

PUC
PAVIMENTO
URBANO DE
CONCRETO



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO



MAR/25



PUC
PAVIMENTO
URBANO DE
CONCRETO



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

CAPÍTULO I
SOLOS

MAR/25



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC

PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

CAPÍTULO I - SOLOS

CAPÍTULO I - SOLOS

INTRODUÇÃO

São apresentadas as características físicas dos solos, contemplando conceitos e ensaios para a determinação de propriedades geotécnicas. Os principais conceitos dos solos referem-se a sua formação, respectivas características e seu comportamento.

O Capítulo I contempla os seguintes temas a saber:

1. Origem e propriedades dos solos

Aborda a origem e as propriedades dos solos, suas características e os critérios utilizados para distinguir os tipos de solos. São apresentados aspectos da formação dos solos e métodos práticos para que possamos distingui-los, conceitos sobre tamanho dos grãos e plasticidade.

2. Relação entre fases e classificação dos solos

Apresenta os índices físicos que correlacionam os pesos e os volumes das fases presentes nos solos, assim como as classificações dos solos comumente praticadas no meio técnico. Orienta quanto a determinação das propriedades dos solos, por meio de ensaios e técnicas executadas para concepção de projetos de engenharia de solos.

3. Compactação do solo

Contempla a prática da compactação do solo para redução do volume e aumento da resistência do mesmo. Aborda os princípios da compactação do solo e sua aplicação em campo, bem como a execução de ensaios e interpretações dos mesmos para fins práticos.

1. Origem e propriedades dos solos

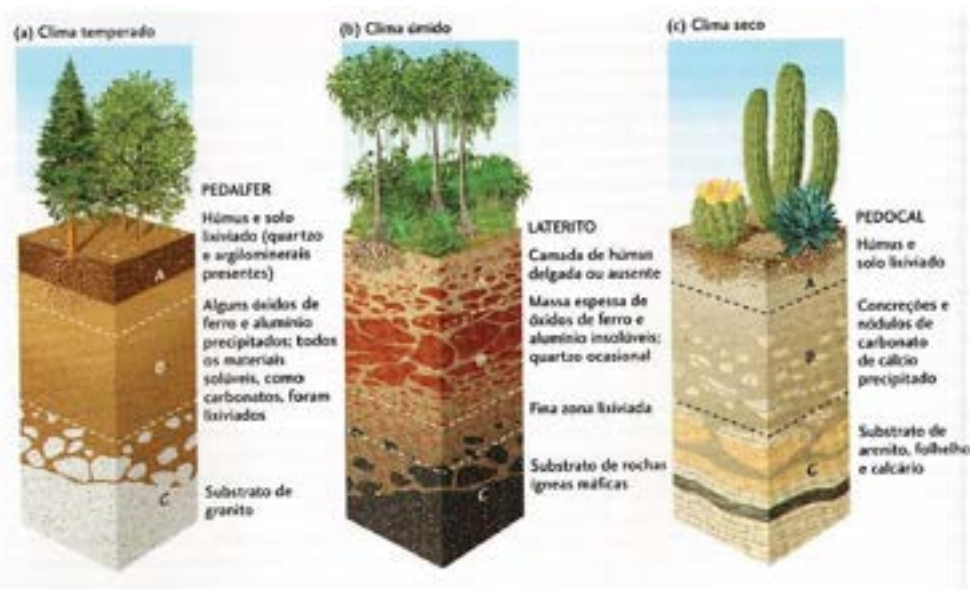
1.1. Formação do solo

Para a construção de um pavimento deve-se saber qual a capacidade de suporte do terreno para cargas de solicitação. Os solos apresentam distintas gêneses e ocorrem sob várias circunstâncias na natureza. Muitos tipos de solos podem ser encontrados simultaneamente em um mesmo local e variar quando analisado em sua profundidade (camadas sobrepostas).

Sua origem e formação é heterogênea e, como sabido, os solos são abundantes na natureza, recobrando grandes extensões de nosso planeta devido à degradação da rocha, principalmente pelo intemperismo físico, químico ou biológico.

O intemperismo é definido como fenômeno que altera as rochas, o qual pode ser considerado uma resposta a uma mudança de ambiente, que ocorre na interface atmosfera-litosfera. Para regiões tropicais, nas quais o intemperismo atua fortemente sobre as rochas e na maturidade dos solos, podem ocorrer o desenvolvimento de extensos e profundos perfis geológicos.

Um dos principais produtos do intemperismo são os solos residuais. Inicialmente, os intemperismos físico e químico atuam na rocha promovendo sua desagregação física. Após a ação intempérica, os blocos rochosos são fragmentados e reduzidos a partículas com formatos arredondados e dispersos na matriz de solo. Com a continuidade do processo, os fragmentos de rocha desaparecem e dão origem ao solo residual. A Figura 1 ilustra a ação do intemperismo considerando as diferentes regiões climáticas e a formação dos distintos perfis geológicos.



Fonte: Grotzinger & Jordan (2006, p. 186).

Figura 1 - Ação do intemperismo em função de diferentes regiões climáticas.

Os perfis classificam as camadas de solo em horizontes, quais sejam:

- Horizonte A: representa uma camada superficial orgânica;
- Horizonte B: corresponde à camada de solo residual.
- Horizonte C: representa a rocha levemente alterada.

O intemperismo é fundamental para o desempenho das obras de engenharia, pois tal processo promove mudanças nas rochas, modificando suas propriedades geotécnicas. Dessa forma, é de suma importância compreender como essas propriedades variam conforme a rocha-mãe se altera até que se torne solo.

A formação do solo é resultado da ação conjunta de agentes ativos (clima e biosfera) e passivos (relevo, tempo e material de origem). A intensidade desses agentes é dependente de um maior ou menor espaço de tempo. Considerando que todo solo é resultado da ação combinada desses agentes, é muito importante a compreensão de cada um deles.

Portanto, cada tipo de solo é um produto da ação de todos os seus fatores de formação. O papel de cada um desses fatores reflete nas propriedades geotécnicas desses materiais.

Dessa forma, por exemplo, é esperado que uma “terra roxa estruturada” (proveniente de basalto), muito utilizada na agricultura, seja diferente de uma “areia quartzosa” (proveniente de arenito). Como o solo é considerado o último estágio de transformação da rocha, muitas informações valiosas podem ser obtidas. Ele pode ser originado de rochas (magmáticas, sedimentares ou metamórficas), de sedimentos e pela decomposição de fragmentos de rocha transportados.

De um modo geral, em climas tropicais há uma grande tendência na formação de espessos horizontes de solos e em regiões frias essa taxa se reduz gradativamente.

1.2. Tamanho das partículas e plasticidade dos solos

Nesta seção, iniciaremos o estudo abordando algumas importantes características físicas dos solos, quais sejam, o tamanho das partículas e sua plasticidade.

O tamanho relativo das partículas sólidas ou grãos define o que podemos chamar de textura e sua medição é realizada por meio da distribuição granulométrica. A plasticidade do solo representa sua maior ou menor capacidade de ser moldado sem mudança de volume e sob

determinada condição de umidade.

Outras propriedades menos complexas, mais expeditas e de fácil determinação, denominadas de propriedades índices, são importantes para que seja tomada a decisão de sua utilização ou não para determinada finalidade.

Exemplificando, caso tenhamos dois tipos de solo, ou seja, um solo que possua grãos bem arredondados e de mesmas dimensões (bem graduados ou com pior distribuição granulométrica) e outro que apresente grãos irregulares e angulosos, além de partículas de dimensões variadas (mal graduado ou com melhor distribuição granulométrica), certamente o de maior resistência é aquele que apresenta um maior entrosamento entre grãos finos e grossos, que consequentemente promove um maior atrito entre as partículas. Nesse caso, estamos falando do segundo tipo de solo, endossando que simples características são fundamentais para a concepção de projetos.

Se separarmos mecanicamente um solo (análise granulométrica) em suas diversas frações, teremos, ao final, vários grupos de grãos com diferentes tamanhos. Podemos ainda separar esses grupos considerando determinados limites (faixas granulométricas) e por fim classifica-los com base no tamanho e na forma dos grãos.

As partículas muito grossas (pedregulhos, blocos etc.) são representadas por fragmentos de rocha alterada ou sã, com formas arredondadas e angulosas. Já as frações grossas (areias) são predominantemente compostas pelo mineral quartzo e os grãos podem ser angulares ou redondos. Nas frações finas e muito finas, em geral, elas representam um único mineral, com formatos diversos, mas nunca arredondados (siltes e argilas). Sem métodos adequados de investigação, não há a possibilidade de quantificar as frações finas e muito finas presentes no solo.

Se considerarmos que as particularidades geotécnicas dos solos estão quase sempre relacionadas às frações mais finas, muitos problemas de engenharia aconteceriam sem uma visão crítica considerada.

Das técnicas mais diretas existentes, utiliza-se a separação do solo em peneiras para as frações muito grossas a grossas e, por sedimentação, para frações finas a muito finas. A Figura 2 apresenta os ensaios de separação de solo.



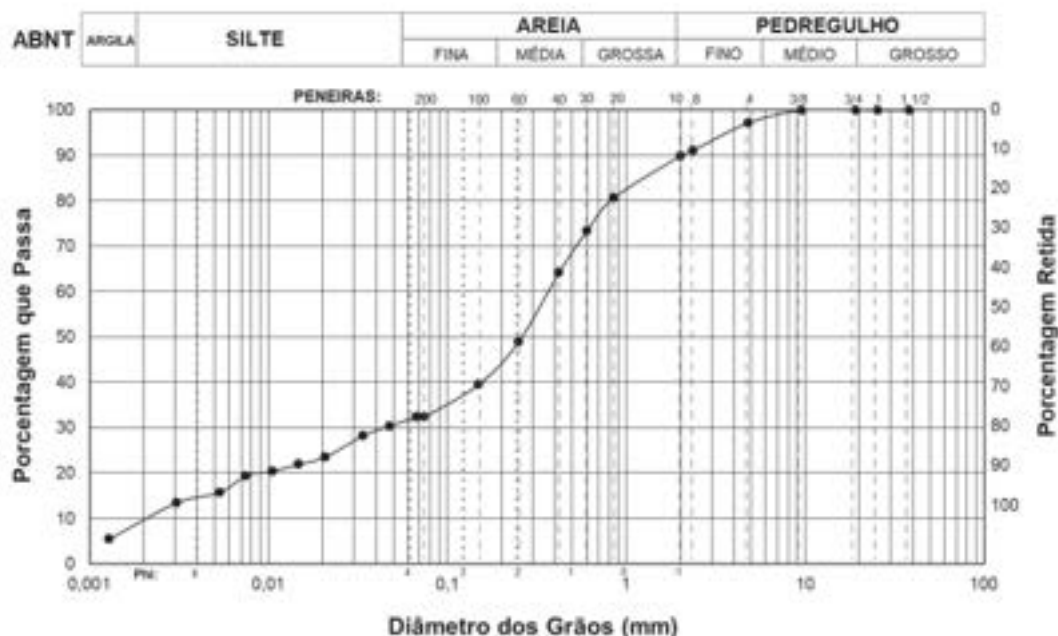
Fonte: <http://www.istockphoto.com/br/>



Fonte: <https://www.google.com/search>

Figura 2 - Separação do solo pelo método das peneiras e por sedimentação.

O produto dos ensaios “separação do solo em peneiras para as frações muito grossas a grossas” e “sedimentação, para frações finas a muito finas”, gera a curva granulométrica (Figura 3), que nada mais é que um gráfico semilogarítmico, cujo eixo das abcissas representa o logaritmo do diâmetro das partículas e o das ordenadas, a porcentagem em peso dos grãos menores que o tamanho correspondente no eixo das abcissas.



Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

Figura 3 - Curva granulométrica.

As frações granulométricas são classificadas pelo tamanho dos grãos, forma ou mesmo nomes e símbolos que representem fração de solo predominante. Assim sendo, as classificações dos solos são baseadas nas frações, definindo-os, como: argila, silte, areia e pedregulho para faixas

granulométricas, que podem variar devido ao sistema de classificação adotado (ABNT, M.I.T. etc.).

A caracterização dos solos considera sua granulometria e consistência, especialmente os solos siltosos e argilosos. À medida que o solo vai perdendo umidade, a argila muda do seu estado líquido para seu estado plástico, chegando por fim ao seu estado sólido (Figura 4).



Fonte: <<http://www.istockphoto.com/br/>.

Figura 4 – Exemplo de estado semissólido da argila.

A propriedade que define esse comportamento para esses tipos de solos é denominada “plasticidade”, a qual representa a capacidade de um determinado solo ser moldado sem alteração de seu volume. Tal característica é dependente do teor de umidade.

O teor de umidade crítico representa a umidade necessária para que ocorra a alteração do estado (líquido para plástico). Naturalmente, a mudança de estado dos solos não é abrupta, mas gradual.

A relação entre a quantidade de água em um solo e os seus estados de consistência é determinada por meio de índices (limites de Atterberg), quais sejam:

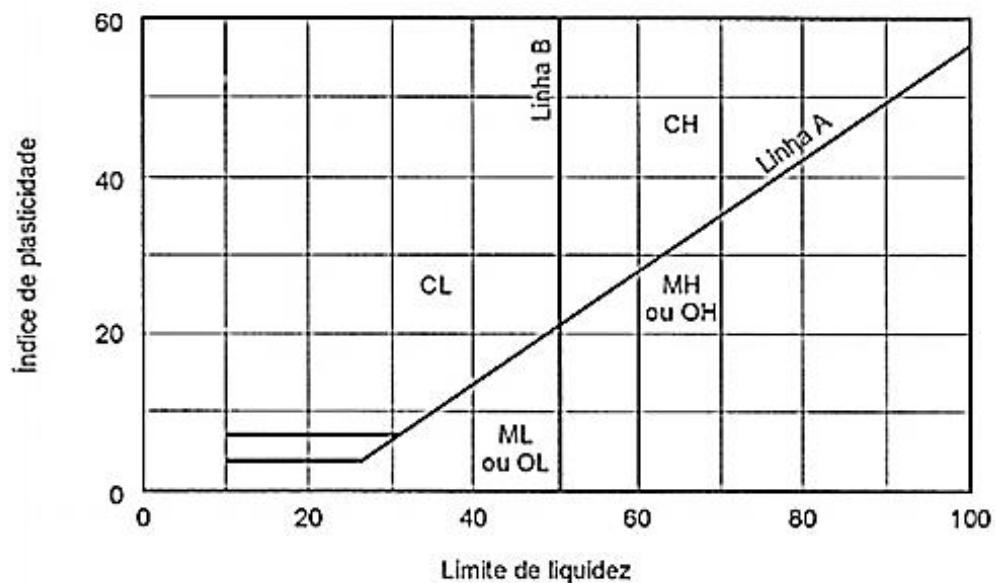
- Limite de liquidez (LL): representa o menor teor de umidade de um solo para que o mesmo se torne fluido, como uma lama bem líquida;
- Limite de plasticidade (LP): representa o teor de umidade que caracteriza um solo no estado plástico cuja redução do teor alteraria seu estado para semissólido (quando um solo aparenta ser sólido, mas sofre variações de volume quando submetido à secagem).

Esses índices são muito importantes para a caracterização do estado do solo e conseqüentemente para o dimensionamento dos projetos de engenharia.

Subtraindo o valor de LL do valor de LP, tem-se o índice de plasticidade (IP). Esse índice caracteriza o comportamento plástico ou não de um solo e é classificado dentro de faixas a saber:

- Não plástico: $IP = 0$;
- Ligeiramente plástico: $0 < IP < 5$;
- Baixa plasticidade: $5 < IP < 10$;
- Média plasticidade: $10 < IP < 20$;
- Alta plasticidade: $20 < IP < 40$;
- Plasticidade muito alta: $IP > 40$.

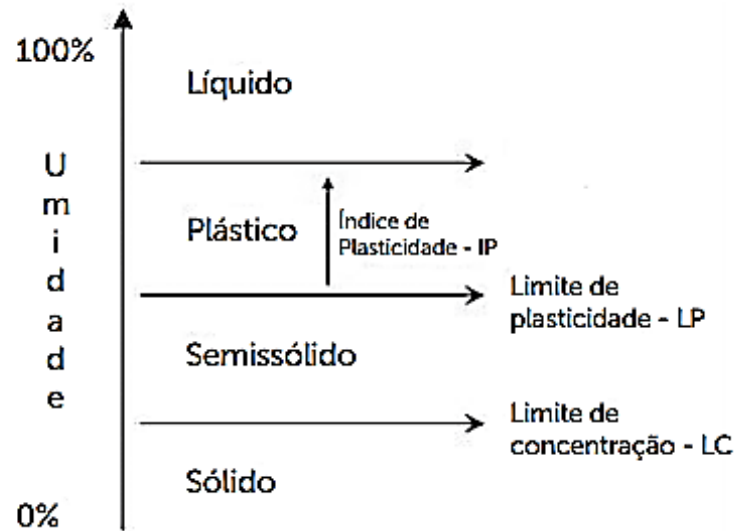
O índice de plasticidade (IP) ainda pode se relacionar com LL e indicar o comportamento do solo, conforme apresentado na Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 5). A Carta de Plasticidade de Casagrande permite caracterizar solos finos a partir do IP e do LL. Os solos com $LL > 50\%$ (direita da linha B) são muito compressíveis e $LL < 40\%$ tem baixa ou nenhuma ($LL < 20\%$) compressibilidade. Acima da linha A situam-se as argilas inorgânicas (CH e CI) mais plásticas e, abaixo, argilas orgânicas e siltes (ML/OL e MH/OH).



Fonte: Sousa Pinto (2006, p. 56).

Figura 4 – Carta de plasticidade de Casa Grande.

Quando um solo perde umidade e altera o seu estado de semissólido para sólido, se a redução do teor de umidade não alterar o volume do solo, pode-se dizer que o solo encontra-se no seu limite de contração (LC). Podemos ainda determinar o grau (grau de contração – C) indicativo da tendência do solo ao aparecimento de fissuras quando sofre secagem, principalmente quando o valor de IP é elevado. A Figura 6 apresenta os índices de consistência e a mudança do estado do solo pela variação da umidade.



Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

Figura 6 – Limites de estados de consistência do solo.

2. RELAÇÃO ENTRE FASES E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Por meio da análise das fases dos solos (sólida, líquida ou gasosa) podemos obter matematicamente algumas características físicas importantes que representam, por exemplo, se um solo permite uma maior compactação, se determinado carregamento poderia colapsar um maciço de solo pelo simples fato de ele estar ou não saturado, prever sua capacidade de deformação, permeabilidade, previsão de colapso pela redução do seu volume em função do umedecimento etc. É importante a determinação de propriedades tais como: o teor de umidade, a massa específica natural, saturada e a massa específica dos grãos.

