



**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS
CONCRETOS COM CURA EM AMBIENTES COM
VIBRAÇÕES MECÂNICAS INDUZIDAS POR
TRÁFEGO DE VEÍCULOS**

Contrato ACTUA-ND-4600004851/08

RELATÓRIO FINAL

**CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA PRES. DUTRA
LSE-DEE105-R20101231**

DEZEMBRO DE 2010

Osasco/SP 31/12/2010		FTomo	PAlmeida	RSantos	PAlmeida
		LSE	LSE	LSE	LSE
Data		Elaborado	Verificado	Qualidade	Aprovado



Equipe Técnica

- Pedro Afonso de Oliveira Almeida
Diretor / Prof. Doutor da EPUSP
- Nayara Yokoyama Vieira
Engenheira Civil / Mestranda em Engenharia Civil da EPUSP
- Fabrício da Cruz Tomo
Engenheiro Civil / Mestrando em Engenharia Civil da EESC/USP
- Prof. Dr. Pericles Brasiliense Fusco
Prof. Titular da Escola Politécnica da USP, Consultor



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Resistência dos concretos em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfego de veículos	3
2.2 Conceitos básicos sobre o concreto simples	9
2.3 Conceitos básicos sobre o concreto armado	11
2.4 Ruptura do concreto por esforços de compressão	12
2.5 Ruptura do concreto por esforços de tração	14
2.6 Fenômenos de aderência aço-concreto	16
2.7 Os fenômenos de ruptura do concreto com cura em ambientes com vibrações	19
3 ASPECTOS DOS CORPOS-DE-PROVA COM CURA EM AMBIENTE COM VIBRAÇÕES	20
3.1 Dosagem do concreto	20
3.2 Corpos-de-prova	22
3.2.1 Corpos-de-prova cilíndricos	22
3.2.2 Corpos-de-prova prismáticos	26
3.3 Vibrações induzidas durante cura	29
3.3.1 Plataforma vibratória	29
3.1.2 Vibrações induzidas durante a cura inicial dos corpos-de-prova	33
3.4 Procedimento para moldagem e armazenamento dos corpos-de-prova	39
4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS DO CONCRETO	44
4.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático(ensaio de compressão simples)	44
4.2 Resistência à tração (ensaio de compressão diametral)	47
4.3 Resistência de aderência (ensaio de arrancamento)	49
5 RESULTADOS	52
5.1 Resistência à compressão	52
5.2 Módulo de elasticidade	58
5.3 Resistência à tração por compressão diametral	63
5.4 Aderência aço-concreto	64
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
7 CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80



1 INTRODUÇÃO

Relatório final da pesquisa “Avaliação da Resistência dos Concretos com Cura em Ambientes com Vibrações Mecânicas induzidas por Tráfego de Veículos”, realizada pelo LSE Laboratório de Sistemas Estruturais, contratado pela Concessionária da Rodovia Presidente Dutra NovaDutra.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os efeitos das vibrações, induzidas por tráfego de veículos, nas primeiras idades do concreto (cura inicial), visando relacionar as resistências e a rigidez com a natureza e a intensidade dessas vibrações durante a cura inicial do concreto. A sistematização da revisão bibliográfica está no Capítulo 2 deste relatório.

Em seguida, foi desenvolvido um estudo experimental para identificar a propriedades mecânicas do concreto em razão das vibrações induzidas por veículos nas estruturas de pontes durante a cura inicial. Para isso, foram fabricadas peças de concretos em ambientes com vibrações típicas das pontes (situação com vibrações) durante a cura inicial e em ambientes isento de vibrações induzidas (situação em repouso).

As peças de concreto foram representadas por corpos-de-prova cilíndricos de Ø10x20 centímetros e Ø15x30 centímetros, e corpos-de-prova cúbicos e prismáticos, com dimensões de 15x15x15 centímetros, 15x15x30 centímetros e 15x15x18,25 centímetros com barras de aço embebidas no eixo de simetria desses. Os corpos-de-prova cilíndricos foram usados em ensaios para a determinação da resistência à compressão, da resistência à tração e do módulo de elasticidade do concreto. Os corpos-de-prova prismáticos foram usados para a determinação da resistência à aderência. A descrição do procedimento de execução de cada ensaio realizado encontra-se no Capítulo 4 desse relatório.

Durante a pesquisa foram estudados seis (6) lotes de amostras de concreto moldadas com concreto $f_{ck}=40$ MPa, utilizando-se como referência traços



fornecidos pela ENGELOG, para os cimentos CP-II e CP-V. Para cada lote foram realizados ensaios nos corpos-de-prova com idades de três (3) dias, sete (7) dias, vinte e oito (28) dias.

Os corpos-de-prova com cura com vibração foram moldados e mantidos sobre uma plataforma vibratória por um período de 12 horas. Para os lotes de 1 a 5, foi utilizada como excitação da plataforma a série temporal de acelerações da ponte sobre o Rio Bananal. Essa série temporal foi registrada durante os ensaios de identificação estrutural realizados pelo L.S.E - Laboratório de Sistemas Estruturais. As vibrações da ponte sobre o Rio Bananal foram escolhidas por apresentarem as maiores amplitudes, pico-a-pico, de acelerações induzidas pelo tráfego. Essa ponte está localizada no quilometro 101,8 km, da BR-040 (Rodovia Rio-Teresópolis). Após a análise das vibrações atuantes na plataforma, verificou-se que as vibrações que predominavam estavam numa banda acima da frequência de interesse da maioria das pontes, da ordem de 2,5 Hz.

Para a cura com vibração do lote 6, o sinal da excitação foi trocado para um sinal registrado no viaduto de acesso à cidade de Penedo, que indica vibrações na banda de interesse, de 2,5 a 5 Hz. Ressalte-se que esse sinal de vibração já foi utilizado na pesquisa realizada pelo LSE em 2006, LSE-DEE-94-R-20060316, o que possibilitará uma comparação entre os diferentes resultados obtidos.

Os resultados dessa investigação encontram-se apresentados no Capítulo 5 do presente relatório.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resistência dos concretos em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfego de veículos

O interesse sobre as propriedades mecânicas do concreto quando moldado em ambientes com vibrações induzidas por tráfego vem aumentando em razão do aumento dos serviços de recuperação e readequação das auto estradas, que sempre se deparam com questões de pavimento ou de alargamento dessas vias. Esses serviços vem se tornando mais frequentes, principalmente, em função do envelhecimento precoce das pontes de concreto, que exigem uma imediata intervenção antes da realização de outras estruturas novas ou até mesmo de desvios, levando sempre a situações em que os serviços são realizados com a via em operação.

Portanto, encontram-se poucos trabalhos na literatura técnica sobre esse tema que é tão relevante.

Dentre eles pode-se citar, inicialmente, o trabalho de Swilwebrand (1992), afirmando que a resistência dos pavimentos moldados em situações onde há vibrações induzidas pelo tráfego aleatório de veículos, passando em uma faixa adjacente, não é modificada. Esse mesmo pesquisador concluiu também que para concretos com alto slump, as vibrações nas primeiras quatro horas de vida podem causar reduções na resistência mecânica, sem relacionar este fato tanto à amplitude quanto a natureza das vibrações.

ISSA (1999), desenvolveu um estudo das prováveis causas de fissuração do concreto nas primeiras idades, dirigido a tabuleiros de pontes. Ele concluiu que nas situações onde havia vibrações nas lajes dos tabuleiros, induzidas pelo tráfego de veículos nas lajes adjacentes, haviam reduções na resistência do concreto, mesmo quando moldados com boa cura, bem compactados e com baixo slump. Contudo, não ficou claro se houve ou não alteração do módulo de elasticidade do concreto em função da vibração.



Outro pesquisador WILK (1998), preocupado com o comportamento da resistência e da rigidez do concreto devido a vibrações nas primeiras idades, recomendou que a ponte não deva ser submetida a qualquer impacto ou vibração durante 18 horas depois do início da moldagem (lançamento do concreto fresco). Wilk (1998) também recomendou que a superfície do concreto fresco moldado no pavimento deve ter um adequado tratamento de cura, isto é, promover a hidratação do cimento, com controle da temperatura e a entrada e saída de umidade do concreto, mantendo-o saturado.

No Brasil esses estudos foram iniciados na Escola Politécnica da USP pelo Prof. Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida, que com Auxílio da Fapesp e apoio da NovaDutra, em 2004, quando orientou a pesquisa de Pós-Doutorado da Dra. Juliana Fernandes, que tinha por objetivo a identificação dos defeitos em peças de concreto moldadas em ambiente vibrado nas primeiras idades. Nessa investigação foram realizadas moldagens de corpos-de-prova sobre a plataforma de um shaker, simulando apenas vibrações unidirecionais. Ao longo do estudo, as propriedades de resistência e rigidez desse concreto foram comparadas com as propriedades de outra amostra moldada em repouso. Nesse estudo realizaram-se ensaios de compressão simples e de flexão em corpos-de-prova com idade de três (3) horas, de sete (7) dias e de vinte e oito (28) dias, do qual se concluiu que a propriedade mecânica mais sensível a tal procedimento vibratório foi a de tração na flexão. A Tabela 2.1 apresenta os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios realizados na Escola Politécnica da USP

propriedade mecânica do concreto	cura em repouso (R)	cura em ambiente com vibração (V)	relação V/R
Resistência à compressão	44,00	43,40	0,986
Módulo de elasticidade	35,30	31,85	0,900
Resistência à tração	2,80	2,30	0,821



Recentemente, foi publicado um artigo no congresso Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures – EVACES’09, pelos pesquisadores GALENKAMP et al, com estudos sobre o efeito das vibrações nas propriedades de resistência à tração. Foram realizados ensaios dinâmicos de flexão e de velocidade de partículas. Uma ilustração esquemática do arranjo está mostrada na Figura 2.1.

O ensaio de velocidade de partícula não é esclarecedor, pois no artigo são mostrados gráficos de resultados que não podem ser verificados. Portanto, neste trabalho não será feita nenhuma avaliação desse trabalho, desconsiderando qualquer informação dos gráficos.

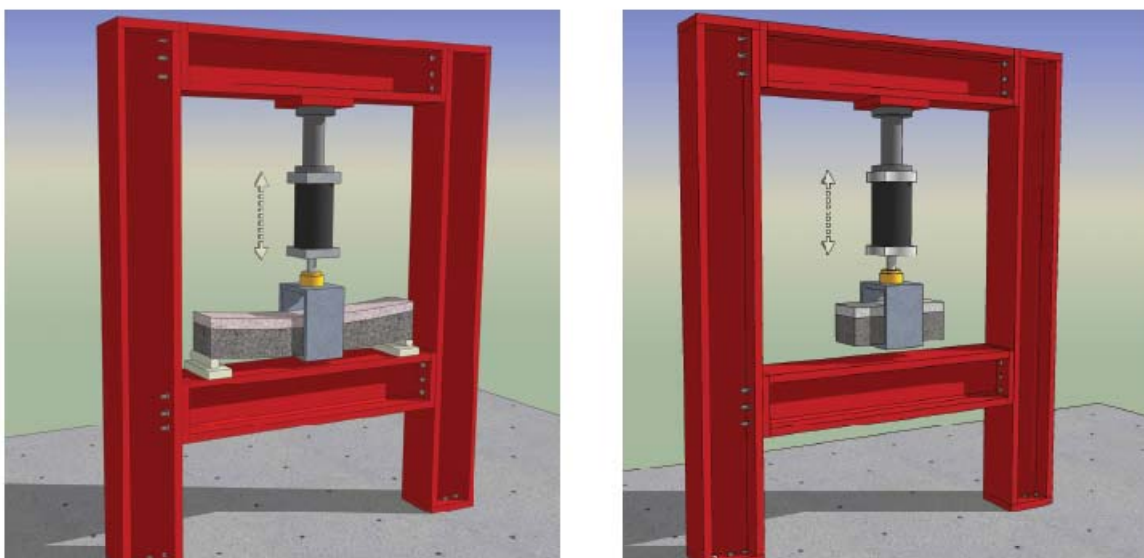


Figura 2.1 – Esquema do arranjo dos ensaios de flexão dinâmica e de velocidade de partículas (GALENKAMP et al, 2009)

Nesse estudo, verificaram que, em uma obra em fase de execução, o tráfego contínuo induz vibrações no concreto recente. O efeito destas vibrações no processo de cura do concreto é muito incerto. Esclareceram também que muitos investigadores tentaram obter uma relação entre vibrações induzidas e a qualidade final do concreto, mas os resultados foram divergentes.

O caminho adotado pelos pesquisadores na investigação foi normalizar as vibrações de uma ponte, e validar as respostas com as vibrações medidas na própria ponte. O resultado foi o espectro completo das frequências predominantes na estrutura mostrado na Figura 2.2. Esse espectro possibilitou uma boa simulação da resposta da ponte na fase experimental do programa.

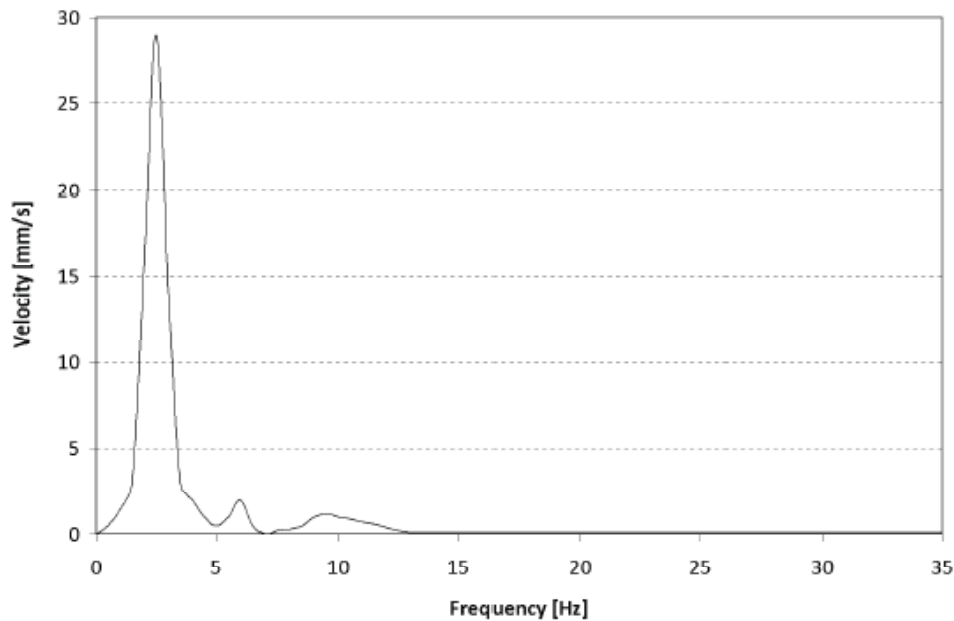


Figura 2.2 – Espectro da frequência da ponte (GALENKAMP et all, 2009)

Com a finalidade de realizar os ensaios para verificar a influência da velocidade de partículas nas propriedades mecânicas, foram medidos em campo as velocidades de partículas por um período de um mês. O registro dessa velocidades está mostrado na Figura 2.3.

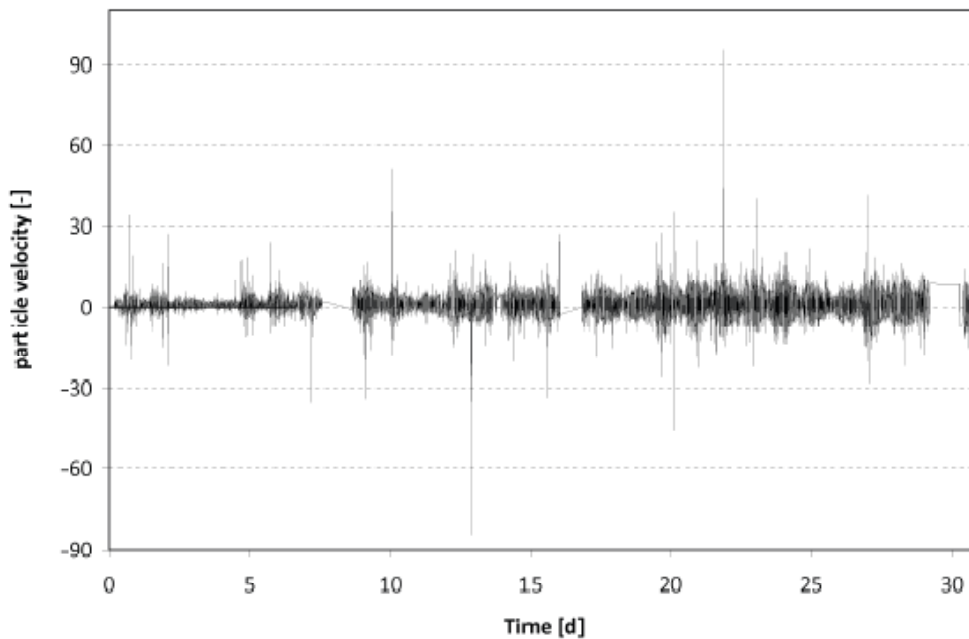


Figura 2.3 – Registro da velocidade de partícula pelo tempo (GALENKAMP et all, 2009)

Diante desses dados, os pesquisadores realizaram uma série de ensaios para determinação da resistência a tração variando a frequência de excitação e a velocidade de partículas. A intensidade de tráfego e a velocidade dos veículos foram incluídas igualmente na fase analítica, evidenciando as condições de carga que eram aplicadas. Os resultados desses ensaios estão mostrados nas Figuras 2.4 e 2.5.

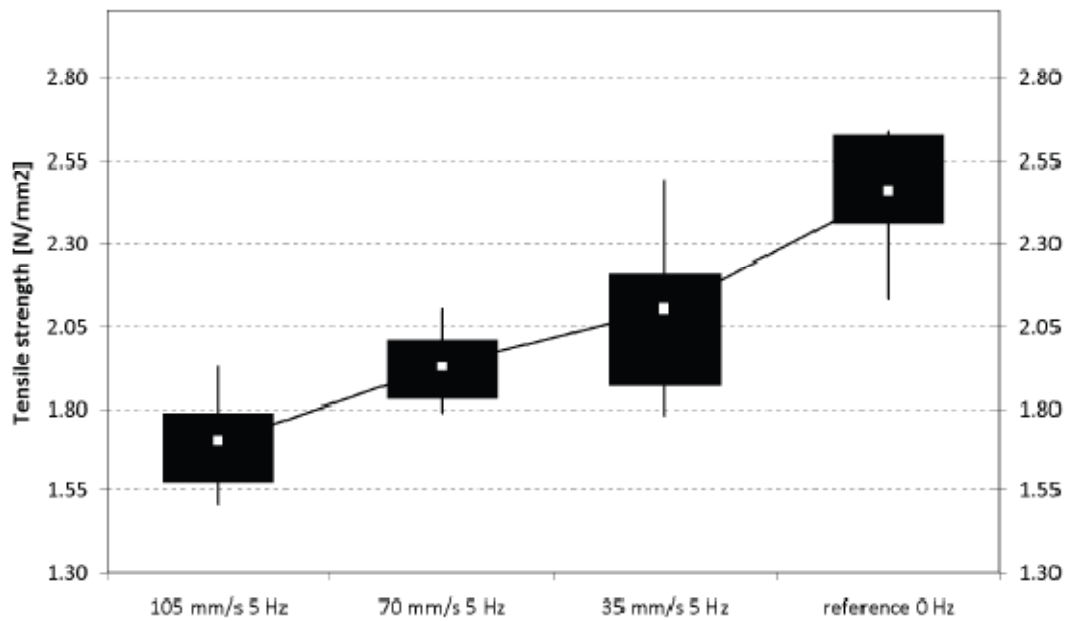


Figura 2.4 – Resistência à tração para diferentes amplitudes de vibração (GALENKAMP et all, 2009)

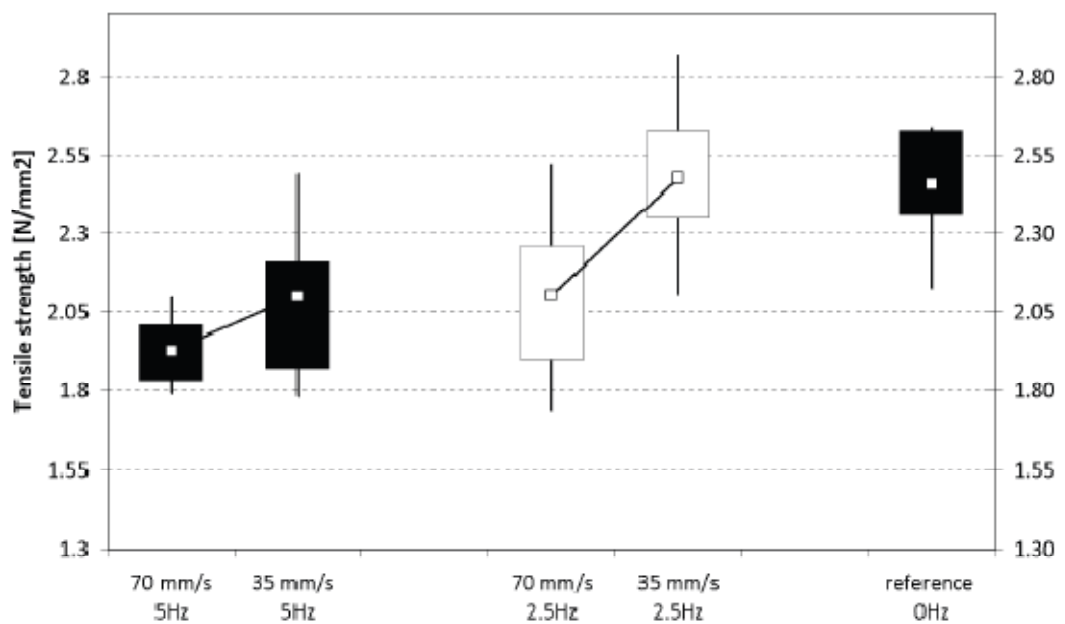


Figura 2.5 – Resistência à tração para diferentes freqüências e amplitudes (GALENKAMP et all, 2009)

Deste trabalho concluiu-se que o aumento da freqüências das vibrações de amplitudes relevantes, induzidas pelo tráfego, afetam negativamente a



resistência do concreto. Da correlação com as velocidades de partículas, verificou-se que altas velocidades de partículas diminuíram a resistência do concreto em até 31%. Entretanto, as cargas de compressão não afetaram a resistência. Segundo os pesquisadores, isto indica que não são os grandes veículos e sim as velocidades que influenciam o processo de hidratação do concreto nas primeiras idades.

