

Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto

L.A.Farias⁽¹⁾; A.N.M.Lopes⁽¹⁾; M.L. Stival⁽²⁾; M.A.S.Andrade⁽¹⁾; R.M.Bittencourt⁽¹⁾

Resumo- A resistência à tração é uma das mais importantes propriedades do concreto, mesmo que normalmente se considere predominantemente em projetos estruturais, a característica de o concreto resistir às tensões de compressão. Muitas estruturas são projetadas com base na resistência à tração na flexão (pavimentos, por exemplo). Em outras, tais como tirantes e reservatórios cilíndricos, a principal solicitação é a de tração pura.

O conhecimento da resistência à tração permite estimar a carga para a qual ocorre a fissuração e, desse modo, prever a durabilidade do concreto. Outras características como aderência entre o concreto e a armadura, a contribuição do concreto para resistir ao cisalhamento, à torção, à retração e a contrações de temperatura estão relacionadas com sua resistência à tração.

Palavras-chave—Tração; Direta; Flexão; Diametral; Concreto.

I. INTRODUÇÃO

Grande parte das peças feitas de concreto é projetada com a premissa de que o concreto resistirá às tensões de compressão mas não às tensões de tração (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Normalmente, é adotado que o comportamento do concreto seja governado somente pela capacidade compressiva, porém isto não significa que este parâmetro seja o único importante. Inúmeros benefícios podem ser adquiridos com um melhor conhecimento da resistência à tração do concreto. De acordo com NEVILLE (1997), a correlação amplamente utilizada de que a resistência à tração do concreto corresponde a 10% da sua resistência à compressão não pode ser feita livremente. Não há uma proporcionalidade direta entre esses dois tipos de resistência, sendo ambos dependentes do nível de resistência do concreto. Dessa forma, se a resistência à compressão aumenta é esperado que a resistência à tração também aumente, mas dentro de uma relação decrescente.

Em determinadas estruturas, as solicitações predominantes são de tração na flexão (pavimentos de rodovias e de aeroportos, lajes e vigas) ou tração pura (tirantes). Em geral, fissuras só podem ocorrer depois que a capacidade de tração do concreto tiver sido esgotada, o que faz dessa uma impor-

tante propriedade no que diz respeito à durabilidade de membros estruturais (OLUOKUN, 1991).

II. IMPORTÂNCIA DA TRAÇÃO DIRETA DO CONCRETO

A resistência à tração de um concreto pode ser obtida através de três tipos de ensaio: tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão. No entanto, esses diferentes métodos de ensaios fornecem diferentes valores de resistência à tração para um mesmo material. RAPHAEL (1984), após realizar uma análise de um grande número de resultados de resistência à tração, observou que a resistência à tração na flexão é, em geral, 35% maior que a resistência à tração por compressão diametral. Quanto à tração por compressão diametral, POPOVICS apud ZHENG, KWAN e LEE (2001) constatou que ela é, geralmente, maior que a tração direta. Para essa relação, NEVILLE (1997) comentou que a tração por compressão diametral pode ser considerada em 5 a 12% maior que a tração direta.

Todavia, dos três tipos de resistência à tração existentes, MIER e VLIET (2002) citam que a tração direta é a mais adequada, principalmente no que diz respeito à análise de fissuração, pois se trata de um valor que mais se aproxima do valor real da resistência à tração do concreto. Dessa forma, essa propriedade é fundamental na aparência e na durabilidade das estruturas. Um bom conhecimento da resistência à tração certamente ajudaria a minimizar os problemas de fissuração e de falhas nas estruturas de concreto (OLUOKUN, 1991).

Porém, existem dificuldades de se obter um resultado confiável a partir de um ensaio de tração direta. Um deles seria o próprio concreto, pois é um material heterogêneo e que está sujeito ao aparecimento de tensões e deformações locais. MITCHELL e ABRISHAMI (1996), em um estudo sobre tensão x deformação do concreto no ensaio de tração direta, citam a heterogeneidade do concreto como fator importante no aparecimento das primeiras microfissuras, que surgem na seção mais fraca do corpo de prova e que, geralmente, ocorrem à uma tensão entre 20 e 30 % da tensão de ruptura. Além disso, existem muitos problemas devido aos métodos de ensaio de tração direta existentes. Foi observado que os equipamentos utilizados e a forma do corpo de prova podem influenciar no resultado final da tração. Com isso, muitas considerações a respeito da tração do concreto são realizadas através de métodos indiretos para obtenção dessa propriedade, cujo resultado, provavelmente, não corresponde ao valor real da tensão de tração a que o concreto está submetido no momento da ruptura.

Agradecimentos a ANEEL pelo apoio financeiro despendido para este trabalho e à equipe de técnicos e engenheiros do Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., que colaboraram para o desenvolvimento da pesquisa.

L.A.Farias são engenheiros civis e trabalham em FURNAS Centrais Elétricas.

M.L.Stival é estudante do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

III. AVALIAÇÃO DA TRAÇÃO DO CONCRETO

A. Métodos Indiretos

A resistência à tração por métodos indiretos é dada pelos ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão.

O ensaio de tração por compressão diametral é um método indireto para obtenção da resistência à tração do concreto, realizado conforme o método NBR 7222/94, da ABNT. No ensaio é aplicada uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, que é apoiado em duas taliscas de madeira em contato com os pratos da prensa. O corpo de prova fratura devido à tração desenvolvida em planos diametralmente opostos. Este ensaio foi desenvolvido pelo engenheiro Lobo Carneiro e é conhecido mundialmente como “Brazilian Test” – Ensaio Brasileiro (Engenheiros de FURNAS, 1997). A Foto 1 ilustra o ensaio.