2.1. Índices físicos

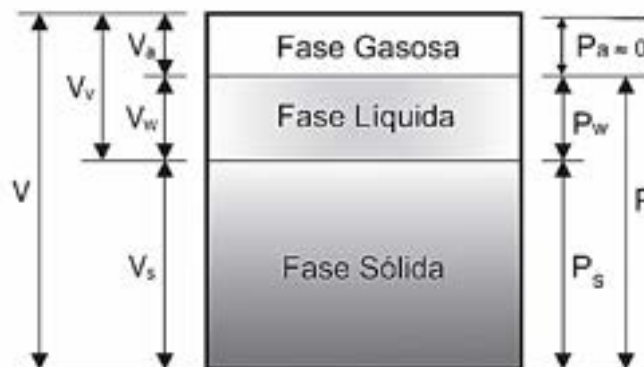
Podemos imaginar que um solo possua apenas grãos (fase sólida), mas se analisarmos um torrão de solo, por exemplo, veremos que ainda podem existir uma fase líquida e uma gasosa (Figura 7).



Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.
Figura 7 – Fases do solo.

Com base na Figura 7, nota-se que todos os componentes sólidos inorgânicos e orgânicos correspondem à fase sólida presente no solo. Nesse contexto, podemos considerar grãos minerais, fragmentos de rocha, restos de matéria orgânica, etc. A fase líquida pode ser exemplificada pela água presente entre as partículas, que pode estar preenchendo vazios, ou seja, espaços entre os grãos, ou ainda estar ao redor das partículas sólidas. Ressalta-se que não é apenas a água que pode representar uma fase líquida. Em campos de exploração de petróleo, o óleo existente entre os grãos minerais também é tratado como fase líquida, apesar de ser mais viscoso em relação à água. A fase gasosa, geralmente, corresponde ao ar existente entre os vazios, mas tomando ainda como exemplo nosso campo de exploração de petróleo, podem existir gases acumulados nos vazios.

A relação entre as fases sólida, líquida e gasosa é capaz de determinar propriedades físicas importantes para subsidiar ensaios complementares e também projetos de engenharia, como a determinação de propriedades, índices, controle de amostras a serem ensaiadas, entre outras. Essas propriedades são denominadas de índices físicos e podem ser expressas em termos de volume e de peso, conforme apresentado na Figura 8.



Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.
Figura 8 – Fases presentes em solos.

Onde:

V = volume total

V_v = volume de vazios

V_a = volume de ar

V_w = volume de água

V_s = volume sólido

P = peso total

P_a = peso de ar (0)

P_w = peso de água

P_s = peso sólido

Os índices físicos podem ser relacionados em termos de peso e volume, utilizando uma série de relações entre eles. A Tabela 1 apresenta algumas dessas relações.

Tabela 1 – Relações entre índices físicos dos solos.

Índice físico	Relação matemática
Peso específico aparente seco	$\gamma_d = \left(\frac{P_s}{V} \right) = \left(\frac{\gamma}{1+w} \right)$
Índice de vazios	$e = \left(\frac{V_v}{V_s} \right) = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1$
Porosidade	$\eta = \left(\frac{V_v}{V} \right) = \left(\frac{e}{1+e} \right)$
Grau de saturação	$S = \left(\frac{V_w}{V_v} \right) = \left(\frac{w \times \gamma_s}{e \times \gamma_w} \right)$
Peso específico saturado	$\gamma_{sat} = \left(\frac{P_{sat}}{V} \right) = (1-\eta) \times \gamma_s + \eta \times \gamma_w$
Peso específico submerso	$\gamma_{sub} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) = (1-\eta) \times (\gamma_s + \gamma_w)$

Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

2.2. Classificação dos solos

O objetivo da classificação dos solos é de prever os seus comportamentos mecânico e hidráulico. Para uma classificação adequada, é fundamental que as características comuns de um determinado grupo de solos sejam destacadas e que, previamente, se tenha informações sobre o comportamento geotécnico desses materiais. Por meio de características qualitativas e quantitativas identificadas ao longo da experiência dos profissionais da mecânica dos solos, as classificações foram corrigidas e adequadas, de modo a se conseguir que solos de mesmas características possam ser colocados em um mesmo grupo.

Muitas classificações se baseiam na origem dos solos (transportados, residuais ou orgânicos), na textura (tamanho das partículas), com base na pedologia (ambiente natural), ou em uma classificação tátil-visual. Algumas consideram interpretações com base em parâmetros geotécnicos (Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS, e o Highway Research Board – HBR, ou American Association State Highway Officials - AASHO).

No SUCS, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Terminologias do SUCS

Sigla / Definição		Solos	Definição	Grupos
G – Pedregulho	W – Bem graduado	Solos grossos	Aqueles que tiveram mais de 50% retidos na peneira de 0,075 mm (#200)	GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM e SC
S – Areia	P – Mal graduado			
M – Silte	H – Alta compressibilidade	Solos finos	Aqueles que tiveram mais de 50 % passado na peneira de 0,075 mm (#200)	ML, MH, CH, CL, OH e Pt
C – Argila	L – Baixa compressibilidade			
O – Solo orgânico				
Pt – Turfas				

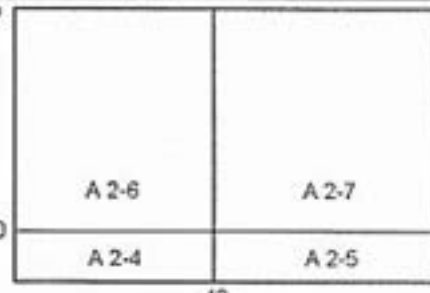
Fonte: adaptado de Sousa Pinto (2006, p. 51).

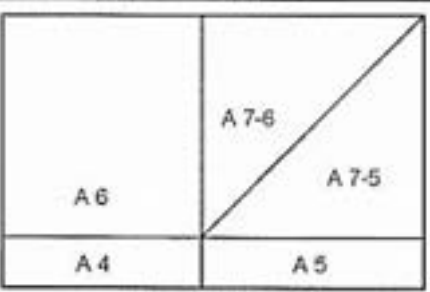
Outra classificação geotécnica importante é a denominada de HBR ou AASHO, sendo mais aplicada a estradas. Esse sistema sofreu revisão entre 1943 e 1945 pelo HBR e foi denominada Transportation Research Board (TRB), também conhecida por sistema de classificação rodoviário. Nesta revisão, alguns grupos foram subdivididos e foi introduzido o índice de grupo (IG), o qual se estabelece em função da porcentagem em peso do material com diâmetro menor que a peneira 0,075 mm, do limite de liquidez (LL) e do índice de plasticidade (IP). O IG é um número inteiro, que serve para dimensionamento de camadas de pavimentos, sendo obtido por meio da fórmula:

$$IG = 0,2 \times (P - 35) + 0,005 \times (P - 35) \times (LL - 40) + 0,01 \times (P - 15) \times (IP - 10)$$

Nesta equação, P representa a porcentagem de solo que passa na peneira 0,075 mm expressa como número inteiro, LL é o limite de liquidez (%) e IP é o índice de plasticidade (%). A Figura 9 apresenta a classificação TRB, que tem como objetivo analisar materiais de base e de subleito de pavimentos.

O IG é um número inteiro que varia de 0 a 20 e define a "capacidade de suporte" do terreno de fundação de um pavimento. Os seus valores extremos representam solos ótimos (IG = 0) e solos péssimos (IG = 20). Para os valores de P, devemos respeitar a regra: se $P > 75\%$ ou 55% , adota-se 75% ou 55% e se $P < 35\%$ ou 15% , adota-se 35% ou 15%. Igualmente para LL e IP temos: se $LL > 60\%$, adota-se 60, e se $LL < 40\%$, adota-se 40 e se $IP > 30\%$, adota-se 30, e se $IP < 10\%$, adota-se 10.

		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3		> 50	< 10	NP
	A-2	IP 			

% P #200 > 35	A-4	IP 			
	A-5				
	A-6				
	A-7-5				
	A-7-6				

Fonte: Sousa Pinto (2006, p. 58).

Figura 9 – Sistema de Classificação Rodoviário (TBR).

Desta forma, os solos são reunidos em grupos e subgrupos. Os solos grossos ou "granulares" compreendem os grupos A – 1; A – 2, A – 3, e os "solos finos", os grupos A – 4, A – 5, A – 6 e A – 7, três dos quais divididos em subgrupos.

A classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), proposta por Nogami e Villibor (1981), hoje é tida como a de maior aceitação e uso no meio técnico rodoviário brasileiro. Baseia em ensaios "subminiaturas" de compactação Mini-MCV (Mini-Moisture Condition Value) com corpos de prova de 50 mm ou 26 mm de diâmetro e perda de massa por imersão de corpos-de-prova. A classificação divide os solos em duas grandes classes de comportamento, ou seja, solo laterítico e solo não laterítico, compreendendo sete grupos.

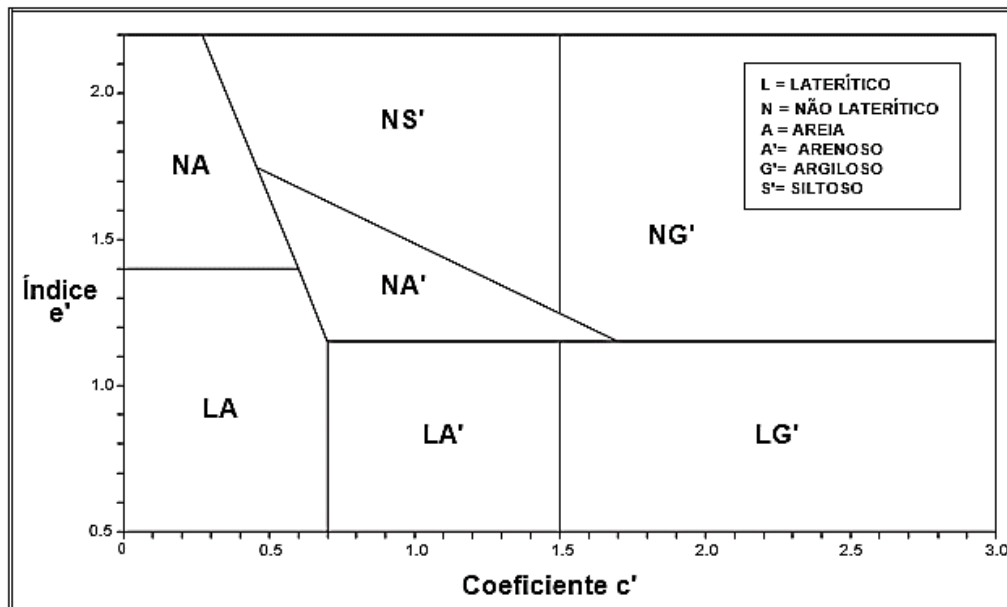
De acordo com os ensaios, é possível classificar os solos em um dos sete grupos, podendo-se, com isso, prever suas propriedades mecânicas e hidráulicas quando compactados para fins de obras viárias. A descrição de cada grupo é:

- **Areias lateríticas (LA):** Neste grupo estão incluídas as areias com poucos finos de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente como areias quartzosas e regossolos;
- **Solos arenosos lateríticos (LA'):** Solos tipicamente arenosos, e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos (textura média). Estes solos, além da presença dos matizes vermelho e amarelo, dão cortes firmes (pouco ou não erodíveis), nitidamente trincados, quando expostos às intempéries;
- **Solos argilosos lateríticos (LG'):** Este grupo é formado por argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Quando apresentam percentagem de areia elevada, tem um comportamento semelhante aos solos do grupo LA';
- **Areias não lateríticas (NA):** Os solos pertencentes a este grupo são as areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. Praticamente não possuem finos argilosos coesivos siltes caoliníticos;
- **Solos arenosos não-lateríticos (NA'):** Compostos granulometricamente por misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades similares) com finos passando na peneira de 0,075mm, de comportamento não laterítico. Geneticamente os tipos mais representativos são solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo tais como os granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros;
- **Solos siltosos não lateríticos (NS'):** Este grupo compreende os solos saprolíticos silto-arenosos peculiares, resultantes do intemperismo tropical nas rochas eruptivas e metamórficas, de constituição predominantemente feldspática-micácea-quartzosa. As variedades mais ricas em areia quartzosa podem ter características mecânicas e hidráulicas que se aproximam dos solos do grupo NA';
- **Solos argilosos não lateríticos (NG'):** Este grupo compreende os solos saprolíticos argilosos, provenientes de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos, siltitos), ou cristalinas pobres em quartzo e ricas em anfibólios, piroxênios e feldspatos cálcicos. Classificam-se neste grupo os solos superficiais pedogenéticos não lateríticos, como os vertissolos bem como muitos solos transportados.

Através do ábaco de classificação (Figura 10), pode-se observar a distribuição destes solos conforme os valores do coeficiente c' e do índice e' .

O coeficiente c' , associado à argilosidade do solo, corresponde às abcissas do ábaco da classificação MCT e o índice e' , que reflete o caráter laterítico do solo, corresponde às ordenadas.

Para a determinação do coeficiente c' e do índice e' , faz-se necessária a realização dos ensaios de Mini-MCV (DNER-ME 258/94) e de Perda de Massa por Imersão (DNER-ME 256/94).



Fonte: Nogami e Villibor, 1981.

Figura 10 – Gráfico da Classificação MCT.

2.3. Ensaios de índices físicos e expansibilidade dos solos

O conhecimento das propriedades do solo é de suma importância para se conseguir decidir se ele poderá ser aproveitado integralmente ou se será preciso enriquecer suas propriedades. As tomadas de decisão são realizadas com base em investigações e na execução de ensaios de campo e de laboratório, podendo-se até optar pela não utilização daquele determinado solo.

Com relação aos índices físicos, pode-se considerar:

- o teor de umidade (w) corresponde à razão entre o peso de água (P_a) existente em certo volume de solo e o peso dos grãos sólidos (P_s) contida nesse mesmo volume de solo;
- massa específica de uma partícula sólida (ρ_s), é a massa do solo seco por unidade do volume que ocupa no espaço;
- a massa específica aparente seca (ρ_d) é a relação da massa dos sólidos pelo seu volume total;
- a densidade relativa dos grãos (G_s) é a razão do peso específico dos sólidos e o peso específico da água (isenta de ar à 4°C e destilada).

Tanto o peso específico aparente seco quanto a massa específica aparente seca, utilizam, respectivamente, a razão entre o peso seco, a massa específica seca da amostra e o volume total. O volume total engloba o volume de vazios, que devemos eliminar para o cálculo do peso específico, e a massa específica dos grãos.

3. COMPACTAÇÃO DO SOLO

De forma bem geral, pode-se dizer que a compactação representa o incremento da massa específica de um solo, por meios mecânicos ou manuais, permitindo a redução dos vazios. Assim, quando da avaliação de um solo, nota-se que, no campo, ele poderá apresentar-se com certo arranjo de seus grãos, e, caso seja transportado, esse arranjo será diferente, havendo aumento dos vazios.

Portanto, ensaios de campo e de laboratório em solos fornecem subsídios para estimar seu comportamento quanto a compactação, expansão e resistência.

3.1. Princípios gerais da compactação

Trata-se da teoria das técnicas de compactação, em campo e laboratório, compreendendo a sua importância às obras de engenharia. Em obras de pavimentação é exigido a utilização da compactação, responsável pela mudança de suas propriedades naturais dos solos, buscando aumento de resistência e homogeneidade.

Na técnica de compactação, o lançamento do solo é realizado em camadas horizontais e posteriormente são passadas máquinas com rolos compressores, reduzindo os vazios do solo. Nota-se que o processo mecânico atual aplica certo peso, aumentando a massa específica aparente e conseqüentemente a sua resistência.

A técnica da compactação em obras de pavimentação é necessária, pois um solo, em determinado local, pode não apresentar as condições necessárias de projeto. Diante deste cenário, ele pode ser pouco resistente, muito compressível ou apresentar características naturais que possam impactar economicamente uma obra.

A compactação dos solos apresenta grande importância, já que por meio dessa técnica é possível fornecer ao solo aumento de sua resistência e diminuição de sua compressibilidade e permeabilidade. A compactação é considerada como uma boa alternativa para que essas propriedades sejam melhoradas, sendo realizada mecanicamente por meio de rolos compactadores, por exemplo, ou mesmo manualmente, com soquetes manuais. Como o peso específico representa a razão entre a massa e o volume de um solo, então se o volume desse solo reduz, mantendo a massa constante, o peso específico também aumentará. Observando-se a Figura 11, percebe-se que a compactação produz um maior entrosamento entre os grãos, aumentando propriedades dos solos, como a coesão e o ângulo de atrito, favorecendo a resistência ao cisalhamento. Se aumentarmos a resistência ao cisalhamento, conseqüentemente aumentaremos também a capacidade de suporte do solo.



Fonte: <<https://goo.gl/v5o5F1>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

Figura 11 – Aspecto dos grãos do solo antes e após compactação.

Da mesma forma, com a redução de vazios, a permeabilidade do solo e sua capacidade de absorção d'água reduzem, tornando o solo mais estável. A Figura 12 apresenta de modo resumido alguns mecanismos para que seja feita a estabilização de um solo.

Método	Processo
Físico	Confinamento (solo com atrito entre as partículas); pré-consolidação (solos finos argilosos); mistura (solo + solo); vibroflotação
Químico	Adição de sal; cal; cimento; asfalto
Mecânico	Compactação

Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

Figura 12 – Métodos utilizados para a estabilização de solos.

O principal objetivo da compactação é a redução da compressibilidade, da variação volumétrica por umedecimento e da secagem, da permeabilidade e da absorção de água, resultando no aumento da resistência mecânica do solo.

Existem alguns ensaios para a determinação da compactação, tanto em laboratório (ensaio de Proctor, ABNT NBR 7182 - Solo – Ensaio de compactação), quanto em campo (cilindro de cravação, ABNT NBR 9813 - Solo - Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação ou frasco de areia; ABNT NBR 7185 - Solo - Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do frasco de areia). O ensaio de Proctor é utilizado como referência para comparação com resultados obtidos em campo e, posteriormente, efetuadas as devidas liberações das camadas de solo constituintes da estrutura do pavimento. Esses ensaios adotam como princípio correlações existentes entre a massa específica aparente seca (p_d), a umidade (w) e a energia que será empregada na compactação, utilizando o ensaio idealizado por Proctor. Com este procedimento, conclui-se que existe uma umidade ótima necessária para compactar a estrutura constituída de solo no pavimento, para cada energia de compactação (dada pelo peso do rolo compressor e pelo número de passadas por camada).

3.2. Ensaio Proctor

A determinação da densidade seca máxima e o teor de umidade ótimo do solo (obtido através da construção da curva de compactação) é realizado por meio do ensaio de Proctor, variando-se a energia de compactação conforme três tipos de ensaio (Normal, Modificado e Intermediário), além da variação do teor de umidade para a mesma amostra.

Basicamente o ensaio consiste na utilização de um cilindro metálico (volume de 1 l), onde a amostra sofre compactação, cada uma através de golpes a partir de um determinado peso em queda livre. A Tabela 3 apresenta um resumo sobre as técnicas empregadas em laboratório para o ensaio Proctor com algumas características de cada ensaio.

Tabela 3 – Métodos utilizados para a estabilização de solos

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5
Fonte: ABNT NBR 7182:2016 – Solo – Ensaio de compactação.				