Segundo os pesquisadores a frequência da vibração influencia nos resultados. Os ensaios com vibração em velocidades de partículas similares, mas com frequências diferentes mostram resultados diferentes. Baixas frequências resultaram em menos ou nenhuma degradação visto que casos com frequências elevadas mostraram substancialmente maior diminuição da resistência.

Conseqüentemente a aceleração parece muito mais apropriada para caracterizar as vibrações do que a velocidade de partículas.

2.2 Conceitos básicos sobre o concreto simples

A composição química aproximada dos minerais que compõem o clínquer de cimento Portland comum é formada por C3S, C2S, C3A e C4AF, em proporções aproximadas entre 45 e 60%, 15 e 30%, 6 e 12% e, 6 e 8%, respectivamente. Na moagem do clínquer adiciona-se uma certa quantidade de sulfato de cálcio (gesso).

De acordo com a Química do Cimento, emprega-se a seguinte notação:

C=CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃; F=Fe₂O₃; S=SO₃; H=H₂O.

Em princípio, deseja-se que haja predominância dos produtos de hidratação do silicato tricálcico e do silicato dicálcico, impedindo-se a hidratação pura e simples do aluminato tricálcico. Para esta última finalidade acrescenta-se o gesso que, em conjunto com o C3A, forma a etringita enquanto a massa de concreto ainda está fluida, cuja composição é dada por (CaO)₆(Al₂O₃)₃(SO₃)₃(H₂O)₃₂.



A etringita é o primeiro hidrato a cristalizar-se, devido à elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação. No cimento portland normal, que contém 5 a 6% de gesso, a precipitação da etringita contribui para o enrijecimento da massa de concreto, para a pega, que leva à solidificação da mistura, e para o desenvolvimento da resistência inicial do concreto.

Essa precipitação da etringita no entorno dos grãos de agregado graúdo, na forma de um entramado caótico de cristais aciculares é responsável pela formação da chamada zona de transição entre os agregados graúdos e a massa de gel que vai se formando na fase de argamassa da mistura, cujo enrijecimento vai formando a concreto endurecido pelo envolvimento dos grãos de agregado graúdo.

Posteriormente, quando o sulfato de cálcio tiver sido todo consumido, eleva-se novamente a concentração de aluminatos, pela hidratação do C3A e do C4AF, e a etringita torna-se instável, transformando-se no monossulfato, $\text{CaO}_4(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)(\text{H}_2\text{O})_{18}$, que se recristaliza em placas hexagonais estáveis.

Muitas das propriedades dos concretos decorrem das transformações que ocorrem nas zonas de transição.

De forma muito clara, é a formação quase instantânea da etringita nas zonas de transição dos agregados graúdos para a matriz de argamassa, que impede a segregação dos agregados graúdos antes do término da pega. É a presença da etringita que permite a formação da massa resistente endurecida do concreto como ela é conhecida, particularmente quando os fenômenos de pega estiverem ocorrendo debaixo da influência de vibrações aleatórias sobre a mistura em consolidação.

Analisando-se a configuração de ruptura de peças estruturais e de corpos-de-prova, verifica-se a plausibilidade da idéia de que a estrutura interna dos



materiais tende a um arranjo em mosaico, no qual se formam diferentes blocos distintos, cada um com um grande número de partículas, com tamanhos de 100 a 1000 nanômetros.

Esses blocos ficam agregados entre si por ligações recíprocas muito menos resistentes que as ligações atômicas envolvidas nas ligações primárias das partículas dentro de cada bloco.

Assim, ao se romper um corpo-de-prova em um ensaio de compressão simples, não ocorre a pulverização de toda a peça, ocorrendo simplesmente a sua subdivisão em um pequeno número de partes isoladas. Esta idéia já há muito tempo está incluída na teoria de segurança das estruturas de concreto, ao se considerar o conceito de seção estrutural de ruptura, que envolve sempre um certo volume de material ao redor dos pontos onde são aplicados os critérios de segurança. Assim, em relação aos fenômenos de ruptura das peças de concreto estrutural, não existe um número infinito de graus de liberdade. Pelo contrário, cada modo de ruptura das peças estruturais ocorre sempre com um número muito restrito de graus de liberdade.

Desse modo, a análise dos efeitos deletérios sobre as características resistentes do concreto sob a ação de vibrações durante o período de cura inicial deve considerar como se delineiam os blocos do mosaico estrutural resistente a essas vibrações.

2.3 Conceitos básicos sobre o concreto armado

Nas estruturas de concreto armado, com ou sem protensão, o arranjo em mosaico da estrutura interna do concreto é muito pouco considerada, em virtude da preocupação em se dispor de armaduras secundárias que interferem na resistência local do material.

Uma das poucas situações em que o arranjo em mosaico da estrutura interna do concreto é indiretamente considerado é aquela em que se busca a definição



do espaçamento máximo permitido para as barras de aço da armadura de pele das chamadas vigas altas. Esse espaçamento deve ficar limitado pela distância necessária para que a ruptura por tração de um dos blocos do mosaico não se propague para os blocos vizinhos. É a partir dessa idéia que se pode compreender a regra de que cada barra de aço pode proteger contra a fissuração o concreto de um bloco ao seu redor, com dimensão da ordem de 15 diâmetros da barra de aço. Nessa regra, além da idéia da formação intrínseca de um bloco resistente, também é considerada a interação de tensões entre os agregados desse bloco e as tensões globais de aderência transmitidas pelo gel rígido da pasta endurecida de cimento.

De qualquer forma, o entendimento da organização da estrutura interna resistente do concreto armado somente pode ser alcançado pelo conhecimento da evolução da interação dos esforços no concreto e nas armaduras, desde o início da solicitação da peça estrutural até o delineamento do seu modo de ruptura.

2.4 Ruptura do concreto por esforços de compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais importante do concreto visto que normas nacionais e internacionais adotam essa propriedade como referência para estimar as demais resistências.

O concreto em sua microestrutura apresenta falhas decorrentes de vazios pré-formados, defeitos de aderência entre a pasta e o agregado e fissuras pré-formadas na pasta ou na zona de transição.

Quando submetido a esforços de compressão, essas falhas desviam as tensões de compressão causando concentração de tensões ao redor da falha e o surgimento de tensões de tração indiretas. Um esquema do desvio das isostáticas de tensões de compressão ao redor de uma falha está mostrado na Figura 2.6.

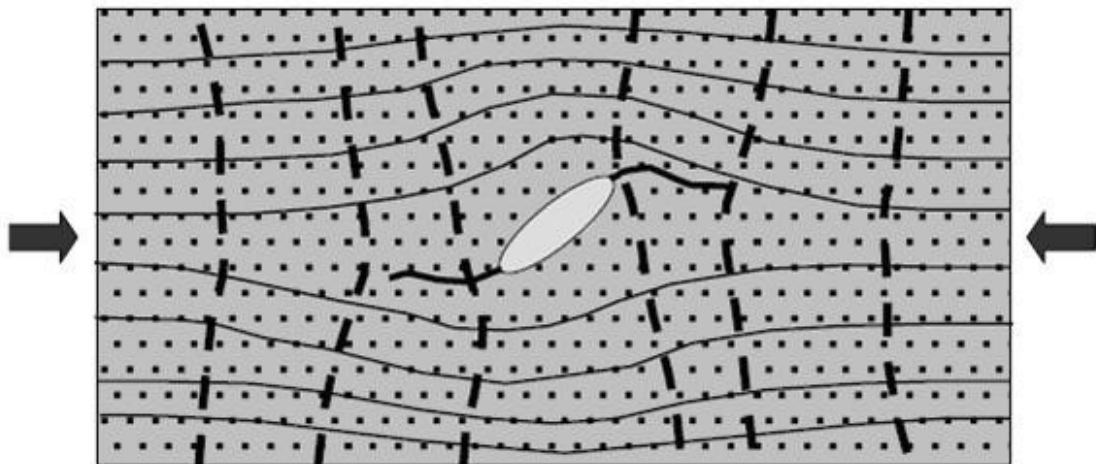


Figura 2.6 – Concentração de tensões de compressão no entorno de uma falha pré-formada (HANAI, 2005)

O aumento das tensões de compressão, conseqüentemente o aumento das tensões de tração ao redor da falha, causam propagação dessas com o crescimento tendendo a ser na direção das forças atuantes de compressão. A união dessas falhas e fissuras formam superfícies de ruptura conforme pode ser observado na Figura 2.7. (HANAI, 2005)

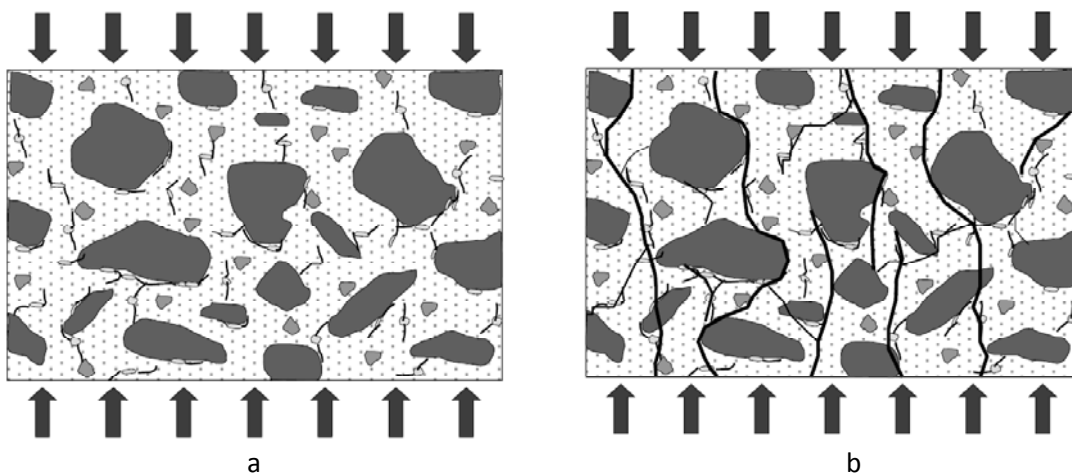


Figura 2.7 – Ilustração de uma seção de concreto com falhas pré-formadas submetido a compressão: (a) progresso da microfissuração a partir de múltiplas falhas; (b) fraturamento do concreto submetido a força de compressão (HANAI, 2005)

POWERS (1958) observou que a resistência à compressão estava relacionada à razão gel/espaco ou à razão entre os produtos sólidos da hidratação no

sistema e o espaço total. Uma comparação de resultados de ensaios de três argamassas com diferentes traços está mostrada na Figura 2.8. (MEHTA, 2008)

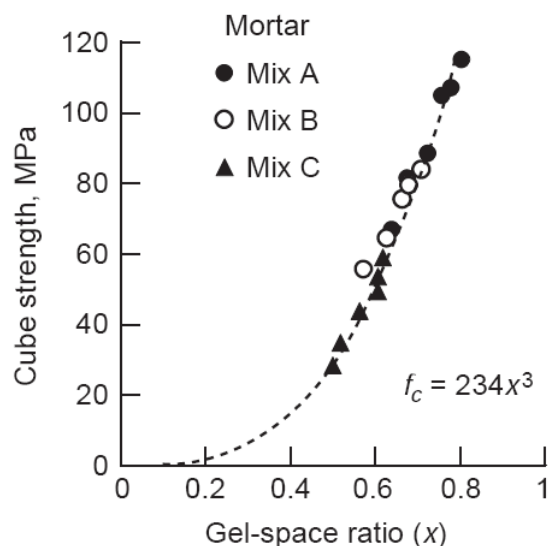


Figura 2.8 – Gráfico resistência em cubos pela razão gel/espaco (MEHTA, 2008)

2.5 Ruptura do concreto por esforços de tração

A ruptura do concreto quando submetido à esforços de tração assim como quando submetido à esforços de compressão se originam no entorno das falhas presente na microestrutura do concreto.

As isostáticas de tração desviam das falhas provocando concentração de tensões conforme mostrado na Figura 2.9

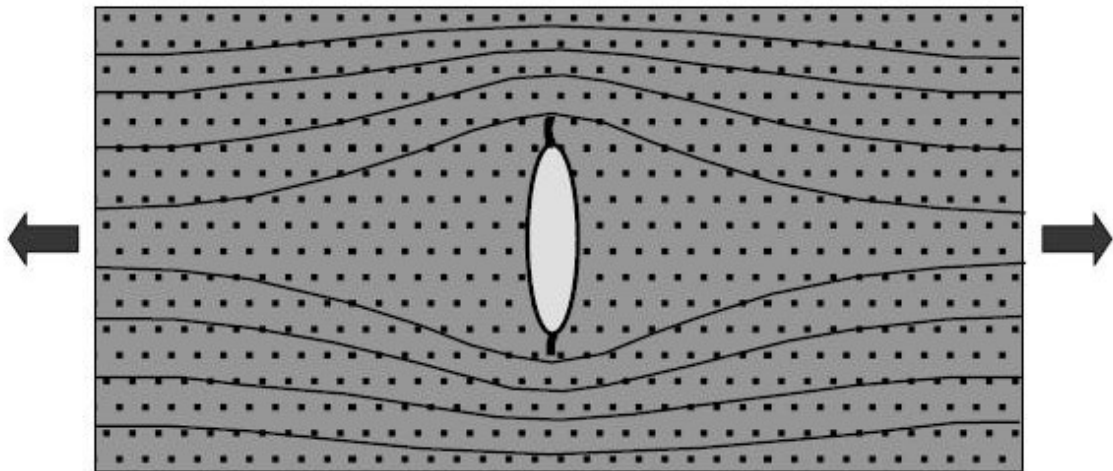


Figura 2.9 – Concentração de tensões de tração no entorno de uma falha pré-formada (HANAI, 2005)

Com o aumento da intensidade das forças de tração ocorre um processo de concentração de tensões e conseqüentemente o aumento do tamanho da falha. A união dessas falhas e fissuras formam superfícies de ruptura conforme pode ser observado na Figura 2.10. (HANAI, 2005)

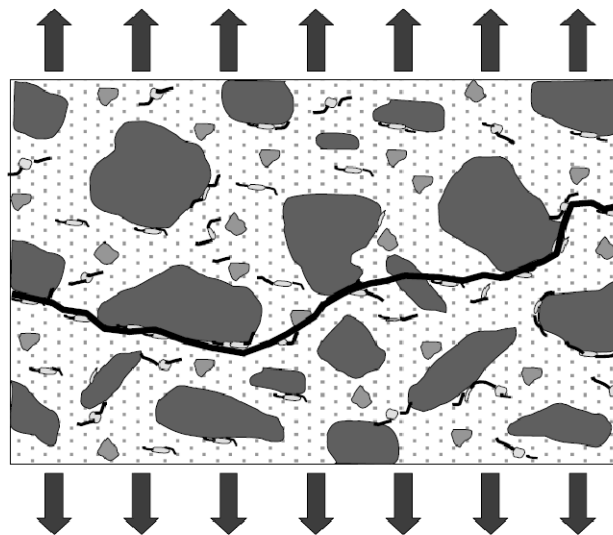


Figura 2.10 – Ilustração de uma seção de concreto com falhas pré-formadas submetido a compressão: (a) fraturamento do concreto submetido a força de tração (HANAI, 2005)



2.6 Fenômenos de aderência aço-concreto

A existência do concreto armado depende essencialmente da solidariedade existente entre os seus materiais componentes, o concreto e o aço. Essa solidariedade impede que haja escorregamento relativo entre a armadura e o concreto que envolve, daí decorrendo de peculiaridades de comportamento, próprias do concreto armado. (FUSCO, 1994)

Essa solidariedade é garantida pela existência de aderência entre o aço e o concreto. Essa aderência pode ser dividida em três naturezas: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica.

A aderência por adesão resulta de ligações físico-químicas entre a nata de concreto e o aço provenientes de forças capilares geradas durante as reações de pega do concreto. A rugosidade e a limpeza da superfície da armadura também influenciam a aderência por adesão.

Uma vez rompida a adesão entre os materiais, surge uma resistência de atrito entre o aço e o concreto. A resistência de atrito depende do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, o qual é função da rugosidade superficial da barras, e da existência de pressões transversais às armaduras. As pressões transversais às armaduras necessárias para que ocorra o atrito podem ser causadas por tensões de compressão devido a cargas externas, pelo efeito de retração ou expansão do concreto. (LEONHARDT, 1972)

A aderência mecânica é decorrente da presença de saliências na superfície da barras. Essas saliências funcionam como peças de apoio, mobilizando tensões de compressão no concreto. (FUSCO, 1994)

LEONHARDT (1972) afirma que em barras nervuradas, a forma, a inclinação das nervuras, a altura e a distância livre entre elas influenciam na aderência mecânica.

Ressalta-se que o efeito de aderência mecânica também está presente nas chamadas “barras lisas” em virtude das irregularidades superficiais inerentes ao processo de laminação, como pode ser observado na Figura 2.11. (FUSCO, 1994)

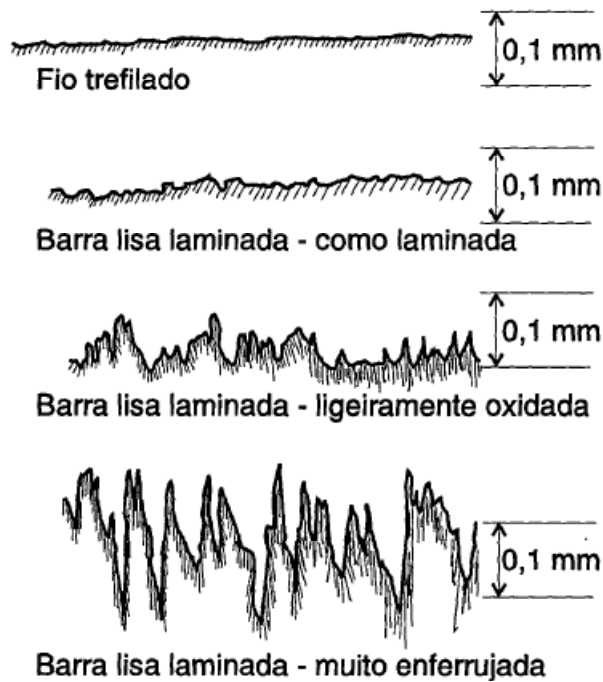


Figura 2.11 – Acabamento superficial de fios e barras lisas (FUSCO,1994)

Portanto, a resistência de aderência é definida pela soma das três parcelas acima descritas. FUSCO (1994) afirma que a divisão da aderência em três parcelas é meramente esquemática pois não é possível determinar-se cada uma delas isoladamente. Desse modo, a resistência de aderência é determinada por meio de ensaios de arrancamento obtendo-se valores médios globais de aderência.

Quatro modos de ruptura podem ser verificados no ensaio de arrancamento. São eles: escorregamento das barras, escoamento das barras e fendilhamento do concreto.

O escorregamento das barras ocorre quando a tensão de aderência é mobilizada em todo o comprimento da mesma.

