paquímetro.

5. EXECUÇÃO DO ENSAIO

Os corpos de prova destinados a este ensaio deverão ser obtidos de placas moldadas segundo o método apresentado no Anexo B. Os corpos de prova deverão ser serrados nas seguintes dimensões: largura 125 mm, altura 75 mm e comprimento 500 mm.

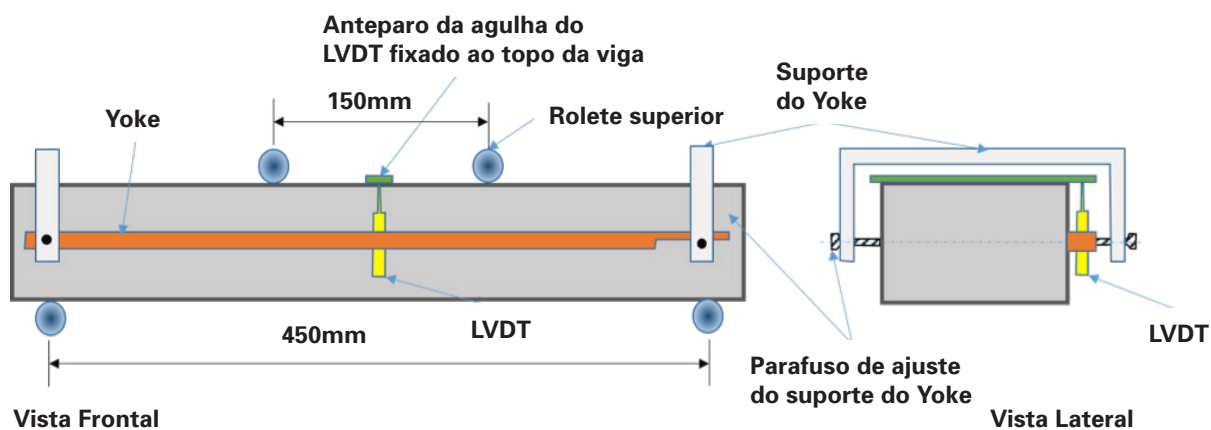


Figura 1 Sistema de suporte de LVDT para posicionamento e apoio no próprio corpo de prova.

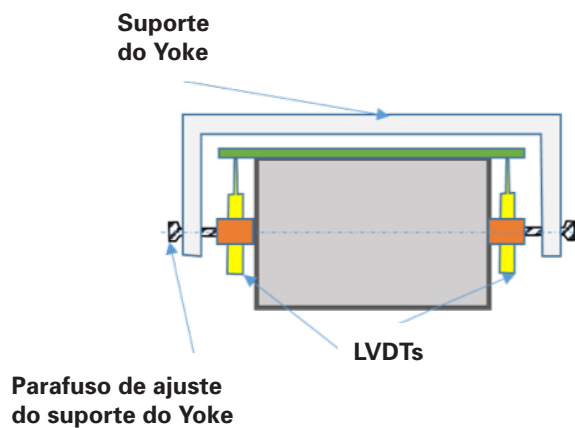


Figura 2 Vista lateral alternativa para o posicionamento de dois LVDTs.

A extração dos corpos de prova prismáticos destinados a este ensaio deverá ser feita de acordo com o esquema apresentado na **Figura 3**. A face inferior dos corpos de prova durante o ensaio (**Figura 1**) deve coincidir com a face em contato com o fundo da fôrma durante o processo de moldagem de modo que o carregamento dos prismas ocorra na mesma direção que a do jateamento.

Durante o ensaio, os seguintes cuidados devem ser observados:

a) Não se deve proceder ao ensaio com corpo de prova saturado, devendo-se mantê-lo fora da câmara úmida por pelo menos um dia antes da realização do ensaio.

b) Antes da realização do ensaio, o corpo de prova deve ter sua altura e largura medidas no terço central de seu vão. A tolerância para tais dimensões é de ± 5 mm.

c) O corpo de prova deve ser posicionado em relação aos cutelos segundo o apresentado na **Figura 1**.

d) O transdutor deve ser posicionado no meio do vão, conforme o apresentado na **Figura 1**, e deve-se garantir que esteja com deslocamento de agulha dentro da faixa de leitura do mesmo, evitando-se os extremos onde sua precisão é reduzida.

e) Deve-se impor uma taxa de deformação constante no LVDT de $(0,25 \pm 0,05)$ mm/minuto para a realização do ensaio até que a deflexão atinja 0,5 mm. Após esse nível de deflexão, a taxa de deformação imposta ao LVDT pode ser incrementada $(1,0 \pm 0,05)$ mm/min.

f) A curva de força por deslocamento deve ser impressa no plotter X-Y ou transferido para uma planilha eletrônica de maneira a se obter a curva de força por deslocamento como exemplificado na **Figura 3**.

g) O ensaio será interrompido quando a medida obtida pelo LVDT for de, no mínimo, 4,5 mm.

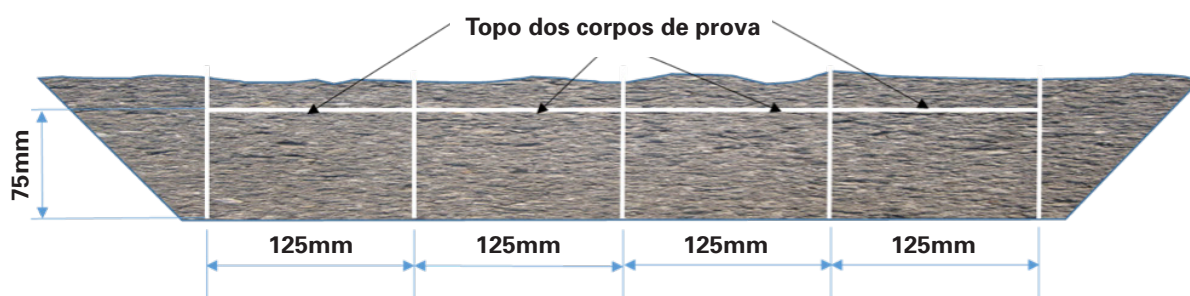


Figura 3 esquema para extração dos corpos de prova prismáticos da placa de concreto projetado.