Outro ensaio comumente utilizado na prática da compactação é o Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR – California Bearing Ratio), apresentado na Figura 13, que significa a relação entre a pressão exercida por um pistão, de diâmetro padronizado, necessária à penetração no solo, até determinado ponto. Esse ensaio é descrito na ABNT NBR 9895 - Solo - Índice de Suporte Califórnia.



Figura13 – Ensaio de CBR.

O ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) possibilita conhecer qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado. Indica também a perda de resistência do solo com a saturação.

O principal objetivo desse ensaio é fornecer o Índice de Suporte Califórnia (CBR) como índice de resistência do solo compactado.

3.3. A compactação do campo

Na construção de vias e acessos, a compactação possibilita a execução imediata do pavimento definitivo, sem o impacto de possíveis recalques futuros, devido ao aumento da capacidade de suporte do subleito, gerando pavimentos mais econômicos.

Devido à necessidade da adoção de padrões de compactação e do aprimoramento das técnicas das exigências dos projetos, muitos equipamentos foram desenvolvidos de forma a suprir tal necessidade e, conseqüentemente, a energia de compactação sofreu modificação (aumento do peso dos soquetes, altura de queda e especialmente a adoção de equipamentos robustos como rolos e compactadores mecânicos). Essa modificação foi motivada principalmente devido ao aumento na produtividade das obras, de uma maneira mais econômica. A Tabela 4 apresenta as energias de compactação para os ensaios Proctor.

Tabela 4 – Energias de compactação.

Ensaio	Energia de compactação (kg.cm/cm³)
Normal	5,7
Intermediário	12,6
Modificado	26,6

Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

Energia de compactação é o esforço de compactação de um trabalho executado, por uma unidade de volume de solo após compactação. Ela pode ser determinada pela expressão:

$$E = \frac{P \times h \times N \times n}{V}$$

Onde:

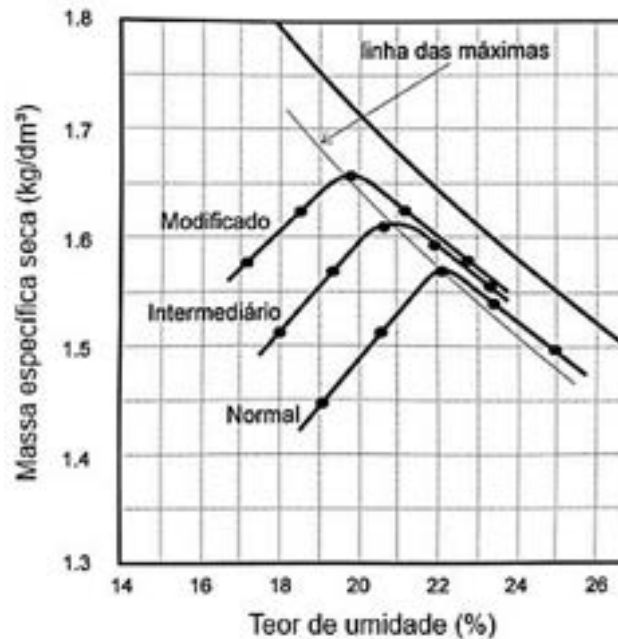
E corresponde à energia de compactação (por volume, representado por V);

P é o peso do soquete;

h representa a altura de queda do soquete;

N e n são o número de golpes por camada e o número de camadas, respectivamente.

A influência da energia de compactação é observada nos parâmetros físicos dos solos mediante gráfico contemplado na Figura 14.

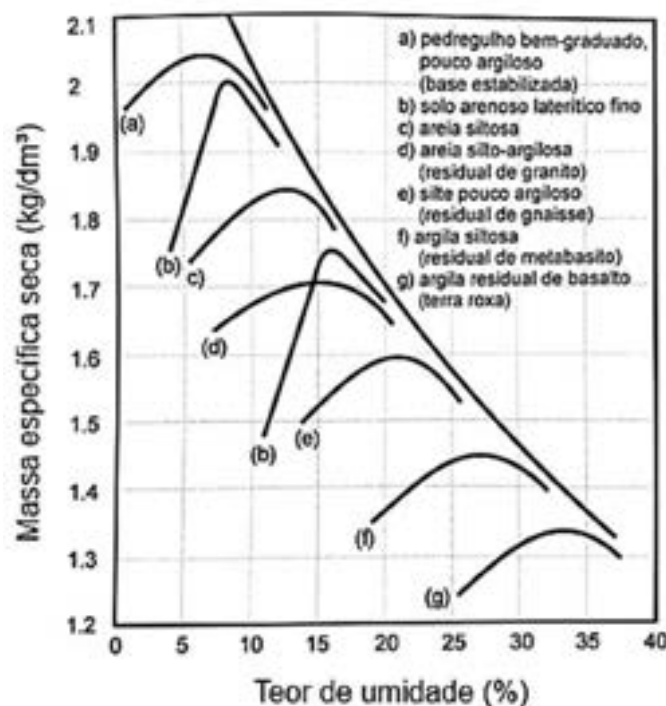


Fonte: adaptada de Pinto (2006, p. 83)

Figura 14 – Curvas de compactação para energias Proctor.

Conforme o aumento da energia, a massa específica seca do solo também aumenta, com a redução do teor de umidade. Além da energia, as características dos solos na eficiência da compactação são consideradas fundamentais.

A Figura 15 apresenta a variação da massa específica pelo teor de umidade, para uma dada energia, para diferentes tipos de solos.



Fonte: adaptada de Pinto (2006, p. 80)

Figura 15 – Curvas de compactação para diferentes solos.

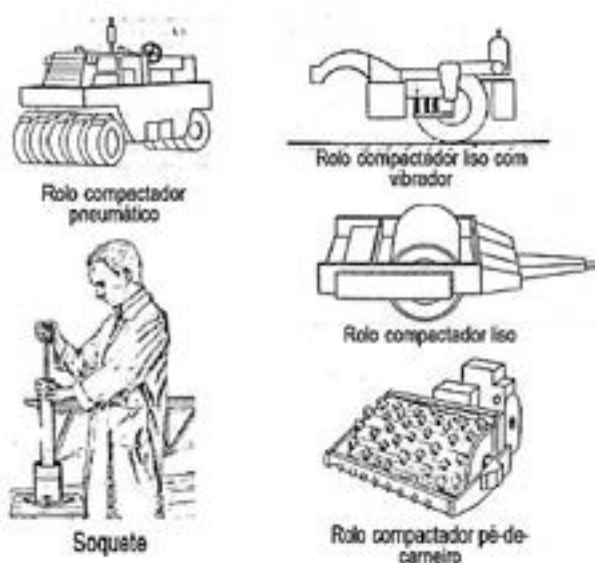
A Tabela 5 apresenta alguns valores típicos de umidade ótima ($W_{ótima}$) e densidade seca máxima ($\gamma_{dsmáx}$) para alguns solos típicos.

Tabela 5 – Valores de $W_{ótima}$ e $\gamma_{dsmáx}$ para solos típicos.

Solos	$W_{ótima}(\%)$	$\gamma_{dsmáx} (kN/m^3)$
Solos argilosos	25 a 30	14 a 15
Solos siltosos	curvas abatidas e baixos valores de $\gamma_{smáx}$	
Arelas bem graduadas com pedregulhos	9 a 10	20 a 21
Arelas finas argilosas lateríticas	12 a 14	19

Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

Há vários equipamentos que podem ser utilizados para execução da prática de compactação, os quais são divididos em três categorias a saber: os soquetes mecânicos, os rolos estáticos e os rolos vibratórios, conforme alguns exemplos apresentados na Figura 16.



Fonte: Vargas (1977, p. 49 e 57 a 59).

Figura 16 – Equipamentos de compactação.

Os soquetes são equipamentos compactos utilizados em locais de difícil acesso a outros equipamentos, podendo ser manuais ou mecânicos. Podem também ser utilizados compactadores mecânicos automáticos, popularmente conhecidos como “sapos”, conforme apresentado na Figura 17.



Figura 17 - Equipamento de compactação mecânico (sapo).

Já os rolos estáticos são representados por rolos pés-de-carneiro, rolos lisos de roda de aço e pneumáticos.

Os rolos pés-de-carneiros são indicados para solos não arenosos, promovendo um maior entrosamento entre as camadas pós compactação. São equipamentos robustos compostos por cilindros metálicos com protuberâncias (pés-de-carneiro), conforme apresentado na Figura 18.



Figura 18 - Equipamento de compactação mecânico tipo rolo pé-de-carneiro.

A eficácia em sua utilização está relacionada com a pressão e a área de contato de cada pé, com o peso do rolo e com o número de pés por tambor que estão em contato com o solo.

Já os rolos lisos são indicados para solos arenosos, pedregulhosos ou compostos por agregados graúdos. Trata-se de um cilindro oco de aço, conforme apresentado na Figura 19, preenchido ou não por areia umedecida ou água, com o objetivo de aumentar a pressão.



Figura 19 - Equipamento de compactação mecânico tipo rolo liso.

Em solos finos, o peso do rolo varia em função da baixa ou da alta plasticidade. Assim, em solos de baixa plasticidade são usados rolos de 7 toneladas e para alta, rolos de 10 toneladas.

Já os rolos pneumáticos são indicados para compactação de solos finos a arenosos, bem como capas asfálticas, bases e sub-bases de pavimentos, conforme Figura 20.



Figura 20 - Equipamento de compactação mecânico tipo rolo pneumático.

Sua eficiência na compactação está relacionada com a área de contato, pressão dos pneus e peso do equipamento.

Por fim, os rolos vibratórios (Figura 21), cuja compactação do solo é consequência da vibração do equipamento, sendo eficientes em solos arenosos. A frequência de vibração possui um efeito singular no processo de compactação.



Figura 21 - Equipamento de compactação mecânica tipo rolo vibratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. – Curso de Tecnologia de Pavimentos de Concreto: Módulo 2 - Projeto e Dimensionamento do Pavimento. Em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Pavim_Concreto_Apres_Mod02%20ABCP.pdf>.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16935/21 - Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16940/21 - Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16942/21 - Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSUMPÇÃO, A. J., CAREIRO, D. S., MENEZES, F. F. C., MILANEZI, M. R. – Pavimento Rígido de Concreto: Utilização nos Corredores de Ônibus de São Paulo. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo, 2014.

BALBO, J. T. – Pavimentos de Concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BRITO, L. A. T., GRAEFF, Â. G. – Métodos de Dimensionamento de Pavimentos: Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações. Relatório Final de Pesquisa. Porto Alegre, 2009.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. – Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. – Manual de Pavimentos Rígidos. 2.ed. - Rio de Janeiro, 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. – NORMA 054/2004 - PRO. Pavimento Rígido - Estudo de Traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. – NORMA 139/2010 - ES. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

PITTA, M. R. – Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84. 2ª edição, São Paulo, ABCP, 1996.

PITTA, M. R. – Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84. 3ª edição, São Paulo, ABCP, 1998.

PITTA, M. R. – Pavimento de Concreto, Parte 1. 1999. Disponível em: <piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/pavimento-de-concreto-parte-1-85160-1.aspx>.

SENÇO, W. – Manual de Técnicas de Pavimentação. São Paulo: PINI. 174 p., 1997.

DNIT 054/2004 – PRO – Pavimento rígido – Estudos de traços e ensaios de caracterização de matérias.

DNIT 047/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte.

DNIT 048/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho.

DNIT 049/2013 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de forma deslizante.

DNIT 141/2010 – ES – Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.

DNIT 056/2013 – ES – Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo.

NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento.

NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. NBR 9895 – Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.

NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação.

NBR 7583 – Execução de pavimento de concreto simples por meio mecânico.

NBR 7223 – Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone - Ensaio de abatimento.

NBR 7680 – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto.

NBR 12142 – Determinação da resistência à tração em corpos de prova prismáticos. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação.

NBR 16938-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade.

NBR 16939-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio.

NBR 16940-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio.

NBR 16942-02/21 – Fibras Poliméricas para Concreto – Requisitos e Métodos de Ensaio. ABNT PR1011/2021 – Projeto de Pavimentos Urbanos de Concreto, Rio de Janeiro, 2021.

ASTM D5893 – Standard Specification for Cold Applied, Single Component, Chemically Curing Silicone Joint Sealant for Portland Cement Concrete Pavements.

ASTM C-42 – Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.

ASTM C 309 – Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.

DNER-ME 024/94 – Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman.

DNER-PRO 273/96 – Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.

ET-DE-P00/001 – DER/SP – Melhoria e preparo do subleito. ET-DE-P00/002 – DER/SP – Reforço do subleito.

ET-DE-P00/008 – DER/SP – Especificação técnica Sub-base ou Base de Brita Graduada.

ET-DE-P00/044 - DER/SP – Concreto Compactado com Rolo para Sub-base e Base de Pavimento de Concreto de Cimento Portland.

ET-DE-P00/039 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Aplicado com Formas Deslizantes.

ET-DE-P00/040 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem - Manual.

ET-DE-P00/041 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem - Mecânico.

NBR 7212 – Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle.

NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento.

NBR 14931 – Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos.

DNIT 050/2004 – EM – Pavimento rígido – Cimento Portland Especificação de material. DNER-EM 037 – Agregado graúdo para concreto de cimento.

NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

NBR NM 47 – Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico.

NBR NM 102 – Concreto – Determinação da exudação.

ACI 360 R10 – Guide to Design of Slabs-on-Ground.

ACI 330 R08 – Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots.

ACI 330 R21 – Commercial Concrete Parking Lots and Site Paving Design and Construction.

ACI 330.2R/17 – Guide for the Design and Construction of Concrete Site Paving for Industrial and Trucking Facilities.

ACI 325.14R/17 – Guide for Design and Proportioning of Concrete Mixtures for Pavements.

ACI 325.9R/15 – Guide for Construction of Concrete Pavements.

American Concrete Pavement Association – Subgrades and Subbases for concrete pavements.

American Concrete Pavement Association – Concrete Information - When do you need to use a subbase under concrete pavements?.

American Concrete Pavement Association – Concrete Information – Design and Construction of Joints for Concrete Streets.

Esta publicação foi
elaborada pelas
Coordernadorias Técnicas
da ABESC e Falcão Bauer e
não pode ser reproduzida
no todo ou em partes sem
sua prévia autorização.



Av. Brig. Faria Lima, 2894 - 7°. andar - cj. 71/72
São Paulo - SP - CEP 01451-902
Tel: (11) 3167-6446

PUC
PAVIMENTO
URBANO DE
CONCRETO



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

CAPÍTULO II
CONCRETO

MAR/25



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC

PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

CAPÍTULO II - CONCRETO

CAPÍTULO II - CONCRETO

INTRODUÇÃO

O concreto é um material de construção composto por um meio aglomerante (cimento + água), agregados miúdos e agregados graúdos, podendo ou não ter componentes minoritários, como aditivos e adições. Os constituintes normais ao concreto podem ser descritos como:

- Cimento Portland: aglomerante hidráulico constituído de uma mistura de clínquer Portland e gesso;
- Agregado: material granular inerte (pedra, areia etc.), cujas partículas são ligadas entre si por um aglomerante (cimento);
- Aditivos: produto em pó ou no estado líquido, adicionado ao concreto, geralmente em pequenas quantidades, com o objetivo de modificar as propriedades do concreto;
- Adições: material finamente distribuído, usado no concreto, geralmente em maior quantidade que os aditivos, com o intuito de melhorar qualidades específicas.

É fundamental conhecer as propriedades do concreto, tanto no seu estado fresco (recém-misturado) como no estado endurecido, quando reações entre o aglomerante e a água se processam, fazendo com que o concreto adquira coesão e resistência mecânica. Para a obtenção de um concreto DURÁVEL e econômico, é necessário atentar-se a:

- Características e formas de uso de cada um dos materiais constituintes do concreto;
- Capacidade de reconhecer e medir as propriedades do concreto e de saber como podemos alterá-las para atender a demandas específicas de cada empreendimento;
- Ter conhecimento de como realizar a mistura, o transporte, o lançamento, o adensamento, o acabamento e a cura do concreto, de forma a atender às especificações requeridas em projeto;
- Preocupar-se com o atendimento às especificações durante a execução e após o endurecimento do concreto e saber tomar decisões caso não sejam atendidas as exigências de projeto.

O Capítulo II contempla os seguintes temas:

1. Aglomerantes

São apresentados os principais aglomerantes utilizados na Construção Civil e suas características físicas e químicas.

2. Agregados graúdos e miúdos

Aborda os agregados graúdos e miúdos, suas propriedades, constantes físicas e granulometria.

3. Concreto no estado fresco

O concreto fresco é preparado pela mistura manual ou mecânica dos componentes. Geralmente, o concreto é misturado com auxílio de betoneiras. São apresentadas algumas propriedades, tais como consistência, massa específica e teor de ar incorporado.

4. Concreto no estado endurecido

Para obtenção de um concreto de boa qualidade, é necessária a utilização de materiais que atendam às especificações de projeto, bem como a dosagem controlada dos materiais constituintes em proporções adequadas, lançamento do sem provocar segregação, compactação do concreto por meio de vibração. As propriedades do concreto endurecido dependem dos cuidados anteriormente citados e ainda das condições de cura promovidas.

5. Durabilidade do concreto

A durabilidade de um concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

1. Aglomerantes

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio. Estes silicatos e aluminatos ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da nata, argamassa ou concreto, que oferecem a resistência mecânica. Constitui-se exclusivamente de clínquer, com pequena adição de controlador de pega, geralmente sulfato de cálcio (gesso). São permitidas adições, desde que atendam aos tipos de adições (fíler, escória, pozolana) e respectivos percentuais, estabelecidos em normas brasileiras publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

1.1 Adições ao cimento Portland

A Figura 1 apresenta de modo ilustrativo a constituição do cimento Portland.

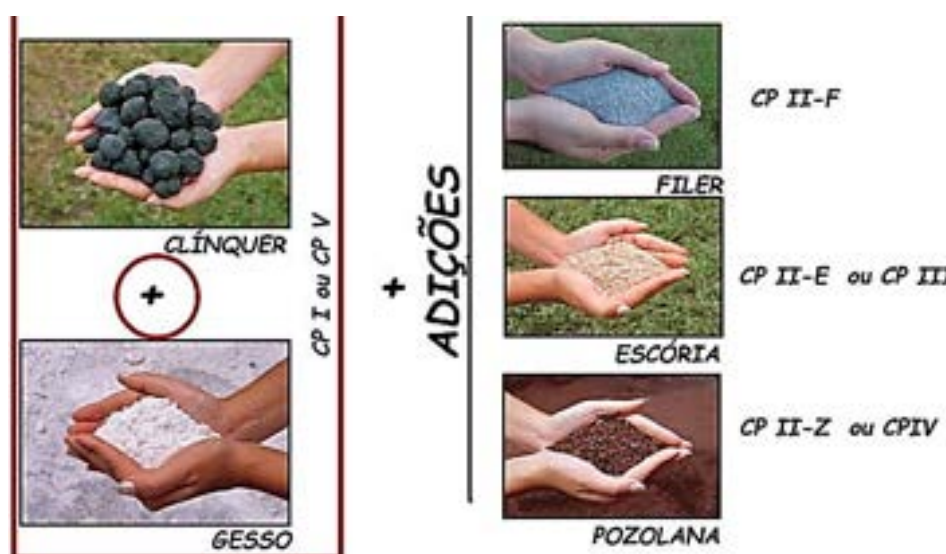


Figura 1 – Constituintes do cimento Portland.