O comportamento teórico das tensões durante o ensaio de arrancamento das barras está mostrado na Figura 2.12

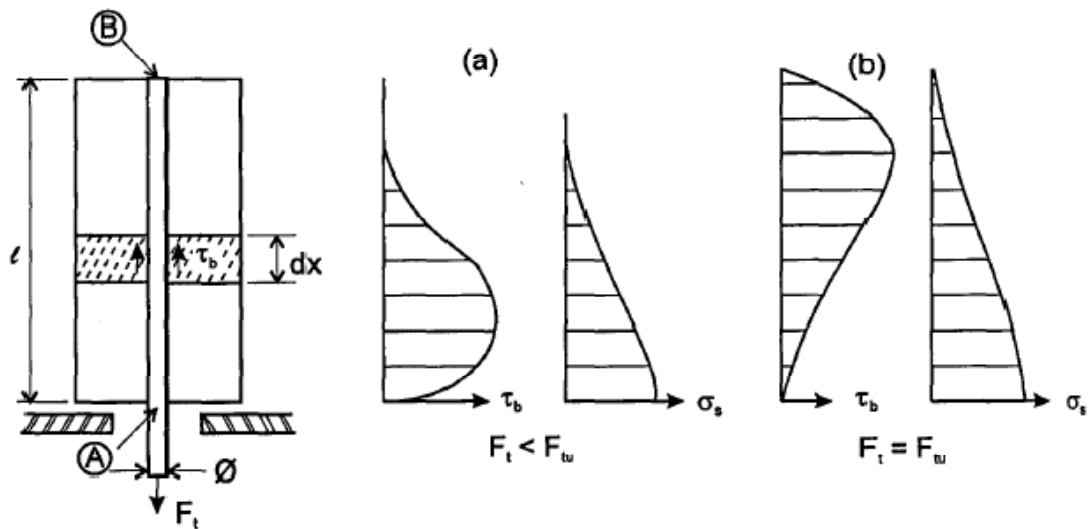


Figura 2.12 – Comportamento das tensões durante o ensaio de arrancamento (FUSCO, 1994)

Verifica-se que a tensão de aderência (τ_b) atinge seu valor máximo onde o diagrama de tensão no aço (σ_s) apresenta um ponto de inflexão.

A ruptura por escoamento da barras de aço se dá quando a força de tração “ F_t ” atuante em uma barra de diâmetro “ \varnothing ” com área da seção transversal “ A ” atinge o valor de resistência ultima a tração da barra f_u .

$$F_t = f_u \cdot A$$

Onde $A = \frac{\pi \phi^2}{4}$

Embora a aderência mecânica seja beneficiada pela presença de saliências, ou nervuras, nas barras de aço, estas mobilizam tensões de compressão diagonais no concreto as quais conseqüentemente estão acompanhadas de tensões transversais de tração a fim de garantir o equilíbrio, como pode ser observado na figura 2.13. (FUSCO, 1994)

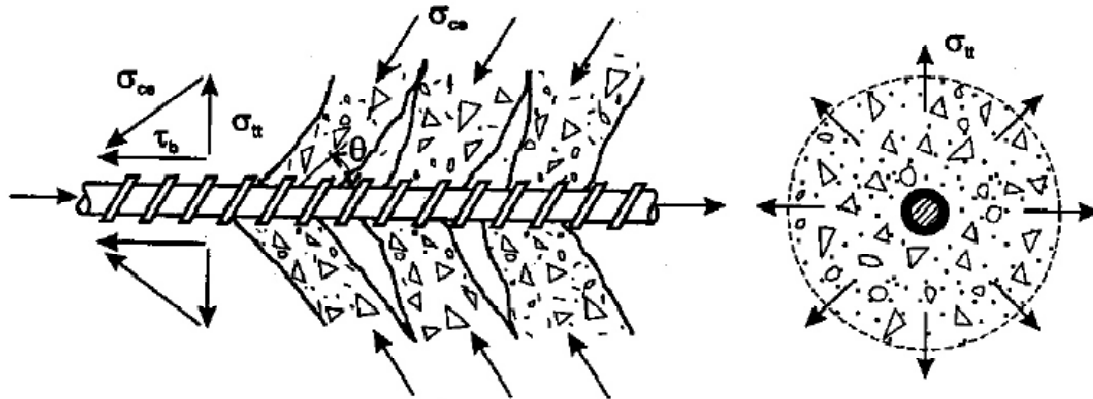


Figura 2.13 – Fissuração do concreto no entorno das barras (FUSCO, 1994)

Essas tensões de tração criam no concreto uma região microfissurada no entorno das barras tendendo a provocar o fendilhamento do concreto paralelamente ao eixo da barras, como poder ser observado na Figura 2.14 (FUSCO, 1994).

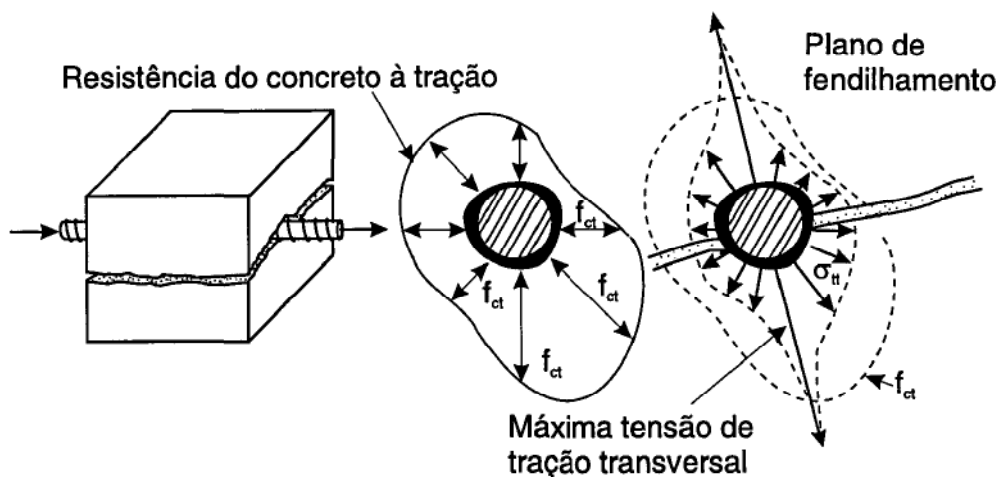


Figura 2.14 – Fendilhamento no concreto (FUSCO, 1994)

2.7 Os fenômenos de ruptura do concreto com cura em ambiente com vibrações

Tendo em vista determinar as causas da destruição precoce das estruturas cujo concreto foi moldado sob a ação de vibrações durante seu período de cura, torna-se necessário realizar uma análise descritiva dos seus modos de ruptura, tanto em relação ao arranjo estrutural das peças que são moldadas nessa situação, quanto em relação às suas ligações com outras partes já



existentes da estrutura. Neste sentido, é preciso dispor de relatos consistentes dos fenômenos de ruptura já observados em diferentes obras submetidas a esta condição.

Ao concluir a revisão bibliográfica ficou evidente que o tema está se tornando de grande relevância internacional, principalmente, por questões de sustentabilidade que levam a recuperação ou readequação das estruturas em serviço.

Entretanto, os resultados das investigações ainda são difusos e não há modelagem consistente sobre a questão do efeito das vibrações nas primeiras idades do concreto.

Dessa forma, a pesquisa será continuada com uma investigação do mecanismo de destruição do concreto, que será testado em ensaios de Laboratório, utilizando-se sinais medidos em pontes da Novadutra e da CRT.

3 ASPECTOS DOS CORPOS-DE-PROVA COM CURA EM AMBIENTE COM VIBRAÇÕES

3.1 Dosagem do concreto

Com objetivo de avaliar os resultados da cura em ambiente com vibrações, para mais de um tipo de dosagem, foram utilizados dois traços fornecidos pela ENGELOG: sendo um com cimento CPII e outro com cimento CPV. Os lotes 1, 2 e 5 são com cimento CP II. Os lotes 3, 4 e 6 são com cimento CP V.

O traço em massa adotado para os lotes 1 e 2 está mostrado na Tabela 3.1. O traço para os lotes 3 e 4 está mostrado na Tabela 3.2.



Tabela 3.1 – Traço em massa para CP II ($f_{ck}=40$ MPa; $A/C\leq 0,45$; Slump= 70 ± 10 mm)

Cimento	Votoran CII-E.40	426 kg
Brita 1	Basalto 12	1.013 kg
Areia natural	Mineração Bofete	424 kg
Areia artificial	Mineração Khouri	361 kg
Aditivo	Fluxer GT.120 - Ertex	3,19 L
Água		175 L

Tabela 3.2 – Traço em massa para CP V (Slump= 100 ± 20 mm)

Cimento	ARI CP V RS	450 kg
Brita 1	Pedreira Serra da Lapa	1001 kg
Areia grossa	Areal Alvorada	442 kg
Areia média	Areal Alvorada	294 kg
Aditivo	BF 10	2,25 L
Água		180 L

As Tabelas 3.3 e 3.4 representam os traços e massa adotados para os lotes 05 e 06, respectivamente.

Tabela 3.3 – Traço em massa para CP II ($f_{ck}=40$ MPa; $A/C\leq 0,45$; Slump= 80 ± 10 mm)

Cimento	Tupi CII-E.40	428 kg
Brita 1	Granito	1.111 kg
Areia Natural Média	Quartzo	327 kg
Areia Artificial Fina	Quartzo	329 kg
Aditivo	Rheotec – Tipo 219P	
Água		181 L

Tabela 3.4 – Traço em massa para CP V (Slump=80 ± 10mm)

Cimento	ARI CP V RS	450 kg
Brita 1	Granito	1100 kg
Areia média	Quartzo	323 kg
Areia fina	Quartzo	325 kg
Aditivo	Rheotec – Tipo 219P	
Água		181 L

3.2 Corpos-de-prova

3.2.1 Corpos-de-prova cilíndricos

Os corpos-de-prova cilíndricos moldados para os lotes 01, 02, 03 e 04 tiveram a finalidade de determinar a resistência e o módulo de deformação à compressão para os concretos com e sem vibração. O projeto com as dimensões da fôrma metálica está apresentado na Figura 3.1.

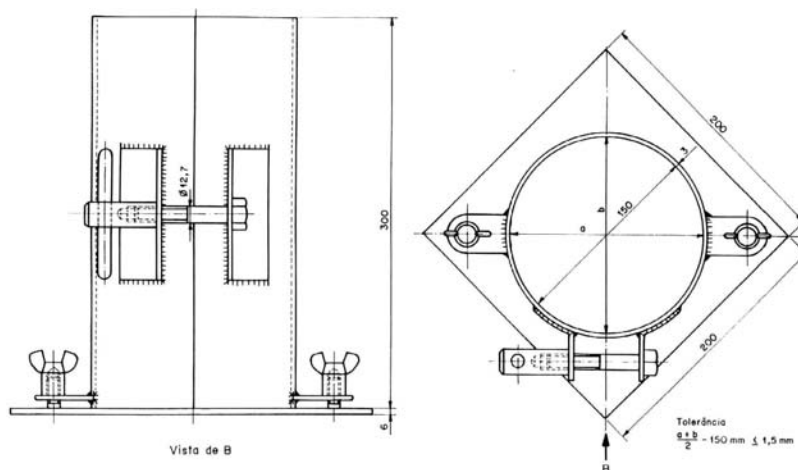


Figura 3.1 – Molde cilíndrico para os CPs Ø 15 x 30 cm

Nos ensaios dos lotes 05 e 06 também foram utilizado os moldes 15x30, somente para para a determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto.

Para a determinação da resistência a compressão e módulo de elasticidade dos lotes 05 e 06 foram utilizados CP 10x20, Figura 3.2.

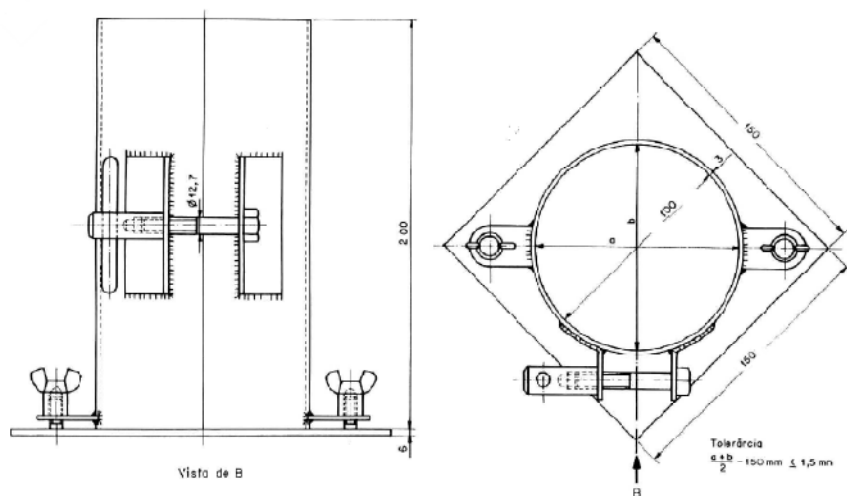


Figura 3.2 – Molde cilíndrico para os CPs $\varnothing 10 \times 20$ cm

As quantidades de corpos-de-prova ensaiados em cada lote estão apresentadas nas Tabela 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Quantidade de CPs dos lotes 1, 2, 3 e 4 com os tipos de cura

Lote	Cimento	Ensaio	Cura	Idade	CP-Ø15x30cm (un.)
Lote 01	CP II	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	em repouso	3 dias	5
			em vibração	3 dias	3
			em repouso	7 dias	5
			em vibração	7 dias	5
			em repouso	28 dias	3
			em vibração	28 dias	5
Lote 02	CP II	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	em repouso	3 dias	5
			em vibração amplificada	3 dias	0 ¹
			em repouso	10 dias	5
			em vibração amplificada	10 dias	5
			em repouso	28 dias	4
			com vibração amplificada	28 dias	6
Lote 03	CP V	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	em repouso	5 dias	5
			em vibração	5 dias	5
			em repouso	7 dias	5
			em vibração	7 dias	4
			em repouso	28 dias	5
			em vibração	28 dias	6
Lote 04	CP V	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	em repouso	3 dias	5
			em vibração amplificada	3 dias	5
			em repouso	7 dias	1 ²
			em vibração amplificada	7 dias	4
			em repouso	28 dias	4
			em vibração amplificada	28 dias	6

¹ Corpos-de-prova extraídos do experimento por apresentarem defeitos

² Corpos-de-prova extraídos do experimento por apresentarem defeitos



Tabela 3.6 – Quantidade de corpos-de-prova dos lotes 5 e 6 com os tipos de cura

Lote	Cimento	Ensaio	Cura	Idade	CP-Ø10x20cm (und.)	CP-Ø15x30cm (und.)
Lote 05	CP II	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	em repouso	3 dias	2	2
			em vibração	3 dias	2	2
			em repouso	7 dias	2	x
			em vibração	7 dias	2	x
			em repouso	28 dias	2	x
			em vibração	28 dias	2	x
	CP II	Resistência à tração por compressão diametral	em repouso	3 dias	x	x
			em vibração	3 dias	x	x
			em repouso	7 dias	x	2
			em vibração	7 dias	x	2
			em repouso	28 dias	x	2
			em vibração	28 dias	x	1
Lote 06	CP V	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	em repouso	3 dias	2	x
			em vibração	3 dias	2	x
			em repouso	7 dias	2	x
			em vibração	7 dias	2	x
			em repouso	28 dias	2	x
			em vibração	28 dias	2	x
	CP V	Resistência à tração por compressão diametral	em repouso	3 dias	x	2
			em vibração	3 dias	x	2
			em repouso	7 dias	x	2
			em vibração	7 dias	x	2
			em repouso	28 dias	x	2
			em vibração	28 dias	x	2

Para determinação da resistência de aderência entre armadura e concreto foram utilizados corpos-de-prova cúbicos e prismáticos, com dimensões usuais de 150 mm de aresta e uma barra de aço embebida no eixo de simetria do CP. Para o caso dos lotes 1 e 2 foram utilizadas barras lisas de aço CA-25 com 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ ") de diâmetro. Para os lotes 3, 4, 5 e 6, foram utilizadas barras nervuradas de aço CA-50, com 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ ") de diâmetro. Durante a cura essas barras permaneceram na posição horizontal, conforme está mostrado na Figura 3.3. Esse arranjo foi adotado para atender as especificações das seguintes normas:

- a) doc.7.II.128 do RILEM (1973) apud FRANÇA (2004);
- b) ASTM C234 (1991) apud FRANÇA (2004);
- c) RILEM/CEB RC 6 (1983) apud FRANÇA (2004).

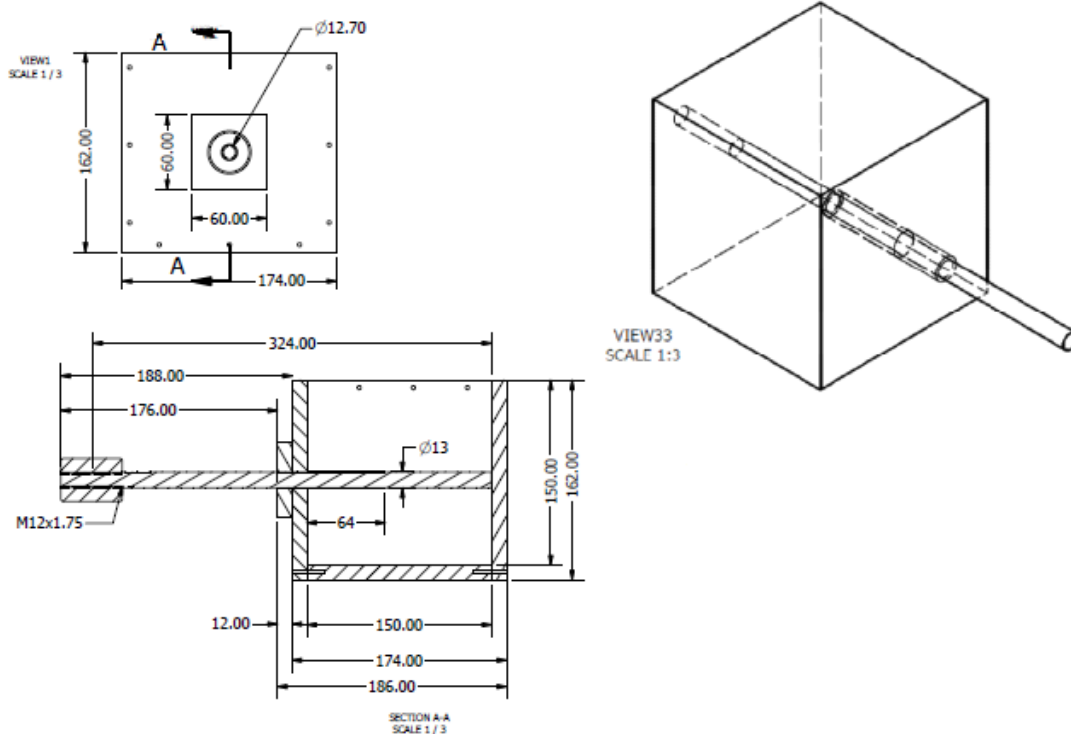


Figura 3.3 – Desenho esquemático da fôrma para os CPs cúbicos 15x15x15 cm

Em razão dos resultados obtidos nos ensaios dos lotes 1, 2, 3 e 4, quando ocorreu a ruptura sistemática por escorregamento da barra, entendeu-se que

havia necessidade de aumentar o comprimento de ancoragem das barras. Dessa forma, as arestas dos corpos-de-prova dos lotes 05 e 06 foram alteradas para as dimensões especificadas nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.