Carga (N)

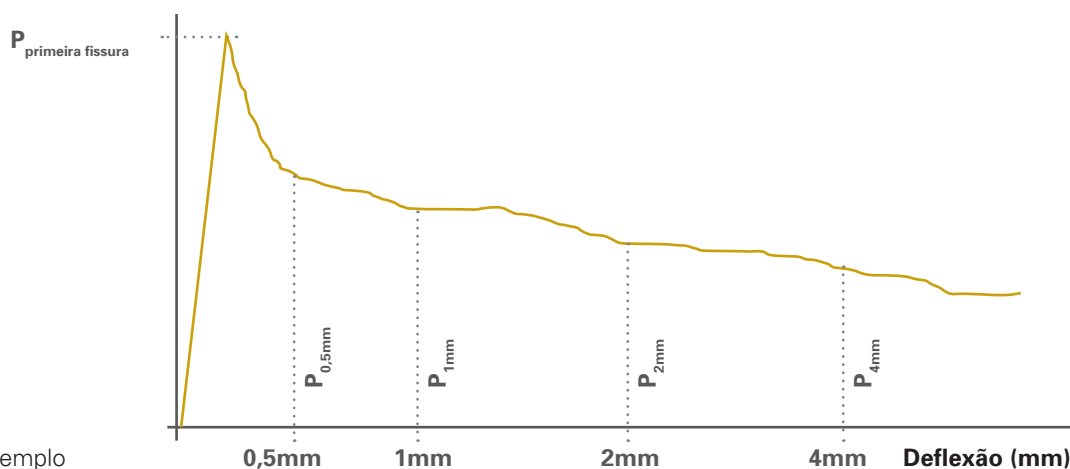


Figura 4 Exemplo de curva de força por deflexão e pontos para determinação das forças resistentes de primeira fissura e residuais.

h) Devem ser utilizados, no mínimo, 3 corpos de prova por determinação. Caso a fissura ocorra fora do terço central do vão, o resultado obtido com tal corpo de prova deverá ser desprezado. Caso se note a ruptura em falha localizada como em um plano de laminação, por exemplo, gerando uma diminuição da tensão máxima atingida durante o ensaio, o resultado deverá ser desconsiderado.

i) O resultado de resistência residual de um determinado concreto deverá ser determinado pela média dos valores considerados como adequados (com ruptura normal no centro de vão sem falhas nítidas na moldagem do corpo de prova). Os resultados devem ser obtidos como média aritmética dos valores individuais.

j) Nesta recomendação se adotará como critério para a determinação da resistência à tração na flexão a partir da determinação da força de primeira fissura, que corresponde à força atingida ao final do trecho elástico inicial da curva ou, no caso de haver ganho de capacidade resistente pós-fissuração, à força que corresponde a uma deformação irreversível de 0,1 mm determinada conforme o exemplo da **Figura 4** na fase inicial de ascensão da curva de força por deflexão a partir da seguinte equação:

$$f_{ct}^i = \frac{P_{\text{primeira fissura}}^i * L}{b_i * h_i^2}$$

onde,

f_{ct}^i = resistência à tração na flexão do concreto projetado em MPa.

$P_{\text{primeira fissura}}^i$ = força máxima atingida no ensaio (N).

L = vão do corpo de prova (450mm).

b_i = largura medida da seção do corpo de prova i na região central (mm).

h_i = altura medida da seção do corpo de prova i na região central (mm).

O cálculo da resistência à tração na flexão média deve ser feito de acordo com a seguinte equação:

$$f_{ct\text{média}} = (f_{ct}^1 + \dots + f_{ct}^n) \div n$$

onde,

$f_{ct\text{média}}$ = resistência à tração na flexão do concreto projetado em MPa.

f_{ct}^i = resistência à tração na flexão do concreto projetado obtido no corpo de prova i em MPa.

n = número de corpos de prova.

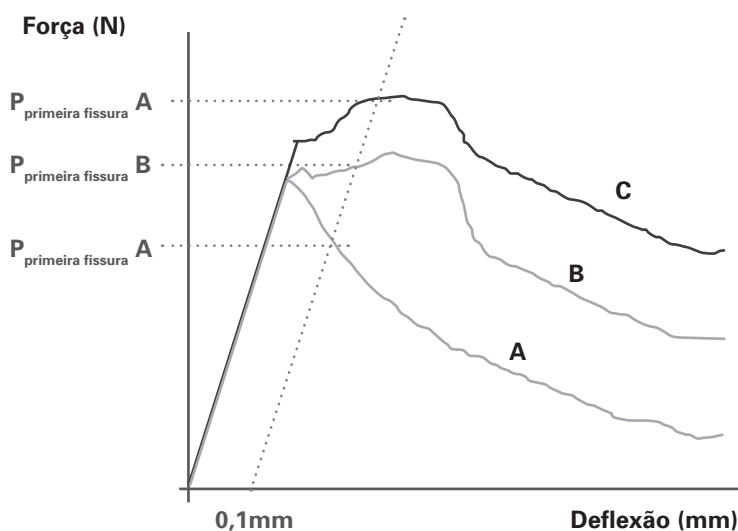


Figura 4 Exemplo de determinação da força de primeira fissura em uma curva de força por deflexão.

k) Cálculos das resistências residuais devem ser realizados segundo o seguinte procedimento:

- Determinação das forças atingidas para cada nível de deslocamento especificado: $P_{0,5mm}^i$, P_{1mm}^i , P_{2mm}^i e P_{4mm}^i para cada corpo de prova ensaiado, conforme o ilustrado na **Figura 3**.

- Para cada corpo de prova, determinar a resistência residual correspondente à deflexão especificada de acordo com as seguintes equações:

$$fr_{0,5mm}^i = P_{0,5mm}^i * \frac{L}{b_i * (h^i)^2}$$

$$fr_{1mm}^i = P_{1mm}^i * \frac{L}{b_i * (h^i)^2}$$

$$fr_{2mm}^i = P_{2mm}^i * \frac{L}{b_i * (h^i)^2}$$

$$fr_{4mm}^i = P_{4mm}^i * \frac{L}{b_i * (h^i)^2}$$

onde,

$fr_{0,5mm}^i$ = resistência residual do corpo de prova i para uma deflexão de 0,5 mm (N/mm²).

fr_{1mm}^i = resistência residual do corpo de prova i para uma deflexão de 1 mm (N/mm²).

fr_{2mm}^i = resistência residual do corpo de prova i para uma deflexão de 2 mm (N/mm²).

fr_{4mm}^i = resistência residual do corpo de prova i para uma deflexão de 4 mm (N/mm²).

$P_{0,5mm}^i$ = força resistida pelo corpo de prova i quando submetido a uma deflexão de 0,5 mm (N).

P_{1mm}^i = força resistida pelo corpo de prova i quando submetido a uma deflexão de 1 mm (N).

P_{2mm}^i = força resistida pelo corpo de prova i quando submetido a uma deflexão de 2 mm (N).

P_{4mm}^i = força resistida pelo corpo de prova i quando submetido a uma deflexão de 4 mm (N).

L = vão do corpo de prova (450mm).

b_i = largura da seção do corpo de prova i onde ocorreu a ruptura (mm).

h^i = altura da seção do corpo de prova i onde ocorreu a ruptura (mm).