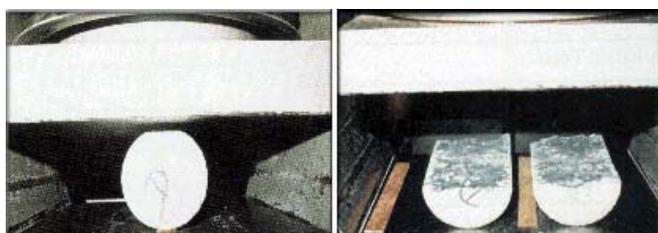


Foto 1 – Corpo de Prova em Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (Engenheiros de FURNAS, 1997)

A grande vantagem de se realizar esse ensaio é a necessidade de somente um equipamento de compressão para obtenção da resistência à tração. Esse tipo de equipamento está disponível em, praticamente, todos os laboratórios de ensaios de materiais em todo o mundo (MIER e VLIET, 2002). Além disso, através de vários estudos avaliados por OLUOKUN, BURDETTE e DEATHERAGE (1991), foi possível constatar que a tração por compressão diametral é uma medida confiável da resistência à tração do concreto. Isso se deve ao fato de conseguir uma relativa uniformidade nas tensões de tração na seção longitudinal do corpo de prova.

Devido às vantagens proporcionadas por esse ensaio, pode-se ensaiar um grande número de amostras em um período relativamente curto e obter resultados próximos, no geral um pouco maiores, aos considerados reais, os quais poderiam ser obtidos somente em ensaios realizados por métodos diretos.

O método para determinação da resistência à tração do concreto na flexão é realizado segundo a norma NBR 12142/91 ou ASTM C-78/94. Para o ensaio, o corpo de prova é posicionado sobre elementos de apoio de forma que a carga seja aplicada no terço médio. Os cutelos de aplicação de carga são instalados na face oposta, com seu ajuste nos extremos do terço médio da distância entre os cutelos de apoio (Engenheiros de FURNAS, 1997). O desenho esquemático do dispositivo do ensaio de tração na flexão é apresentado na Figura 1.

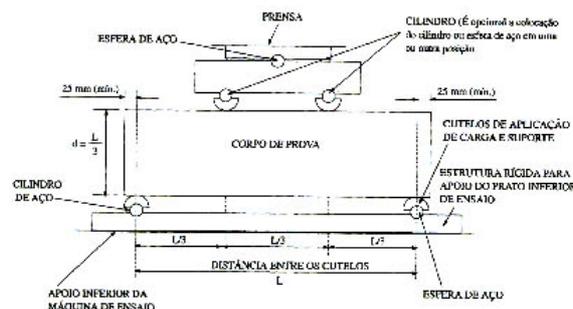


Figura 1 – Esquema do Ensaio de Resistência à Tração na Flexão (Engenheiros de FURNAS, 1997)

Dentre valores de resistência à tração que podem ser obtidos para um mesmo concreto, o obtido na flexão é, geralmente, o maior deles. Isso é explicado pela forma através da qual a resistência é obtida. A equação utilizada para o cálculo da resistência à tração, nesse ensaio, considera o comportamento elástico do concreto no ponto de ruptura. No entanto, essa situação não corresponde ao estado real da viga de concreto no momento da ruptura (RAPHAEL, 1984). Na realidade, a curva tensão-deformação torna-se não linear quando o concreto está próximo à ruptura. Além disso, devido a tensão máxima estar localizada na fibra mais externa, que é restringida pela fibra mais próxima do material menos tensionado, a tensão máxima alcançada é maior do que a resistência à tração real sob tensão uniforme (ZHENG et al., 2001).

B. Métodos Diretos

A tração direta, comparada com métodos indiretos, fornece resultados mais próximos à tração real do concreto. A seguir, são apresentados alguns modelos desenvolvidos para a obtenção da tração direta do concreto.

- Modelo de Zheng, Kwan e Lee

Dentre os estudos realizados para a obtenção de um equipamento ideal para o ensaio de tração direta, existe o conduzido por ZHENG, KWAN e LEE (2001). Para tanto, foram utilizados, aproximadamente, 200 corpos de prova prismáticos cuja resistência à compressão variava de 10 a 70 MPa. Segundo esses pesquisadores, para a obtenção de um dispositivo de aplicação de tração direta mais confiável sem a introdução de tensões secundárias, seria necessário colar pratos de aço centrados nas bases do corpo de prova e tracioná-los até que a tensão transmitida ao concreto estivesse na forma de tração pura. No estudo, foram considerados corpos de prova com seção transversal com dimensões de 10 cm x 10 cm e altura variável de 150 cm a 500 cm.

O esquema do equipamento desenvolvido e a disposição do corpo de prova são apresentados na Figura 3.

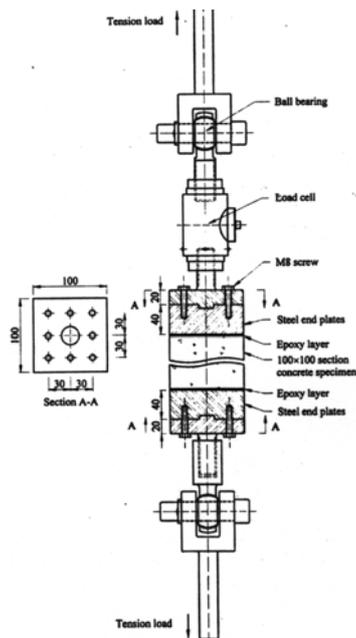


Figura 3 – Dispositivo para Ensaio de Tração Direta do Concreto Desenvolvido por Zheng, Kwan e Lee (2001).

- Modelo de Schuman e Tucker

SCHUMAN e TUCKER (1943) apresentaram um modelo para ensaio de tração direta em corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 40 cm de altura. Para adaptação ao dispositivo, o concreto é moldado nos 20 cm centrais do molde e, os 10 cm a partir da base e do topo, são moldados com argamassa de traço em peso 1:1,5, com relação A/C de 0,35. Na região da argamassa são fixados quatro parafusos rosqueados com 9,5 mm de diâmetro, 12 cm de comprimento e ancoragem de 8 cm. Os parafusos são utilizados para fixação de discos de aço no corpo de prova. A estes discos são acopladas hastes rotuladas para fixação aos dispositivos da prensa de ensaio (Engenheiros de FURNAS, 1997). A Foto 2 apresenta o equipamento desenvolvido para o ensaio de tração direta.