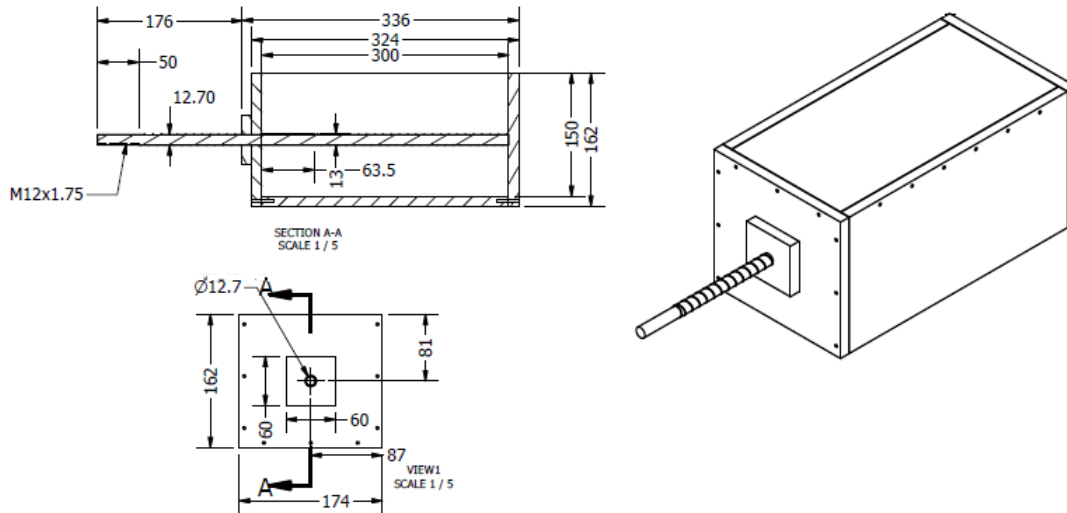


Figura 3.4 – Desenho esquemático da fôrma para os CPs prismáticos 15x15x30 cm

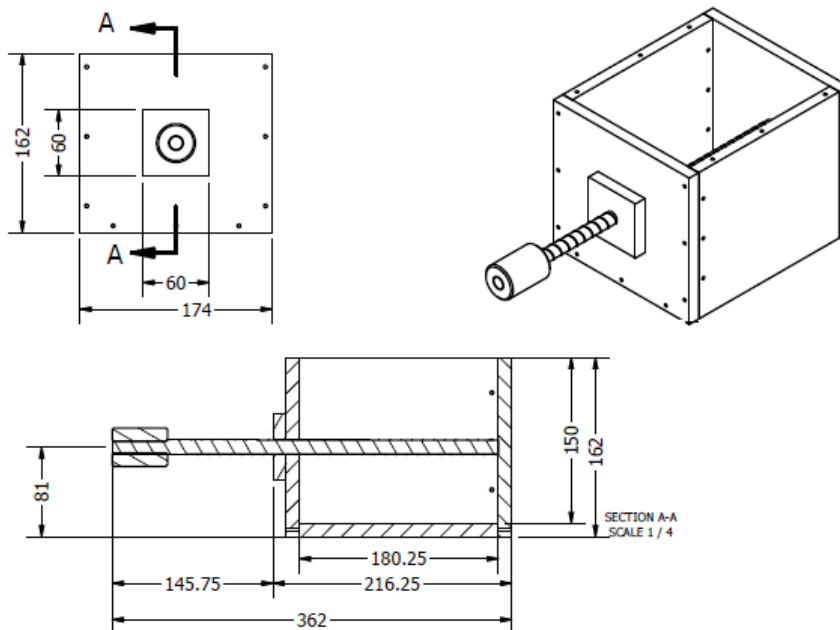


Figura 3.5 – Desenho esquemático da fôrma para os CPs prismáticos 15x15x18,25 cm

A quantidade de corpos-de-prova para cada lote está mostrada nas Tabelas 3.7 e 3.8.



Tabela 3.7 – Corpos-de-prova dos lotes 1, 2, 3 e 4 com os tipos de cura

Lote	Cimento	Ensaio	Cura	Idade	15x15x15cm (und.)
Lote 01	CP II	Resistência de aderência	em repouso	3 dias	6
			em vibração	3 dias	5
			em repouso	7 dias	5
			em vibração	7 dias	7
			em repouso	28 dias	7
			em vibração	28 dias	7
Lote 02	CP II	Resistência de aderência	em repouso	3 dias	4
			em vibração amplificada	3 dias	3
			em repouso	7 dias	5
			em vibração amplificada	7 dias	7
			em repouso	28 dias	5
			em vibração amplificada	28 dias	5
Lote 03	CP V	Resistência de aderência	em repouso	4 dias	5
			em vibração	4 dias	5
			em repouso	7 dias	7
			em vibração	7 dias	7
			em repouso	28 dias	7
			em vibração	28 dias	8
Lote 04	CP V	Resistência de aderência	em repouso	3 dias	5
			em vibração amplificada	3 dias	5
			em repouso	7 dias	7
			em vibração amplificada	7 dias	7
			em repouso	28 dias	8
			em vibração amplificada	28 dias	7

Tabela 3.8 – Corpos-de-prova dos lotes 5 e 6 com os tipos de cura

Lote	Cimento	Ensaio	Cura	Idade	15x15x15cm (und.)	15x15x18,25cm (und.)	15x15x30cm (und.)
Lote 05	CP II	Resistência de aderência	em repouso	3 dias	7	x	6
			em vibração	3 dias	6	x	6
			em repouso	7 dias	6	x	x
			em vibração	7 dias	6	x	x
			em repouso	28 dias	6	x	x
			em vibração	28 dias	3	x	x
Lote 06	CP V	Resistência de aderência	em repouso	3 dias	6	5	x
			em vibração	3 dias	6	5	x
			em repouso	7 dias	7	7	x
			em vibração	7 dias	6	6	x
			em repouso	28 dias	7	7	x
			em vibração	28 dias	7	7	x

3.3 Vibrações induzidas durante cura

3.3.1 Plataforma vibratória

A simulação da cura em ambiente com vibração foi realizada por duas plataformas vibratórias desenvolvidas no LSE.

Para a cura dos lotes de 1 a 4 foi construída uma plataforma vibratória servohidráulica, suspensa e fixada na extremidade da haste do atuador com capacidade de 500 kN da MED, Figuras 3.6 a 3.8.

Para os lotes 05 e 06 foi utilizado uma plataforma de concreto apoiada sobre a haste do atuador, Figuras 3.9 e 3.10.

Nos dois sistemas o atuador é capaz de desenvolver movimentos aleatórios normal ao plano principal das plataformas, representando a situação da moldagem em pontes ou estruturas similares. A oscilação aleatória resulta do movimento axial do êmbolo do atuador que é fixado em série com uma célula de carga. Essas plataformas, tal como as pontes, tem oscilações verticais acompanhada de oscilações transversais, inerentes do sistema de fixação.

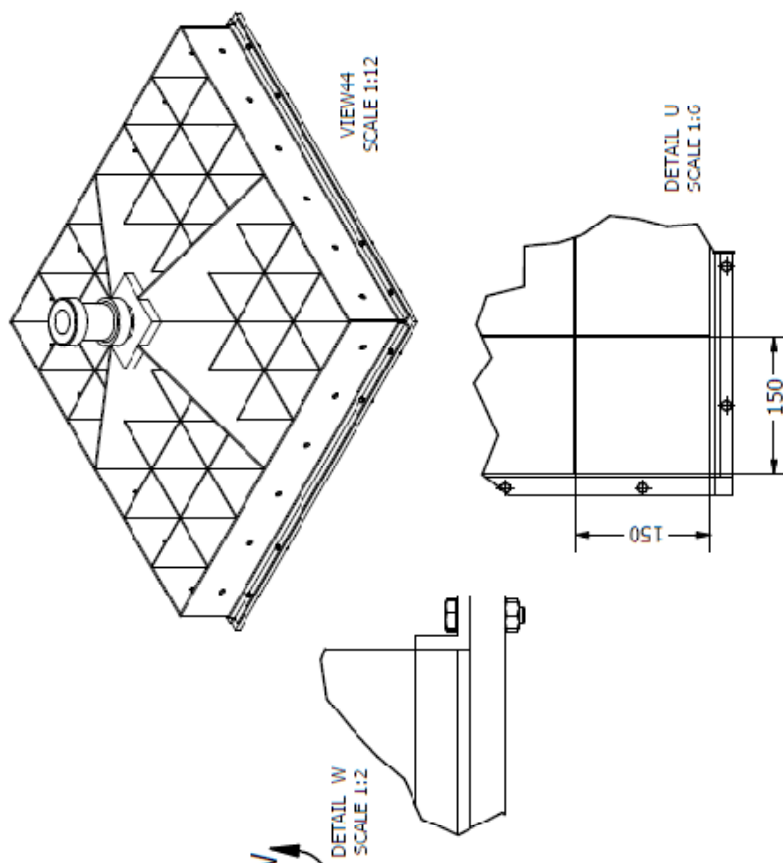


Figura 3.6 – Vista isométrica e detalhes da plataforma utilizada para moldagem dos CP's dos lotes de 1 a 4

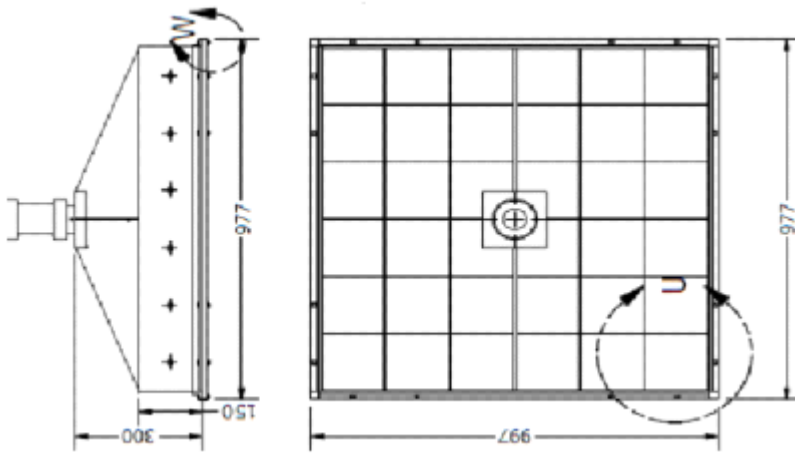


Figura 3.7 – Vistas superior e lateral da plataforma utilizada para moldagem dos CP's dos lotes de 1 a 4

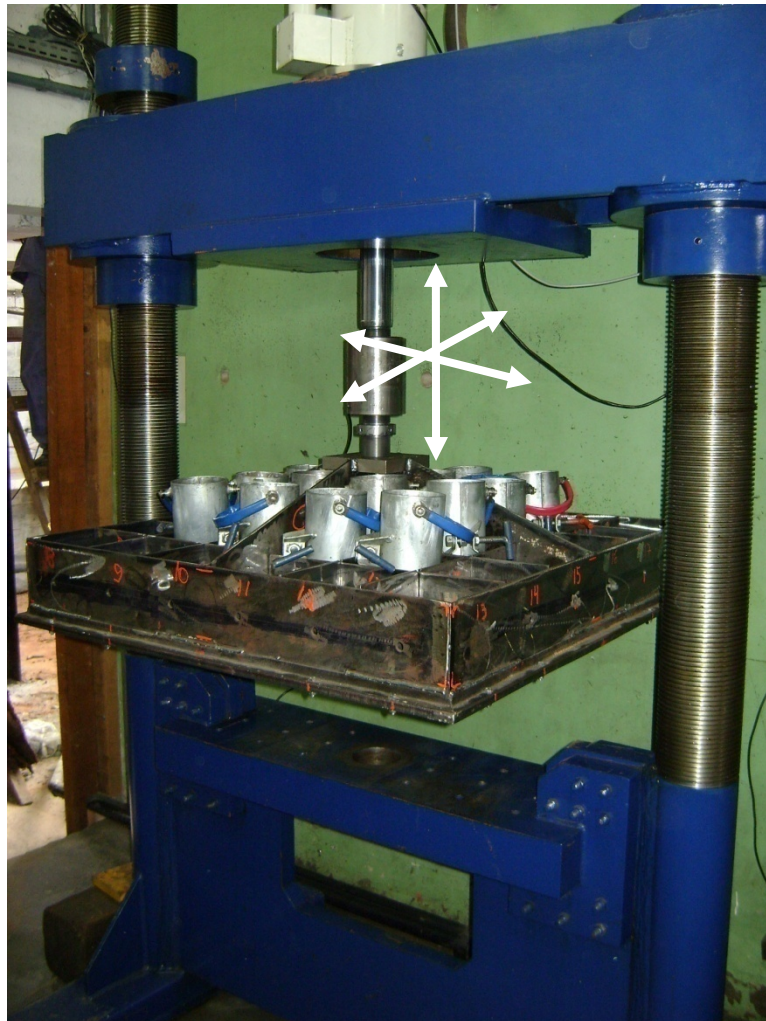


Figura 3.8 – Plataforma em posição de moldagem dos CP's dos lotes de 1 a 4

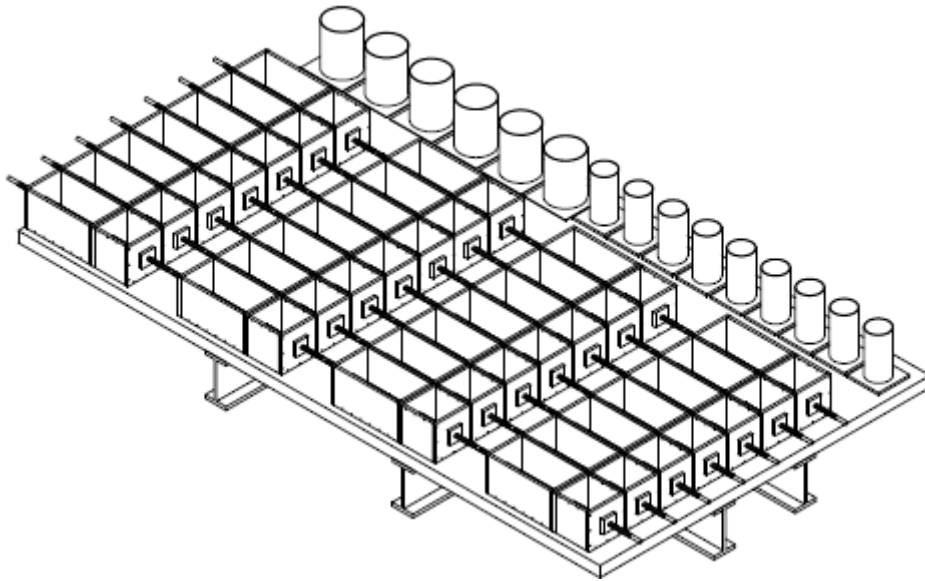


Figura 3.9 – Vista isométrica da plataforma utilizada para moldagem dos CP's dos lotes 5 e 6



Figura 3.10 – Foto da plataforma apoiada na haste do atuador durante a moldagem dos corpos-de-prova dos lotes 5 e 6

A cura dos corpos-de-prova foi realizada em quatro situações distintas: repouso, vibrados por 12 horas com acelerações análogas às registradas na Ponte sobre o Rio Bananal (lotes 1, 3 e 5), vibrados por 12 horas com acelerações registradas nessa mesma ponte amplificadas em 50% (lotes 2 e 4) e vibrados por 12 horas com acelerações análogas às registradas no viaduto de acesso a Penedo (lote 6).

A plataforma vibratória para os lotes de 1 a 5 foram excitadas com o sinal das acelerações registradas na ponte sobre o Rio Bananal, pois a mesma apresentou os maiores valores pico-a-pico. As séries temporais dessas vibrações normalizadas encontram-se mostradas na Figura 3.11. O valor pico-a-pico máximo registrado nesse caso foi de 0,193 da aceleração da gravidade.

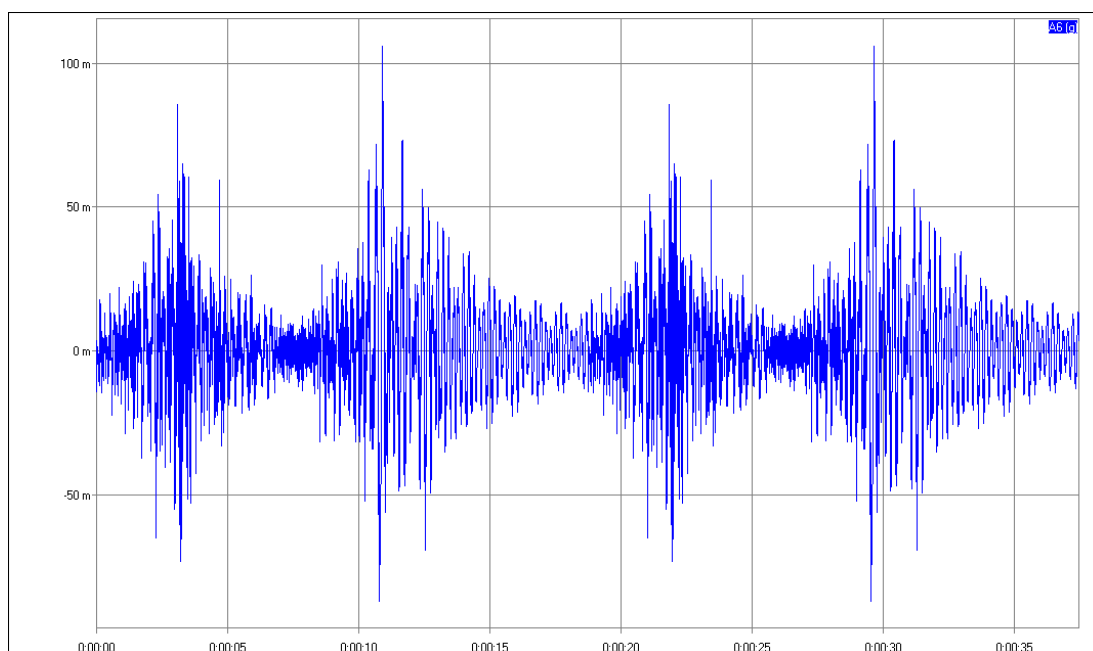


Figura 3.11 - Série temporal de acelerações registrada na Ponte sobre o Rio Bananal, que inclui maior amplitude pico-a-pico de acelerações durante monitoração do tráfego de veículos

Nesse caso, é importante ressaltar também que é pouco provável a passagem de dois veículos, um em seguida do outro, que provoquem no tabuleiro as acelerações máximas. Dessa forma, optou-se por intercalar o



trecho com maior pico-a-pico medido de acelerações, com um outro de menor intensidade, 159 mg, mas ainda bastante significativo.

A partir dos dados levantados, adotou-se um intervalo entre passagens de 7,8 segundos, entre o veículo que gera 159 mg e veículo que gera 193 mg, e de 10,9 segundos, entre o veículo de 193 mg para o veículo de 159 mg. Isso pressupõe a passagem de 9.240 veículos por dia na ponte, acima portanto da média nacional e próximo aos valores medidos na monitoração da Rodovia Dutra, que foi de 8.900 veículos por dia.

Para avaliar a natureza das vibrações, o espectro dos sinais medidos na ponte sobre o Rio Bananal, decorrente dos trechos de acelerações considerados, está mostrado na Figura 3.12. Verifica-se que a banda de freqüências de maior energia corresponde àquelas mobilizadas pelo tráfego de veículos, com picos em 1,5 e 6 Hz.

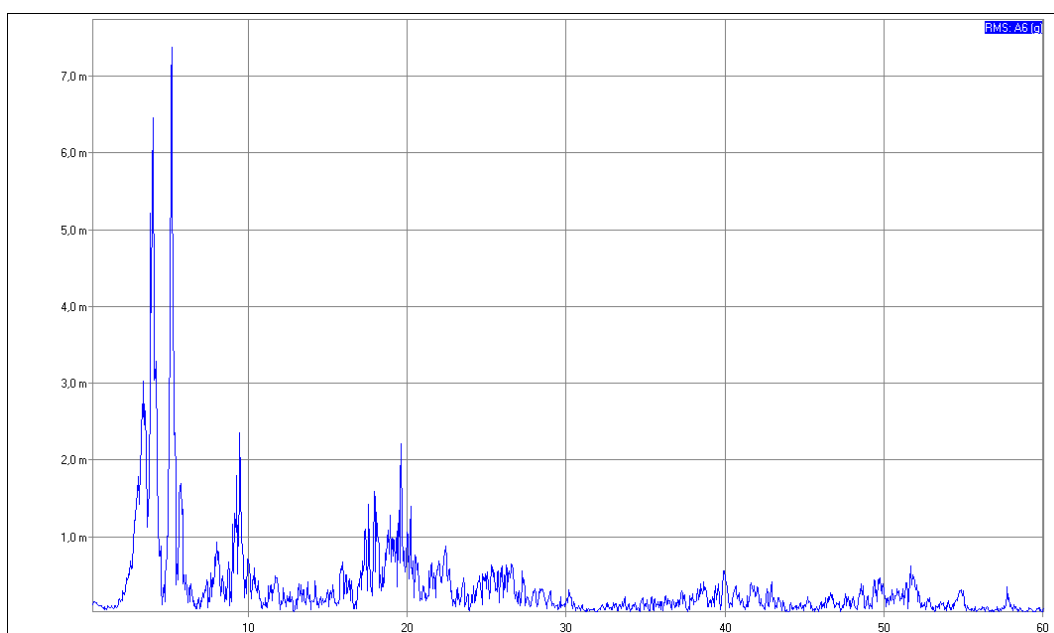


Figura 3.12 - Espectro de acelerações da série apresentada na Figura 3.11

Os espectros de resposta da plataforma vibratória dos lotes de 1 a 5, estão mostrados nas Figuras de 3.13 a 3.17 onde se verifica que a banda de



frequências de maior energia para os lotes de 1 a 4 são 3,80 Hz, 5,40 Hz e 9,40 Hz e para o lote 5 são 4,0 Hz, 5,4 Hz e 10,6 Hz.