- A determinação das resistências residuais médias do concreto reforçado com fibras deve ser feita de acordo com as seguintes equações:

$$fr_{0,5mm} = (fr_{0,5mm}^1 + \dots + fr_{0,5mm}^n) \div n$$

$$fr_{1mm} = (fr_{1mm}^1 + \dots + fr_{1mm}^n) \div n$$

$$fr_{2mm} = (fr_{2mm}^1 + \dots + fr_{2mm}^n) \div n$$

$$fr_{4mm} = (fr_{4mm}^1 + \dots + fr_{4mm}^n) \div n$$

onde:

$fr_{0,5mm}$ = resistência residual média para uma deflexão de 0,5 mm (N/mm²).

fr_{1mm} = resistência residual média para uma deflexão de 1 mm (N/mm²).

fr_{2mm} = resistência residual média para uma deflexão de 2 mm (N/mm²).

fr_{4mm} = resistência residual média para uma deflexão de 4 mm (N/mm²).

n = número de corpos de prova considerados.

6. RESULTADOS

Na apresentação dos resultados, devem constar as seguintes informações:

- a) identificação de cada um dos corpos de prova ensaiados e suas respectivas dimensões;
- b) as resistências à tração na flexão individuais de cada corpo de prova ensaiado;
- c) a resistência à tração na flexão média obtida com o conjunto de corpos de prova submetidos ao ensaio;
- d) as resistências residuais individuais de cada um dos corpos de prova ensaiados;
- e) as resistências residuais médias obtidas com o conjunto de corpos de prova submetidos ao ensaio.

ANEXO D

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA NA PUNÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO PROJETADO REFORÇADO COM FIBRAS - MÉTODO DE ENSAIO

1. OBJETIVO

Este método de ensaio tem por objetivo avaliar o comportamento pós-fissuração do concreto projetado reforçado com fibras através de um ensaio de punção em placa com deformação controlada.

2. DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

EN 14488-5. Testing sprayed concrete - Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens. European Standard. CEN/TC 104. 2004.

3. APARELHAGEM

A aparelhagem necessária para a execução do ensaio é a seguinte:

a) Fôrmas para moldagem das placas segundo o procedimento prescrito no Anexo B. A fôrma deve ser de madeira rígida ou aço de maneira a se evitar deformações da placa durante o processo de jateamento para a moldagem.

b) Prensa hidráulica dotada de sistema de controle de deslocamento para o carregamento a compressão e vão livre para corpo de prova de no mínimo 0,80 m.

c) Suporte para placa rígido de aço conforme o apresentado na **Figura 1**.

e) LVDT (Transdutor diferencial de voltagem linear) com capacidade de leitura de, no mínimo, 50 mm calibrado e resolução mínima de 0,2 mm.

f) Suporte plástico para ponta do LVDT com diâmetro não inferior a 30 mm.

g) Leitora de deslocamentos que possibilite o traçado de diagramas de força por deslocamento.

h) Suporte metálico para LVDT que possibilite deslocamentos verticais para ajuste do mesmo com apoios na aba superior do suporte de placa (**Figura 2**).

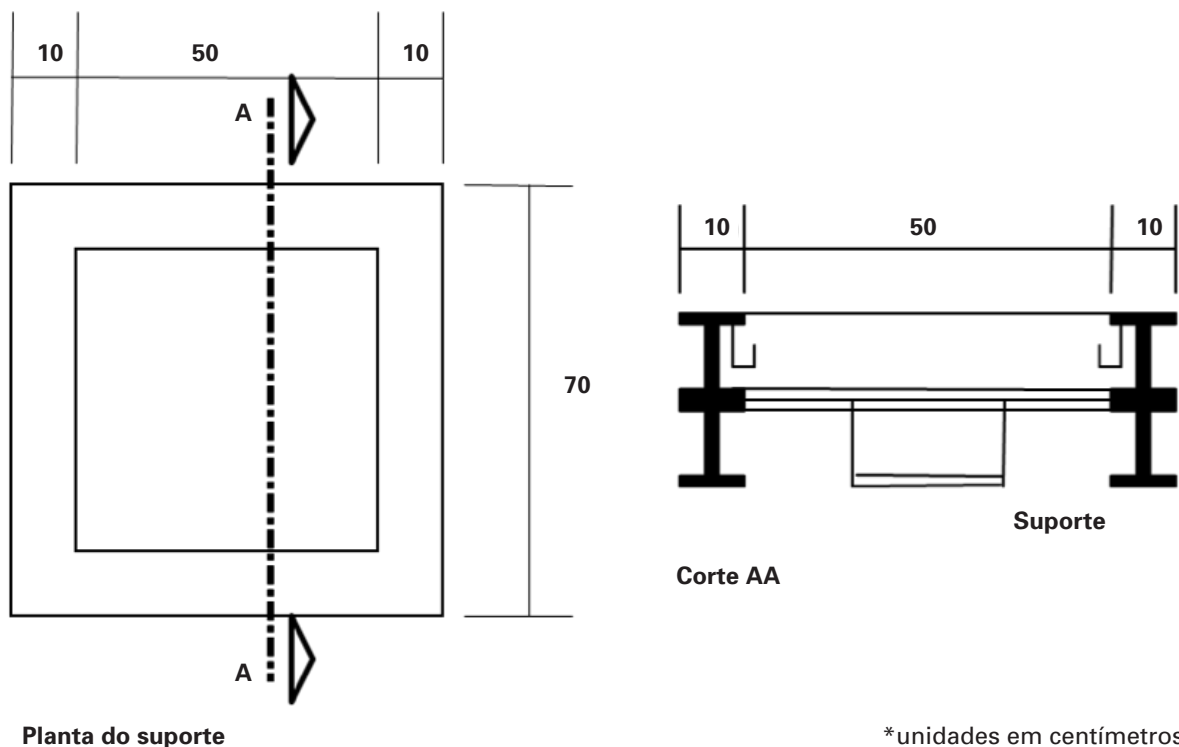


Figura 1 Suporte de placa para o carregamento de punção.