Foto 2 – Tração Direta por Schuman e Tucker (FURNAS, 1997)

- Modelo apresentado por Nianxiang e Wenyan

As formas e dimensões dos corpos de prova utilizados por NIANXIANG e WENYAN (1989) são mostradas na Figura 2.

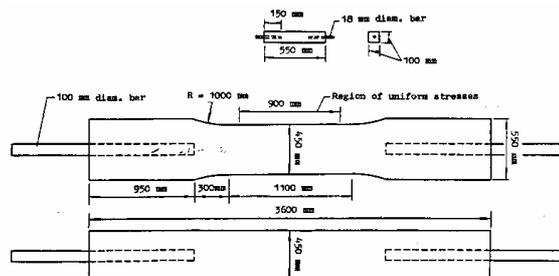


Figura 2 – Modelo dos Corpos de Prova para Ensaio de Tração Direta - NIANXIANG e WENYAN (1989)

Para corpos de prova maiores, com dimensões de 45 cm x 45 cm x 360 cm, foram utilizadas barras de aço de 10 cm de diâmetro e, para corpos de prova pequenos, com dimensões de 10 cm x 10 cm x 55 cm, barras de 18 mm de diâmetro colocadas no centro da seção, ao longo do eixo axial do corpo de prova. Dois cilindros foram utilizados para suportar o peso do corpo de prova maior, eliminando assim possíveis efeitos de flexão devido ao peso próprio. A disposição do corpo de prova no equipamento de tração é mostrado na Figura 3.

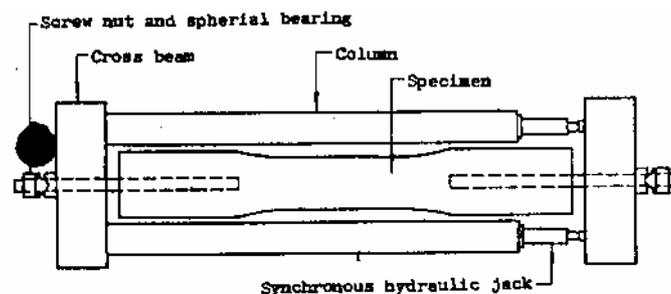


Figura 3 – Corpo de Prova Submetido a Ensaio de Tração Direta segundo NIANXIANG e WENYAN (1989)

- Modelo desenvolvido por Leroy

Outro método desenvolvido para ensaios de tração direta contempla a utilização de um equipamento desenvolvido por Leroy (Engenheiros de FURNAS, 1997), fabricado nas instalações do Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A., em Goiânia/GO. O dispositivo de ensaio é baseado em um conjunto de pescadores de testemunhos de concreto, com duas caixas de mola cônica circulares que prendem firmemente os corpos de prova, permitindo assim que sejam tracionados. A transmissão da tensão de tração é feita através de tampas acopladas a um sistema que evita a rigidez do conjunto (DIAS et al., 1990).

Esse método pode ser aplicado tanto para corpos de prova moldados quanto para testemunhos, com relação altura/diâmetro igual a 2,0. O equipamento de ensaio desenvolvido e a disposição do corpo de prova são apresentados nas Fotos 3 e 4, respectivamente.



Foto 3 – Dispositivo de Ensaio de Tração Direta Desenvolvido por Leroy (Engenheiros de FURNAS, 1997)



Foto 4 – Corpo de Prova Posicionado para Ensaio de Tração Direta (Engenheiros de FURNAS, 1997)

IV. FATORES QUE INFLUENCIAM NO RESULTADO DA TRAÇÃO

Quando se trata de resistência à compressão, cujos valores são altos em relação aos valores de resistência à tração, variações em dois resultados de ensaios na ordem de, por exemplo, 0,5 MPa, são consideradas pequenas no universo de valores. No entanto, quando analisa-se a tração do concreto, para a qual os valores da resistência são baixos, uma variação de resultados de 0,5 MPa é muito grande. Dessa forma, por menor que seja a influência dos diversos fatores no ensaio de tração, ela pode promover impactos significativos nos valores finais dessa resistência.

A. Dimensões dos Corpos de Prova

Várias tentativas para determinação da resistência à tração do concreto pelo ensaio de tração direta foram realizados. Contudo, o maior problema está nas tensões secundárias geradas nas bases dos corpos de prova. Alguns exemplos disso são apresentados na Figura 4.

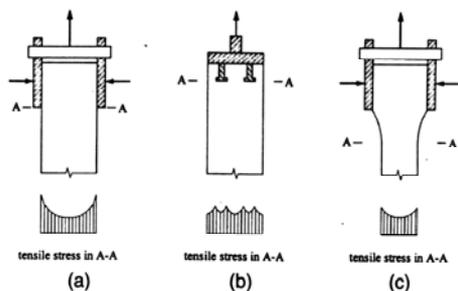


Figura 4 – Tensões Geradas durante o Ensaio de Tração Direta (ZHENG et al., 2001)

Tal efeito causa distribuição desigual de tensões no corpo de prova, com localização da ruptura nas bases e uma redução significativa na medida da resistência à tração (ZHENG et al., 2001).

De acordo com RAPHAEL (1984), os primeiros ensaios para a determinação da tração direta do concreto foram realizados na Universidade da Califórnia. O equipamento era constituído por pratos de aço aderidos ao topo e à base de um testemunho cilíndrico, com carregamento aplicado nesses pratos. Considerando que a aderência entre o aço e o concreto poderiam, de alguma forma, ter induzido uma concentração de tensão que pode ter enfraquecido o testemunho, foi idealizado um novo método de ensaio. Para tanto, remodelou-se o testemunho para o formato de um haltere. Com isso, foi possível avaliar que a medida da tração é dependente do método utilizado e do tipo de corpo de prova adotado.

Problemas quanto à forma e dimensões dos corpos de prova são evidentes. O não alinhamento do corpo de prova e da prensa durante a aplicação da carga geram excentricidades que fazem com que o corpo de prova tenha sua seção de ruptura próxima aos dispositivos de topo e de base. Até mesmo a forma com que o concreto é fabricado pode influenciar nos resultados de resistência à tração durante o ensaio. Logo, por vários fatores, a determinação da resistência à tração vem sendo determinada por ensaios de tração na flexão e tração por compressão diametral (MIER et al., 2002).