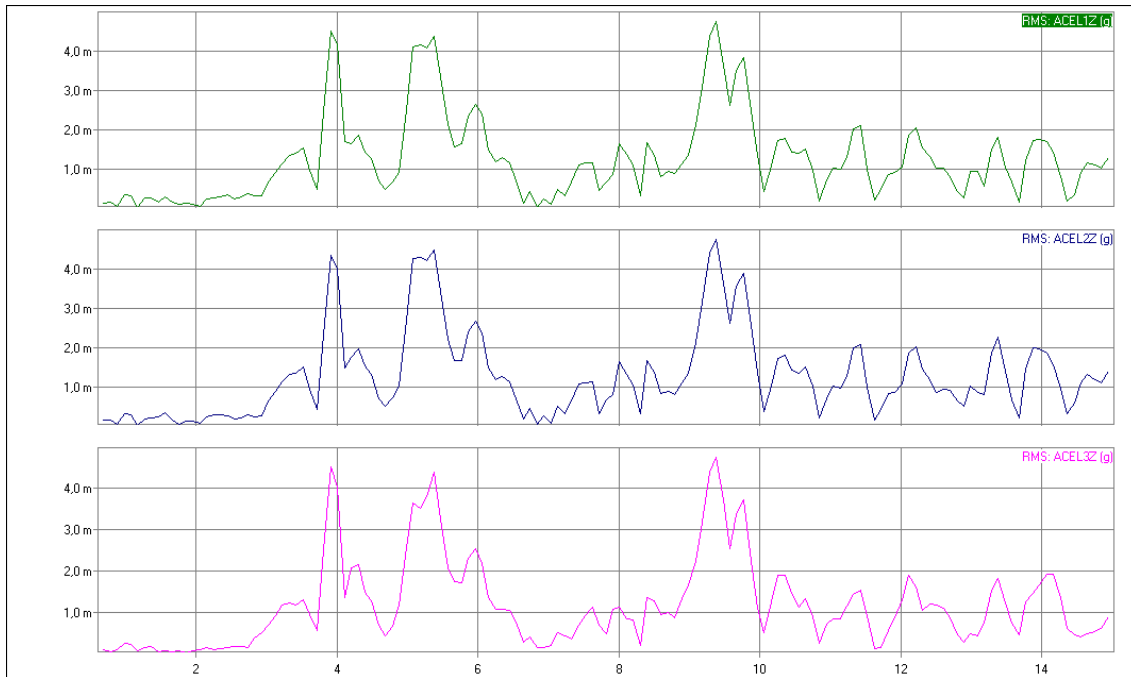


Figura 3.13 - Espectro de resposta da plataforma do lote 01

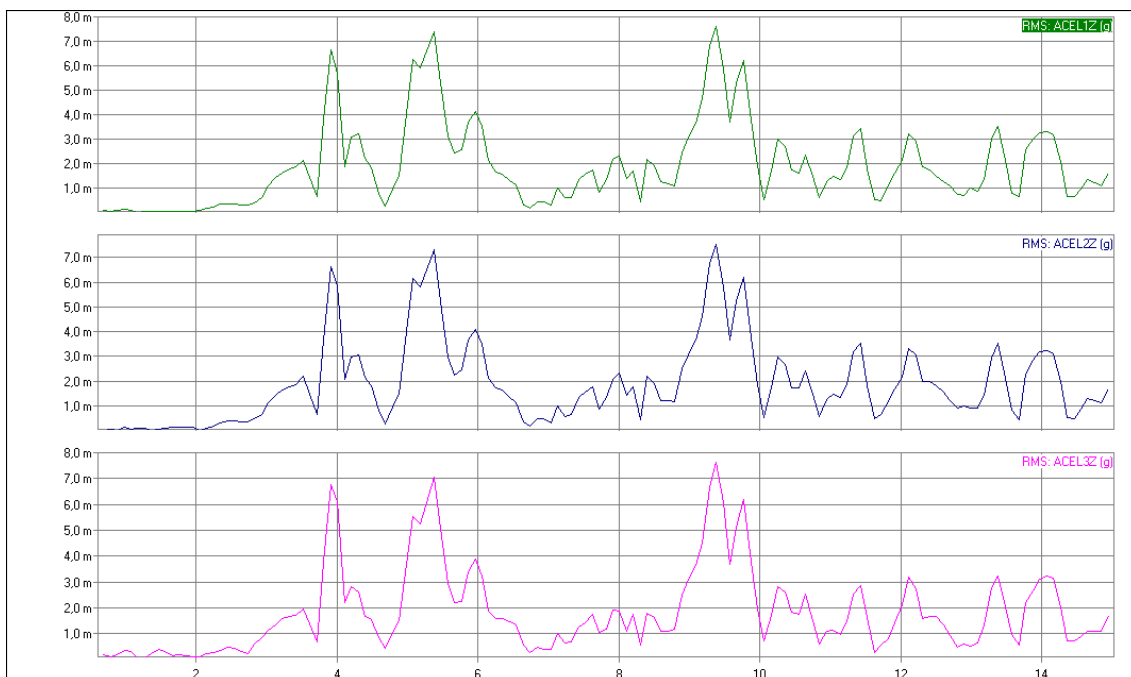


Figura 3.14 - Espectro de resposta da plataforma do lote 02

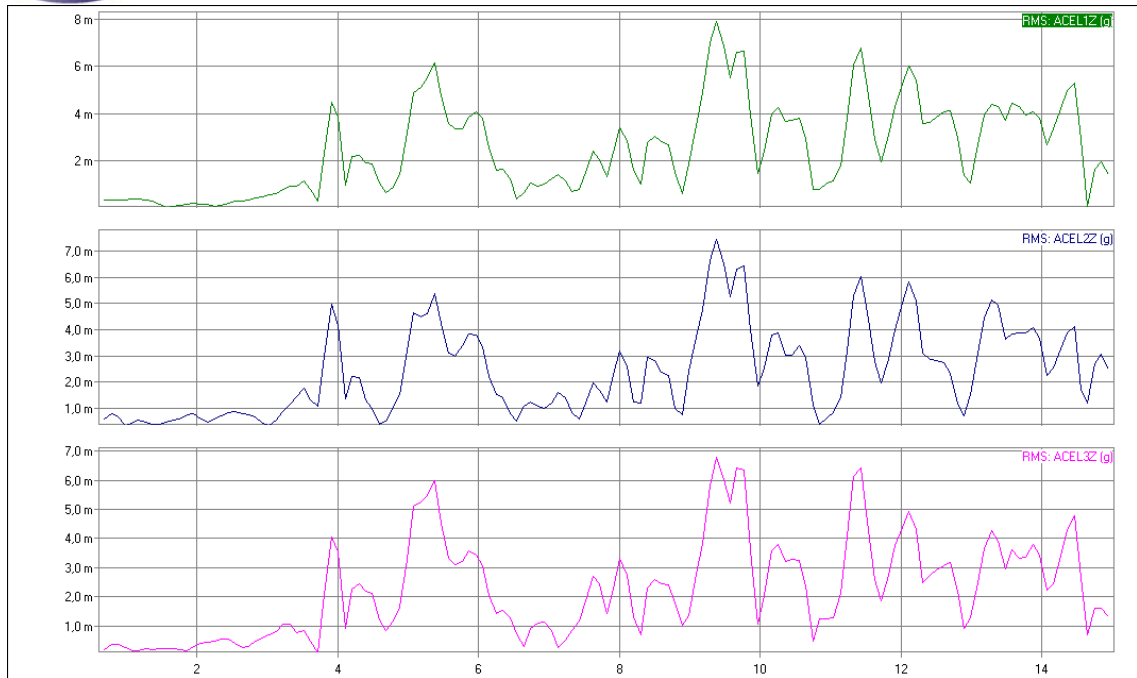


Figura 3.15 - Espectro de resposta da plataforma do lote 03

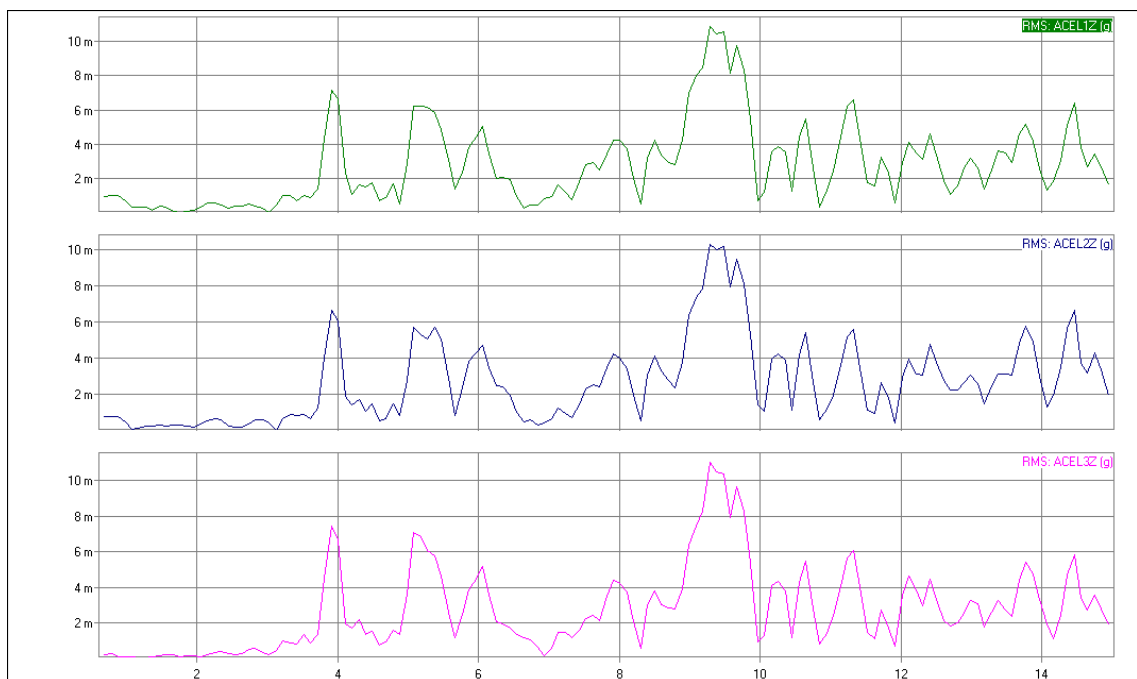


Figura 3.16 - Espectro de resposta da plataforma do lote 04



Figura 3.17 - Espectro de resposta da plataforma do lote 05

Diante dos resultados observados nos lotes de 01 a 05 e das observações apresentadas no relatório elaborado em 2006 sob o contrato DEE-94 onde foram obtidos valores de resistência ao arrancamento menores para os corpos-de-prova vibrados durante o processo de cura do que para os corpos-de-prova curados em repouso, os corpos-de-prova do lote 06 foram moldados excitando a plataforma com as vibrações registradas no viaduto de acesso a Penedo, sendo essa a mesma adotada nos ensaios referente ao relatório de 2006.

A série temporal das acelerações registradas nesse viaduto está apresentada na figura 3.19 onde é possível observar que o maior valor pico-a-pico das acelerações foi de 92,5 mg.

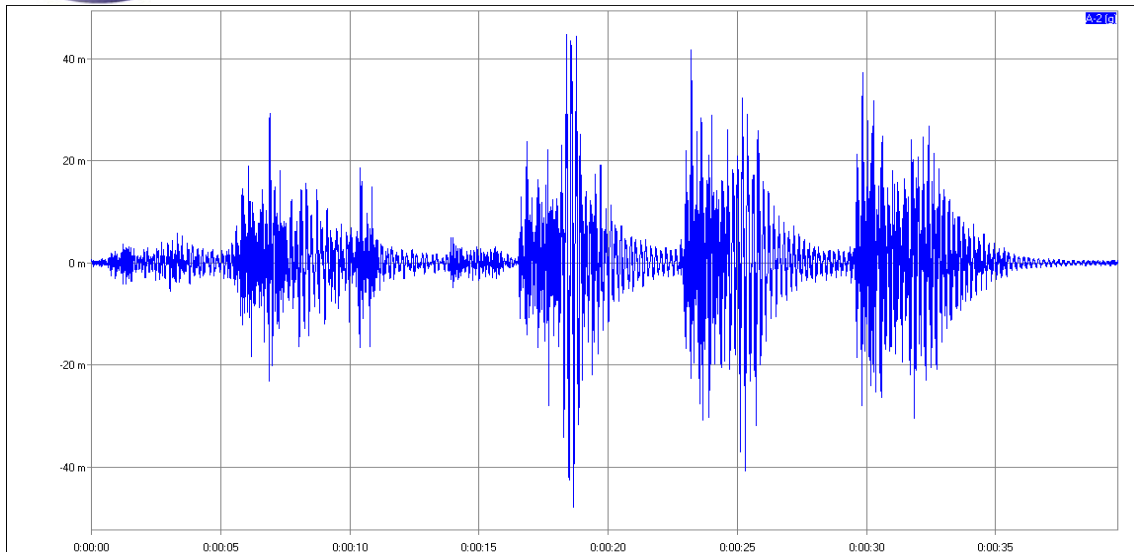


Figura 3.19 - Série temporal de acelerações registrada no viaduto de acesso a Penedo

O espectro referente ao trecho das acelerações mostradas na Figura 3.19 encontra-se na Figura 3.20. Verifica-se que a banda de frequências de maior energia corresponde àquelas mobilizadas pelo tráfego de veículos está centrada em 5,2 Hz.

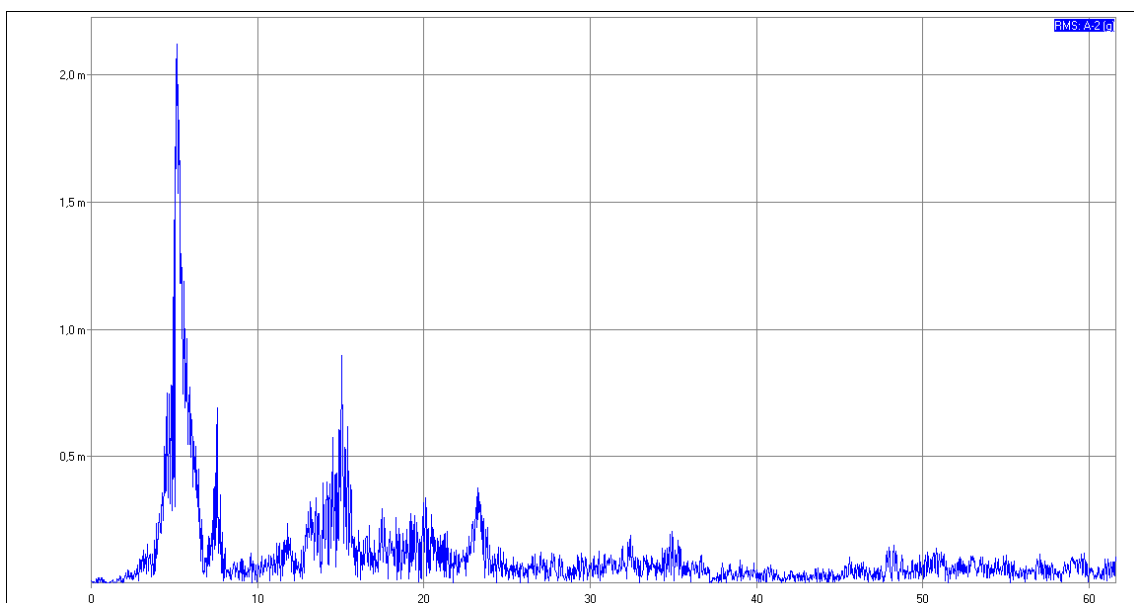


Figura 3.20 - Espectro de acelerações da série apresentada na figura 3.19

O espectro de resposta da plataforma excitada com o sinal do viaduto de acesso a cidade de Penedo está mostrado na figura 3.21. Verifica-se que neste caso as frequências com maior energia encontram-se em 2,0 Hz, 3,0 Hz, 6,0 Hz e 9,4 Hz ou seja, frequências menores que as das bandas usadas nos lotes de 1 a 5.

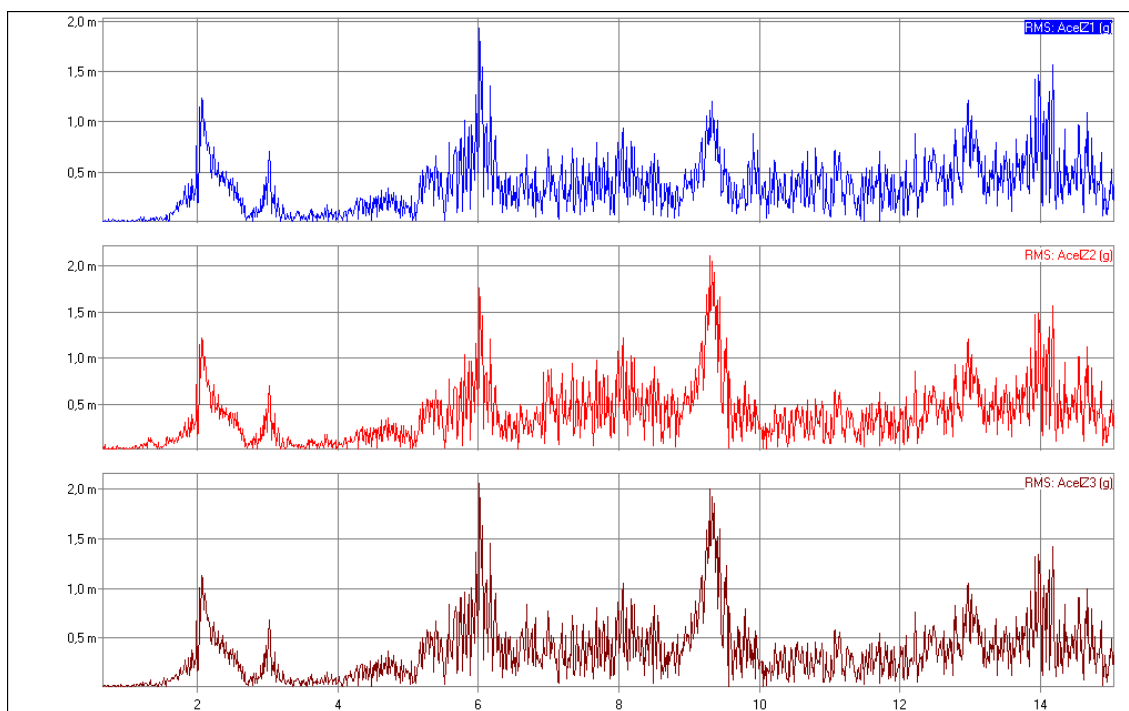


Figura 3.21 - Espectro de resposta da plataforma do lote 06

Desse modo, conclui-se que nas pontes, a energia de vibração fica concentrada em uma banda menor do que as que foram usadas nos ensaios dos lotes de 1 a 5.

3.4 Procedimento para moldagem e armazenamento dos corpos-de-prova

O procedimento utilizado para moldagem e armazenamento dos corpos-de-prova está descrito a seguir:

- a) Instalação da plataforma vibratória;



- b) Preparação das formas cilíndricas e prismáticas;
- c) Iniciar movimentação da plataforma de acordo com sinais mostrados nas Figuras 3.11 e 3.19;
- d) Chegada de caminhão-betoneira;
- e) Moldagem simultânea de corpos-de-prova em repouso e corpos-de-prova vibrados na plataforma;
- f) Parar movimentação da plataforma após 12 horas de vibrações contínuas;
- g) Desmoldagem dos corpos-de-prova em repouso e dos corpos-de-prova moldados sobre a plataforma vibrante;
- h) Armazenamento dos corpos-de-prova na câmara úmida.

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu orientações da NBR 5738 (2003).

Durante a moldagem dos corpos-de-prova, a vibração foi efetuada por um atuador ligado a uma unidade hidráulica, a um controlador e a um sistema de aquisição de dados.

O controlador envia a frequência e amplitude de curso para o atuador, já o sistema de aquisição de dados registra o desempenho do atuador durante o ensaio.

Para vibração dos corpos-de-prova foi utilizado vibrador de concreto marca Weg, modelo TE-80, potência 2,0 CV, velocidade 3.400 RPM.