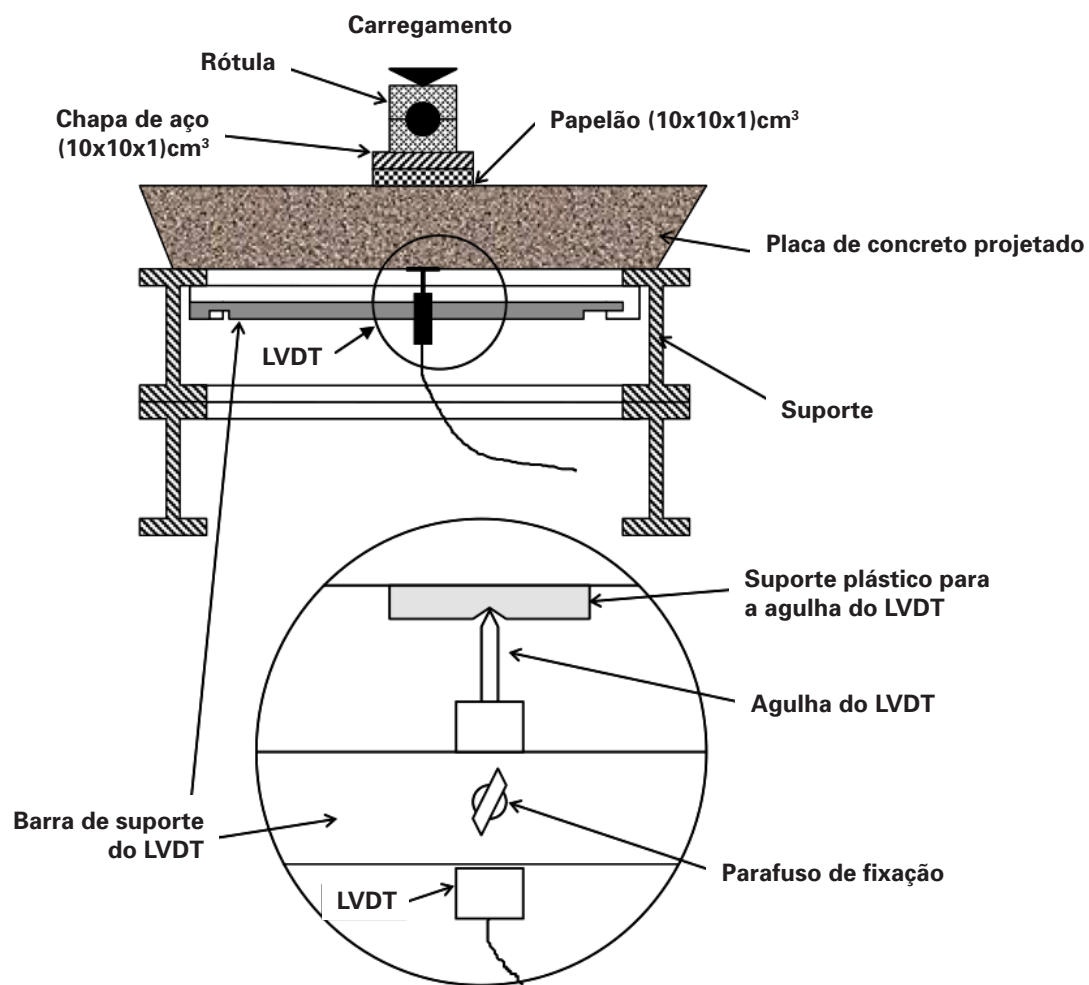


Figura 1 Suporte de LVDT.

4. EXECUÇÃO DO ENSAIO

4.1. Moldagem e preparação da placa para ensaio

A moldagem da placa de ensaio deve seguir os mesmos procedimentos prescritos na norma NBR 13.070 utilizando-se uma fôrma com as dimensões especificadas na **Figura 1**.

Após a projeção, a fôrma deve ser rasada de maneira a se remover todo o excesso produzido durante a moldagem e se garantir uma espessura uniforme de 10 cm. Tal remoção deve ser cuidadosa de modo a não afetar o material da parte inferior da placa que constituirá o corpo de prova para o ensaio de punção.

A espessura final da placa deve ser de 100 mm com erro máximo de + 5mm.

A placa deve ser protegida por uma lona plástica de modo a se evitar perdas de umidade por evaporação. A mesma deve ser marcada de maneira clara. A placa não deve ser removida antes de completar 24 horas de idade. Em seguida procede-se à cura da mesma conforme o especificado.

Durante o transporte a placa deve ser protegida contra danos de origem mecânica e perda de umidade. Preferencialmente, a placa deve ser transportada ainda na fôrma para que se evite a indução de danos durante o processo.

4.2. Realização do ensaio

A placa de ensaio deve ser posicionada no suporte de modo a apoiar todas as bordas e deixar uma área quadrada central livre de 50 x 50 cm², conforme o apresentado na **Figura 3**. O carregamento deve ser feito pela parte superior bem ao centro da placa, numa área quadrada de 10 x 10 cm².

O fundo da placa (superfície que permaneceu em contato com a fôrma) deve ser posicionado para baixo. No caso de haver um espaçamento elevado entre a placa e o apoio pode-se utilizar gesso ortodôntico para proceder ao preenchimento do espaço entre a placa e o suporte e garantir um apoio contínuo direto em todo o perímetro da mesma.

O dispositivo de carregamento de 10 x 10 cm² deve ser apoiado na placa de ensaio e o contato deve ser garantido por meio de um papelão maciço de 1 cm de espessura no mínimo.

A velocidade de carregamento da placa deve ser de 1 mm/minuto no centro da placa. O deslocamento deve ser mantido constante até uma deflexão de 25 mm no centro da

placa. Concomitantemente deve ser plotada a curva força, em newtons, por deflexão, em milímetros. Conforme o apresentado na **Figura 4**, deve-se determinar a energia absorvida durante o ensaio, em joules, até a deflexão de 25 mm através da determinação da curva de energia acumulada por deflexão (área sob a curva de força por deflexão), conforme o apresentado na **Figura 5**.