A resistência à tração é simplesmente calculada dividindo-se a carga máxima pela área da seção transversal. Porém, quaisquer concentrações de tensões que podem promover o decréscimo da resistência real são pouco avaliadas. Segundo MIER e VLIET (2002) para evitar influências pronunciadas por essas concentrações, um corpo de prova em forma de haltere, por exemplo, seria de grande importância para minimizar problemas que pudessem aparecer por causa de concentrações de tensões não desejadas.

NIANXIANG e WENYAN (1989) buscaram determinar a resistência à tração direta do concreto, bem como a relação entre os valores obtidos para corpos de prova com diferentes dimensões. Com análise dos resultados de ensaio em 80 corpos de prova de grandes dimensões (45x45x360cm) e 80 corpos de prova de pequenas dimensões (10x10x55cm), com dimensão máxima do agregado de 150 mm e 40 mm, respectivamente, eles encontraram uma relação entre a resistência à tração no concreto para corpos de prova grandes e pequenos de cerca de 0,63. Isso demonstra que os corpos de prova pequenos apresentaram valores de resistência à tração maiores que os corpos de prova grandes.

No entanto, SHAH apud ZHOU et al. (1998), em estudos de ruptura do concreto, mostraram que os efeitos das dimensões na resistência é relativo, principalmente devido ao processo de propagação das fissuras. Desta forma, os efeitos das dimensões dos corpos de prova foram avaliados através de ensaios de resistência à flexão, torção e tração por compressão diametral, em concretos de alta resistência confeccionados com agregado do tipo litológico calcário e agregado leve constituído de cinza volante. Na resistência à flexão das vigas, foi observado que os valores de resistência obtidos diminuíam de 36% a 47% com o aumento da altura da viga. Os dados experimentais também mostraram que o valor da resistência à tração por compressão diametral, para

concretos com ambos os tipos de agregados, aumentou com o aumento das dimensões. TANG apud ZHOU et al. (1998), através de análises pelo método de elementos finitos, constatou que a largura de contato entre o carregamento aplicado e o corpo de prova submetido ao ensaio de tração por compressão diametral tem grande influência nos valores dos resultados finais da resistência à tração.

B. Cura e Temperatura do Concreto

GARDNER e POON (1976) investigaram a variação das resistências à compressão e tração do concreto em várias idades, quando curado a baixas temperaturas. Eles estudaram concretos com resistência à compressão de 28 MPa aos 28 dias, abatimento de 5,0 cm a 7,5 cm e relação água/cimento de 0,5, com mistura e moldagem a uma temperatura de 22° C. Os concretos foram feitos com cimento Portland comum e com cimento de Alta Resistência Inicial. Para a análise dos efeitos de temperatura e tempo de cura, os corpos de prova foram curados a 22° C em períodos de 1, 3 e 7 dias. Em seguida, foram transferidos para câmaras frias com temperaturas de cura de 2° C a 13° C.

Sabe-se que a evolução da resistência no concreto depende da idade, método e temperatura de cura. A baixas temperaturas, a hidratação do cimento e as reações químicas são retardadas e, portanto, a velocidade de ganho de resistência no concreto é menor. GARDNER e POON (1976) observaram que as resistências à tração e à compressão, em idades jovens, aumentaram com o aumento da temperatura de cura. Porém, notou-se que a cura prematura a baixas temperaturas aumentou a resistência última do concreto, evidenciando que concretos curados durante um maior período de tempo a altas temperaturas iniciais tiveram sua resistência final diminuída.

V. CORRELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS DO CONCRETO

As relações entre os vários tipos de resistências são influenciadas por fatores tais como: método de ensaio de resistência à tração, resistência à compressão do concreto, tipo de cura, características do agregado, incorporação de aditivos e adições (Mehta & Monteiro, 1994). Outros pesquisadores, como Kim et al. (2002); Oluokun et al. (1991) e Gardner & Poon (1976), demonstraram que parâmetros de ensaio como idade, temperatura e tipo de cura, tipo de cimento e condições de mistura não têm efeitos perceptíveis na relação existente entre as resistências à tração e compressão. De qualquer forma, observa-se que mesmo havendo influência desses fatores nas relações de resistências, não é permitido estabelecer uma relação simples entre as resistências que possa ser aplicada em qualquer caso.

A tração do concreto é uma propriedade física que não tem um significado absoluto. Ela é sempre expressa em termos do procedimento específico do ensaio. Métodos diretos e indiretos de ensaio para a determinação da tração fornecem um resultado característico (Oluokun, 1991). Dessa forma, é considerado que a tração direta do concreto corresponde a, aproximadamente, 10% de sua resistência à compressão. Para a tração por compressão diametral é conside-

rada, praticamente, a mesma relação, talvez 1% maior e, para a tração na flexão, cerca de 15% da resistência à compressão (Raphael, 1984).

De acordo com Mehta & Monteiro (1994), o ensaio de tração por compressão diametral superestima a resistência à tração do concreto de 10 a 15%, quando comparado com o ensaio de tração direta. Os mesmos autores relatam também que os resultados de ensaios de tração na flexão superestimam a resistência à tração do concreto de 50 a 100%. Isso porque, neste ensaio, a tensão máxima está localizada na fibra mais externa, que é restringida pela fibra mais próxima do material menos tensionado, e a tensão máxima alcançada é maior do que a resistência à tração real sob tensão uniforme (Zheng et al., 2001).

A resistência à tração do concreto normalmente aumenta com a resistência à compressão, mas não existe uma proporcionalidade direta, pois a relação entre as duas depende do nível de resistência do concreto (Neville, 1997; FIP-CEB, 1990).