Tabela 3.9 Procedimentos para fabricação e armazenamento dos CP's

Concreto	Lote	Data	Atividade
CP II (barra lisa)	1	20/fev	Instalação da plataforma
		20/fev	Preparação das formas
		22/fev	Iniciar movimentação plataforma
		22/fev	Chegada caminhão-betoneira às 10:00 hs
		22/fev	Moldagem simultânea dos CP's em repouso e vibrados 100%
		22/fev	Parar movimentação plataforma após 12 horas de vibração
		22/fev	Desmoldagem dos CP's em repouso e vibrados 100%
		22/fev	Armazenamento dos CP's na câmara úmida
CP II (barra lisa)	2	23/fev	Preparação das formas
		23/fev	Iniciar movimentação plataforma
		23/fev	Chegada caminhão-betoneira às 10:00 hs
		23/fev	Moldagem simultânea dos CP's em repouso e vibrados 150%
		23/fev	Parar movimentação plataforma após 12 horas de vibração
		23/fev	Desmoldagem dos CP's em repouso e vibrados 150%
		23/fev	Armazenamento dos CP's na câmara úmida
CP V (barra corrugada)	3	06/mar	Instalação da plataforma
		08/mar	Preparação das formas
		08/mar	Iniciar movimentação plataforma
		08/mar	Chegada caminhão-betoneira às 10:00 hs
		08/mar	Moldagem simultânea dos CP's em repouso e vibrados 100%
		08/mar	Parar movimentação plataforma após 12 horas de vibração
		09/mar	Desmoldagem dos CP's em repouso e vibrados 100%
		09/mar	Armazenamento dos CP's na câmara úmida
CP V (barra corrugada)	4	09/mar	Preparação das formas
		10/mar	Iniciar movimentação plataforma
		10/mar	Chegada caminhão-betoneira às 10:00 hs
		10/mar	Moldagem simultânea dos CP's em repouso e vibrados 150%
		10/mar	Parar movimentação plataforma após 12 horas de vibração
		11/mar	Desmoldagem dos CP's em repouso e vibrados 150%
		11/mar	Armazenamento dos CP's na câmara úmida
CP II (barra corrugada)	5	19/nov	Instalação da plataforma
		22/nov	Preparação das formas
		23/nov	Iniciar movimentação plataforma
		23/nov	Chegada caminhão-betoneira às 10:00 hs
		23/nov	Moldagem simultânea dos CP's em repouso e vibrados
		23/nov	Parar movimentação plataforma após 12 horas de vibração
		24/nov	Desmoldagem dos CP's em repouso e vibrados
		24/nov	Armazenamento dos CP's na câmara úmida
CP V (barra corrugada)	6	13/dez	Iniciar movimentação plataforma
		13/dez	Chegada caminhão-betoneira às 14:00 hs
		13/dez	Moldagem simultânea dos CP's em repouso e vibrados
		13/dez	Parar movimentação plataforma após 12 horas de vibração
		14/dez	Desmoldagem dos CP's em repouso e vibrados
		14/dez	Armazenamento dos CP's na câmara úmida



Figura 3.22 - Moldagem dos corpos-de-prova dos lotes 1 a 4 na plataforma vibratória

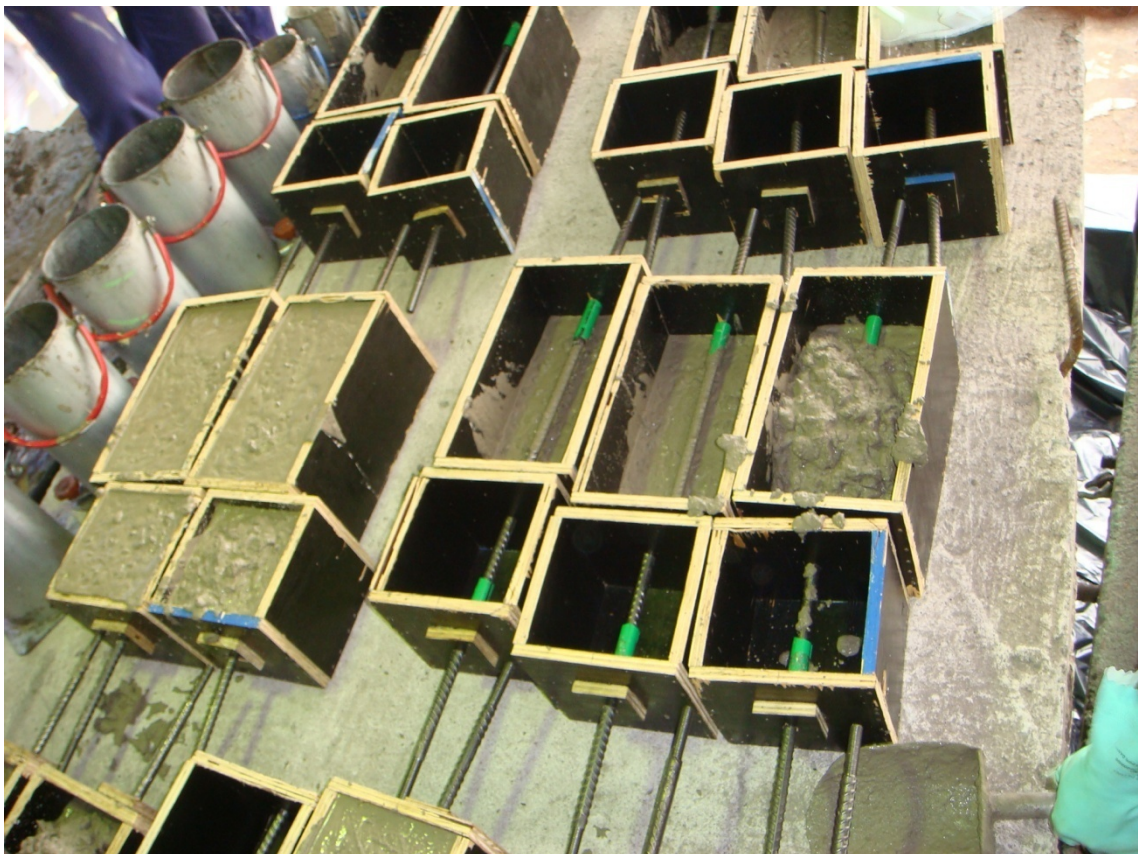


Figura 3.23 - Moldagem dos corpos-de-prova dos lotes 5 e 6 na plataforma vibratória



Figura 3.24 - Moldagem dos corpos-de-prova com cura em repouso dos lotes 1 a 4



Figura 3.25 - Moldagem dos corpos-de-prova com cura em repouso dos lotes 5 e 6

4.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático(ensaio de compressão simples)

As propriedades estruturais do concreto foram determinadas por ensaios de compressão simples, compressão diametral e ensaios de arrancamento. Para a determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do concreto foram utilizadas as especificações da NBR 8522 (2008).

Devido a disponibilidade de equipamentos, os ensaios foram realizados em duas máquinas de ensaio, MED e MEC, ambas do LSE. Na MED foram realizados os ensaios dos lotes 1 a 4, Figura 4.1. Na MEC foram realizados os ensaios dos lotes 5 e 6, Figura 4.2.

A resistência à compressão foi determinada de acordo com as exigências da NBR 5739 (2003). Neste ensaio o corpo de prova foi carregado axialmente com controle de força até a sua ruptura. Conhecidas a Força (F_{max}) de ruptura e a área (A_{CP}) da seção transversal do corpo de prova, pôde-se determinar a resistência à compressão (f_c) por:

$$f_c = \frac{F_{max}}{A_{CP}}$$

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático seguiu o procedimento definido na NBR8255(2003). Foram utilizados extensômetros tipo clip-gages, fixados num plano diametral na meia altura do corpo-de-prova. A base de medida dos deslocamentos foi de 100 mm.

Inicialmente foi feita uma compatibilização das deformações lidas, onde o corpo de prova foi carregado a 20% da força de ruptura estimada pelo ensaio de determinação da resistência a compressão e em seguida os valores de deformação foram lidos. Caso a diferença entre as deformações fosse superior a



20% , o corpo de prova era reposicionado (alinhando-o ao eixo de aplicação da força) e novamente carregado. Esse procedimento era repetido até que a diferença entre as deformações fosse menor do que 20% da maior deformação, Figura 4.3.



Figura 4.1 - Arranjo do ensaio de compressão simples para os lotes 1 a 4 na MED



Figura 4.2 - Arranjo do ensaio de compressão simples para os lotes 5 e 6 na MEC



Figura 4.3 - Leitura dos deslocamentos verticais diametralmente opostos, nos clip-gages

Com esse valores de resistência foram determinados níveis de carregamento para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade como mostra a Figura 4.4.

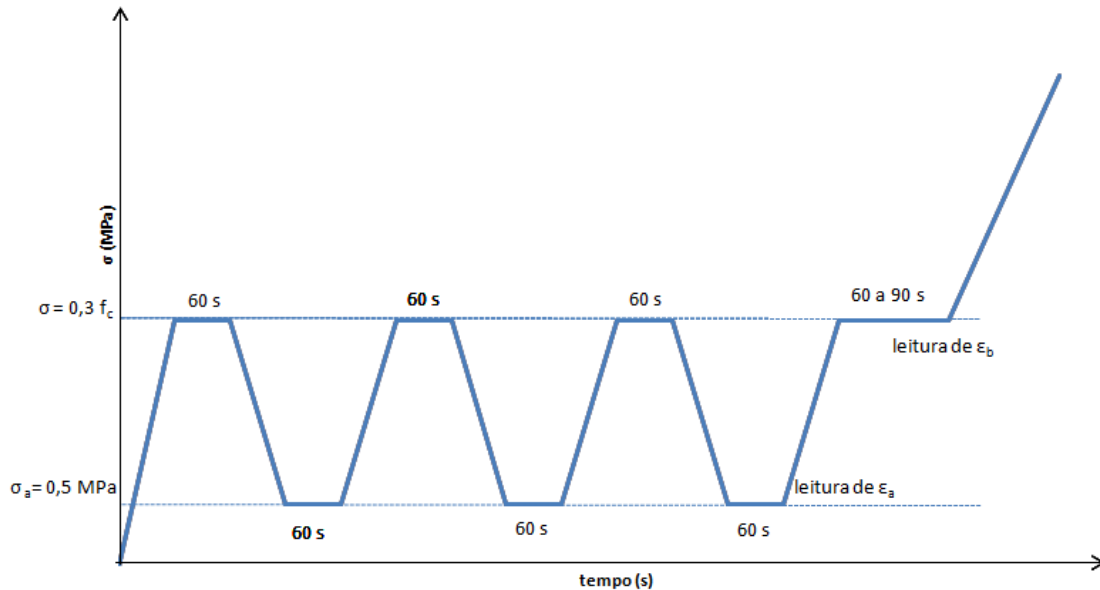


Figura 4.4 - Níveis de carregamento para determinação do módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade, E_{ci} , gigapascals, é dado pela fórmula:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3}$$

Onde σ_b é a tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3 f_c$), σ_a é a tensão básica, em megapascals ($\sigma_a = 0,5 \text{ MPa}$), ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão menor e ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

4.2 Resistência à tração (ensaio de compressão diametral)

Os ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral foram realizados conforme especificações da NBR 7222 (2008) na máquina MEC.

Para este ensaio foram moldados corpos de prova de 15 cm de diâmetro e 30 centímetros de altura. A montagem do ensaio está mostrada na Figura 4.5, onde, entre os pratos (chapas de aço) foram colocadas ripas de madeira, de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova. Após o ajuste do corpo de prova e as demais peças na máquina aplicou-se uma carga com velocidade constante de aproximadamente 0,05 MPa/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral é dada por:

$$f_{t,D} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times L}$$

Onde $f_{t,D}$ é a resistência à tração por compressão diametral expressa em MPa, F é a carga máxima obtida no ensaio (kN), d é o diâmetro do corpo de prova (mm) e L é a altura do corpo de prova (mm).

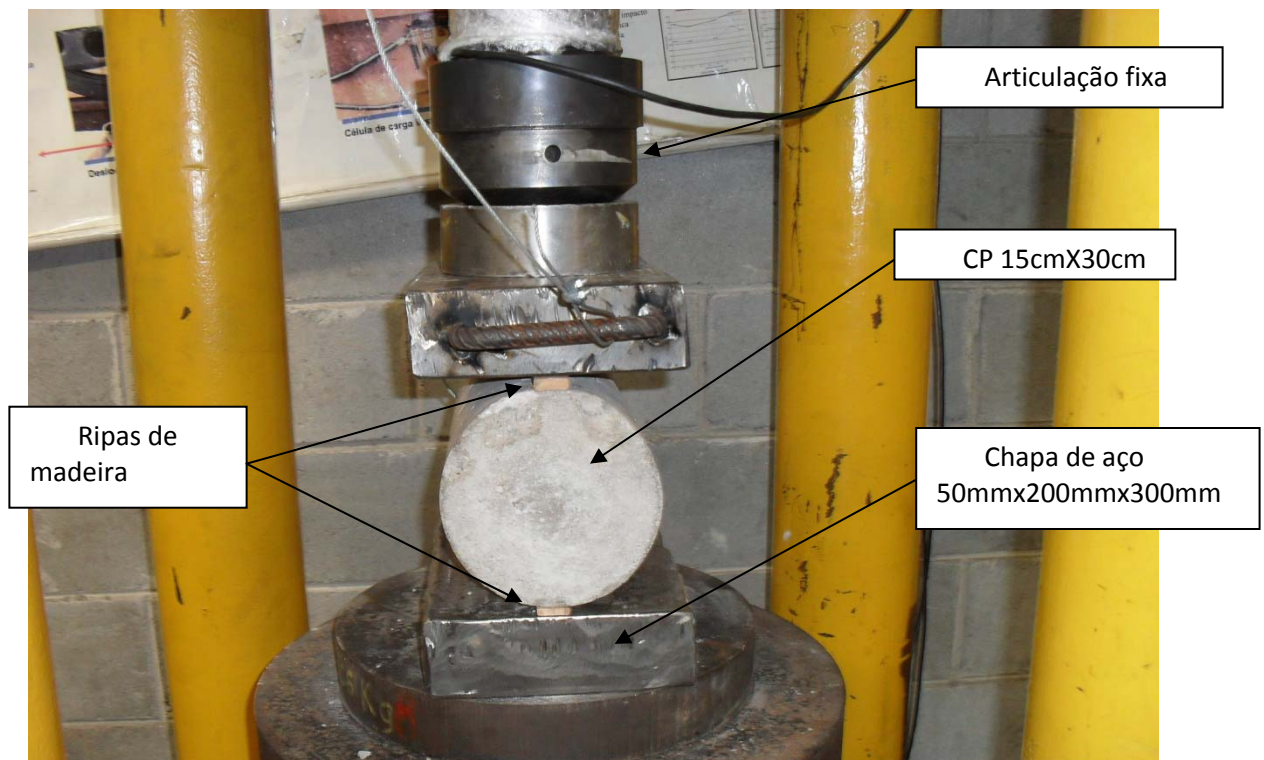


Figura 4.5 - Ensaio de compressão diametral realizado na MEC, LSE



4.3 Resistência de aderência (ensaio de arrancamento)

A resistência de aderência, inicialmente, foi determinada com corpos de prova padronizados, submetidos a arrancamento. O arranjo básico utilizado no ensaio de arrancamento está mostrado na Figura 4.6.

Os ensaios de arrancamento foram realizados na máquina de ensaio MED do LSE, com capacidade para realizar ensaios com força controlada ou deslocamento controlado. Para os ensaios a MED foi configurada para ensaios de tração de 0 kN até 500 kN, com curso de deslocamento de 0 mm até 500 mm.

O ensaio foi realizado com força controlada, com carregamento monotônico crescente, Figura 4.8. .

Durante os ensaios foi realizada leitura da força e do deslocamento da barra simultaneamente numa taxa de 500 Hz. O deslocamento medido corresponde ao movimento do embolo do atuador.

O procedimento utilizado para realizar os ensaios de aderência aço-concreto está descrito a seguir:

- a) instalação do corpo-de-prova na MED;
- b) fixação do cp na mesa da MED por uma placa de 1", ancorada por 4 hastes na mesa de tração da MED;
- c) fixação da extremidade da barra aderida (rosca) na célula de carga da MED;
- d) aplicação do carregamento monotônico crescente numa taxa de 100 N/s conforme Figura 4.8, até atingir a força máxima, que pode decorrer do deslizamento da barra em relação ao concreto, ou a ruptura por escoamento do aço, ou ruptura do concreto;
- e) realização de registro fotográfico e descrição do modo de ruptura correspondente do CP;
- f) remoção do CP da MED e armazenamento em câmara úmida para posterior inspeção.

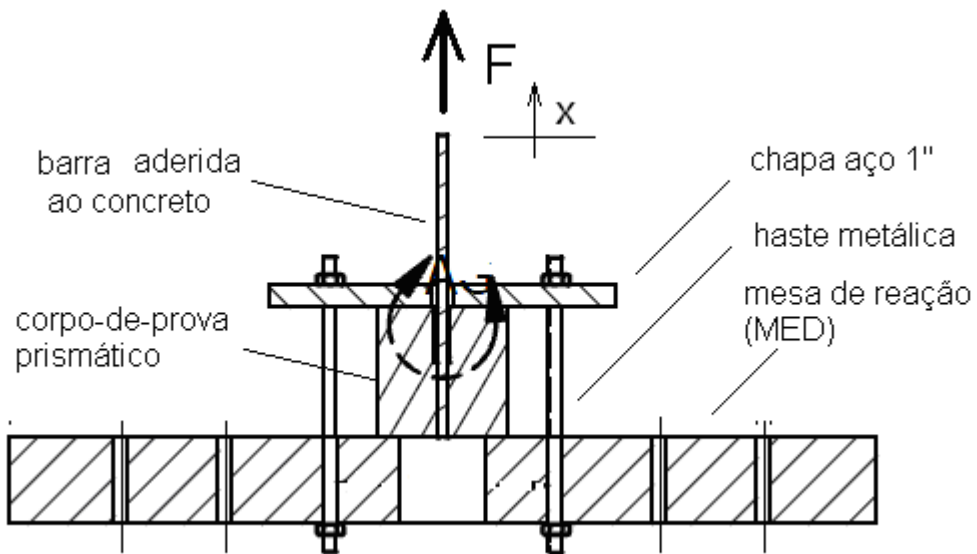


Figura 4.6 - Arranjo do ensaio de arrancamento

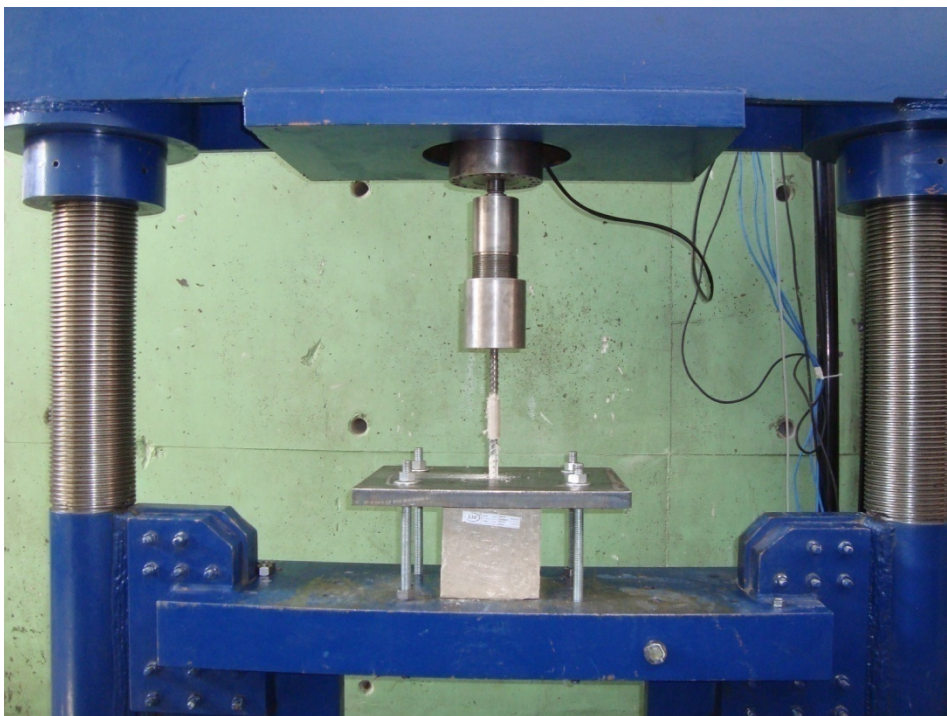


Figura 4.7 - Ensaio de arrancamento para determinação da resistência de aderência aço-concreto

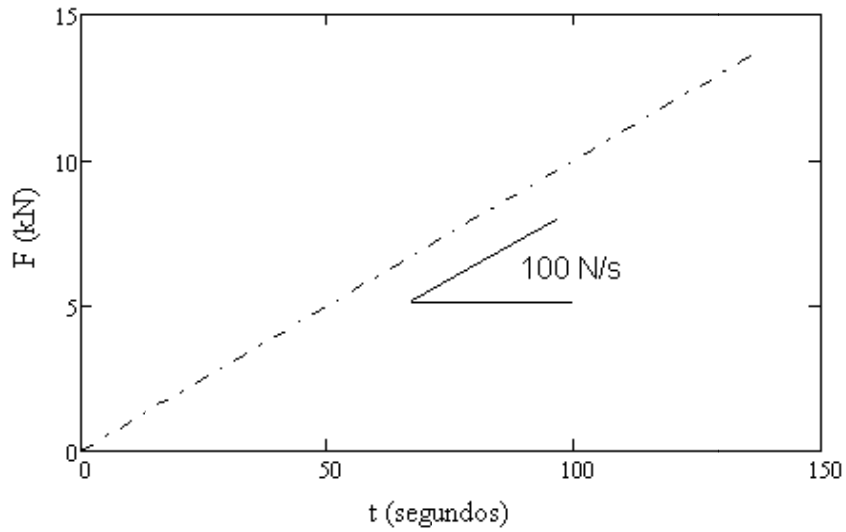


Figura 4.8 - Plano de carregamento do ensaio de arrancamento, com crescimento monotônico da força