1.2 Tipos de cimento e aplicação do concreto

A Tabela 1 apresenta esquematicamente os tipos de cimento requeridos em função das aplicações do concreto e de suas propriedades desejadas.

Tabela 1 – Tipos de cimento e aplicação do concreto

APLICAÇÕES	PROPRIEDADE DESEJADA	TIPO DE CIMENTO
Concreto simples e armado	Resistência de projeto	I, II, III e IV
Pavimento de concreto	Pequena retração	I, II, III, IV e V
Pisos industriais de concreto	Resistência à abrasão	I, II, III, IV e V
Solo-cimento	Aglomerante	I, II, III e IV

1.3 Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

O tipo de cimento utilizado impacta de maneira decisiva em importantes características do concreto e da argamassa. A Tabela 2 apresenta de maneira resumida a intensidade dessa influência sobre essas características.

Tabela 2 – Tipo de cimento x Características do concreto/argamassa

Grau de influência		Tipo de Cimento					
		Comum e Composto	Alto Forno	Pozolânico	ARI	Resistente a Sulfatos	Banco Estrutural
Características	Resistência a compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão
	Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior
	Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão
	Resistência aos agentes agressivos (água do mar e esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor
	Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão

2. AGREGADOS

2.1 Definição

Materiais granulares, sem forma e volume definidos, geralmente inertes, com dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. Os principais agregados utilizados em construções são a areia e a pedra (brita).

2.2 Importância

Os agregados constituem uma elevada porcentagem (cerca de 75%) do concreto, portanto, as suas características apresentam elevada importância nas proporções empregadas e na economia do concreto.

Em geral devem ser formados por partículas duras e resistentes, isentas de produtos deletérios, tais como: argila, mica, silte, sais, matéria orgânica, entre outros.

A composição granulométrica dos agregados é determinada em ensaios padronizados de peneiramento. As curvas granulométricas devem ficar dentro de limites estabelecidos em especificações, de modo que os agregados apresentem um bom entrosamento, com pequeno volume de espaço vazio entre suas partículas. Esse bom entrosamento resulta em economia de pasta de cimento, que é o material mais caro do concreto.

Denomina-se porcentagem acumulada em uma dada peneira a porcentagem das partículas de agregado maiores que a abertura (#) dessa peneira. A composição granulométrica é representada em uma curva, tendo como abscissa as aberturas das peneiras e como ordenadas as respectivas porcentagens acumuladas.

Fator econômico - o agregado é o componente volumétrico mais importante na fabricação do concreto, sendo responsável por 75% do volume total desse material. Permite a redução dos custos de fabricação do concreto por ser o elemento de custo mais baixo por unidade de volume.

2.3 Classificação

2.3.1 Quanto à Origem

- **Naturais:** encontrados na natureza já na forma granular (areia de rio, seixo rolado/pedregulho) ou obtidos após simples britagem (areia artificial, brita, pó de pedra);
- **Artificiais:** produzidos industrialmente a partir de matérias primas naturais ou artificiais (argila expandida, vermiculita expandida).

2.3.2 Quanto as Dimensões

- **Miúdo:** areia natural quatzosa ou artificial resultante do britamento de rochas estáveis ($\varnothing_{\text{max}}$ inferior ou igual a 4,8 mm);
- **Graúdo:** pedregulho natural, pedra britada com diâmetro máximo superior a 4,8 mm, tendo ao mesmo tempo, pelo menos 85% do material em peso retido acumulado na peneira de abertura 4,8 mm.

2.3.3 Quanto à massa específica

- **leve:** inferior a 2 g/cm³ (agregados pedra pomes, vermiculita, argila expandida);
- **normal:** entre 2 g/cm³ e 3 g/cm³ (areia quatzosa, brita, seixo rolado);
- **pesado:** superior a 3 g/cm³ (barita, magnetita) ($\gamma_{\text{barita}} = 6,8 \text{ g/cm}^3$).

2.4 Características das rochas de origem

2.4.1 Resistência Mecânica

- **à compressão:** a resistência varia conforme o esforço de compressão se exerça paralela ou perpendicularmente ao veio da pedra. O ensaio se faz em corpos-de-prova cúbicos de 4 cm de lado. Sob o aspecto de resistência à compressão, estes materiais não apresentam qualquer restrição ao seu emprego no preparo de concreto normal, pois tem resistência muito superior às máximas dos concretos;
- **ao desgaste:** a pasta de cimento e água não resiste ao desgaste. Quem confere esta propriedade aos concretos é o agregado. Ao desgaste superficial dos grãos de agregado quando sofrem abrasão. A resistência à abrasão mede, portanto, a capacidade que tem o agregado de não se alterar quando manuseado (carregamento, basculamento, estocagem). Em algumas aplicações do concreto, a resistência à abrasão é característica muito importante, como por exemplo em pistas de aeroportos, em vertedouros de barragens e em pistas rodoviárias, pois o concreto sofre grande desgaste superficial. A resistência à abrasão é medida na máquina “Los Angeles”. A : ABNT NBR NM 51 trata do ensaio à abrasão, dando as características da máquina e das cargas de agregado e esferas de ferro. O cilindro é girado durante um tempo determinado, sofrendo, o agregado, desgaste superficial e também um certo choque causado pelas esferas de ferro. Retirada do cilindro, a amostra é peneirada na peneira de 1,7 mm; o peso do material que passa expresso em porcentagem do peso inicial, é a “Abrasão Los Angeles”.

2.4.2 Parâmetros de qualidade de um agregado

Os agregados chegam a ocupar em torno de 70% do volume final do concreto. Portanto é importante que os agregados naturais atendam aos seguintes requisitos:

- **Resistência aos esforços mecânicos** – $f_c > 600 \text{ kgf/cm}^2$ a 1.600 kgf/cm^2 ;
- **Substâncias nocivas** – devem ser isentos de materiais pulverulentos, torrões de argila, materiais carbonosos (carvão mineral);
- **Impurezas orgânicas** – devem ser isentos de húmus, dejetos, açúcares, graxas, restos de vegetais, etc;
- **Durabilidade e resistência química** – alguns feldspatos e xistos decompõem lentamente sob a ação da água devendo, portanto, serem evitados;
- **Reatividade potencial** – alguns agregados naturais (calcedônia, opala e calcários dolomíticos) reagem com o álcalis do cimento (NaOH e KOH), resultando compostos expansivos e por isso devem ser evitados;

- **Forma e distribuição dos grãos** – os agregados devem apresentar formato arredondado e granulometria mais contínua possível; isto resultará na melhoria da trabalhabilidade e na redução do consumo de cimento.

A granulometria ótima de um agregado corresponde, para uma mesma consistência, ao consumo mínimo de cimento. A forma geométrica dos agregados graúdos influi consideravelmente na qualidade dos concretos. Para agregados de origem natural considera-se que a forma geométrica mais adequada seja a esférica, enquanto que, no caso de britas, a forma cúbica deve ser priorizada. Baseado nas relações entre o comprimento (C), largura (L) e espessura (E) os agregados graúdos podem ser classificados em: alongados, cúbicos, lamelares e discóides conforme as relações entre as três dimensões, as quais definem o coeficiente de forma.

Quanto menor o tamanho dos grãos, maior será a Superfície Específica (SE) e a quantidade de água necessária para molhagem.

2.5 Especificações para Agregados – ABNT NBR 7211

2.5.1 Granulometria

A ABNT NBR 7211 apresenta faixas granulométricas ideais para agregados miúdos e graúdos. O método de ensaio para determinação da curva granulométrica deve seguir o especificado nessa norma.

Agregados miúdos:

São constituídos de partículas de dimensões tais que, no máximo, 15% ficam retidos na peneira de 4,8 mm (peneira #4) (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100
NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.				

- **Diâmetro máximo:** corresponde à abertura da peneira em que fica retida, acumulada, uma porcentagem de agregado igual ou inferior a 5%;
- **Módulo de finura:** a classificação das areias quanto ao módulo de finura segue o especificado no rodapé da Tabela 2 da ABNT NBR 7211.

Agregados Graúdos:

Pedregulho natural, seixo rolado ou pedra britada, proveniente do britamento de rochas estáveis, com um máximo de 15% passando na peneira de 4,8 mm (peneira #4). Podem ser de origem natural (seixo ou pedregulho) ou artificial (trituração mecânica de rochas de granito, basalto e gnaiss). A distribuição granulométrica, determinada segundo a ABNT NBR NM 248, deve atender aos limites indicados para o agregado gráudo constantes na Tabela 6 da ABNT NBR 7211 (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Limites da composição granulométrica do agregado gráudo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

^a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado gráudo.

^b Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT NBR 7211/2009.

- **massa específica real (γ):** excluem-se os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos. Determinado através do Frasco de Chapman. Para agregado miúdo e através da balança hidrostática para agregados gráudos.
- **massa específica aparente:** (ou massa unitária) consideram-se os vazios, permeáveis ou impermeáveis, contidos nos grãos. Massa por unidade de volume, sem compactar.

2.5.2 Impurezas dos agregados

As impurezas presentes nos agregados provocam modificações consideráveis nas características dos produtos argamassa e concreto.

- a) Material Pulverulento: Os materiais pulverulentos como a argila ($< 2 \mu\text{m}$) e o silte (entre $2 \mu\text{m}$ e $6 \mu\text{m}$), exercem um efeito prejudicial quando envolvem os grãos do agregado, pois impedem que ocorra uma boa aderência com o aglomerante. Por terem elevada S.E. (superfície específica) podem aumentar a relação água/cimento. Em alguns casos a lavagem pode melhorar o desempenho do agregado.
 - Limites para agregado miúdo: em concreto submetido a desgaste superficial - máximo de 3% e nos demais concretos máximo de 5%;
 - Limites para agregado graúdo: máximo de 1%.
- b) Impurezas orgânicas: as partículas de humus exercem um efeito prejudicial sobre a pega e o endurecimento das argamassas e do concreto, provocando uma redução de suas características mecânicas. A determinação das impurezas orgânicas só é realizada para agregados miúdos.

Foi observado efeito quando da exploração de portos de areia à jusante de usinas de cana-de-açúcar. A liberação de vinhoto (vinhaça) no leito dos rios e a posterior exploração das jazidas de areia, provocou sérios problemas na qualidade do concreto. A sacarose exerce uma forte inibição à pega e ao endurecimento do cimento, alterando as características mecânicas da argamassa e do concreto. Quando existir dúvida quanto à procedência do agregado, podem ser efetuadas análises químicas ou, então, verificar a resistência à compressão de argamassa confeccionada com esse tipo de agregado.

O método de ensaio para determinação do teor de Matéria Orgânica é especificado pela ABNT NBR NM 49 e consiste em comparar a cor da solução de NaOH em contato com a areia por período de 24 h com a cor da solução padrão, se for mais escura deve-se rejeitar o lote.

2.5.3 Teor de Umidade da areia

Deve-se corrigir as quantidades de água e areia a serem empregadas numa mistura. Pode ser determinada de diferentes maneiras, aplicáveis ou não ao canteiro de obras.

- Inchamento da areia (ABNT NBR 6467).

Afastamento entre os grãos de areia provocado pela água adsorvida aos grãos. O coeficiente de inchamento (I) torna-se mais importante quando aumenta a superfície específica dos grãos (ou seja, quanto mais fino for o agregado). A partir da variação da umidade da areia, pode-se construir um diagrama relacionando a umidade (h%) com a razão entre os volumes úmidos (V_h) e seco (V_0). O inchamento máximo ocorre para valores de

umidade situados entre 4% e 6%. Areias finas apresentam maior inchamento, devido à maior superfície específica.

3. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As mais importantes propriedades do concreto fresco são: a trabalhabilidade, a integridade de massa (oposto de segregação) e o poder de retenção da água (oposto da exsudação).

A composição (traço) do concreto destinado à execução de pavimentos rígidos deverá ser determinada por método racional, conforme requisitos especificados nas normas NBR 7212, NBR 12655 e NBR 12821, de modo a obter-se com os materiais disponíveis na região uma mistura fresca de trabalhabilidade adequada ao processo construtivo empregado e, simultaneamente, um produto endurecido compacto e durável, de baixa permeabilidade (alta densidade), e que satisfaça às condições de resistência mecânica e acabamento superficial impostas pela especificação, que deve acompanhar o projeto do pavimento.

Tal composição (carta traço) sendo acrescido pela inserção de macrofibras estruturais para reforço secundário que atenda as normas (ABNT NBR 16935/16940/16942-21) assim como as especificações de resistência dos projetos, sendo imprescindível que as fibras atendam as normas específicas da ABNT bem como o desempenho mínimo exigido do material na pós fissuração.

3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto fresco pode ser entendida como a maior ou menor facilidade que o concreto apresenta de ser transportado, lançado e adensado sem perder sua homogeneidade e sem deixar espaços vazios entre as armaduras ou quaisquer outros locais das formas.. Para o concreto, ainda no estado plástico, esta é a sua principal propriedade.

Na realidade, trabalhabilidade reúne um conjunto de características que tornam um concreto idôneo e de fácil colocação nos elementos a serem concretados. Compõe-se de fatores intrínsecos interrelacionados a fatores extrínsecos à própria massa do concreto.

Como fatores intrínsecos tem-se: atrito interno, coesão, viscosidade, homogeneidade, traço adequado para preenchimento dos vazios, entre outros.

Como fatores extrínsecos tem-se: dimensões da peça a concretar, relação volume/superfície do elemento; quantidade e disposição de armaduras, equipamentos de transporte, lançamento, adensamento, entre outros.

Como não se consegue medir todas essas características, inclusive porque alguns são de difícil quantificação, avalia-se a trabalhabilidade de um concreto indiretamente através de sua consistência.

3.2 Consistência

A consistência pode ser definida como a resistência que opõe a massa de concreto fresco à sua deformação. Pode também ser entendida como o grau de plasticidade da mistura, ou seja, sua maior ou menor facilidade de deformação sob ação de cargas. É um dos principais fatores que influenciam a trabalhabilidade, não devendo, no entanto, ser confundida com ela. É muito difícil de ser prevista previamente por simples observação visual, pois depende de vários fatores, tais como: diâmetro máximo do agregado graúdo, granulometria dos agregados, traço, fator água/cimento, etc. Como ferramentas, para a determinação dessa propriedade, foram desenvolvidos alguns métodos de ensaio que traduzem em número (quantificação) a consistência de misturas.

O mais procedimento mais utilizado é o “abatimento do tronco de cone” (ABNT NBR 16889): mede-se através do abatimento ou perda de altura em cm, que experimenta uma determinada massa de concreto, ao se retirar o molde tronco cônico, proposto por Abrams e denominado “Cone de Abrams”. O concreto que foi adensado no tronco de cone em três camadas, com 25 golpes de barra de aço de 1/2", por camada, abate após a desmoldagem (Figura 2). É o mais simples e o mais divulgado, sendo empregado largamente em obras e laboratórios de ensaios. É mais recomendado para concretos de consistência medianamente plástica fluída; não sendo recomendável a concretos muito secos ou pobres.

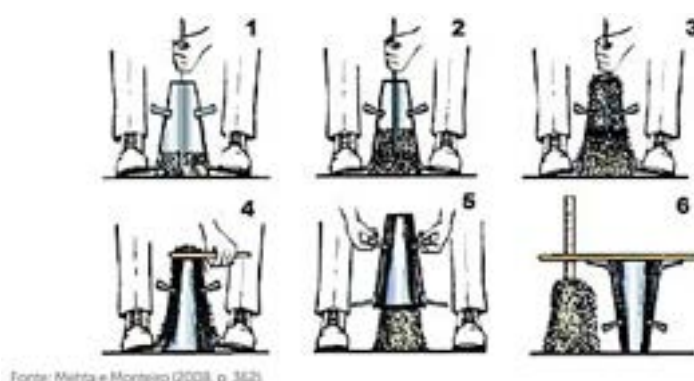


Figura 2 – Ensaio de abatimento (tronco de cone).

3.3 Segregação

A segregação dos constituintes do concreto corresponde a uma separação dos constituintes antes do início de pega. Esta separação pode ser ocasionada por excesso de agregados graúdos, o que corresponde a falta de argamassa para se manter coeso o conjunto de materiais. Pode também ser resultante de um excesso de água que favoreça a sedimentação dos componentes pétreos mais densos. Considerando que a argamassa tem uma densidade média de 2,2 kg/m³ e os agregados graúdos normais 2,7 kg/dm³, um excesso de vibração também acarretar a sedimentação do agregado graúdo. Mesmo em concretos coesos e bem dosados, se não houver cuidado nas operações de transporte, lançamento e adensamento, estes poderão apresentar segregação, tornando-os inadequados.

3.4 Exsudação

É um fenômeno semelhante à segregação, pois também trata da separação dos constituintes do concreto. É mais significativo em concretos com excesso de água e com pouca quantidade de finos. Trata-se da sedimentação dos constituintes mais pesados (cimento, agregados graúdos) enquanto a água por eles afastada flui à superfície da massa. A homogeneidade do concreto diminui, pois a água que flui à superfície pode arrastar consigo muito finos do aglomerante, de tal forma que, em casos extremos, a superfície do concreto fica coberta por uma nata de cimento, porosa e pouco resistente, enquanto que as paredes dos canais percorridos pela água em movimento de ascensão podem ficar praticamente sem cimento. Também sob os agregados graúdos e armadura, a argamassa se assenta, deixando um vazio que é preenchido por ar e água, ou somente nata de cimento com muita água e, portanto, pouco resistente (Figura 3).



Fonte: Santos, L. F., 2018, at all.

Figura 3 – Ensaio de espalhamento de um concreto autoadensável (altos níveis de exsudação e segregação)

A exsudação e segregação se manifestam nitidamente:

- a) com altos fatores água/cimento;
- b) em concretos pobres e finos;
- c) com cimentos grossos;
- d) com traços muito ricos ou muito pobres;
- e) em concretos mal transportados, lançados e adensados incorretamente;
- f) em componentes verticais de grande altura (paredes cortina, pilares, etc.).

3.5 Retração Plástica

Refere-se à variação de volume que ocorre enquanto o concreto está no estado fresco. É usualmente observada na forma de fissuras de retração plástica que acontecem antes ou durante o acabamento (Figura 4).



Fonte: Internet, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, Fórum da Construção.
Figura 4 – Retração plástica.

4. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Antes de nos aprofundarmos sobre as características mecânicas do concreto, é importante ressaltar que a resistência à compressão é o parâmetro mais utilizado para a avaliação da qualidade do concreto empregado em estruturas. Os estudos sobre esse parâmetro associado ao desempenho de concretos, durabilidade e correlação com outros parâmetros físicos (módulo de elasticidade, tração e fluência) mostram sua importância na engenharia civil. Isso posto, vamos conhecer algumas características sobre a resistência do concreto.