Mehta e Monteiro (1994), relacionando a resistência à tração com resistência à compressão em concretos com resistência à compressão de 7 a 62 MPa, comentaram que a razão entre tração direta e compressão é 10 a 11% para concreto com baixa resistência, 8 a 9% para concreto de média resistência e 7% para concreto de alta resistência. Ao avaliar o comportamento de concretos de alto desempenho com resistência à compressão em torno de 60 MPa, Lopes (1999) verificou que a relação resistência à tração/resistência à compressão variou entre 7,4 e 10%, faixa de valores encontrada por outros pesquisadores.

O Comitê ACI 318-77 expressa a relação entre a resistência à tração diametral e a resistência à compressão em termos da raiz quadrada da resistência a compressão. Essa relação, obtida em ensaios realizados com concretos maduros, não consiste em margens seguras para previsões de resistência à tração em concreto jovens, segundo Carino & Lew (1982). Assim, com o objetivo de discutir as previsões de resistência à tração do concreto a partir da resistência à compressão, estes autores apresentaram a melhor relação entre esses parâmetros de resistência para concretos jovens e maduros, com resistência a compressão variando de 6,9 a 39,7 MPa. De uma análise comparativa entre as curvas trabalhadas e a relação fornecida pelo ACI, os autores sugeriram a equação $f_{ct} = 0,261 * (f_c')^{0,73}$, onde f_{ct} e f_c' são dados em MPa, como a mais apropriada para relacionar os valores de resistência a compressão e resistência a tração por compressão diametral.

O estudo mostrou que a relação do ACI, para estimar a resistência a tração diametral, não é a mais apropriada para dados de extensa faixa de resistência. Para baixos valores de resistência à compressão, a relação do ACI superestima a resistência à tração diametral e subestima a resistência à tração diametral para altos valores de resistência a compressão. Assim, Carino & Lew (1982) constataram que a melhor equação que relaciona a resistência à compressão e resistência à tração diametral é $f_{ct} = 0,261 * (f_c')^{0,73}$, pois é aplicada a valores de todas as faixas de resistência à compressão para concreto convencional.

Já Oluokun (1991) reavaliou as relações existentes entre resistência à compressão e resistência à tração diametral, a

fim de investigar a validade e exatidão dessas relações propostas. Buscou-se, com isso, propiciar um uso mais eficiente do concreto, particularmente na tração. No estudo foram utilizados resultados de ensaios de várias fontes disponíveis, num total de 556 pontos, com diferentes dimensões de agregados, relações água/cimento, idades de ensaio, temperaturas de cura e condições de mistura. Por esta razão, os dados foram considerados altamente representativos quanto às variabilidades existentes na prática das construções. Da análise de regressão dos dados, foi extraída a relação $f_{ct} = 0,214 * (f_c')^{0,69}$, no sistema S.I., que é a relação sugerida como alternativa à relação apresentada pelo ACI.

Com base no que é apresentado na literatura, torna-se necessário desenvolver equações de correlação, a partir de dados experimentais, que permitam estimar a resistência à tração de forma que melhor representem a nossa realidade, quando não for possível proceder aos ensaios específicos para a determinação dessa propriedade.

VI. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA OBTIDOS NO BANCO DE DADOS DO LABORATÓRIO DE CONCRETO DE FURNAS

Os resultados de ensaios apresentados fazem parte o banco de dados do Laboratório de Concreto de FURNAS, situado em Goiânia – GO. São resultados obtidos por meio de métodos indiretos de determinação da resistência à tração dados pelos ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão e através de métodos diretos de tração direta desenvolvidos por Leroy e Schumman & Tucker (DIAS et al., 1990), além da resistência à compressão.

O estudo baseou em ensaios realizados em corpos-de-prova confeccionados com uma variedade de misturas de concreto, incluindo diferentes cimentos, adições pozolânicas, níveis de resistência à compressão e principalmente diferentes tipos de concreto: convencional e compactado com rolo. Foram analisados 817 resultados de concreto convencional e 330 de concreto compactado com rolo.

Os dados foram analisados através de regressão linear, com grau de liberdade igual a $n-2$, onde “n” é o número de amostras. O intervalo de confiança foi determinado pela variável “t” de Student, adotando uma probabilidade de 95% do valor esperado da resistência à tração, para um dado valor de resistência à compressão, se posicionar dentro da banda de confiança.

A. Avaliação dos Dados do Concreto Convencional

Para a análise dos resultados, não foram consideradas idades específicas. Para a obtenção das correlações, são considerados diversos tipos de concreto convencional, com e sem adições, com agregados de diferentes tipos litológicos e variados consumos de cimento. A resistência dos concretos avaliados variou de 2,0 a 50,0 MPa. Nas Figuras 5 a 8 estão apresentadas as equações de correlação obtidas em função da resistência à compressão, bem como o coeficiente de correlação e o número de amostras consideradas para cada ensaio.