5 RESULTADOS

5.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão estão mostrados nas tabelas 5.1 a 5.18. Nessas tabelas, os resultados dos corpos-de-prova com cura em repouso estão indicados com a sigla R (repouso) na coluna “cura” e os com cura em vibração com a sigla V (vibração). **A cura em vibração, aqui definida, corresponde a um período de 12 horas de vibração em plataforma, simulando um sinal gravado em campo.**

Tabela 5.1 - Resistência à compressão, Lote 1, CII, 3 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ^3	δ (%) ⁴
R	FR-101	17,19	20,66	3,38	16,4
R	FR-102	24,71			
R	FR-103	23,57			
R	FR-104	20,07			
R	FR-105	17,75			
V	FV-101	15,37	17,86	2,57	14,4
V	FV-103	20,49			
V	FV-105	17,73			

Tabela 5.2 - Resistência à compressão, Lote 1, CII, 7 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-106	28,09	27,37	1,24	4,52
R	FR-107	25,44			
R	FR-108	28,18			
R	FR-109	28,33			
R	FR-114	26,83			
V	FV-109	27,61	27,85	1,88	6,76
V	FV-110	29,71			
V	FV-111	25,01			
V	FV-114	27,50			
V	FV-115	29,42			

³ Desvio padrão

⁴ Coeficiente de variação



Tabela 5.3 - Resistência à compressão, Lote 1, CII, 28 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-110	33,88	31,86	1,86	5,85
R	FR-113	30,21			
R	FR-115	31,49			
V	FV-104	32,21	33,10	0,81	2,46
V	FV-106	32,69			
V	FV-107	34,00			
V	FV-108	33,93			
V	FV-112	32,67			

Tabela 5.4 - Resistência à compressão, Lote 2, CII, 3 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-201	31,41	31,56	0,89	2,8
R	FR-202	32,51			
R	FR-203	31,90			
R	FR-204	30,41			
R	FR-205	0,00			

Tabela 5.5 - Resistência à compressão, Lote 2, CII, 10 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-210	37,95	39,58	4,70	11,88
R	FR-209	44,52			
R	FR-208	42,77			
R	FR-206	32,45			
R	FR-215	40,22			
V	FV-209	37,32	32,11	4,34	13,53
V	FV-208	31,53			
V	FV-204	35,60			
V	FV-203	26,85			
V	FV-205	29,25			



Tabela 5.6 - Resistência à compressão, Lote 2, CP II, 28 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-211	44,89	46,23	1,51	3,26
R	FR-212	46,12			
R	FR-213	48,36			
R	FR-214	45,55			
V	FV-201	38,28	37,63	1,34	3,55
V	FV-206	35,09			
V	FV-211	37,77			
V	FV-214	37,80			
V	FV-215	39,03			
V	FV-216	37,83			

Tabela 5.7 - Resistência à compressão, Lote 3, CPV, 5 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-301	38,12	39,85	2,27	5,70
R	FR-303	40,54			
R	FR-304	37,99			
R	FR-305	42,77			
V	FV-301	35,82	35,75	1,29	3,61
V	FV-302	34,81			
V	FV-303	35,33			
V	FV-304	37,93			
V	FV-305	34,84			

Tabela 5.8 - Resistência à compressão, Lote 3, CPV, 7 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-306	42,52	41,77	2,91	7,0
R	FR-307	45,37			
R	FR-308	42,65			
R	FR-309	37,43			
R	FR-310	40,86			
V	FV-306	40,26	39,60	3,23	8,17
V	FV-308	39,65			
V	FV-309	35,33			
V	FV-310	43,17			



Tabela 5.9 - Resistência à compressão, Lote 3, CPV, 28 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-311	50,44	48,73	1,07	2,2
R	FR-312	47,79			
R	FR-313	48,78			
R	FR-314	47,86			
R	FR-315	48,76			
V	FV-311	45,85	45,19	0,50	1,10
V	FV-312	44,65			
V	FV-313	44,64			
V	FV-314	45,12			
V	FV-315	45,64			
V	FV-316	45,23			

Tabela 5.10 - Resistência à compressão, Lote 4, CPV, 3 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-401	30,25	29,55	0,68	2,3
R	FR-402	28,65			
R	FR-403	29,73			
R	FR-404	30,07			
R	FR-405	29,04			
V	FV-401	30,30	30,55	0,46	1,50
V	FV-402	31,34			
V	FV-403	30,21			
V	FV-404	30,37			
V	FV-405	30,50			

Tabela 5.11 - Resistência à compressão, Lote 4, CPV, 7 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-415	36,08	36,08	X	X
V	FV-406	33,17	32,33	0,91	2,82
V	FV-408	32,47			
V	FV-409	31,04			
V	FV-410	32,65			



Tabela 5.12 - Resistência à compressão, Lote 4, CPV, 28 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	FR-406	36,25	37,85	1,23	3,26
R	FR-407	37,73			
R	FR-409	38,21			
R	FR-413	39,21			
V	FV-411	39,59	37,70	2,66	7,05
V	FV-412	32,60			
V	FV-413	38,43			
V	FV-414	39,09			
V	FV-415	37,12			
V	FV-416	39,41			

Tabela 5.13 - Resistência à compressão, Lote 5, CPII, 3 dias - Ø10x20

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-507	29,82	30,91	1,53	5,0
R	CR-Ø10x20-508	31,99			
V	CV-Ø10x20-507	21,98	24,75	3,91	15,8
V	CV-Ø10x20-508	27,51			

Tabela 5.14 - Resistência à compressão, Lote 5, CPII, 3 dias - Ø15x30

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-501	18,59	20,18	2,25	11,1
R	CR-Ø15x30-502	21,77			
V	CV-Ø15x30-501	15,96	16,84	1,24	7,4
V	CV-Ø15x30-502	17,72			

Tabela 5.15 - Resistência à compressão, Lote 5, CPII, 7 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-509	37,63	36,17	2,06	5,7
R	CR-Ø10x20-510	34,71			
V	CV-Ø10x20-509	30,09	30,58	0,69	2,3
V	CV-Ø10x20-510	31,07			

Tabela 5.16 - Resistência à compressão, Lote 5, CPII, 28 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-511	38,89	38,89	-	-
V	CV-Ø10x20-511	34,27	34,42	0,21	0,6
V	CV-Ø10x20-512	34,56			



Tabela 5.17 - Resistência à compressão, Lote 6, CP-V, 3 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-607	31,53	31,25	0,40	1,3
R	CR-Ø10x20-608	30,96			
V	CV-Ø10x20-607	33,03	33,77	1,04	3,1
V	CV-Ø10x20-608	34,50			

Tabela 5.18 - Resistência à compressão, Lote 6, CP-V, 7 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-609	36,05	35,28	1,10	3,1
R	CR-Ø10x20-610	34,50			
V	CV-Ø10x20-69	31,13	31,34	0,30	0,9
V	CV-Ø10x20-610	31,55			

Tabela 5.19 - Resistência à compressão, Lote 6, CP-V, 28 dias

cura	CP	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-611	42,33	43,16	1,17	2,70
R	CR-Ø10x20-612	43,99			
V	CV-Ø10x20-611	35,62	38,72	4,38	11,30
V	CV-Ø10x20-612	41,81			

5.2 Módulo de elasticidade

Os resultados dos dos modulos de elasticidade, determinados nos ensaios de compressão, estão mostrados nas tabelas 5.19 a 5.36. Nessas tabelas, os resultados dos corpos-de-prova com cura em repouso estão indicados com a sigla R (repouso) na coluna “cura” e os com cura com vibração com a sigla V (Vibração).

Tabela 5.20 - Módulo de elasticidade, Lote 1, CPlI, 3 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-101	30,72	26,99	2,56	9,5
R	FR-102	27,25			
R	FR-103	27,61			
R	FR-104	25,46			
R	FR-105	23,89			
V	FV-101	18,36	24,75	6,36	25,7
V	FV-103	31,07			
V	FV-105	24,81			

Tabela 5.21 - Módulo de elasticidade, Lote 1, CPlI, 7 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-106	30,97	31,22	2,07	6,65
R	FR-107	31,21			
R	FR-108	28,89			
R	FR-109	30,48			
R	FR-114	34,56			
V	FV-109	30,24	34,27	2,57	7,49
V	FV-110	36,17			
V	FV-111	35,04			
V	FV-114	36,52			
V	FV-115	33,37			

Tabela 5.22 - Módulo de elasticidade, Lote 1, CPlI, 28 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-110	21,25	30,79	8,35	27,1
R	FR-113	36,78			
R	FR-115	34,33			
V	FV-104	35,21	35,52	1,49	4,2
V	FV-106	36,95			
V	FV-107	33,30			
V	FV-108	35,27			
V	FV-112	36,86			

Tabela 5.23 - Módulo de elasticidade, Lote 2, CP11, 3 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-201	46,08	32,26	9,67	30,0
R	FR-202	33,88			
R	FR-203	28,48			
R	FR-204	19,42			
R	FR-205	33,43			

Tabela 5.24 - Módulo de elasticidade, Lote 2, CP11, 10 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-210	35,84	40,31	5,27	13,07
R	FR-209	41,90			
R	FR-208	48,71			
R	FR-206	38,71			
R	FR-215	36,39			
V	FV-209	39,64	37,10	2,90	7,81
V	FV-208	36,48			
V	FV-204	40,59			
V	FV-203	34,25			
V	FV-205	34,56			

Tabela 5.25 - Módulo de elasticidade, Lote 2, CP11, 28 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-211	37,55	38,69	1,02	2,6
R	FR-212	39,69			
R	FR-213	39,39			
R	FR-214	38,12			
V	FV-201	40,00	40,10	0,91	2,3
V	FV-206	41,40			
V	FV-211	39,90			
V	FV-214	39,39			
V	FV-215	40,93			
V	FV-216	38,99			

Tabela 5.26 - Módulo de elasticidade, Lote 3, CPV, 5 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-301	27,26	23,21	5,93	25,55
R	FR-302	13,21			
R	FR-303	25,63			
R	FR-304	22,50			
R	FR-305	27,45			
V	FV-301	27,04	23,78	5,10	21,45
V	FV-302	27,27			
V	FV-303	23,79			
V	FV-304	25,81			
V	FV-305	15,00			

Tabela 5.27 - Módulo de elasticidade, Lote 3, CPII, 7 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-306	26,74	24,94	5,32	21,3
R	FR-307	28,07			
R	FR-308	26,77			
R	FR-309	15,48			
R	FR-310	27,65			
V	FV-306	27,11	26,32	1,42	5,4
V	FV-308	24,19			
V	FV-309	27,08			
V	FV-310	26,88			

Tabela 5.28 - Módulo de elasticidade, Lote 3, CPII, 28 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-311	30,88	30,10	1,13	3,8
R	FR-312	29,80			
R	FR-313	31,62			
R	FR-314	29,28			
R	FR-315	28,89			
V	FV-311	28,05	28,95	2,03	7,0
V	FV-312	29,02			
V	FV-313	25,40			
V	FV-314	30,44			
V	FV-315	31,05			
V	FV-316	29,74			

Tabela 5.29 - Módulo de elasticidade, Lote 4, CPV, 3 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-401	23,24	23,69	1,12	4,7
R	FR-402	21,91			
R	FR-403	24,57			
R	FR-404	24,49			
R	FR-405	24,22			
V	FV-401	24,93	22,52	2,90	12,88
V	FV-402	23,88			
V	FV-403	17,51			
V	FV-404	23,41			
V	FV-405	22,86			

Tabela 5.30 - Módulo de elasticidade, Lote 4, CPV, 7 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-415	24,54	24,54	X	X
V	FV-406	25,28	21,40	9,70	45,34
V	FV-407	25,65			
V	FV-408	25,46			
V	FV-409	26,53			
V	FV-410	4,07			

Tabela 5.31 - Módulo de elasticidade, Lote 4, CPII, 28 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	FR-406	22,96	24,91	2,85	11,4
R	FR-407	27,88			
R	FR-409	26,76			
R	FR-413	22,03			
V	FV-411	28,89	27,56	3,04	11,04
V	FV-412	29,71			
V	FV-413	28,75			
V	FV-414	27,95			
V	FV-415	21,46			
V	FV-416	28,62			

Tabela 5.32 - Módulo de elasticidade, Lote 5, CPII, 3 dias - Ø10x20

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-507	25,76	19,33	9,10	47,1
R	CR-Ø10x20-508	12,89			
V	CV-Ø10x20-507	21,80	21,80	X	X



Tabela 5.33 - Módulo de elasticidade, Lote 5, CPII, 3 dias - Ø15x30

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-501	18,82	18,37	0,64	3,5
R	CR-Ø15x30-502	17,92			
V	CV-Ø15x30-501	19,20	17,24	2,78	16,1
V	CV-Ø15x30-502	15,27			

Tabela 5.34 - Módulo de Elasticidade, Lote 5, CPII, 7 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-509	30,09	27,94	3,05	10,9
R	CR-Ø10x20-510	25,78			
V	CV-Ø10x20-509	29,34	29,34	X	X

Tabela 5.35 - Módulo de Elasticidade, Lote 5, CPII, 28 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-511	28,55	28,55	X	X
V	CV-Ø10x20-512	27,04	27,04	X	X

Tabela 5.36 - Módulo de elasticidade, Lote 6, CP-V, 3 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-607	26,92	27,32	0,57	2,1
R	CR-Ø10x20-608	27,72			
V	CV-Ø10x20-607	25,46	25,46	X	X

Tabela 5.37 - Módulo de elasticidade, Lote 6, CP-V, 7 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-609	29,65	29,01	0,91	3,1
R	CR-Ø10x20-610	28,36			
V	CV-Ø10x20-610	27,29	27,29	X	X

Tabela 5.38 - Módulo de elasticidade, Lote 6, CP-V, 28 dias

cura	CP	E_{ci} (GPa)	$E_{ci,m}$ (GPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø10x20-611	31,28	31,02	0,37	1,2
R	CR-Ø10x20-612	30,75			
V	CV-Ø10x20-611	29,61	29,61	X	X

5.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de compressão diametral para determinação da resistência à tração do concreto estão mostrados nas tabelas 5.39 a 5.43. Nessas tabelas, os resultados dos corpos-de-prova com cura em repouso estão indicados com a sigla R (repouso) na coluna “cura” e os com cura com vibração com a sigla V (vibração). A resistência a tração normal foi determinada por

Tabela 5.39 - Resistência à tração, Lote 5, CII, 7 dias

cura	CP	$f_{t,D}$ (MPa)	$f_{t,Dm}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-503	3,51	3,30	0,29	8,88
R	CR-Ø15x30-504	3,10			
V	CV-Ø15x30-503	3,40	3,27	0,19	5,78
V	CR-Ø15x30-504	3,13			

Tabela 5.40 - Resistência à tração, Lote 5, CII, 28 dias

cura	CP	$f_{t,D}$ (MPa)	$f_{t,Dm}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-505	4,14	4,02	0,18	4,57
R	CR-Ø15x30-506	3,89			
V	CV-Ø15x30-505	3,61	3,68	0,11	2,90
V	CR-Ø15x30-506	3,76			

Tabela 5.41 - Resistência à tração, Lote 6, CP-V, 3 dias

cura	CP	$f_{t,D}$ (MPa)	$f_{t,Dm}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-601	2,63	2,79	0,22	8,01
R	CR-Ø15x30-602	2,95			
V	CV-Ø15x30-601	2,51	2,81	0,43	15,25
V	CV-Ø15x30-602	3,11			

Tabela 5.42 - Resistência à tração, Lote 6, CP-V, 7 dias

cura	CP	$f_{t,D}$ (MPa)	$f_{t,Dm}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-603	2,51	2,74	0,32	11,85
R	CR-Ø15x30-604	2,97			
V	CV-Ø15x30-603	3,31	3,38	0,09	2,74
V	CV-Ø15x30-604	3,44			



Tabela 5.43 - Resistência à tração, Lote 6, CP-V, 7 dias

cura	CP	$f_{t,D}$ (MPa)	$f_{t,Dm}$ (MPa)	σ	δ (%)
R	CR-Ø15x30-605	3,19	3,39	0,30	8,74
R	CR-Ø15x30-606	3,60			
V	CV-Ø15x30-605	3,73	3,73	x	x

5.4 Aderência aço-concreto

Os resultados dos ensaios de arrancamento, R_b (kN), estão mostrados nas tabelas 5.44 a 5.65. Nessas tabelas, os resultados dos corpos-de-prova com cura em repouso estão indicados com a sigla R (repouso) na coluna “cura” e os com cura com vibração com a sigla V (vibração). Os valores $R_{b,m}$ correspondem a média de cada amostra ensaiada. Nesta fase da pesquisa não foi determinada a resistência de aderência f_b .

Tabela 5.44 - Ensaios de arrancamento, Lote 1, CPII, 3 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-101	2,60	3,87	3,38	87,4
R	BR-102	8,78			
R	BR-103	7,48			
R	BR-104	2,02			
R	BR-105	1,45			
R	BR-106	0,87			
V	BV-104	6,07	7,99	3,50	43,8
V	BV-105	6,81			
V	BV-107	7,84			
V	BV-111	5,22			
V	BV-113	14,01			



Tabela 5.45 - Ensaio de arrancamento, Lote 1, CPlI, 7 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-108	1,70	3,50	2,23	63,8
R	BR-110	6,70			
R	BR-111	1,76			
R	BR-112	2,37			
R	BR-113	4,96			
V	BV-101	8,26	11,72	3,97	33,9
V	BV-103	16,13			
V	BV-106	6,11			
V	BV-114	10,27			
V	BV-115	10,88			
V	BV-116	13,62			
V	BV-119	16,74			

Tabela 5.46 - Ensaio de arrancamento, Lote 1, CPlI, 28 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-114	3,79	4,79	2,78	58,1
R	BR-115	5,49			
R	BR-116	7,37			
R	BR-117	1,72			
R	BR-118	2,19			
R	BR-119	3,63			
R	BR-120	9,34			
V	BV-110	6,43	8,92	5,57	62,4
V	BV-108	5,92			
V	BV-109	5,55			
V	BV-112	3,26			
V	BV-117	12,92			
V	BV-118	19,47			
V	BV-120	8,86			

Tabela 5.47 - Ensaio de arrancamento, Lote 2, CPlI, 3 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-203	9,12	5,08	2,46	48,5
R	BR-204	6,47			
R	BR-208	1,21			
R	BR-209	4,94			
V	BV-203	3,14	3,32	2,81	84,5
V	BV-205	1,21			
V	BV-207	1,61			



Tabela 5.48 - Ensaios de arrancamento, Lote 2, CP II, 7 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-213	1,64	3,96	3,29	83,1
R	BR-214	4,35			
R	BR-215	1,88			
R	BR-216	9,52			
R	BR-217	2,40			
V	BV-201	2,02	3,61	2,80	77,6
V	BV-208	1,09			
V	BV-209	2,37			
V	BV-210	1,82			
V	BV-211	9,24			
V	BV-212	3,82			
V	BV-214	4,90			

Tabela 5.49 – Ensaios de arrancamento, Lote 2, CP II, 28 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-206	15,33	6,82	5,49	80,5
R	BR-210	4,12			
R	BR-218	2,52			
R	BR-219	2,81			
R	BR-220	9,33			
V	BV-215	11,59	8,27	2,61	31,5
V	BV-216	8,66			
V	BV-218	4,28			
V	BV-219	8,60			
V	BV-220	8,21			

Tabela 5.50 - Ensaios de arrancamento, Lote 3, CP V, 4 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-301	51,600	51,39	4,89	9,5
R	BR-302	51,190			
R	BR-303	43,660			
R	BR-304	53,530			
R	BR-305	56,990			
V	BV-301	64,890	70,34	6,46	9,2
V	BV-302	77,360			
V	BV-303	70,590			
V	BV-304	75,980			
V	BV-305	62,860			



Tabela 5.51 - Ensaios de arrancamento, Lote 3, CPV, 7 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-307	53,85	56,88	2,66	4,7
R	BR-308	54,82			
R	BR-309	59,93			
R	BR-310	56,22			
R	BR-311	54,69			
R	BR-312	58,21			
R	BR-313	60,44			
V	BV-306	79,02	79,95	2,32	2,9
V	BV-307	79,98			
V	BV-308	79,29			
V	BV-309	82,57			
V	BV-310	83,56			
V	BV-311	78,10			
V	BV-312	77,16			