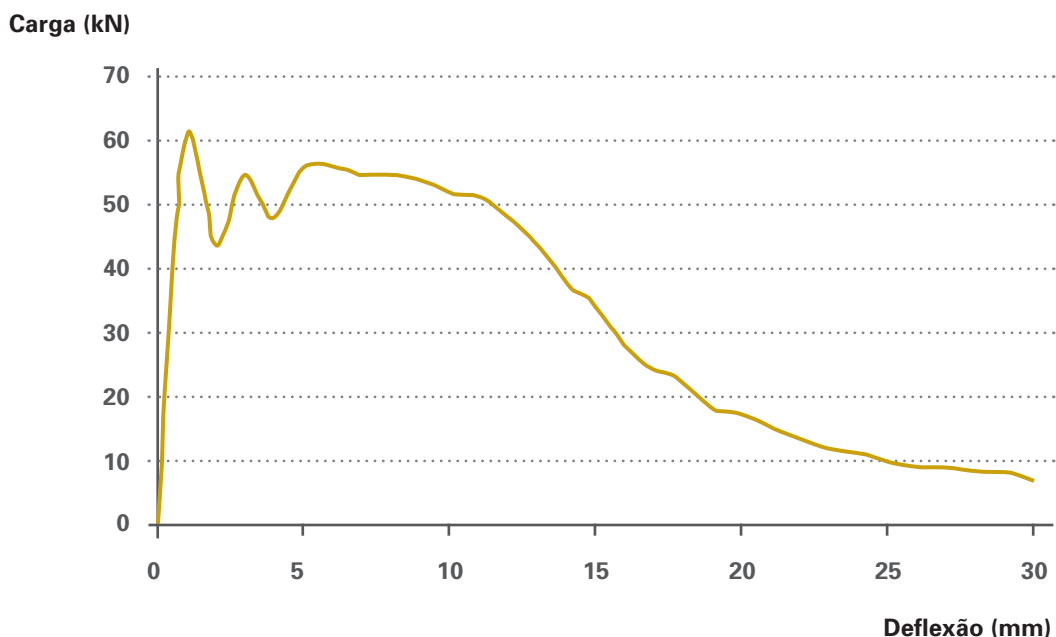


Figura 4 Curva típica de força por deflexão obtida no ensaio de punção de placas.

Energia acumulada (Joules)

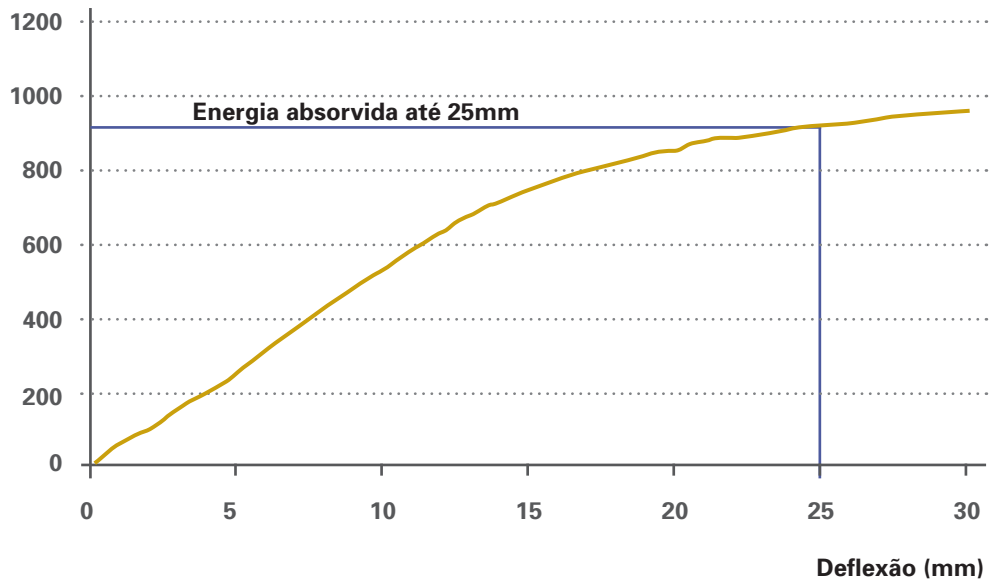


Figura 5 Curva de energia acumulada por deflexão obtida a partir da curva de força por deflexão.

5. RESULTADOS

Na apresentação dos resultados, devem constar as seguintes informações:

- energia absorvida até um deslocamento de 25 mm de deflexão;
- tipo e características da máquina de ensaio;
- identificação do corpo de prova;
- dimensões do corpo de prova;
- condições de cura e idade do concreto;
- curva de força por deflexão incluindo a máxima força atingida durante a realização do ensaio;
- curva de energia por deflexão calculada a partir de f;
- número e abertura média das fissuras.

ANEXO E

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRAS INCORPORADO AO CONCRETO PROJETADO - MÉTODO DE ENSAIO

1. OBJETIVO

Este método de ensaio tem por objetivo realizar a determinação do teor de fibras efetivamente incorporado ao concreto projetado aplicado em placas ou no revestimento do túnel.

2. DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

ABNT NBR 13044:2012 - Concreto Projetado - Reconstituição da mistura recém-projetada.

ABNT NBR 13070:2012 - Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados.

ABNT NBR 9778:2005 - Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

3. PRINCÍPIOS BÁSICOS

Este método de ensaio consiste na determinação do consumo de fibra por metro cúbico de CPRF que depende da posterior determinação da massa específica saturada, determinada em testemunhos extraídos com o material já endurecido. Inicialmente faz-se a determinação da proporção em massa da fibra em relação aos outros materiais constituintes do CPRF para posterior verificação de seu consumo. O mesmo também pode ser executado em paralelo com o ensaio de reconstituição de traço estabelecido na norma ABNT NBR 13044:2012.

4. APARELHAGEM

Balança com precisão mínima de 0,1 g.

Peneira metálica com abertura de malha de 4,8 mm.

Peneira metálica com abertura de malha de 1,2 mm.

5. EXECUÇÃO DO ENSAIO

a) Coletar uma amostra de cerca de 2 kg de CPRF, ainda não endurecido, e pesar em uma balança com precisão mínima de 0,1 g. Registrar o valor da massa total do material correspondente ao valor de m_t .

b) Realizar a lavagem dos finos do concreto sobre o conjunto de peneiras (superior de 4,8 mm e inferior de 1,2 mm) de modo que fiquem retidos os agregados e as fibras.

c) Fazer a coleta da fibra de aço com o uso de um ímã ou manualmente.

d) Fazer a coleta da macrofibra polimérica manualmente.

e) Secar totalmente a fibra.

f) Pesar a fibra em uma balança com precisão mínima de 0,001 g para determinar o valor de m_f .

g) Determinar a massa específica saturada do concreto no estado endurecido segundo a norma ABNT NBR 9778:2005.

h) Determinar o consumo de fibra por metro cúbico de CRF através da equação [1]:

$$CF = \frac{\gamma \cdot m_f}{m_t} \quad (\text{kg/m}^3) \quad [1]$$

Onde,

CF = consume de fibras por metro cúbico de CPRF (kg/m^3);

γ = massa específica do concreto no estado endurecido (kg/m^3);

m_f = massa de fibras coletada da amostra (kg);

m_t = massa total da amostra coletada para ensaio (kg).

Nota 9 este método de ensaio deverá ainda ser avaliado durante o desenvolvimento do programa experimental do projeto de pesquisa.

5. RESULTADOS

Na apresentação dos resultados, devem constar as seguintes informações:

- a) Detalhamento do local e procedimento de retirada da amostra;
- b) Identificação das amostras analisadas;
- c) Número de amostras ensaiadas;
- d) Consumo médio de fibra por metro cúbico de concreto projetado.