O concreto do pavimento urbano deverá atender aos requisitos seguintes:

- Resistência característica mínima à tração na flexão ($f_{ctM,k}$) $\geq 4,2$ ou $4,5$ MPa aos 28 dias (resistência utilizada no cálculo), conforme condições de solo e tráfego utilizadas em projeto do pavimento, atendendo-se às referências de controle definidas no projeto, ou então, resistência característica à compressão axial equivalente $f_{ck} \geq 30,0$ ou $35,0$ MPa desde que determinada em ensaio a correlação, utilizando-se os materiais que efetivamente serão aplicados na obra. A resistência à tração na flexão será determinada em corpos de prova prismáticos, conforme procedimentos constantes nas normas NBR 5738; NBR 12142 e NBR 16940. A resistência à compressão axial será determinada em corpos de prova cilíndricos, moldados e ensaiados conforme os requisitos e procedimentos constantes nas normas NBR 5738 e NBR 5739.
- Consumo mínimo de cimento: $C_{min} = 320 \text{ Kg/m}^3$, conforme especificado no Projeto com utilização de Macrofibra estrutural.
- Relação água / cimento máxima: $A/C \leq 0,50 \text{ l/Kg}$.
- Abatimento, determinado conforme a norma NBR NM 67, deverá atender as necessidades dos equipamentos a serem utilizados na execução do pavimento e as condições de declividade da obra.
- A dimensão máxima característica do agregado no concreto não deverá exceder

1/3 da espessura da placa do pavimento ou 50mm, obedecido o menor valor.

- Teor de ar, determinado conforme a norma NBR NM 47: $\leq 4,0\%$.
- Exsudação, medida conforme a norma NBR NM 102: $\leq 3,0\%$.
- Teor de argamassa entre 50% e 53% ou de acordo com equipamento a ser utilizado na aplicação do concreto.

4.1 Resistência característica à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais utilizada no controle tecnológico do concreto. Esse parâmetro pode ser associado a outras propriedades do concreto (fluência, módulo, etc.), sendo associada também à durabilidade.

De acordo com a ABNT NBR 5739, a determinação da resistência à compressão é realizada por meio de ensaio em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), usualmente empregada pela facilidade de manuseio.

4.2 Resistência à tração

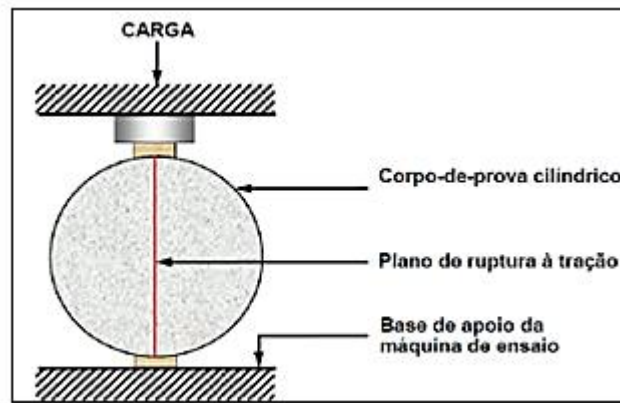
A existência dos esforços de momento fletor e força cortante em elementos estruturais geram, na seção transversal de peças de concreto, tensões de tração e deformações. Quando a tensão de tração atinge a capacidade limite do concreto, tem-se a possibilidade do início das fissuras no material. A tensão de tração é fundamental no dimensionamento de elementos estruturais, pois está associada à determinação do momento de fissuração, da verificação das aberturas de fissuras e da resistência de aderência. Para que possamos determinar a tração direta no concreto, é necessário aplicar forças centralizadas em um corpo de prova até sua ruptura.

Para concretos, a determinação dos esforços de tração é obtida por meio de ensaios laboratoriais denominados “tração por compressão diametral” e “tração na flexão”.

4.2.1 Ensaio de tração por compressão diametral (Lobo Carneiro)

A determinação da resistência à tração diametral do concreto diametral ($f_{ct,sp}$) se dá conforme ABNT NBR 7222.

O ensaio para determinar a resistência à tração diametral do concreto foi desenvolvido pelo Prof. Luiz Lobo Carneiro, em 1943. Esse método brasileiro é adotado por códigos normativos de diversos países. Para a determinação da resistência à tração, o ensaio utiliza um corpo de prova com dimensões de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. Para a sua realização, o corpo de prova cilíndrico é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da máquina de ensaio, de modo que o contato entre o corpo de prova e os pratos ocorra somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas, sendo aplicada uma força até a ruptura por fendilhamento devido à tração indireta (PINHEIRO, 2010) (Figuras 5 e 6).



Fonte: Pinheiro (2010, [s.p.]).

Figura 5 – Esquema do ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Dal Molin e Vieira (2011, p. 31).

Figura 6 – Ensaio de tração por compressão diametral.

A distribuição de tensões é praticamente uniforme, sendo a determinação da resistência à tração dada pela equação:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ – resistência à tração por compressão diametral;

F – força aplicada pela máquina de ensaio;

d – diâmetro do corpo de prova;

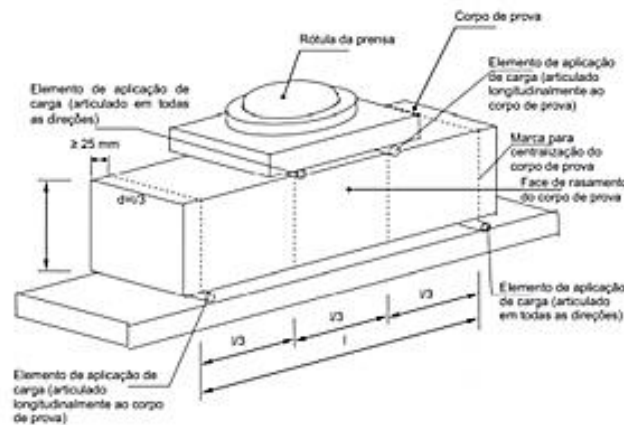
l – comprimento do corpo de prova.

4.2.2 Ensaio de tração na flexão

A determinação da resistência à tração do concreto (f_{ct} , f) é obtida por meio do ensaio ABNT NBR 12142.

O ensaio de resistência à tração na flexão é realizado em corpos de prova prismáticos, os quais devem atender às dimensões básicas previstas na ABNT NBR 5738, submetidos à

carga de flexão em duas seções simétricas (aplicada nos terços da amostra) (Figuras 7 e 8).



Fonte: ABNT (2010, p. 2).

Figura 7 – Esquema do ensaio de tração na flexão.



Fonte: Filho (2013, p. 65).

Figura 8 – Ensaio de tração na flexão.

A determinação da tensão de tração na flexão pode ser obtida segundo as equações:

Quando a ruptura ocorre no terço médio da distância entre elementos de apoio:

$$f_{ct.f} = \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2}$$

Onde:

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (MPa);

F - carga máxima aplicada (N);

L - comprimento do vão (mm);

b e d - largura e altura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm).

Quando a ruptura ocorre fora do terço médio da distância entre elementos de apoio:

$$f_{ct.f} = \frac{3 \cdot F \cdot A}{b \cdot d^2}$$

Onde:

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão (MPa);

F - carga máxima aplicada (N);

A – distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm);

b e d - largura e altura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm).

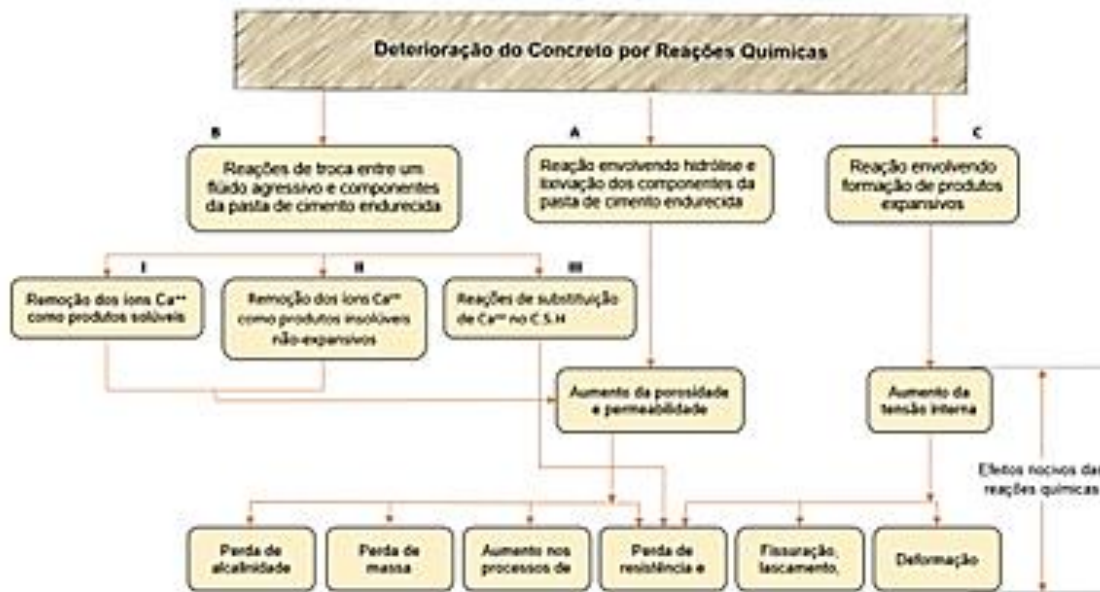
5. DURABILIDADE DO CONCRETO

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade de um concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. A taxa de deterioração, normalmente, está vinculada com a mobilidade da água por seus poros, ou seja, está relacionada ao nível de permeabilidade do concreto. Portanto, o raciocínio é simples: aumentando a impermeabilidade, teremos a diminuição da porosidade capilar e teremos, por exemplo, maior resistência a sulfatos, inibição da reação álcali-agregado e, por fim, maior durabilidade. As Figuras 9 e 10 agrupam as causas físicas e químicas da deterioração do concreto.



Fonte: adaptada de Mehta e Monteiro (2008, p. 131).

Figura 9 – Causas físicas da deterioração do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 158).

Figura 10 – Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto*.

(*) A: ataque de água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados; B(I): solução ácida formando componentes solúveis de cálcio, como cloreto de cálcio, sulfato de cálcio, acetato de cálcio ou bicarbonato de cálcio; B(II): soluções de ácido oxálico e seus sais, formando oxalato de cálcio; B(III): ataque de longa duração de água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição de Ca^{2+} por Mg^{2+} ; C: ataque por sulfato formando etringita e gesso, reação álcali-agregado, corrosão da armadura no concreto, hidratação de MgO e CaO cristalinos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. – Curso de Tecnologia de Pavimentos de Concreto: Módulo 2 - Projeto e Dimensionamento do Pavimento. Em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Pavim_Concreto_Apres_Mod02%20ABCP.pdf>.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16935/21 - Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16940/21 - Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16942/21 - Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSUMPÇÃO, A. J., CAREIRO, D. S., MENEZES, F. F. C., MILANEZI, M. R. – Pavimento Rígido de Concreto: Utilização nos Corredores de Ônibus de São Paulo. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo, 2014.

BALBO, J. T. – Pavimentos de Concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BRITO, L. A. T., GRAEFF, Â. G. – Métodos de Dimensionamento de Pavimentos: Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações. Relatório Final de Pesquisa. Porto Alegre, 2009.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. – Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. – Manual de Pavimentos Rígidos. 2.ed. - Rio de Janeiro, 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. – NORMA 054/2004 - PRO. Pavimento Rígido - Estudo de Traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. – NORMA 139/2010 - ES. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

PITTA, M. R. – Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84. 2ª edição, São Paulo, ABCP, 1996.

PITTA, M. R. – Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84. 3ª edição, São Paulo, ABCP, 1998.

PITTA, M. R. – Pavimento de Concreto, Parte 1. 1999. Disponível em: <piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/pavimento-de-concreto-parte-1-85160-1.aspx>.

SENÇO, W. – Manual de Técnicas de Pavimentação. São Paulo: PINI. 174 p., 1997.

DNIT 054/2004 – PRO – Pavimento rígido – Estudos de traços e ensaios de caracterização de matérias.

DNIT 047/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte.

DNIT 048/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho.

DNIT 049/2013 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de forma deslizante.

DNIT 141/2010 – ES – Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.

DNIT 056/2013 – ES – Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo.

NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento.

NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. NBR 9895 – Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.

NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação.

NBR 7583 – Execução de pavimento de concreto simples por meio mecânico.

NBR 7223 – Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone - Ensaio de abatimento.

NBR 7680 – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto.

NBR 12142 – Determinação da resistência à tração em corpos de prova prismáticos. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação.

NBR 16938-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade.

NBR 16939-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio.

NBR 16940-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio.

NBR 16942-02/21 – Fibras Poliméricas para Concreto – Requisitos e Métodos de Ensaio. ABNT PR1011/2021 – Projeto de Pavimentos Urbanos de Concreto, Rio de Janeiro, 2021.

ASTM D5893 – Standard Specification for Cold Applied, Single Component, Chemically Curing Silicone Joint Sealant for Portland Cement Concrete Pavements.

ASTM C-42 – Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.

ASTM C 309 – Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.

DNER-ME 024/94 – Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman.

DNER-PRO 273/96 – Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.

ET-DE-P00/001 – DER/SP – Melhoria e preparo do subleito. ET-DE-P00/002 – DER/SP – Reforço do subleito.

ET-DE-P00/008 – DER/SP – Especificação técnica Sub-base ou Base de Brita Graduada.

ET-DE-P00/044 - DER/SP – Concreto Compactado com Rolo para Sub-base e Base de Pavimento de Concreto de Cimento Portland.

ET-DE-P00/039 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Aplicado com Formas Deslizantes.

ET-DE-P00/040 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem - Manual.

ET-DE-P00/041 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem - Mecânico.

NBR 7212 – Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle.

NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento.

NBR 14931 – Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos.

DNIT 050/2004 – EM – Pavimento rígido – Cimento Portland Especificação de material. DNER-EM 037 – Agregado graúdo para concreto de cimento.

NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

NBR NM 47 – Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico.

NBR NM 102 – Concreto – Determinação da exudação.

ACI 360 R10 – Guide to Design of Slabs-on-Ground.

ACI 330 R08 – Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots.

ACI 330 R21 – Commercial Concrete Parking Lots and Site Paving Design and Construction.

ACI 330.2R/17 – Guide for the Design and Construction of Concrete Site Paving for Industrial and Trucking Facilities.

ACI 325.14R/17 – Guide for Design and Proportioning of Concrete Mixtures for Pavements.

ACI 325.9R/15 – Guide for Construction of Concrete Pavements.

American Concrete Pavement Association – Subgrades and Subbases for concrete pavements.

American Concrete Pavement Association – Concrete Information - When do you need to use a subbase under concrete pavements?.

American Concrete Pavement Association – Concrete Information – Design and Construction of Joints for Concrete Streets.

Esta publicação foi
elaborada pelas
Coordernadorias Técnicas
da ABESC e Falcão Bauer e
não pode ser reproduzida
no todo ou em partes sem
sua prévia autorização.



Av. Brig. Faria Lima, 2894 - 7°. andar - cj. 71/72
São Paulo - SP - CEP 01451-902
Tel: (11) 3167-6446

PUC
PAVIMENTO
URBANO DE
CONCRETO



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

CAPÍTULO III
EXECUÇÃO DO
PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

MAR/25



MANUAL DE EXECUÇÃO DE PUC

PAVIMENTO URBANO DE CONCRETO

CAPÍTULO III - EXECUÇÃO

CAPÍTULO III - EXECUÇÃO

INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e de deformabilidade (SOUZA, 1980 apud Geraldo Luciano de Oliveira Marques, 2006). Esta estrutura assim constituída apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e de deformações.

Dentre as funções do pavimento, pode-se destacar a trafegabilidade, cuja estrutura deve ser concebida com materiais qualificados, viabilizando suas aplicações, custos e , especialmente, oferecendo conforto e segurança ao usuário.

O objetivo deste capítulo é descrever a conformação da estrutura para pavimento rígido, cuja construção será detalhada. O pavimento rígido é constituído por uma placa de concreto de cimento Portland, que tem como função conjunta conformar a camada estrutural e a superfície de rodagem propriamente dita, apresentando, por sua vez, considerável rigidez à flexão. Por resistir significativamente à flexão, a rigidez é fator importante no dimensionamento da placa de concreto, tendo em vista uma distribuição de tensões uniformemente distribuída, conferindo desempenho sobre bases frágeis (MESQUITA, 2001 apud OZIEL GOMES DA SILVA, 2009).

1. Estrutura e materiais do pavimento de concreto simples

A estrutura do pavimento é composta de algumas camadas concebidas após a terraplenagem do local, acima do subleito, e vão variar conforme a solicitação do tráfego no local. Toda a estrutura do pavimento está acima do sub-leito que funciona como a fundação do sistema que irá receber os esforços absorvidos pelo pavimento. Acima do sub-leito basicamente a estrutura do pavimento é constituída da regularização do sub-leito, reforço de sub-leito (caso haja necessidade), sub-base acima do reforço, seguido de base e revestimento (concreto) (Figura 1).



Figura 1 – Camadas estruturais do pavimento de concreto.

Este tipo de estrutura, por camadas, trabalha essencialmente à tração. A deformabilidade elástica dos pavimentos rígidos é caracterizada pelo módulo de elasticidade (E). Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes das placas de concreto de cimento Portland, as quais são apoiadas sobre camada de transição (base e sub-base). A determinação da espessura é obtida a partir da resistência à tração do concreto, considerando-se a fadiga, o coeficiente de reação do sub-leito e as cargas aplicadas. Os pavimentos rígidos apresentam deformação reduzida, contribuindo para uma vida útil maior.

Uma das características importantes dos pavimentos rígidos é que o carregamento oriundo das rodas dos veículos é distribuído sobre sub-leito, através de uma área de grandes dimensões, conforme ilustram as Figuras 2 e 3.

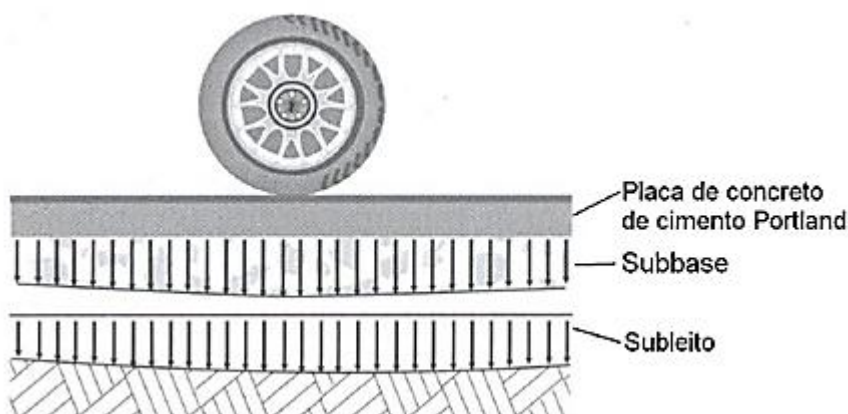


Figura 2 – Distribuições de tensões no sub-leito em pavimentos rígidos.