Tabela 5.52 - Ensaios de arrancamento, Lote 3, CPV, 28 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-314	64,92	67,48	3,45	5,1
R	BR-315	66,25			
R	BR-316	65,06			
R	BR-317	64,82			
R	BR-318	73,74			
R	BR-319	66,84			
R	BR-320	70,75			
V	BV-313	79,51	84,66	3,10	3,7
V	BV-314	87,02			
V	BV-315	87,94			
V	BV-316	85,08			
V	BV-317	86,63			
V	BV-318	80,367			
V	BV-319	84,63			
V	BV-320	86,08			

Tabela 5.53 - Ensaios de arrancamento, Lote 4, CPV, 3 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-401	48,960	45,05	3,79	8,4
R	BR-402	47,570			
R	BR-403	46,590			
R	BR-404	42,000			
R	BR-405	40,140			
V	BV-401	60,010	56,62	5,39	9,5
V	BV-402	59,690			
V	BV-403	51,320			
V	BV-404	61,790			
V	BV-405	50,270			

Tabela 5.54 - Ensaios de arrancamento, Lote 4, CPV, 7 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-406	53,38	53,39	3,79	7,1
R	BR-407	50,80			
R	BR-408	57,72			
R	BR-409	53,65			
R	BR-410	59,00			
R	BR-411	49,45			
R	BR-412	49,71			
V	BV-406	60,21	64,44	3,19	5,0
V	BV-407	69,03			
V	BV-408	60,26			
V	BV-410	64,96			
V	BV-411	65,15			
V	BV-412	65,19			
V	BV-413	66,29			



Tabela 5.55 - Ensaio de arrancamento, Lote 4, CPV, 28 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	BR-413	49,82	60,42	5,54	9,2
R	BR-414	55,91			
R	BR-415	62,24			
R	BR-416	65			
R	BR-417	58,21			
R	BR-418	64,49			
R	BR-419	61,32			
R	BR-420	66,37			
V	BV-414	78,43			
V	BV-415	83,97			
V	BV-416	79,94			
V	BV-417	77,04			
V	BV-418	78,43			
V	BV-419	74,54			
V	BV-420	71,59			

Tabela 5.56 - Ensaio de arrancamento, Lote 5, CPII, 3 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x15 - 501	54,14	49,65	5,48	11,05
R	PR-15x15x15 - 502	46,51			
R	PR-15x15x15 - 503	51,21			
R	PR-15x15x15 - 504	48,24			
R	PR-15x15x15 - 505	57,39			
R	PR-15x15x15 - 506	49,7			
R	PR-15x15x15 - 507	40,37			
V	PV-15x15x15 - 502	60,8	63,80	4,45	6,98
V	PV-15x15x15 - 503	67,7			
V	PV-15x15x15 - 504	59,78			
V	PV-15x15x15 - 505	63,02			
V	PV-15x15x15 - 506	60,74			
V	PV-15x15x15 - 507	70,78			



Tabela 5.57 - Ensaios de arrancamento, Lote 5, CPlI, 3 dias, prismático 15x15x30

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x30 - 522	86,66	87,25	0,81	0,92
R	PR-15x15x30 - 523	87,89			
R	PR-15x15x30 - 524	87,19			
R	PR-15x15x30 - 525	87,48			
R	PR-15x15x30 - 526	88,25			
R	PR-15x15x30 - 527	86,05			
V	PV-15x15x30 - 522	88,52	87,61	1,47	1,68
V	PV-15x15x30 - 524	84,89			
V	PV-15x15x30 - 525	87,3			
V	PV-15x15x30 - 526	87,52			
V	PV-15x15x30 - 527	88,56			
V	PV-15x15x30 - 528	88,87			

Tabela 5.58 - Ensaios de arrancamento, Lote 5, CPlI, 7 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x15 - 508	58,88	56,15	3,94	7,01
R	PR-15x15x15 - 509	57,55			
R	PR-15x15x15 - 510	55,94			
R	PR-15x15x15 - 511	60,47			
R	PR-15x15x15 - 512	54,84			
R	PR-15x15x15 - 513	49,24			
V	PV-15x15x15 - 508	66,17	63,03	8,44	13,39
V	PV-15x15x15 - 509	48,28			
V	PV-15x15x15 - 510	66,7			
V	PV-15x15x15 - 511	58,82			
V	PV-15x15x15 - 512	72,53			
V	PV-15x15x15 - 513	65,7			

Tabela 5.59 - Ensaios de arrancamento, Lote 5, CPlI, 28 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x15 - 515	65,66	64,87	5,53	8,53
R	PR-15x15x15 - 516	69,17			
R	PR-15x15x15 - 517	66,43			
R	PR-15x15x15 - 518	70,09			
R	PR-15x15x15 - 519	65,09			
R	PR-15x15x15 - 520	64,39			
R	PR-15x15x15 - 521	53,27	73,94	9,28	12,55
V	PV-15x15x15 - 515	81,48			
V	PV-15x15x15 - 516	76,76			
V	PV-15x15x15 - 517	63,58			

Tabela 5.60 - Ensaio de arrancamento, Lote 6, CP-V, 3 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x15 - 601	49,64	55,27	9,74	17,62
R	PR-15x15x15 - 602	40,47			
R	PR-15x15x15 - 603	55,74			
R	PR-15x15x15 - 605	67,72			
R	PR-15x15x15 - 606	54,53			
R	PR-15x15x15 - 607	63,5			
V	PV-15x15x15 - 602	47,25	56,57	10,05	17,77
V	PV-15x15x15 - 603	63,95			
V	PV-15x15x15 - 604	53,53			
V	PV-15x15x15 - 605	44,06			
V	PV-15x15x15 - 606	60,54			
V	PV-15x15x15 - 607	70,07			

Tabela 5.61 - Ensaio de arrancamento, Lote 6, CP-V, 3 dias, Prismático 15x15x18,25

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x18,25 - 602	79,09	72,39	6,23	8,61
R	PR-15x15x18,25 - 603	77,09			
R	PR-15x15x18,25 - 604	63,15			
R	PR-15x15x18,25 - 605	70,76			
R	PR-15x15x18,25 - 606	71,86			
V	PV-15x15x18,25 - 601	74,01			
V	PV-15x15x18,25 - 602	74,78			
V	PV-15x15x18,25 - 603	67,8			
V	PV-15x15x18,25 - 604	85,89			
V	PV-15x15x18,25 - 606	79,23			

Tabela 5.62 - Ensaio de arrancamento, Lote 6, CP-V, 7 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x15 - 608	61,09	62,97	4,09	6,49
R	PR-15x15x15 - 609	66,58			
R	PR-15x15x15 - 610	57,64			
R	PR-15x15x15 - 611	59,01			
R	PR-15x15x15 - 612	65,07			
R	PR-15x15x15 - 613	62,52			
R	PR-15x15x15 - 614	68,88	68,13	6,03	8,85
V	PV-15x15x15 - 608	69,31			
V	PV-15x15x15 - 609	70,31			
V	PV-15x15x15 - 611	56,03			
V	PV-15x15x15 - 612	69,54			
V	PV-15x15x15 - 613	71,35			
V	PV-15x15x15 - 614	72,23			

Tabela 5.63 - Ensaios de arrancamento, Lote 6, CP-V, 7 dias, prismático 15x15x18,25

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x18,25 - 608	69,54	74,53	4,39	5,89
R	PR-15x15x18,25 - 609	72,48			
R	PR-15x15x18,25 - 610	79,68			
R	PR-15x15x18,25 - 611	73,7			
R	PR-15x15x18,25 - 612	76,15			
R	PR-15x15x18,25 - 613	80,36			
R	PR-15x15x18,25 - 614	69,78			
V	PV-15x15x18,25 - 608	83,5	74,62	9,77	13,09
V	PV-15x15x18,25 - 609	81,09			
V	PV-15x15x18,25 - 610	74,85			
V	PV-15x15x18,25 - 611	72,05			
V	PV-15x15x18,25 - 612	79,62			
V	PV-15x15x18,25 - 613	56,6			

Tabela 5.64 - Ensaios de arrancamento, Lote 6, CP-V, 28 dias, cúbico 15x15x15

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x15 - 615	70,62	66,47	10,63	15,99
R	PR-15x15x15 - 616	75,11			
R	PR-15x15x15 - 617	46,88			
R	PR-15x15x15 - 618	64,48			
R	PR-15x15x15 - 619	70,52			
R	PR-15x15x15 - 620	78,09			
R	PR-15x15x15 - 621	59,6			
V	PV-15x15x15 - 615	80,23	71,25	5,61	7,88
V	PV-15x15x15 - 616	73,97			
V	PV-15x15x15 - 617	65,9			
V	PV-15x15x15 - 618	70,37			
V	PV-15x15x15 - 619	65,03			
V	PV-15x15x15 - 620	75,67			
V	PV-15x15x15 - 621	67,58			



Tabela 5.65 - Ensaio de arrancamento, Lote 6, CP-V, 28 dias, prismático 15x15x18,25

cura	CP	R_b (kN)	$R_{b,m}$ (kN)	σ	δ (%)
R	PR-15x15x18,25 - 615	78,81	4,45	5,63	0,00
R	PR-15x15x18,25 - 616	79,07			
R	PR-15x15x18,25 - 617	83,85			
R	PR-15x15x18,25 - 618	82,85			
R	PR-15x15x18,25 - 619	72,58			
R	PR-15x15x18,25 - 620	73,64			
R	PR-15x15x18,25 - 621	82,21			
V	PV-15x15x18,25 - 615	86,52	85,39	1,65	1,94
V	PV-15x15x18,25 - 616	83,93			
V	PV-15x15x18,25 - 617	86,72			
V	PV-15x15x18,25 - 618	84,07			
V	PV-15x15x18,25 - 619	84,79			
V	PV-15x15x18,25 - 620	83,75			
V	PV-15x15x18,25 - 621	87,93			

Foram realizados nessa pesquisa 542 ensaios para determinar quatro propriedades mecânicas: resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração e resistência ao arrancamento. A quantidade de ensaios para cada propriedade determinada está apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Quantidade de ensaios realizados para cada propriedade investigada

Condição de cura do corpo-de-prova	Resistência à compressão (f_c)	Módulo de elasticidade (E_c)	Resistência à tração indireta ($f_{t,d}$)	Resistência ao arrancamento (R_b)
Repouso	60	65	10	136
Ambiente vibrado	69	62	9	131

Está mostrado na Tabela 6.2 a relação entre as propriedades determinadas nos corpos-de-prova com cura em repouso (R) pelas determinadas nos corpos-de-prova com cura em ambiente vibrado (V). Essa relação (V/R) indica quantitativamente o efeito da vibração durante a cura inicial do concreto.

Tabela 6.2 – Resumo dos valores da relação V/R para o 6 lotes investigados

Lote	Dias	Corpo de prova	V/R	Propriedade	Obs.	n° CP "R"	n° CP "V"	Ruptura	Tipo aço
1	3	10x20	0,86	$f_{c,m}$		5	3		
	7	10x20	1,02	$f_{c,m}$		5	5		
	28	10x20	1,04	$f_{c,m}$		3	5		
2	3	10x20	-	$f_{c,m}$		1	0		
	10	10x20	0,81	$f_{c,m}$		5	5		
	28	10x20	0,81	$f_{c,m}$		4	6		
3	5	10x20	0,9	$f_{c,m}$		4	5		
	7	10x20	0,95	$f_{c,m}$		5	4		
	28	10x20	0,93	$f_{c,m}$		5	6		
4	3	10x20	1,03	$f_{c,m}$		5	6		
	7	10x20	0,9	$f_{c,m}$		1	4		
	28	10x20	1	$f_{c,m}$		4	6		
5	3	10x20	0,8	$f_{c,m}$		2	2		
	3	15x30	0,83	$f_{c,m}$		2	2		
	7	10x20	0,85	$f_{c,m}$		2	2		
	28	10x20	0,89	$f_{c,m}$		1	2		
6	3	10x20	1,08	$f_{c,m}$		2	2		
	7	10x20	0,89	$f_{c,m}$		2	2		
	28	10x20	0,90	$f_{c,m}$		2	2		
1	3	10x20	0,92	$E_{c,m}$		5	3		
	7	10x20	1,1	$E_{c,m}$		5	5		
	28	10x20	1,15	$E_{c,m}$	δR alto ⁵	3	4		
2	3	10x20	-	$E_{c,m}$	δR alto	5	0		
	10	10x20	0,92	$E_{c,m}$		5	5		
	28	10x20	1,04	$E_{c,m}$		4	6		
3	5	10x20	1,02	$E_{c,m}$		5	5		
	7	10x20	1,06	$E_{c,m}$	δR alto	5	4		
	28	10x20	0,96	$E_{c,m}$		5	6		
4	3	10x20	0,95	$E_{c,m}$		5	5		
	7	10x20	0,98	$E_{c,m}$	δV alto	1	5		
	28	10x20	1,11	$E_{c,m}$		4	6		

⁵ δR = coeficiente de variação. Considera-se δR alto nessa tabela valores acima de 20%

Lote	Dias	Corpo de prova	V/R	Propriedade	Obs.	n° CP "R"	n° CP "V"	Ruptura	Tipo aço
5	3	10x20	1,13	$E_{c,m}$	δR alto	2	1		
	3	15x30	0,94	$E_{c,m}$		2	2		
	7	10x20	1,05	$E_{c,m}$		2	1		
	28	10x20	0,95	$E_{c,m}$		1	1		
6	3	10x20	0,93	$E_{c,m}$		2	1		
	7	10x20	0,94	$E_{c,m}$		2	1		
	28	10x20	0,95	$E_{c,m}$		2	1		
5	7	15x30	0,99	$f_{t,d,m}$		2	2		
	28	15x30	0,92	$f_{t,d,m}$		2	2		
6	3	15x30	1,01	$f_{t,d,m}$		2	2		
	7	15x30	1,23	$f_{t,d,m}$		2	2		
	28	15x30	1,10	$f_{t,d,m}$		2	1		
1	3	15x15x15	2,06	$R_{b,m}$	δR e V altos	6	5		
	7	15x15x15	3,35	$R_{b,m}$	δR e V altos	5	7	12 escorregamentos	CA25-barra lisa
	28	15x15x15	1,86	$R_{b,m}$	δR e V altos	7	7	14 escorregamentos	CA25-barra lisa
2	3	15x15x15	0,65	$R_{b,m}$	δR e V altos	4	3	7 escorregamentos	CA25-barra lisa
	7	15x15x15	0,91	$R_{b,m}$	δR e V altos	5	7	12 escorregamentos	CA25-barra lisa
	28	15x15x15	1,21	$R_{b,m}$	δR e V altos	5	5	10 escorregamentos	CA25-barra lisa
3	4	15x15x15	1,37	$R_{b,m}$		5	5	6 escorregamentos e 4 fendilhamentos	CA50-barra nervurada
	7	15x15x15	1,41	$R_{b,m}$		7	7	14 escorregamentos	CA50-barra nervurada
	28	15x15x15	1,25	$R_{b,m}$		7	8	11 escorregamentos e 4 fendilhamentos	CA50-barra nervurada
4	3	15x15x15	1,26	$R_{b,m}$		5	5	7 escorregamentos e 3 fendilhamentos	CA50-barra nervurada
	7	15x15x15	1,21	$R_{b,m}$		7	7	12 escorregamentos e 2 fendilhamentos	CA50-barra nervurada
	28	15x15x15	1,29	$R_{b,m}$		8	7	13 escorregamentos e 2 fendilhamentos	CA50-barra nervurada
5	3	15x15x15	1,29	$R_{b,m}$		7	6	12 escorregamentos e 1 fendilhamento	CA50-barra nervurada
	3	15x15x30	1	$R_{b,m}$		6	6	1 escorregamento, 10 escoamentos e 1 fendilhamento	CA50-barra nervurada
	7	15x15x15	1,12	$R_{b,m}$		6	6	10 escorregamentos e 2 fendilhamentos	CA50-barra nervurada



Lote	Dias	Corpo de prova	V/R	Propriedade	Obs.	n° CP "R"	n° CP "V"	Ruptura	Tipo aço
5	28	15x15x15	1,14	$R_{b,m}$		7	3	9 escorregamentos 1 fendilhamentos	CA50- barra nervurada
6	3	15x15x15	1,02	$R_{b,m}$		6	6	4 escorregamentos 8 fendilhamentos	CA50- barra nervurada
	3	15x15x18,25	1,05	$R_{b,m}$		5	5	6 escorregamentos e 4 fendilhamentos	CA50- barra nervurada
	7	15x15x15	1,08	$R_{b,m}$		7	6	8 escorregamentos e 5 fendilhamentos	CA50- barra nervurada
	7	15x15x18,25	1	$R_{b,m}$		7	6	9 escorregamentos e 4 fendilhamentos	CA50- barra nervurada
	28	15x15x15	1,07	$R_{b,m}$		7	7	7 escorregamentos e 7 fendilhamentos	CA50- barra nervurada
	28	15x15x18,25	1,08	$R_{b,m}$		7	7	2 escoamentos, 11 escorregamentos e 1 fendilhamento	CA50- barra nervurada

A investigação da cura do concreto em ambientes com vibração mostrou que a vibração introduz defeitos na formação da microestrutura das peças de concreto, que podem ser identificados pelas propriedades mecânicas: de resistência à compressão, f_c e módulo de elasticidade E_c . Esses defeitos que reduzem as propriedades de f_c e E_c , em valores da ordem de 8%, dependem da amplitude e da natureza da vibração, que neste caso investigado foi a aceleração, principalmente, aquelas com natureza da ordem de 2,5 Hz. Para as acelerações acima dessa frequência, o defeito devido a vibração não é identificado com clareza através das propriedades mecânicas f_c , f_t e E_c , medidas em ensaios estáticos, como realizado nesta pesquisa. Entretanto, nada pode se afirmar quanto aos aspectos de envelhecimento mecânico do concreto, principalmente, aqueles devidos aos ensaios cíclicos, representativos das cargas acidentais.

Para o caso da resistência de aderência, durante a investigação foram realizados ensaios em três tipos de corpos-de-prova com comprimentos diferentes. Ressalta-se que quanto maior o comprimento de ancoragem das barras maior foi a resistência ao arrancamento apresentada no ensaios, porém a análise comparativa entre os corpos-de-prova com cura em ambiente vibrado e com cura em repouso foi realizada comparando os corpos-de-prova de mesma geometria, ou seja, tendo apenas como variável as condições de cura. Diante disso, concluiu-se que a cura em ambiente com vibração não introduziu defeito na resistência de aderência, medida em ensaios com carregamentos monotônicos crescentes. Essa situação foi observada tanto para as acelerações com diferentes amplitudes e também com diferentes frequências.. Da mesma forma, como se trata de interações entre a microestrutura do concreto com a superfície do aço, que dependem de engrenamento, nada se pode concluir sobre o envelhecimento mecânico dessas ligações, apenas com propriedades medidas em ensaios estáticos.



Todavia, como os resultados dos ensaios com corpos-de-prova curados em repouso (R) ou com vibração (V), são contraditórios, pois $(V/R)_{\text{compressão}} = 0,93$ e $(V/R)_{\text{arrancamento}} = 1,27$, com um valor médio $(V/R) = (0,93+1,27)/2 = 1,10$, verifica-se que não se chegou a uma conclusão consistente.

De qualquer maneira, não se pode definir regras de trabalho, se a diferença efetiva de resultados, seja para mais ou para menos, for de apenas 10%, pois esse valor não poderia ser responsável pelos eventos que de fato ocorrem com as obras de ampliação das pontes brasileiras.

Para a obtenção da resposta ao fenômeno em consideração é preciso ampliar a investigação provocando o envelhecimento mecânico das propriedades f_c , f_t , E_c e f_b , que pode ser realizada em carregamentos cíclicos (fadiga). Esses ensaios podem vir a esclarecer os mecanismos responsáveis pela perda de rigidez das peças de concreto armado pela presença de vibrações devidas a cargas acidentais.

Desse modo, como não existe na realidade um envelhecimento do concreto com número de ciclos de carregamento muito baixo, é preciso examinar se a deterioração acontece com um número muito grande de ciclos de carregamento.

Atenciosamente,

São Paulo, 31 de dezembro de 2010

Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida
Diretor do LSE



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5738 (2003): *Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto* – Procedimento - Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118 (2003): *Projeto de estruturas de concreto* – Procedimento – Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7222(2010): *Concreto e Argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos* – Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8522 (2008): *Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão* – Rio de Janeiro

FUSCO, P.B. (1994) – *Técnica de armar as estruturas de concreto*. PINI, São Paulo

HANAI, J. B. Comportamento Resistente, Ductilidade e Confinamento. In: ISAIA, G.C. (editor). *Concreto; ensino, pesquisa e realizações*. Volume 1. São Paulo, Ibracon, 2005.

LEONHARDT, F; MONNIG, E (1972) – *Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Volume 1. Rio de Janeiro

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M (2008) - *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. PINI, São Paulo