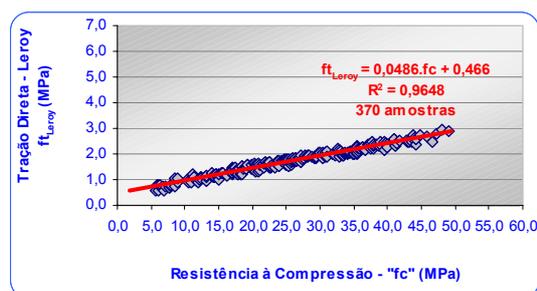


Figura 5 – Leroy x Compressão

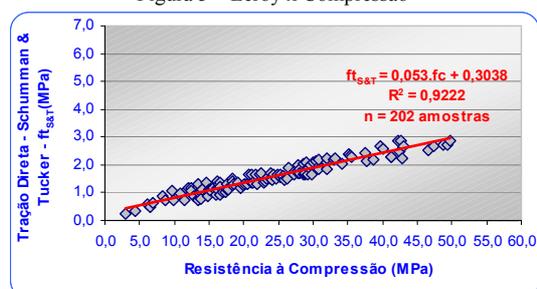


Figura 6 – Schumman & Tucker x Compressão

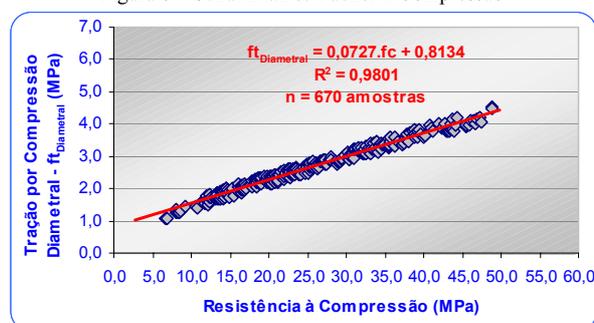


Figura 7 – Diametral x Compressão

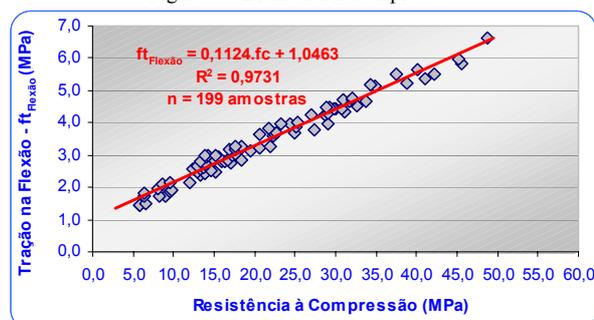


Figura 8 – Tração na Flexão x Compressão

Para efeito comparativo, na Figura 9 estão apresentadas as equações de correlação entre resistência à compressão e os diversos ensaios de determinação da resistência à tração do concreto.

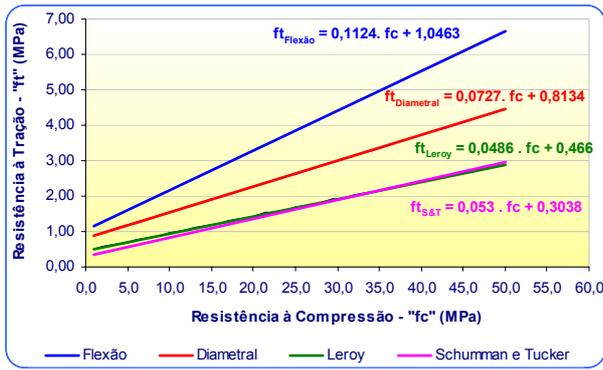


Figura 9 – Distribuição das Resistências à Tração – Métodos Diretos e Indiretos

A partir desse gráfico, pode-se fazer uma análise das relações existentes entre os tipos de resistência à tração estudados e à resistência à compressão, para diferentes faixas de resistência. As correlações entre a resistência à tração são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Correlações entre a Resistência à Tração e a Resistência à Compressão

Faixa de Resistência à Compressão (MPa)	Método Direto (%)		Método Indireto (%)	
	Leroy	Schumman & Tucker	Tração por Compressão Diametral	Tração na Flexão
5 – 10	11,4	9,6	18,7	26,0
10 – 20	8,1	7,4	13,0	18,6
20 – 30	6,8	6,5	10,6	14,3
30 – 40	6,2	6,2	9,6	14,3
40 – 50	5,9	6,0	9,1	13,6

De acordo com a Tabela 1, pode-se constatar que, o valor da resistência à tração aumenta com o aumento da resistência à compressão, dentro de uma relação decrescente. Este comportamento também foi percebido por Mehta & Monteiro (1994).

Como pode ser observado na Figura 7, os resultados de resistência à tração direta determinados pelos diferentes métodos - Leroy e Schumman&Tucker - se equivalem. No entanto, devido à facilidade de execução do ensaio pelo dispositivo Leroy, o ensaio de tração direta idealizado por Schumman & Tucker é menos vantajoso.

Quanto aos métodos indiretos, o ensaio de tração por compressão diametral é mais prático e rápido que o ensaio para a determinação da tração na flexão. A grande vantagem em se realizar o ensaio de tração por compressão diametral é que o equipamento necessário para a determinação dessa propriedade é disponível em, praticamente, todos os laboratórios de ensaios de materiais em todo o mundo, além de fornecer uma medida confiável de resistência à tração. Isto é alcançado pela relativa uniformidade nas tensões de tração na área diametral do corpo de prova. Dessa forma, devido às vantagens, pode-se ensaiar um grande número de amostras num período de tempo relativamente curto. No entanto, a principal diferença entre a tração por compressão diametral e a tração na flexão está na reprodução do estado de tensões reais nos casos de estruturas solicitadas à flexão (Silva, 1997). Logo, uma correlação entre as duas seria interes-

sante no caso de se estimar o valor da resistência à tração na flexão a partir da resistência à tração por compressão diametral. Na Tabela 2, estão apresentadas as correlações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão obtidas no estudo.

Tabela 2 – Correlações entre os Métodos Indiretos de Resistência à Tração

Faixa de Resistência à Compressão (MPa)	Métodos Indiretos
	Correlação entre a Resistência à Tração por Compressão Diametral e a Resistência à Tração na Flexão
5 – 10	72,0
10 – 20	69,6
20 – 30	68,2
30 – 40	67,4
40 – 50	66,9

Vários pesquisadores buscaram correlacionar a resistência à tração com a resistência à compressão. Nesse sentido, as Figuras 10 e 11 apresentam as equações de correlação encontradas para a resistência à tração determinada pela flexão e pela compressão diametral, respectivamente, com ênfase à equação encontrada nesse estudo para essa propriedade.