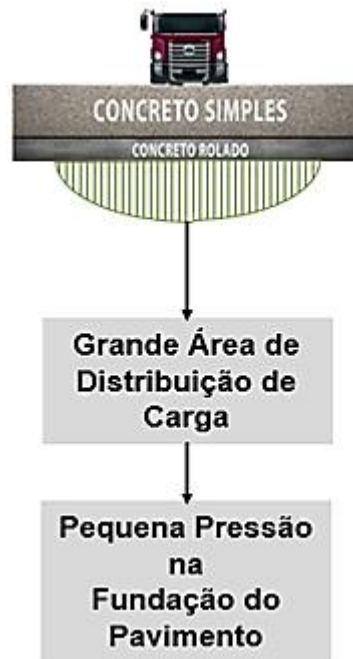


Figura 3 – Esquema da distribuição de cargas no pavimento rígido.

1.1. Sub-leito

É o terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento. Deve ser considerado e estudado até as profundidades em que atuam significativamente as cargas impostas pelo tráfego, onde, caso o CBR do sub-leito for inferior a 2%, ele deve ser substituído por material que apresente valores de CBR entre 2% e 20%. Para valores de CBR superiores a 20%, o material pode ser utilizado como sub-base. O sub-leito é constituído de material natural consolidado e compactado. De acordo com o Departamento Nacional Infraestrutura e Transporte (DNIT), o material do sub-leito deve apresentar expansão inferior a 2% e CBR superior a 2%.

1.2. Sub-base

Camada complementar à base. Deve ser utilizada quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o sub-leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnico-econômicas. Pode ser utilizado para regularizar a espessura da base.

De acordo com o DNIT, o material da sub-base deve apresentar CBR superior a 20%, índice de Grupo - IG = 0 e expansão inferior a 1%.

O material constituinte da sub-base deve apresentar características tecnológicas superiores às do material de reforço; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base (BALBO, 2007 apud Anna Carolina Rossi, 2017).

1.2.1. Materiais

1.2.1.1. Camadas estabilizadas granulometricamente

São as camadas constituídas por solos, britas ou outros materiais, como escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Essas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, estabelecidos em especificações. Muitas vezes, esses materiais devem sofrer beneficiamento prévio, como britagem e peneiramento, com vista ao enquadramento nas especificações. Quando se utiliza uma mistura de material natural e pedra britada, tem-se as sub-bases e bases de solo-brita. Quando se utiliza exclusivamente produtos de britagem, tem-se as sub-bases e bases de brita graduada simples (BGS), conforme Figura 4.



Fonte: Anna Carolina Rossi
Figura 4 – Brita graduada simples.

1.2.1.2. Macadames

Camada de brita de graduação aberta que, após compactação, tem os vazios preenchidos pelo material de enchimento, constituído por finos de britagem (pó de pedra) ou mesmo por solos de granulometria e plasticidade apropriadas; a penetração do material de enchimento é promovida pelo espalhamento na superfície, seguido de varredura, compactação (sem ou com vibração) e irrigação, no caso de macadame hidráulico (Figura 5). O macadame seco, ao dispensar a irrigação, além de simplificar o processo de construção, evita o encharcamento do subleito.



Fonte: Anna Carolina Rossi
Figura 5 – Macadame hidráulico.

1.2.1.3. Solo melhorado com cimento

A sub-base de solo melhorado com cimento é o produto endurecido resultante da cura úmida da mistura homogênea compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas em projeto e determinadas por ensaios prévios de laboratório por dosagem experimental. Mistura de solo com adição de pequenos teores de cimento (2% a 4%), com objetivo de melhorar a plasticidade e sensibilidade à água.

O cimento empregado deve atender a especificação de material DNER EM 036, para recebimento e aceitação do material. Devem ser empregados: a) cimento Portland comum; b) cimento Portland de alto-forno; c) cimento Portland pozolânico, sendo esses em conformidade com a ABNT NBR 16697.

Os solos empregados devem ser os provenientes de ocorrências de materiais das áreas de empréstimo e jazidas, devendo apresentar as seguintes características:

- limite de liquidez menor que 40%, determinado conforme ABNT NBR 6459;
- índice de plasticidade menor que 18 %;
- a curva granulométrica do material deve enquadrar-se nas faixas da Tabela 1;
- a faixa de trabalho, definida a partir da curva granulométrica de projeto, deve obedecer à tolerância indicada para cada peneira na Tabela 1, porém, sempre respeitando os limites da faixa granulométrica;
- não deve conter matéria orgânica e outras impurezas nocivas.

Tabela 1 – Faixa granulométrica do solo

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando	Tolerância (%)
ASTM	(mm)		
3"	76	100	-
Nº 4	4,8	50 – 100	±
Nº 40	0,42	15 – 100	±
Nº 200	0,075	5 – 35	±

A Figura 6 apresenta sacos de cimento espalhados pela pista (terra) para posterior mistura ao solo.



Fonte: Caio Piedade.

Figura 6 – Sacos de cimento sobre a pista (terra).

1.3. Base

Camada destinada a resistir e distribuir ao sub-leito os esforços oriundos do tráfego e, sobre a qual, se construirá o revestimento. De acordo com o DNIT, o material da base deve apresentar CBR superior a 80% e expansão inferior a 0,5%, limite de liquidez LL inferior a 25% e índice de plasticidade IP superior a 6%.

1.3.1. Materiais

1.3.1.1. Camadas estabilizadas granulometricamente

Conforme descrito em 1.2.1.1.

1.3.1.2. Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

Mistura de agregado mineral, cimento Portland, aditivos e água, em proporções determinadas experimentalmente, atendendo à requisitos de qualidade, sendo

uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada, resultando uma mistura homogênea, compactada e rígida.

A camada de base e sub-base de brita graduada tratada com cimento deve ser executada com materiais que atendam aos seguintes requisitos:

- os agregados utilizados obtidos a partir da britagem e classificação de rocha são devem constituir-se por fragmentos duros, limpos e duráveis, livres do excesso de partículas lamelares ou alongadas, macias ou de fácil desintegração, assim como de outras substâncias ou contaminações prejudiciais;
- desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles, conforme ABNT NBR NM 51, inferior a 50%;
- equivalente de areia do agregado miúdo, conforme ABNT NBR 12052, superior a 55%;
- índice de forma superior a 0,5 e porcentagem de partículas lamelares inferior a 10%, conforme ABNT NBR 5564;
- perda no ensaio de durabilidade conforme DNER-ME 089, em cinco ciclos, com solução de sulfato de sódio, deve ser inferior a 20% e, com sulfato de magnésio, inferior a 30%.

A Figura 7 apresenta o espalhamento da camada de BGTC.



Fonte: Juliano Gewehr.

Figura 7 – Espalhamento da camada de BGTC.

1.3.1.3. Concreto Compactado com Rolo (CCR)

Concreto de cimento Portland compactado com rolo, concreto rolado ou CCR é a camada do pavimento constituída por concreto simples, com baixo consumo de cimento e consistência seca, onde a compactação é realizada com rolos compactadores ou equipamento similar.

O concreto compactado com rolo deve ser dosado por método racional em laboratório e deve atender aos seguintes requisitos:

- possuir consumo mínimo de cimento entre 85 kg/m³ a 120 kg/m³;
- possuir resistência característica à compressão simples aos 28 dias de cura, que atenda a resistência definida em projeto para estrutura do pavimento. Devem ser moldados, no mínimo, 6 corpos de prova, a cada 1.500 m² de pista, de amostras coletadas no distribuidor de agregados, imediatamente antes da compactação; em 5 camadas compactadas com energia normal, recebendo cada uma delas 30 golpes do soquete de 4,5 kg, com altura de queda de 45 cm. Os moldes devem ser cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, pode ser utilizado o soquete do ensaio Marshall;
- resistência compressão simples deve ser determinada conforme ABNT NBR 5739;
- deve-se estabelecer uma curva granulometria do projeto da mistura em função dos materiais utilizados e a respectiva faixa de trabalho definida pela tolerância da abertura das peneiras.

A Figura 8 elucida o processo de realização do CCR.



Fonte: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018.
Figura 8 – Processo de realização de CCR.

1.3.1.4. Solo-cimento

É uma mistura de solo, cimento Portland e água, devidamente compactada, resultando um material duro, cimentado e de elevada rigidez à flexão. A porcentagem de cimento varia de 5% a 13% e depende do tipo de solo utilizado. Solos argilosos exigem porcentagens maiores de cimento. O resultado da dosagem é a definição da quantidade de solo, cimento e água de modo que a mistura apresente características adequadas de resistência e durabilidade. A dosagem requer a realização de ensaios de laboratório, sendo a resistência à compressão axial o parâmetro mais utilizado. A Figura 9 mostra o processo de execução do solo-cimento.



Fonte: Alexandre Zadra, 2020.
Figura 9 – Processo de realização de CCR.

1.4. Revestimento de concreto

Camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos. Destina-se econômica e simultaneamente, a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e à segurança, bem como resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento. Deve ser resistente ao desgaste.

1.4.1. Materiais constituintes do concreto

O revestimento de concreto é constituído por mistura de cimento Portland, areia, agregado graúdo e água, distribuído numa camada devidamente adensada.

2. Construção das camadas do pavimento

2.1. Operações preliminares

2.1.1. Regularização do sub-leito

Operação destinada a conformar o sub-leito, transversal e longitudinalmente. Poderá ou não existir, dependendo das condições do sub-leito. Compreende cortes ou aterros até 20 cm de espessura (Figura 10).



Figura 10 – Regularização do sub-leito.

2.1.2. Reforço do sub-leito

É a camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento do pavimento, sendo parte integrante deste e que, por circunstâncias técnicas e econômicas, será executado sobre o sub-leito regularizado. Serve para melhorar as qualidades do sub-leito e regularizar a espessura da sub-base.

De acordo com o DNIT, o material do reforço do sub-leito deve apresentar expansão inferior a 1% e CBR superior ao material do sub-leito (Figura 11).



Figura 11 – Reforço do sub-leito.

2.2. Operação de construção de sub-bases e bases granulares

As operações aqui descritas podem ser aplicadas para construção de sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente, solo-brita, brita graduada, havendo alguns pequenos detalhes que diferem para cada caso em particular.

2.2.1. Escavação, carga e descarga

O material retirado da jazida é armazenado próximo ao local de execução do pavimento. Posteriormente, o material armazenado é transportado até a pista, onde é descarregado em pilhas (Figura 12).



Fonte: <http://comofazerorcamentodeobra.blogspot.com/2016/03/como-elaborar-um-orcamento-de.html>

Figura 12 – Escavação de material de jazida.

2.2.2. Empilhamento

Ao descarregar o material na pista, os caminhões formam pilhas (Figura 13).



Fonte: ODA, 2016.
Anna Carolina Rossi.

Figura 13 – Solo agregado.

2.2.3. Mistura

No caso de haver dois ou mais materiais a serem utilizados, procede-se a mistura antes do espalhamento. A mistura pode ser realizada com o emprego de máquinas agrícolas e motoniveladora (Figura 14), máquinas móveis pulvemisturadoras ou máquinas estacionárias.



Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=Kl4B_st-hDs

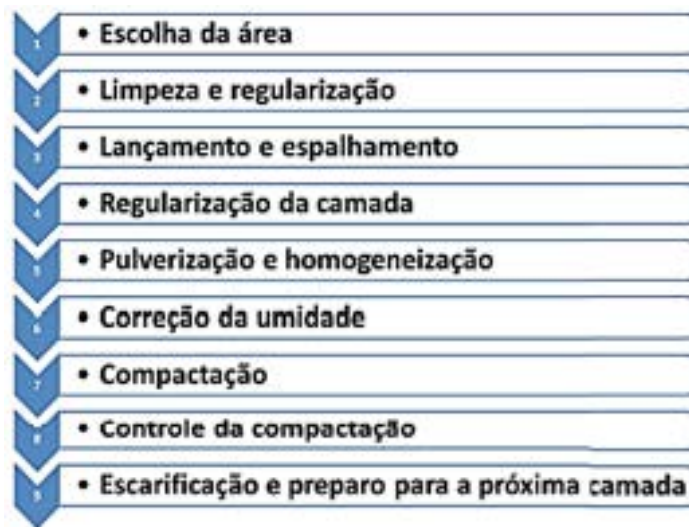
Figura 14 – Mistura de materiais por meio de motoniveladora

2.2.4. Espalhamento

É realizado com motoniveladora. O controle da espessura durante o espalhamento é feito por meio de linhas e estacas.

2.2.5. Compactação no campo

Em campo o procedimento de compactação segue uma ordem lógica, sendo utilizado para todas as camadas de construção da estrutura do pavimento de concreto, exceto para a camada de revestimento. A Figura 15 ilustra o procedimento aplicado na etapa de compactação das sub-bases e bases granulares.



Fonte: Márcio Fernandes Leão, 2018.

Figura 15 – Procedimento (etapas) para a compactação.

A primeira etapa consiste na escolha da área de empréstimo. Nesse contexto muitos fatores devem ser considerados, principalmente quanto a questões técnicas e econômicas, como: distância de transporte, características geotécnicas e umidade do material em relação à umidade de compactação.

Escolhida a área de empréstimo, deve-se proceder com a limpeza e a regularização da área de trabalho.

Em seguida, são realizados o lançamento e o espalhamento do material (uso de motoscrapers ou unidades de transporte).

Após essa etapa, é realizada a regularização da camada, utilizando motoniveladora para acerto da altura da camada (espessura das camadas ≤ 30 cm de material fofo para ter 15 cm a 20 cm de solo compactado, incluindo 2 cm a 5 cm da camada anterior).

Ocorre então a pulverização e a homogeneização do material da camada pela remoção ou desagregação de torrões secos, material aglomerado ou fragmentos de rocha alterada por uso de escarificadores ou arados de disco.

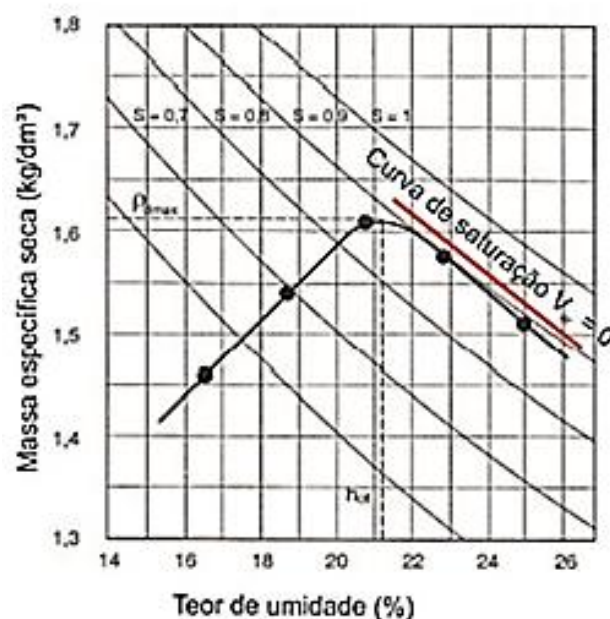
É realizada a correção da umidade, utilizando técnicas de irrigação (caminhões pipa e irrigadeiras) ou aeração (arados de disco), havendo homogeneização e conferência desta umidade.

Por fim, é executada a compactação propriamente dita por meio de equipamentos escolhidos de acordo com o tipo de solo e de serviço. Para acabamento e solos granulares, recomenda-se a utilização de rolo liso. Para solos argilosos, recomenda-se a utilização de rolo pé de carneiro. Quando se utiliza o rolo pneumático, para maiores áreas utiliza-se pneus parcialmente vazios (menores pressões), enquanto que para áreas menores utiliza-se pneus cheios (maior pressão).

2.2.6. Controles

Após a compactação, é necessário fazer o seu controle pela avaliação da umidade ótima (tolerância de $\pm 2\%$) e $\gamma_{dm\max}$ pelo grau de compactação especificado (liberação da camada através de ensaios de campo). É feita a escarificação para a camada seguinte, sendo o processo repetido.

Quando executamos a compactação no solo, são utilizadas diversas condições de umidade em função de uma determinada energia de compactação. Desta maneira, obtém-se a curva de compactação, a partir de cinco pares de valores de massas específicas e teores de umidade. A curva de compactação, exemplificada na Figura 16, apresenta a variação dos pesos específicos ou mesmo da massa específica, ambos secos, em função do teor de umidade (w).



Fonte: adaptado de Sousa Pinto (2006, p. 67).

Figura 16 – Curva de compactação.

Com base na Figura 16, para uma massa específica seca máxima (ou peso específico aparente seco máximo), existe uma umidade ótima ($w_{ótima}$ ou h_{ot}). Desta maneira, para cada solo, sob uma dada energia de compactação, existe a umidade ótima e a massa específica seca máxima. Antes desse ponto, temos o ramo seco (parte crescente do gráfico) e o ramo úmido (parte decrescente do gráfico). As curvas de compactação, embora sejam diferentes para cada tipo de solo, se assemelham quanto à forma. O comportamento do solo, indicado na curva de compactação, pode ser explicado considerando que à medida que cresce o teor de umidade, até certo valor (h_{ot}), o solo se torna mais “trabalhável”, resultando em massas e pesos específicos maiores e teores de ar no solo menores. Como não é

possível expulsar todo o ar existente nos vazios do solo, a curva de compactação não poderá nunca alcançar a curva de saturação (que é, teoricamente, a curva de $Var = 0$), justificando-se, assim, a partir da massa específica seca máxima, onde o ramo é descendente.

Quando ocorre o aumento no teor de umidade, há um efeito de lubrificação entre as partículas, aumentando a compactação enquanto a saída de ar é facilitada. Após determinado o teor de umidade próximo à saturação – umidade ótima, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios. Assim, a maior quantidade de água presente resulta em redução da massa específica do solo.

O objetivo da técnica de compactação será o atingimento do Grau de Compactação (G_c) igual à 100% (ou variáveis, referindo-se ao parâmetro de aceitabilidade das camadas as quais são executadas, em função do Grau de Compactação dessas, geralmente aceita quando o Grau de Compactação está acima de 95%), atingindo este valor conforme expressão abaixo:

$$G_c = \frac{\gamma_{dcampo}}{\gamma_{dm\acute{a}x}} \times 100\% = 1, \text{ sendo:}$$

- G_c = Grau de Compactação;
- γ_{dcampo} = densidade seca do material obtida em campo;
- $\gamma_{dm\acute{a}x}$ = densidade máxima seca do material obtida em laboratório.

3. Pavimento Urbano de Concreto - Detalhamento

Pavimento Urbano de Concreto - PUC, para uso em vias urbanas é o pavimento cuja camada é constituída por placas de concreto de cimento Portland com adição de macrofibras estruturais, que atuam como reforço secundário, desta forma elevando-se o desempenho de resistência a tração do concreto e reduzindo-se a espessura da camada de concreto, que desempenham simultaneamente as funções de base e de revestimento.

A execução dos serviços deve seguir rigorosamente a Especificação Técnica “ET-DE-P00/040 – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem –Manual” do DER/SP.

Dentre os procedimentos indicados pelo DER/SP, outros procedimentos construtivos podem ser adotados, oriundos de especificações e referências de apoio, desde que previamente aprovados pela Fiscalização.