ANEXO F

EXEMPLO DE DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO PROJETADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A dosagem das fibras no concreto projetado deve ser feita segundo um procedimento experimental. É totalmente desaconselhável a utilização de traços pré-definidos dado que a interação entre a fibra e a matriz proporciona uma grande diversidade de respostas. O procedimento aqui recomendado resume-se apenas à definição do consumo de fibra por metro cúbico de concreto que alimenta a máquina de projeção. Supõe-se que a matriz de concreto projetado já tenha sido sujeita a um procedimento de dosagem e avaliação prévio, de modo a garantir que a mesma atenda aos requisitos de resistência à compressão.

2. CONDIÇÕES BÁSICAS

Para se realizar a dosagem da fibra de aço no concreto projetado, deve-se contar com todo o equipamento e mão de obra que será disponibilizado para a execução da obra. Não é aceitável realizar o procedimento de dosagem em um equipamento que não venha a ser empregado na execução do revestimento do túnel. A condição ideal é que se utilize da infraestrutura da obra durante a sua fase de implantação ou execução de fases anteriores ao início da obra do túnel em questão.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do procedimento de moldagem, deve-se providenciar fôrmas e equipamentos de ensaio necessários à qualificação do material previamente ao trabalho experimental. A dosagem consiste, basicamente, na moldagem de placas de concreto com três teores distintos de fibras:

- T_{fab} = O teor estimado pelo fabricante da fibra como o necessário para atender aos requisitos especificados no item 2.
- T_1 = Um teor baixo de fibra correspondente a $T_{fab} - 20 \text{ kg/m}^3$.
- T^2 = Um teor alto de fibra correspondente a $T_{fab} + 30 \text{ kg/m}^3$.

Antes do serviço de projeção do concreto para a moldagem das placas, deve-se verificar o nível de abatimento de tronco de cone do material, antes e depois da adição das fibras (NBR NM97:1998). Caso haja uma alteração do valor maior que 20 mm, em relação ao original medido sem fibras, deve-se providenciar o ajuste do mesmo dosando novamente o aditivo superplastificante.

Deverá ser moldada, no mínimo, uma placa para a extração de três prismas para a determinação da tenacidade na flexão conforme os procedimentos indicados no

Anexo C. Deverão ser moldadas, no mínimo, três placas destinadas à determinação da absorção de energia mediante ensaio de punção (Anexo D). Deverá ser também moldada uma placa destinada à extração de testemunhos cilíndricos (Anexo A) para a determinação da resistência à compressão (NBR 7680, 2015) e massa específica e absorção de água (NBR 9778, 2005). As recomendações para a moldagem de placas se encontram apresentadas no Anexo B.

As placas não deverão ser movidas até a idade de um dia, devendo permanecer nas fôrmas protegidas por uma lona plástica ou por umedecimento constante. De cada placa deverão ser extraídos os corpos de prova previstos para cada determinação através da utilização de serra circular ou serra-copo, sendo ambas diamantadas. A idade mínima de extração é de 7 (sete) dias.

Os ensaios deverão ser realizados quando a idade do concreto atingir 28 dias. Após a realização dos ensaios de determinação da massa específica (NBR 9778, 2005) os mesmos deverão ser rompidos à compressão até o seu completo esmagamento. As fibras deverão ser coletadas com o auxílio de um ímã para a determinação do teor incorporado de fibras, dividindo-se a massa coletada de fibra pelo volume do corpo de prova. Um detalhamento deste procedimento se encontra apresentado no Anexo E. Deverão ser utilizados, no mínimo, três corpos de prova para esta determinação.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a determinação do consumo mínimo de fibras, deve-se correlacionar as resistências residuais determinadas no ensaio de tração na flexão com o consumo de fibras. Um exemplo deste tipo de correlação se encontra apresentado na **Figura 1**. O teor de fibra a ser utilizado é aquele que garante o atendimento da resistência residual para os três níveis de deflexão especificados no procedimento do Anexo C.

Para a determinação do teor mínimo de fibras, deve-se correlacionar as energias absorvidas no ensaio de punção de placas com os respectivos consumos de fibras. O teor mínimo será aquele que garanta uma energia absorvida mínima de 700 joules, conforme o especificado na **Tabela 3** (item 6.2.2. desta recomendação) e determinado segundo o procedimento do Anexo D. Um exemplo deste tipo de correlação se encontra apresentado na **Figura 2**.

O consumo mínimo de fibras a ser utilizado no concreto projetado de revestimento do túnel será o maior dos dois valores obtidos nos gráficos de dosagem anteriores. Caso o maior consumo obtido corresponda ao ensaio de punção de placas, este valor deverá ser utilizado para a determinação das resistências residuais de controle a partir do gráfico de dosagem correspondente (**Figura 3**).

Durante o processo de controle de execução da obra (item 4), deverá ser verificado se o concreto atende a estes novos níveis de resistência residual, dado que o controle de produção não deverá ser feito através do ensaio de punção de placas. No caso do maior teor corresponder ao obtido para a dosagem da fibra segundo a resistência residual (**Figura 1**), deve-se manter os índices estipulados na **Tabela 2** (item 6.2.1 desta recomendação) para o controle do concreto durante a execução da obra (item 4).