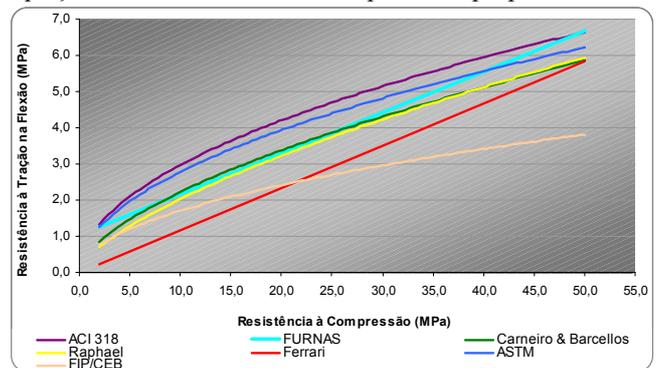


Figura 10 – Correlações entre a Resistência à Tração na Flexão e a Resistência à Compressão

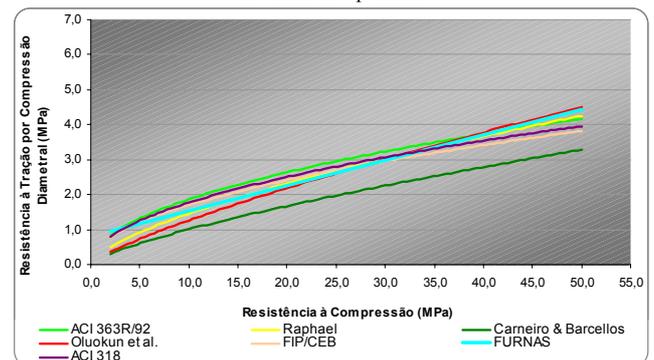


Figura 11 – Correlações entre a Resistência à Tração na Compressão Diametral e a Resistência à Compressão

B. Avaliação dos Dados do Concreto Compactado com Rolo

As correlações obtidas para o concreto compactado com rolo foram determinadas para concretos com e sem adições, com diferentes tipos litológicos, variados consumos de cimento e considerando idades diversas. A faixa de resistência avaliada foi de 2,0 a 20,0 MPa. Nas Figuras 12 a 15 estão apresentadas as equações de correlação obtidas em função da resistência à compressão, bem como o coeficiente de

correlação e o número de amostras consideradas para cada ensaio.

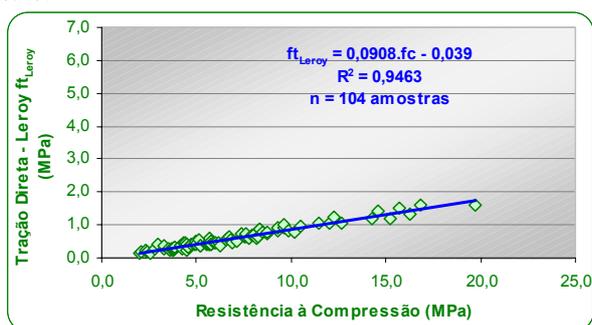


Figura 12 – Leroy x Compressão

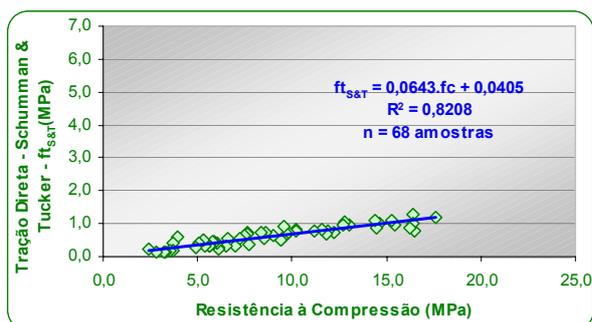


Figura 13 – Schumman & Tucker x Compressão

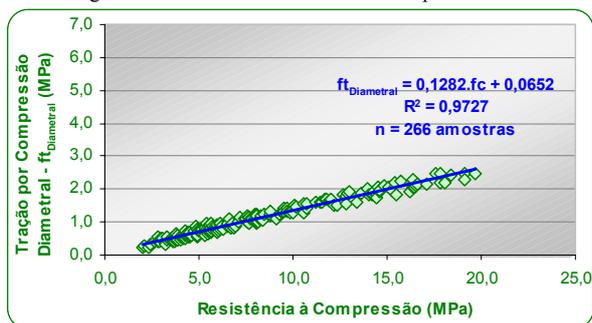


Figura 14 – Diametral x Compressão

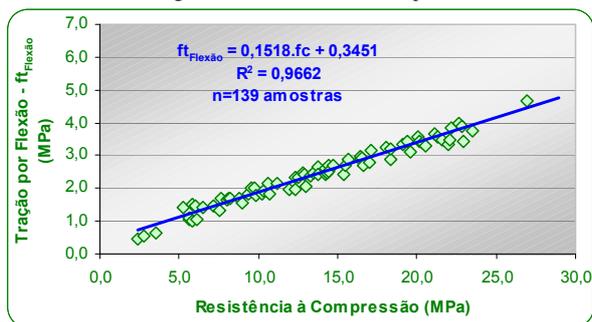


Figura 15 – Tração na Flexão x Compressão

Na Figura 16 estão apresentadas as equações de correlação entre resistência à compressão e os diversos ensaios de determinação da resistência à tração.

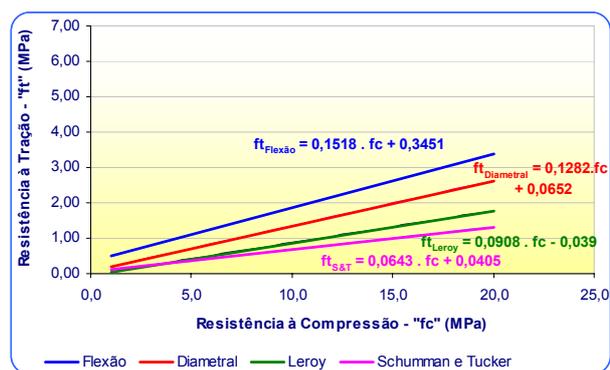


Figura 16 – Distribuição das Resistências à Tração – Métodos Diretos e Indiretos

Na Tabela 3, estão apresentadas as relações entre a resistência à tração, obtida pelos diferentes tipos de ensaio, e a resistência à compressão, obtidas através da Figura 16.

Tabela 3 – Correlações entre a Resistência à Tração e a Resistência à Compressão

Faixa de Resistência à Compressão (MPa)	Método Direto (%)		Método Indireto (%)	
	Leroy	Schumman & Tucker	Tração por Compressão Diametral	Tração na Flexão
5 – 10	8,5	7,0	13,7	20,0
10 – 20	8,8	6,7	13,3	17,6

Devido à pequena faixa de resistência analisada para o concreto compactado com rolo, os resultados não foram muito conclusivos, com as correlações apresentando-se muito próximas de uma faixa de resistência para a outra.