A composição (traço) do concreto destinado à execução de pavimentos rígidos deverá ser determinada por método racional, conforme requisitos especificados nas normas NBR 7212, NBR 12655 e NBR 12821, de modo a obter-se com os materiais disponíveis na região uma

mistura fresca de trabalhabilidade adequada ao processo construtivo empregado e, simultaneamente, um produto endurecido compacto e durável, de baixa permeabilidade (alta densidade), e que satisfaça às condições de resistência mecânica e acabamento superficial impostas pela especificação, que deve acompanhar o projeto do pavimento.

Tal composição (carta traço) sendo acrescido pela inserção de macrofibras estruturais para reforço secundário que atenda as normas (ABNT NBR 16935/16940/16942-21) assim como as especificações de resistência dos projetos, sendo imprescindível que as fibras atendam as normas específicas da ABNT bem como o desempenho mínimo exigido do material na pós fissuração, conforme recomendado neste manual.

Sendo imprescindível que seja verificado através da realização de ensaios (Segundo a norma ABNT 16940) que o material atende as exigências mínimas de desempenho, sendo de responsabilidade do projetista e do responsável técnico pela execução a verificação.

A Central Dosadora do Concreto, fazendo o fornecimento do concreto com adição de macrofibras (Concreto reforçado com fibra, CRF), não tendo o projeto e com fornecimento direto, obrigatoriamente deverá emitir o Relatório de Carregamento de Carga e ART (Acervo de Responsabilidade Técnica) do concreto fornecido.

4. Materiais constituintes do concreto

São considerados adequados quaisquer tipos de cimento que atendam aos requisitos estabelecidos pela **ABNT NBR 16697**. Normalmente, utilizam-se os cimentos do tipo **CP II** e **CP III**, por apresentarem menor finura (Blaine máximo de 4000 g/cm²).

Valores Recomendados de Resistencia del Concreto
según rango de Tráfico

RANGOS DE TRÁFICO PESADO EXPRESADO EN EE	RESISTENCIA MÍNIMA A LA FLEXOTRACCIÓN DEL CONCRETO (MR)	RESISTENCIA MÍNIMA EQUIVALENTE A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (F'c)
≤ 5'000,000 EE	40 kg/cm ²	280 kg/cm ²
> 5'000,000 EE ≤ 15'000,000 EE	42 kg/cm ²	300 kg/cm ²
> 15'000,000 EE	45 kg/cm ²	350 kg/cm ²

Os agregados, água, aditivos e aço deverão atender aos requisitos definidos no item 5 da **norma DNIT 047**, e seu recebimento e armazenamento na obra deverão seguir as orientações contidas nas normas **DNIT 050/2004-EM** e **DNER-EM 037**.

Nos projetos que utilizarem **macrofibra estrutural**, esta deverá atender às exigências das normas **ABNT NBR 16935**, **ABNT NBR 16940** e **ABNT NBR 16942**, além de atender aos parâmetros mínimos de projeto ($FR_4 \geq 1,3$ MPa com $K \geq 90\%$), conforme estabelecido nas normas **ACI 544.4R** e **ACI 330**.

O concreto do pavimento urbano deverá atender aos seguintes requisitos:

- **Resistência característica mínima à tração na flexão ($f_{ctM,k}$):** $\geq 4,2$ MPa ou $\geq 4,5$ MPa aos 28 dias, conforme condições de solo e tráfego previstas no

projeto. A resistência à tração será determinada em corpos de prova prismáticos conforme **ABNT NBR 5738**, **NBR 12142** e **NBR 16940**.

- Alternativamente, poderá ser considerada a **resistência à compressão axial (f_{ck})** ≥ 30 MPa ou ≥ 35 MPa, desde que demonstrada a correlação entre tração e compressão utilizando os mesmos materiais aplicados na obra, conforme **NBR 5738** e **NBR 5739**.
- **Consumo mínimo de cimento (C_{min})**: 320 kg/m^3 , conforme especificado no projeto, quando da utilização de macrofibra estrutural.
- **Relação água/cimento máxima (A/C)**: $0,50 \text{ l/kg}$.
- **Abatimento (Slump)**: determinado conforme **NBR 16889** (antiga NM 67), devendo ser adequado ao tipo de equipamento de execução e às condições de declividade da obra.
- **Dimensão máxima característica do agregado**: não deve exceder $1/3$ da espessura da placa do pavimento ou 50 mm , prevalecendo o menor valor.
- **Teor de ar incorporado**: $\leq 4,0\%$, conforme **NBR 16897** (antiga NM 47).
- **Exsudação**: $\leq 3,0\%$, conforme **NBR 16891** (antiga NM 102).
- **Teor de argamassa**: entre 50% e 53% , ou ajustado conforme o equipamento utilizado para lançamento e adensamento do concreto.

5. Reforço do concreto com fibras poliméricas

Quando da utilização de macrofibras e microfibras na composição do concreto, estas devem atender às normas:

- **ABNT NBR 16940:2021** – Concreto Reforçado com Fibras – Determinação da Resistência à Tração na Flexão.
- **ABNT NBR 16942:2021** – Fibras Poliméricas para Concreto – Requisitos e Métodos de Ensaio.

Todos os ensaios devem ser realizados por laboratórios acreditados pelo **INMETRO**. Caso não seja possível, os laboratórios devem comprovar a rastreabilidade de seus procedimentos e a calibração de seus equipamentos, atendendo as normas vigentes.

As macrofibras têm como principal função **aumentar a resistência residual pós-fissuração do concreto**, proporcionando maior ductilidade ao material e, em muitos casos, permitindo a **redução da espessura das placas** de pavimento.

As características mínimas exigidas para as macrofibras são:

- **Diâmetro equivalente**: $\geq 0,30 \text{ mm}$.
- **Comprimento**: entre 30 mm e 50 mm .

- **Módulo de elasticidade:** $\geq 3,0$ GPa.
- **Material:** poliolefinas derivadas de polipropileno, com tratamento superficial conforme norma.
- **Resistência à alcalinidade:** conforme NBR 16942.
- **Fator de forma:** atendendo às condições de desempenho estabelecidas.

O teor de macrofibra, em quilogramas por metro cúbico de concreto (kg/m^3), deverá ser suficiente para garantir a resistência residual média mínima de:

- **$FR_4 \geq 1,3$ MPa**
- **$K \geq 90\%$** (índice de confiabilidade)

para um concreto de referência com resistência à tração na flexão de **$4,2 \pm 0,3$ MPa**.

Importante: Caso o projeto preveja valores de desempenho superiores aos mínimos estabelecidos acima, **deverão ser respeitados integralmente os requisitos de desempenho definidos em projeto**, sem qualquer redução dos parâmetros especificados.

Reforçamos a importância de utilizar fibras **certificadas pela ABNT**. A dosagem adequada deverá ser verificada por meio de ensaios de caracterização realizados em laboratório e validados em campo, preferencialmente junto a laboratórios certificados ou qualificados, conforme premissas do **INMETRO**.

De forma geral, recomenda-se a utilização **de 3 e $5,5\text{kg/m}^3$ de macrofibra estrutural**, devendo o valor exato ser definido com base nos resultados de projeto e verificação de desempenho.

Notas Explicativas:

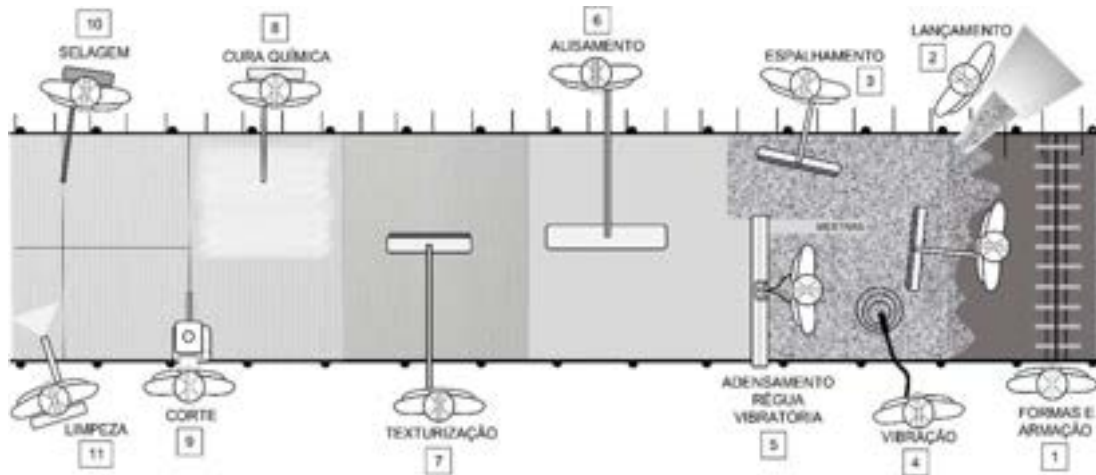
- **FR_4 :** Resistência Residual no quarto ponto da curva carga-deflexão (resistência pós-fissuração).
- **K:** Fator de confiabilidade, normalmente aplicado para garantir desempenho mínimo estatisticamente seguro.
- **LOP (Limit of Proportionality):** Limite de proporcionalidade da resistência à tração do concreto.

6. Equipamentos para execução

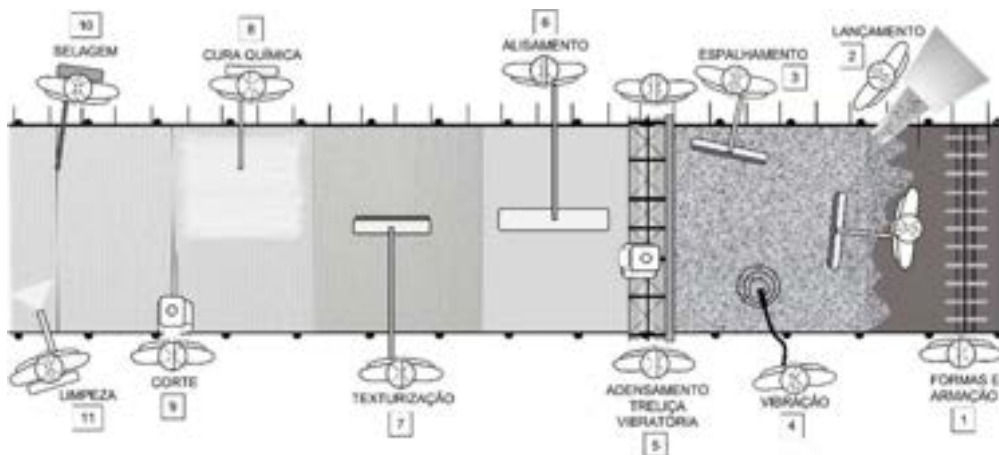
Para a execução do pavimento rígido deverá ser utilizado equipamento compatível com as características da obra e necessidade de produtividade para a situação em questão. Esses equipamentos estão descritos e especificados no procedimentos ET-DE- P00/040 DER/SP, e na norma DNIT 047/2004 – ES, que apoia este documento, e podem ser do tipo régua vibratória, treliça vibratória ou rolo vibratório (roller screed). Serão aceitos equipamentos de maior porte (fôrmas-trilho e/ou pavimentadoras de formas deslizantes)

desde que aplicáveis à obra, podendo ser utilizados alisadora acabadora de concreto (bambolê). Neste caso, para outros equipamentos, devem ser seguidas as normativas específicas para tais equipamentos, ET-DE-P00/039 DER/SP ou ET-DE-P00/041 DER/SP.

Execução com régua vibratória



Execução com treliça vibratória



Além do equipamento principal de espalhamento (adensamento/alisamento) do concreto, a executora fará uso dos seguintes equipamentos complementares para a correta execução do pavimento:

- Formas metálicas ou similar, para contenção lateral do concreto em quantidade suficiente para 2 dias de produção, se for utilizada. Estas formas deverão servir de furos para instalação das barras de ligação. No caso de concretagem em toda largura/seção transversal da pista/rua, em um mesmo momento, poderão ser utilizadas mestras/taliscas de nível, substituindo as formas, para referência de cota e apoio do equipamento de adensamento/alisamento do concreto;
- Formas metálicas ou similar, para contenção frontal do concreto em final de jornada (juntas transversais). Estas formas deverão servir de furos para instalação das barras de transferência;
- Plataforma de apoio ou ponte de serviço: Necessária para eventuais acabamentos

do concreto após a passagem do equipamento de espalhamento. Normalmente fabrica-se este equipamento na obra, prevendo-se possíveis mudanças de larguras;

- Lona plástica, para em caso de chuva proteger-se o concreto fresco em fase de pega;
- Ferramentas manuais de pedreiro e armador (equipamento de nível, linhas, linhas marcadoras de juntas, pontaletes, pás, enxadas, puxadores de concreto em frente ao equipamento, turquesas, etc) em quantidade suficiente para o bom andamento da obra;
- Vibradores de imersão (motor a gasolina), diâmetro > 50mm (mínimo dois);
- Desempenadeira metálica de cabo longo - Float manual (mínimo dois);
- Rodo de corte de secção retangular (mínimo 3m) de cabo longo (caso necessário);
- Elementos para texturização: Vassoura de piaçava, nylon ou pente metálico;
- Bomba de pulverização costal manual para aplicação do agente de cura (mínimo duas);
- Equipamento de corte e serras de disco diamantado (conforme espessura e profundidade do corte), auto-propelidas (corta e anda) em quantidade suficiente para atendimento à demanda de cortes (mínimo duas – considerando o não funcionamento de uma no momento do corte – contingência);
- Sistema de iluminação auxiliar. Dependendo do planejamento da obra, grande parte dos cortes das juntas pode vir a ser executado a noite;
- Réguas de alumínio de comprimento $\geq 3\text{m}$ com secção retangular, para aferição do nivelamento da superfície acabada (mínimo duas);
- Aplicadores manuais de selantes (mínimo um). Deve-se prever também equipamento para limpeza do corte para melhor aderência do selante, neste caso podendo ser por pressão de ar ou água. Em caso onde o projeto possua no reservatório das juntas cordão de respaldo, este deve ser introduzido por ferramenta adequada que permita constante nivelamento deste dentro das juntas;
- Equipamento para limpeza de ferramentas e entrega do pavimento, inclusive a limpeza e remoção do agente de cura sobre o concreto, para posterior pintura de sinalização sobre o mesmo (pressurização de água).

Obs: Deve-se prever a instalação de protetores para não permitir o acesso ao concreto fresco, por pessoas ou animais, bem como também prever a proteção ao vento quando necessário.

7. Preparo da pista para a concretagem e assentamento de fôrmas

A superfície que receberá a camada de CONCRETO, deve ter atingido o parâmetro defletoométrico de controle apresentado no projeto, e estar desempenada e limpa, isenta de resíduos e outros elementos prejudiciais à adequada execução da mesma.

As fôrmas, quando utilizadas, deverão ser alocadas anteriormente à execução do pavimento e estarem de acordo com a topografia. Deverão ser assentadas na camada subjacente com base no alinhamento da pista, bem como serem fixadas com ponteiros de aço, no máximo a cada metro, de modo a suportar sem quaisquer deslocamentos os esforços inerentes ao trabalho. Para o perfeito assentamento, as fôrmas ainda devem ser calçadas em toda a sua extensão, não sendo permitidos apoios isolados.

O topo das fôrmas deverá coincidir com a superfície de rolamento prevista, fazendo-se necessária a verificação do alinhamento e do nivelamento, admitindo-se desvios altimétricos de até 3mm e diferenças planialtimétricas não superiores a 5mm com relação ao projeto.

Deverá também ser efetuada verificação do fundo de caixa (no centro da pista) não se admitindo espessura, ao longo de toda a seção transversal, inferior à especificada no projeto.

8. Colocação de lona plástica

Logo abaixo das placas de concreto com o objetivo de manter a água de amassamento do concreto, evitando a perda desta para a camada de base, é recomendado o uso de lona impermeável ou produto similar. A lona precisa ser resistente, com alta micragem entre 150 e 200 micras.

A colocação da lona deve ser feita com sobreposição de no mínimo de 15 cm em relação a camada adjacente.

9. Mistura, transporte, lançamento e espalhamento do concreto

O concreto deverá ser produzido em centrais de concreto, com o atendimento integral das condições estipuladas na norma NBR 7212.

O transporte do concreto deverá ser feito em caminhões betoneira ou basculantes.

O período máximo entre a mistura (a partir da adição da água) e o lançamento do concreto será de trinta minutos, no caso de caminhões basculantes, sendo proibida a redosagem sob qualquer forma. Quando utilizados caminhões betoneira (com agitação) para o transporte este período poderá ser de 90 minutos.

A introdução da macrofibra estrutural e microfibra pode ser realizada diretamente durante o carregamento na usina, inserindo as mesmas na esteira, ou diretamente em obra, lançando as fibras conforme sua dosagem especificada em projeto diretamente no caminhão betoneira, devendo proceder a homogeneização batendo o caminhão durante 2 min para cada m³ de concreto, observar se os caminhões que encontram-se na linha estão com as facas em boas condições, para garantir a boa homogeneização do material.

O espalhamento do concreto pode ser feito com auxílio de ferramentas manuais (pás, enxadas, etc) ou executado de forma mecanizada (escavadeira de pequeno porte, etc) porém, qualquer que seja o processo utilizado, deve-se garantir uma distribuição

homogênea de modo a regularizar a camada na espessura a ser adensada.

A pavimentação poderá ser realizada numa faixa contínua sem a necessidade de juntas longitudinais de construção. Caso estas sejam necessárias, devem coincidir com as previstas em projeto.

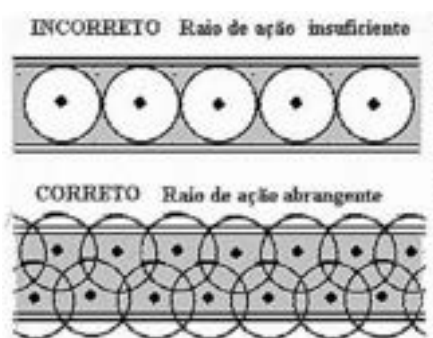
10. Adensamento e conformação do concreto

O equipamento para execução do pavimento de concreto deverá ser, preferencialmente, de pequeno porte, do tipo régua vibratória, treliça vibratória ou rolo vibratório (roller screed). Eventualmente, caso as características da via permitam, podem ser utilizados equipamentos com maior produtividade (Fôrmas-trilho ou pavimentadoras de fôrmas deslizantes), adequando-se, neste caso, as condições de execução e canteiro.

Além do adensamento superficial realizado pelos equipamentos vibratórios deverá ser realizado adensamento complementar com vibradores de imersão em toda a largura concretada, respeitando-se o raio de vibração do equipamento, e inserindo o mesmo em ângulos de 45° graus a fim de melhor adensar o concreto reforçado com fibra e direcionando o posicionamento horizontal da mesma. Atentar para a sobreposição dos pontos de adensamento, conforme figura que segue:

A verificação da regularidade longitudinal da superfície deverá ser feita por meio de uma régua de alumínio com mais de 3m de comprimento. Qualquer variação na superfície, superior a 5 mm, seja uma depressão ou saliência, deverá ser corrigida de pronto, sendo as saliências cortadas e as depressões preenchidas com concreto fresco.