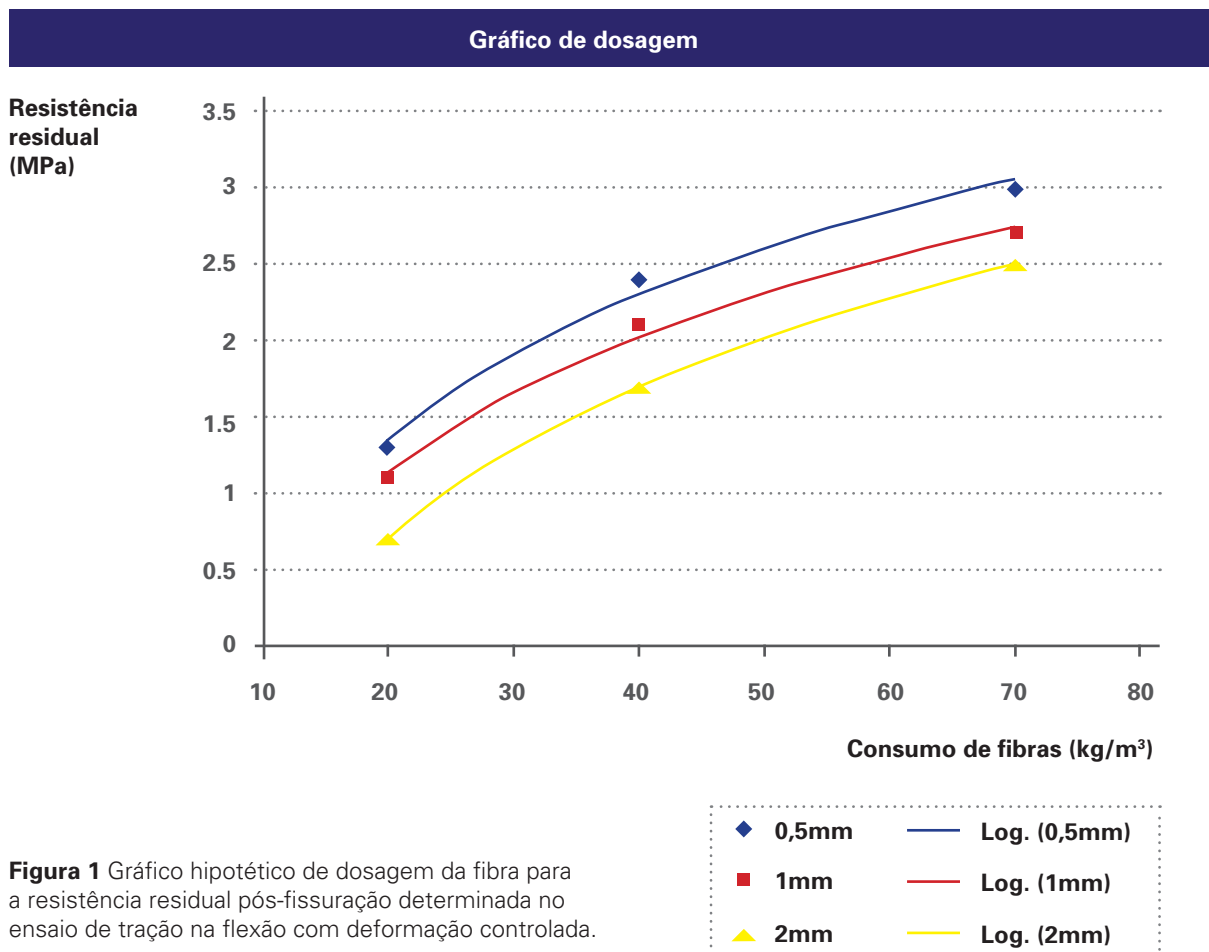


Gráfico de dosagem para o ensaio de punção de placas

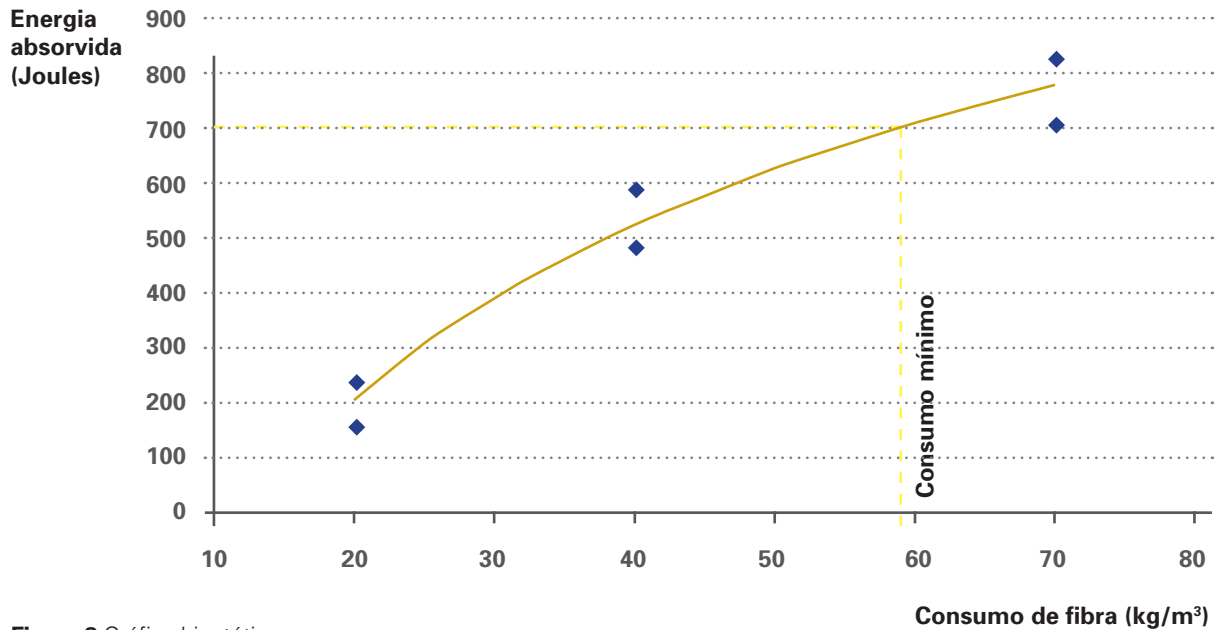


Figura 2 Gráfico hipotético de dosagem da fibra para a energia absorvida no ensaio de punção estático.

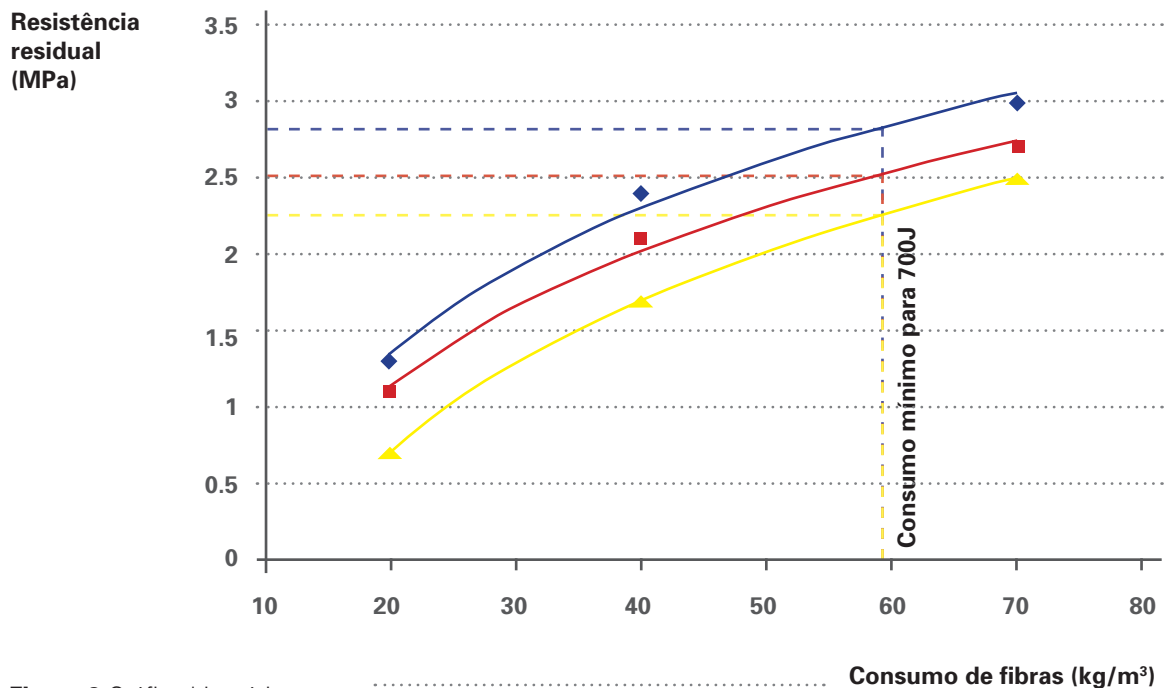
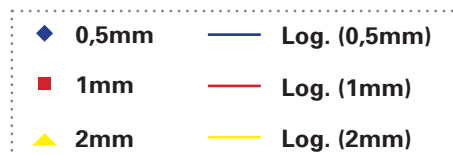