Na Tabela 4, estão apresentadas as correlações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão obtidas no estudo do concreto compactado com rolo.

Tabela 4 – Correlações entre os Métodos Indiretos de Resistência à Tração

Faixa de Resistência à Compressão (MPa)	Métodos Indiretos
	Correlação entre a Resistência à Tração por Compressão Diametral e a Resistência à Tração na Flexão
5 – 10	68,7
10 – 20	75,8

VII. CONCLUSÕES

Ainda há muito o que se estudar sobre a tração direta do concreto, pois existem fatores que influenciam nos resultados, tais como os métodos e equipamentos, geometria do corpo de prova, bases de fixação e tipo de concreto, que embora sejam temas já bastante explorados, ainda não se tem uma definição de como cada uma dessas variáveis efetivamente influenciam no resultado da resistência à tração. Dessa forma, um melhor conhecimento dessas variáveis e a análise da viabilidade deve ser obtido para que se obtenha um método de ensaio de tração direta que forneça valores reais da resistência do concreto. A determinação dos valores reais de tração é de suma importância, para que se possa minimizar o aparecimento de fissuras ocasionadas por efeitos térmicos e de retração e efeitos provocados por esforços atuantes nas estruturas.

Para a análise dos resultados constantes no banco de dados de FURNAS, consideraram-se as relações lineares. Foram deduzidas expressões analíticas para os parâmetros relevantes em estudo.

De acordo com o estudo de outros pesquisadores, fica válida a análise dos dados através de outros tipos de relação, tais como potenciais, logarítmicas e exponenciais.

Comparando-se as equações obtidas neste estudo com as de outros pesquisadores, pode-se concluir que, para a resistência à tração na flexão, a equação de correlação do concreto convencional está bem próxima das propostas por Carneiro & Barcellos apud Oluokun (1991) e Raphael (1984), até resistências de, aproximadamente, 35 MPa. Já para a tração por compressão diametral, a equação de correlação para o concreto convencional está próxima de todas as apresentadas na Figura 11, à exceção da encontra por Carneiro & Barcellos apud Oluokun (1991).

As resistências à compressão e à tração estão diretamente relacionadas. No entanto, não foi observada uma proporcionalidade com valor constante. Com o crescimento da resistência à compressão aumentaram, também, as resistências à tração por compressão diametral, na flexão e direta, em uma razão decrescente.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- [1] METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo – SP, Editora PINI, 1994.
- [2] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. Editora PINI, São Paulo, 1997.
- [3] OLUOKUN, F. A. Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete. ACI Materials Journal. May-June 1991. pp. 302-309.
- [4] RAPHAEL, J. M. Tensile Strength of Concrete. ACI Journal, nº 2, Proceedings V.81, Março-Abril 1984, páginas 158-165.
- [5] ZHENG, W.; KWAN, K. H.; LEE, P. K. K. Direct Tension Test of Concrete. ACI Materials Journal, nº 1, Vol. 98, Janeiro-Fevereiro 2001, páginas 63-71.
- [6] MIER, J. G. M. and VLIET, M. R. A. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. Engineering Fracture Mechanics 69, páginas 235-247, 2002.
- [7] MITCHELL, D. and ABRISHAMI, H. H. Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening. ACI Structural Journal 93, November-December 1996, páginas 703-710.
- [8] FURNAS, Equipe de. Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo – Ensaio e Propriedades. São Paulo – SP, Editora PINI, 1997.
- [9] OLUOKUN, F.A; BURDETTE, E.G.; DEATHEARAGE, J.H. Splitting Tensile Strength and Compressive Strength Relationship at Early Ages. ACI Materials Journal. March-April 1991. pp. 115-121.
- [10] SCHUMAN, L.; TUCKER, J. Tensile and Other Properties of Concretes Made With Various Types of Cements. Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol.31 - 1943.
- [11] NIANXIANG, X.; WENYAN, L. Determining Properties of Mass Concrete by Direct Tensile Test. Magazine of Concrete Research, nº 3, Vol. 86, May-June 1989, páginas 214-219.
- [12] DIAS, E.G.; GAMBALE, E.A.; LEROY, G.; FONTOURA, J.T.F; ANDRADE, W.P. Ensaio de Resistência à Tração Direta do Concreto. Anais do Congresso Brasileiro de Cimento, ABCP, São Paulo – SP, páginas 497-523, 1990.
- [13] ZHOU, F. P.; BALENDRAN, R. V.; JEARY, A. P. Size effect on flexural, Splitting tensile, and torsional strengths of high-strength concrete. Cement and Concrete Research 28, nº 12, páginas 1725-1736, 1998.
- [14] GARDNER, N. J. and POON, S. M. Time and temperature effects on Tensile, Bond, and Compressive Strengths. ACI Journal. July 1976. pp. 405-409.
- [15] CARINO, N. J. e LEW, H.S. Re-examination of the Relation Between Splitting Tensile and compressive strength of normal weight concrete. ACI Journal. May-June 1982. pp. 214-219.
- [16] KIM, J. K.; HAN, S. H.; SONG, Y. C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results. Cement and Concrete Research 32, páginas 1087-1094, 2002.
- [17] SILVA, E. F. Concreto de alto desempenho: estudo de propriedades mecânicas. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1997, 166p.
- [18] ZAIN, M.F.M.; MAHMUD, H.B.; ILHAM, A.; FAIZAL, M. Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete. Cement and Concrete Research 32, p. 1251-1258, 2002.
- [19] FARIAS, L.A. *et al.* – Relação entre os Parâmetros de Resistência do Concreto – 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON – Vitória-ES, 2003. /no prelo/
- [20] FARIAS, L.A. *et al.* – Tração Direta do Concreto: Uma Revisão Bibliográfica – 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON – Vitória-ES, 2003. /no prelo/
- [21] FARIAS, L.A. *et al.* – Relação entre os Parâmetros de Resistência do Concreto – 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON – Vitória-ES, 2003. /no prelo/