11. Acabamento e texturização do concreto



O acabamento final do concreto deverá ser realizado, primeiramente, por meio da utilização do rodo de corte (para retirada de irregularidades na superfície) e, na sequência, com a utilização do float manual (desempenadeira de cabo longo) para o desempenho final do pavimento. Estes serviços devem ser executados imediatamente após o adensamento do concreto.

Logo a seguir, deve-se proceder com a texturização do pavimento, que deve estar de acordo com os parâmetros definidos em projeto e validados pelo Município. Para regiões de baixa velocidade, vias locais e coletoras, admite-se como acabamento, nível de rugosidade simples como alisamento camurçado, grosso ou superior, não sendo admitido acabamento

lapidado ou polido. Para regiões com declive é recomendado o acabamento vassourado ou superior nestes casos importante reforçar o adensamento do concreto para diminuir o afloramento das macrofibras estruturais. Para regiões com velocidade acima de 40 km/h deve se utilizar acabamento com textura vassourado ou utilização de pentes metálicos que provocarão ranhuras na superfície das placas.

A vassoura ou o pente metálico devem ser passados na direção transversal à faixa concretada, de forma homogênea e constante, afim de obter ranhuras contínuas, uniformes e alinhadas ao longo do pavimento como um todo.

As ranhuras devem ser leves para não comprometer o acabamento final do pavimento e evitar geração acentuada de ruídos. As ranhuras devem ser verificadas através do ensaio de macha de areia, onde a altura das ranhuras deve ficar entre 0,6 e 1,2 mm.

12. Cura do concreto

A Norma ABNT NBR 14931 descreve que a cura de concreto envolve o conjunto de medidas que visam evitar sua secagem prematura e prover a pasta de cimento de água suficiente para sua hidratação, particularmente nas camadas superficiais das peças.

O concreto deve ser hidratado para que, a partir das reações de hidratação do cimento, este possa adquirir no futuro as propriedades desejadas, como resistência, baixa permeabilidade, baixa difusividade, alta estabilidade do volume não retraindo, resistência à abrasão e resistência a produtos químicos.

Deve ser empregada a cura química, com produtos para a cura primária e cura secundária, seguindo a norma ABNT NBR 14391. A cura primária é aplicada durante o lançamento do concreto, imediatamente após o seu adensamento por régua / treliça vibratória. Geralmente, se usa uma dosagem de 0,15 L / m² até 0,35 L / m² para o produto da cura primária.

Enquanto a cura secundária é aplicada a partir do momento em que a superfície perde o brilho, ou seja, esteja com o aspecto fosco (sem brilho), geralmente depois da execução do serviço da texturização. Para a cura secundária, encontra-se consumo comum de 0,35 L / m² a 0,50 L / m² visando a formação de película contínua, cujo objetivo é impedir a perda de água de amassamento do concreto para o ambiente.

Os produtos para a cura primária e para a cura secundária devem ser aplicados em toda a superfície do pavimento conforme orientações do fabricante. Normalmente, ambos os agentes de cura, primária e secundária, têm uma pigmentação branca (clara) após a aplicação na superfície. Principalmente a cura secundária, deve obedecer aos requisitos descritos na norma ASTM-C 309 com uma taxa de evaporação $\leq 0,55$ kg/m².

A aplicação dos agentes de cura deve ser executada por meio de aspersão. O período total de cura é o período no qual recomenda a não circulação de qualquer tráfego sobre o pavimento recém-executado.

O período total de cura deverá ser de 7 dias, período no qual recomenda-se a não circulação de qualquer tráfego sobre o pavimento recém-executado.

Caso as condições climáticas apresentem-se muito exacerbadas, calor ou frio em excesso e/ou muito vento, deve-se proceder com a cura úmida adicional neste período de 7 dias, espalhando-se mantas de geotêxtil umidificadas sobre o pavimento recém-executado.

No final da obra, após passado o período de cura, deve-se prever a limpeza do pavimento com pressão de água para remoção da película de cura, assim permitindo a pintura de sinalização no pavimento.

13. Desmoldagem

As formas só poderão ser retiradas decorridas ao menos 12 horas da finalização da concretagem (atentar para especificações do concreto) e, desde que o concreto possa suportar-se nenhum dano a operação de desmoldagem. Durante a desmoldagem deverão ser tomados os cuidados necessários para evitar o esborcinamento nos cantos das placas.

Recomenda-se que as faces laterais das placas, ao serem expostas pela remoção das fôrmas, sejam imediatamente protegidas por processo que lhes proporcione condições de cura análogas às da superfície do pavimento.

14. Juntas

A locação das seções onde serão executadas as juntas deverá ser feita por medidas topográficas, devendo ser determinadas as posições futuras por pontos fixos estabelecidos nas duas margens da pista, ou ainda, sobre as formas estacionárias.

Deve-se estabelecer um Plano de Corte no qual se determine o momento adequado e a ordem de abertura das juntas transversais, que devem ser trabalhadas de modo a aliviar as tensões no pano concretado. Em síntese, deve-se adotar uma estratégia de corte na qual os panos venham sendo reduzidos, aliviando assim as tensões incidentes.



As juntas deverão obedecer a paginação do projeto e serem serradas no primeiro momento possível após o início de pega do concreto, momento no qual o concreto jovem já se encontra endurecido e assim possível apoiar o equipamento de corte sem provocar depressões no concreto e esborcinamento nos cortes. Esse momento específico vai depender das condições climáticas, do concreto e diversos outros aspectos, mas na grande maioria dos casos ele se dá por volta de 4 - 8h após a concretagem (janela de serragem).

A profundidade do corte será de 1/3 da espessura da placa e sua largura será de 2 a 3mm. Para as condições finais das juntas deverão ser atendidas as recomendações especificadas no detalhamento do projeto, inclusive as condições de preenchimento (selagem) das juntas, quando necessários (juntas de construção).

Ao fim de cada jornada de trabalho, ou sempre que a concretagem tiver de ser interrompida por mais de 60 minutos, deverá ser executada uma junta de construção cuja posição deve coincidir com a de uma junta transversal indicada no projeto.

Entre a placa de concreto e o meio fio poderá ser inserido EPS (isopor) de espessura demínimo 3mm, para que não aja aderência entre o pavimento e o meio fio, assim não formando um único elemento e possibilitando a pequena movimentação de ambos.

Caso o meio fio seja moldado in loco recomenda-se que suas juntas coincidam com as juntas transversais do pavimento, evitando-se assim fissuras induzidas nesse elemento.

15. Selagem das Juntas

Para a aplicação do material de selagem das juntas (quando especificadas), limpar as juntas cuidadosamente com a ponta de um cizel, vassouras de fios duros e ar comprimido.

O material de selagem das juntas deve ser elástico, de silicone autonivelante, resistente a ações climáticas, raio ultravioleta e intempéries, e deve ser aplicado cuidadosamente no interior dos sulcos, de modo a preencher a junta sem transbordamento. Os excessos e respingosna superfície devem ser removidos.

A profundidade de penetração do material selante e suas características devem ser executadas conforme definidas no projeto.

“Para ruas de cidades com espaçamentos de juntas curtos, a quantidade de abertura e fechamento de juntas é pequena. Como resultado, a eficácia da vedação de juntas para vias urbanas não é tão crítica quanto para espaçamentos de juntas longos e para pavimentos de rodovias com alto volume de caminhões” ACPA – Projeto e construção de juntas para ruas de concreto. Assim quando encontrado tal situação, concentra-se a selagem para as áreas com corrente de águas próximas ao meio fio e entre placas com barras de transferência e ligação.

16. Abertura ao tráfego

O pavimento pronto só pode ser aberto ao tráfego quando atingida a resistência mínima de aceitação. Recomenda-se a aceitação de 80% da resistência especificada do concreto,

17. Controle de qualidade e ensaios

A empresa executora deverá apontar laboratório que irá realizar os ensaios e controle de qualidade para a prefeitura que terá poder de veto, caso este laboratório não apresente os requisitos técnicos necessários.

Os ensaios que serão exigidos para o controle tecnológico são baseados e indicados nasEspecificações Técnicas “ET-DE-P00/040 – Pavimento de Concreto de Cimento Portland

Sobre Plataforma de Terraplenagem – Manual”. Definidas conforme tipologias de projeto.

18. Controle do acabamento superficial

Após a conclusão de cada trecho, antes da liberação ao tráfego, este deverá ser avaliado quanto ao conforto e à suavidade ao rolamento de acordo com a especificidade e velocidade limite da via, e conforme a norma DNIT 063/2004-PRO (Pavimento de Concreto - Avaliação Subjetiva), que apoia este documento.

O laudo desta avaliação deverá atribuir ao trecho inspecionado um conceito sobre a condição geral da estrutura e do comportamento da pavimentação, avaliando os aspectos de integridade, capacidade e regularidade superficial, resistência à derrapagem, potencial de hidroplanagem e outros. Este conceito será dado por uma nota entre 0 e 100, sendo aprovados quanto a estes aspectos somente os trechos que apresentarem nota igual ou superior a 40.

Caso o trecho não seja aceito, a superfície do pavimento deverá ser reparada e, caso isto não seja possível, os trechos considerados com acabamento ruim deverão ser demolidos e refeitos.

19. Determinação da resistência do concreto

Na inspeção do concreto deverá ser determinada a resistência à tração na flexão na idade de controle fixada no projeto, ou, a resistência à compressão axial, desde que tenha sido estabelecida através de ensaios, sendo para o concreto em questão, uma correlação confiável entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão axial.

20. Moldagem dos corpos-de-prova

A cada trecho de no máximo 2.500m² de pavimento, definido para inspeção, deverão ser moldados aleatoriamente e de amassadas diferentes, no mínimo, 6 exemplares de corpos de prova sendo cada exemplar constituído por, no mínimo, 2 corpos de prova prismáticos ou cilíndricos de uma mesma amassada, cujas dimensões, preparo e cura deverão estar de acordo com a norma NBR 5738. Na identificação dos corpos de prova deverá constar a data da moldagem, a classe do concreto e outras informações julgadas necessárias.

21. Ensaios

Os corpos de prova deverão ser ensaiados na idade de controle fixada no projeto, sendo a resistência à tração na flexão determinada nos corpos de prova prismáticos conforme a norma NBR 12142, e a resistência à compressão axial nos corpos de prova cilíndricos de acordo com a norma NBR 5739.

Dos 2 resultados obtidos será escolhido o de maior valor, que será considerado como sendo a resistência do exemplar.

22. Determinação da resistência característica

A resistência característica estimada do concreto do trecho inspecionado à tração na flexão ou à compressão axial será determinada a partir das expressões:

$$f_{ctM,est} = f_{ctM,28} - k_s \text{ ou } f_{ck,est} = f_{c28} - k_s$$

Onde:

- $f_{ctM,est}$ = valor estimado da resistência característica do concreto à tração na flexão;
- $f_{ctM,28}$ = resistência média do concreto à tração na flexão, na idade de 28 dias;
- $f_{ck,est}$ = valor estimado da resistência característica do concreto à compressão axial;
- $f_{c,28}$ = resistência média do concreto à compressão axial, na idade de 28 dias;
- s = desvio padrão dos resultados;
- k = coeficiente de distribuição de Student;
- n = número de exemplares.

O valor do coeficiente k é função da quantidade de exemplares do lote, sendo obtido na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de distribuição de Student													
AMOSTRAGEM VARIÁVEL													
<i>n</i>	6	7	8	9	10	12	15	18	20	25	30	32	> 32
<i>k</i>	0,920	0,906	0,896	0,889	0,883	0,876	0,868	0,863	0,861	0,857	0,854	0,842	0,842

23. Aceitação automática

O pavimento será aceito automaticamente quanto à resistência do concreto, quando se obtiver uma das seguintes condições:

$$f_{ctM, est} \geq f_{ctM,k} \text{ ou } f_{ck, est} \geq f_{ck}$$

24. Verificações suplementares

Quando não houver aceitação automática deverão ser extraídos no trecho, em pontos uniformemente espaçados, no mínimo, 6 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro, ou correspondentes a espessura da placa de concreto, segundo a norma NBR 7680, ou corpos de prova prismáticos, conforme a norma ASTM-C 42, os quais serão ensaiados

respectivamente à compressão axial (norma NBR 5739) e à tração na flexão (norma NBR 12142). Estes corpos de prova devem ser extraídos das placas que apresentarem as menores resistências no resultado do controle.

Com os resultados obtidos nestes corpos de prova será determinada a resistência característica pela fórmula $f_{ctM,est} = f_{ctM,28} - k_s$ ou $f_{ck,est} = f_{c,28} - k_s$. O trecho será aceito se for atendida a condição $f_{ctM,est} \geq f_{ctM,k}$ ou $f_{ck,est} \geq f_{ck}$. Caso esta condição não seja atendida deverá ser feita revisão do projeto, adotando para a resistência do concreto do trecho a resistência característica estimada e a espessura média determinada no controle geométrico.

Se o trecho ainda não for aceito deverá ser adotada, de acordo com o parecer da Fiscalização e sem ônus para o Município, uma das seguintes decisões:

- Aproveitamento do pavimento, com restrições ao carregamento ou ao uso.
- Reforço do pavimento.
- Demolição e reconstrução pavimento.

25. Controle de trafegabilidade

A empresa executora é responsável pelo controle de trafegabilidade sobre o pavimento (pedestres, automóveis e outros) durante o período da obra e em horário imediato a sua conclusão.

26. Limpeza da obra / acabamento final

Deverá ser efetuada a completa limpeza da pista antes de sua liberação por completo ao tráfego, buscando eliminar quaisquer detritos que venham a atrapalhar sua utilização.

A obra deve ser liberada apenas após a completa execução dos serviços de sinalização horizontal.

27. Aceite da obra

A prefeitura municipal através do seu corpo técnico irá analisar todas os relatórios de controle de qualidade e ensaios para aceite da obra. A obra será considerada aceita e entregue somente após entrega do relatório final comprovando estarem cumpridos todos os requisitos do controle de qualidade baseados nos Ensaios e Critérios de Aceitação exigidos pela Especificação Técnica “ET- DE-P00/040 – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem – Manual”.

A prefeitura reserva-se o direito de não aceitar a obra caso os resultados não estejam de acordo com os critérios normativos estabelecidos, bem como pode pedir a realização de novos ensaios tantos quantos forem necessários para essa avaliação.

A prefeitura terá amplo e irrestrito acesso às informações relativas aos serviços e materiais descritos neste memorial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. – Curso de Tecnologia de Pavimentos de Concreto: Módulo 2 - Projeto e Dimensionamento do Pavimento. Em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Pavim_Concreto_Apres_Mod02%20ABCP.pdf>.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16935/21 - Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16940/21 - Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. – NBR 16942/21 - Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSUMPÇÃO, A. J., CAREIRO, D. S., MENEZES, F. F. C., MILANEZI, M. R. – Pavimento Rígido de Concreto: Utilização nos Corredores de Ônibus de São Paulo. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2014.

BALBO, J. T. – Pavimentos de Concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BRITO, L. A. T., GRAEFF, Â. G. – Métodos de Dimensionamento de Pavimentos: Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações. Relatório Final de Pesquisa. Porte Alegre, 2009.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. – Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. – Manual de Pavimentos Rígidos. 2.ed. - Rio de Janeiro, 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. – NORMA 054/2004 - PRO. Pavimento Rígido - Estudo de Traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. – NORMA 139/2010 - ES. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

PITTA, M. R. – Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84. 2ª edição, São Paulo, ABCP, 1996.

PITTA, M. R. – Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84. 3ª edição, São Paulo, ABCP, 1998.

PITTA, M. R. – Pavimento de Concreto, Parte 1. 1999. Disponível em: <piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/pavimento-de-concreto-parte-1-85160-1.aspx>.

SENÇO, W. – Manual de Técnicas de Pavimentação. São Paulo: PINI. 174 p., 1997.

DNIT 054/2004 – PRO – Pavimento rígido – Estudos de traços e ensaios de caracterização de matérias.

DNIT 047/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte.

DNIT 048/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho.

DNIT 049/2013 – ES – Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de forma deslizante.

DNIT 141/2010 – ES – Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.

DNIT 056/2013 – ES – Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo.

NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento.

NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. NBR 9895 – Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.

NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação.

NBR 7583 – Execução de pavimento de concreto simples por meio mecânico.

NBR 7223 – Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone - Ensaio de abatimento.

NBR 7680 – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto.

NBR 12142 – Determinação da resistência à tração em corpos de prova prismáticos. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação.

NBR 16938-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade.

NBR 16939-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio.

NBR 16940-02/21 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio.

NBR 16942-02/21 – Fibras Poliméricas para Concreto – Requisitos e Métodos de Ensaio. ABNT PR1011/2021 – Projeto de Pavimentos Urbanos de Concreto, Rio de Janeiro, 2021.

ASTM D5893 – Standard Specification for Cold Applied, Single Component, Chemically Curing Silicone Joint Sealant for Portland Cement Concrete Pavements.

ASTM C-42 – Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.

ASTM C 309 – Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.

DNER-ME 024/94 – Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman.

DNER-PRO 273/96 – Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.

ET-DE-P00/001 – DER/SP – Melhoria e preparo do subleito. ET-DE-P00/002 – DER/SP – Reforço do subleito.

ET-DE-P00/008 – DER/SP – Especificação técnica Sub-base ou Base de Brita Graduada.

ET-DE-P00/044 - DER/SP – Concreto Compactado com Rolo para Sub-base e Base de Pavimento de Concreto de Cimento Portland.

ET-DE-P00/039 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Aplicado com Formas Deslizantes.

ET-DE-P00/040 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem - Manual.

ET-DE-P00/041 – DER/SP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland Sobre Plataforma de Terraplenagem - Mecânico.

NBR 7212 – Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle.

NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento.

NBR 14931 – Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos.

DNIT 050/2004 – EM – Pavimento rígido – Cimento Portland Especificação de material. DNER-EM 037 – Agregado graúdo para concreto de cimento.

NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

NBR NM 47 – Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico.

NBR NM 102 – Concreto – Determinação da exudação.

ACI 360 R10 – Guide to Design of Slabs-on-Ground.

ACI 330 R08 – Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots.

ACI 330 R21 – Commercial Concrete Parking Lots and Site Paving Design and Construction.

ACI 330.2R/17 – Guide for the Design and Construction of Concrete Site Paving for Industrial and Trucking Facilities.

ACI 325.14R/17 – Guide for Design and Proportioning of Concrete Mixtures for Pavements.

ACI 325.9R/15 – Guide for Construction of Concrete Pavements.

American Concrete Pavement Association – Subgrades and Subbases for concrete pavements.

American Concrete Pavement Association – Concrete Information - When do you need to use a subbase under concrete pavements?.



American Concrete Pavement Association – Concrete Information – Design and Construction of Joints for Concrete Streets.

Esta publicação foi
elaborada pelas
Coordernadorias Técnicas
da ABESC e Falcão Bauer e
não pode ser reproduzida
no todo ou em partes sem
sua prévia autorização.



Av. Brig. Faria Lima, 2894 - 7°. andar - cj. 71/72
São Paulo - SP - CEP 01451-902
Tel: (11) 3167-6446