Figura 3 Gráfico hipotético de dosagem da fibra para a resistência residual pós-fissuração sendo utilizado para determinação os níveis a serem obtidos durante o controle de execução da obra quando o consumo mínimo de fibras foi determinado para se garantir o nível mínimo de energia absorvida no ensaio de punção de placas.



Deflexão (mm)	Resistência residual padrão (MPa)	Resistência residual corrigida para o teor de dosagem (MPa)
0,5	2,5	2,8
1	2,3	2,5
2	2	2,3

ANEXO G

MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRAS DE AÇO INCORPORADO AO CONCRETO PROJETADO ENDURECIDO - MÉTODO DE ENSAIO

1. OBJETIVO

Este método de ensaio tem por objetivo determinar o teor de fibra incorporado ao concreto projetado no estado endurecido.

2. DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

NBR 9778:2005 - Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

KALIL, R. Z., ESCARIZ, R. C., FIGUEIREDO, A. D. Elaboração de método de ensaio para determinação do teor de fibras em concreto endurecido. In: 52o Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza. Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1 Determinação do volume do corpo de prova

Para a determinação do teor incorporado de fibras, a primeira etapa a ser cumprida é a determinação do volume do corpo de prova ou do testemunho extraído. A primeira etapa consiste na realização do ensaio previsto na norma NBR 9778:2005 - Argamassas e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica da ABNT. Com a aplicação da norma tem-se a determinação do volume do corpo de prova ou testemunho a partir da determinação da massa saturada superfície seca e da massa submersa do mesmo. A diferença entre estas duas massas resulta no volume do corpo de prova.

3.2 Esmagamento do corpo de prova

Tendo sido determinado o volume do corpo de prova ou do testemunho extraído, o passo seguinte é o seu esmagamento para permitir

a extração das fibras. No procedimento aqui proposto, definiu-se por iniciar o esmagamento do mesmo realizando a ruptura do corpo de prova segundo os procedimentos normais recomendados pela norma NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos da ABNT (**Figura 1**). Uma vez rompido o concreto, deve-se dar prosseguimento ao esmagamento do corpo de prova já dentro de uma bandeja de modo a evitar que parte do material seja perdida no processo, como mostram as **Figuras 2 e 3**. O procedimento de esmagamento deve ser repetido até que não haja pedaços de corpo de prova com dimensões maiores que o dobro do diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado na mistura. A avaliação desta condição deve ser feita visualmente (**Figura 4**).

3.3 Primeira coleta das fibras

Após o esmagamento do corpo de prova, deverá haver a primeira coleta de fibras. Com o material na bandeja utilizada para coletar o corpo de prova esmagado, coleta-se a fibra de aço com o auxílio de um ímã conforme o apresentado na **Figura 5**.

Deve-se garantir que toda a fibra presente no corpo de prova seja coletada, mesmo que ainda presa a algum pedaço do mesmo, como mostra a **Figura 6**. Toda a fibra coletada deverá ser separada e acondicionada em um reservatório ou saco plástico (**Figura 7**) de modo a evitar perdas de fibras.



Figura 1 - Ruptura inicial do corpo de prova.



Figura 2 - Esmagamento do corpo de prova na prensa sendo mantido dentro de uma bandeja para evitar perda de material.



Figura 3 - Esmagamento do corpo de prova na prensa sendo mantido dentro de uma bandeja para evitar perda de material.



Figura 4 - Corpo de prova de concreto com fibras de aço ao final da etapa de esmagamento.



Figura 5 - Coleta das fibras de aço com o auxílio de um ímã.



Figura 6 - Coleta das fibras de aço com o auxílio de um ímã.



Figura 7 - Coleta manual das macrofibras poliméricas.

3.4 Separação das fibras aderidas

Como algumas das fibras permanecerão aderidas a pedaços do corpo de prova, estas deverão ser removidas dos mesmos. O procedimento para isto é a ruptura desses pedados de concreto com o auxílio de um martelo, conforme o apresentado na **Figura 8**. Após a separação, todas as fibras soltas deverão ser coletadas e acondicionadas em um recipiente ou saco plástico de modo a evitar que se perca parte da amostra. A coleta dessas fibras soltas ocorre da mesma maneira descrita no item anterior, ou seja, com o auxílio de um ímã (**Figura 9**). Na ausência do ímã, é possível realizar a coleta manual das fibras

ou mesmo a combinada como aparece na **Figura 10**. O importante é garantir que todas as fibras de aço presentes no corpo de prova sejam coletadas e separadas. Todas as fibras separadas deverão ser acondicionadas em um saco plástico devidamente identificado. É importante ressaltar que o cálculo do teor de fibra é feito por corpo de prova, o que implica na necessidade de identificar as amostras de fibras separadas em função do corpo de prova de onde foram extraídas.

3.5 Pesagem das fibras



Figura 8 - Esmagamento dos pedaços de corpo de prova com martelo para separação das fibras aderidas.



Figura 9 - Coleta das fibras de aço após o esmagamento dos pedaços de corpo de prova para separação das fibras aderidas.



Figura 10 - Fibras de aço sendo coletadas com ímã e manualmente de maneira simultânea.

Uma vez separadas, as fibras de aço e macrofibras poliméricas deverão ser então pesadas (**Figura 11**).



Figura 11 - Pesagem das fibras de aço.

4. RESULTADOS

A massa de fibras coletada no corpo de prova dividida pelo volume do próprio do corpo de prova determinado na primeira etapa do ensaio irá determinar o consumo de fibra no concreto endurecido em questão.



Antonio D. de Figueiredo
Renan P. Salvador
Renata Monte
Alan Renato Estrada

Novembro 2019



CBT
COMITÊ
BRASILEIRO
DE TÚNEIS