"Design of Concrete Mixtures"

(*Projeto de misturas de concreto*)

Duff Andrew **Abrams**

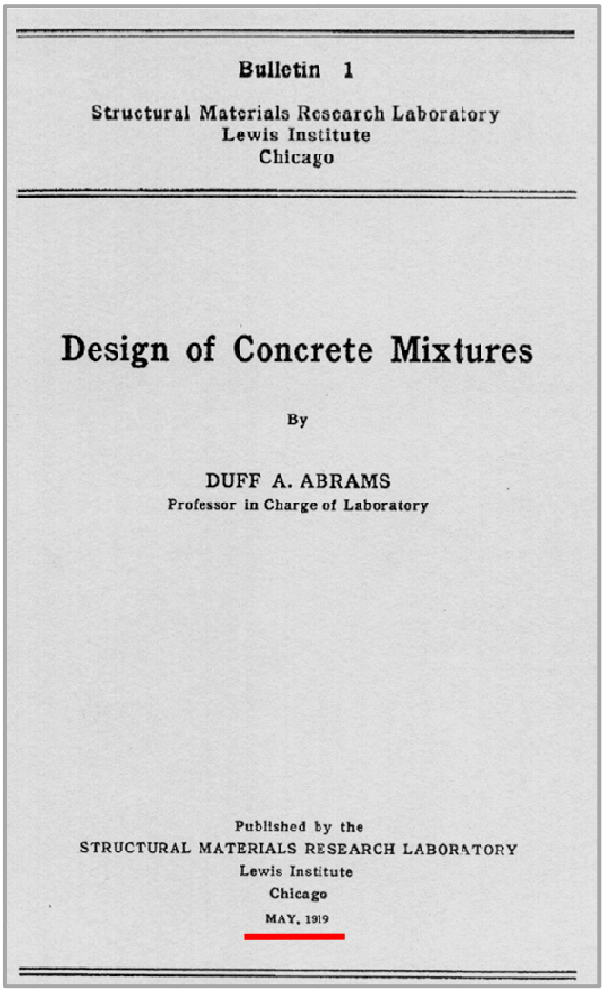
Este artigo de Abrams foi a base da dosagem do concreto. Foi publicado por D. A. Abrams em 1919, após apresentá-lo em reunião da Portland Cement Association - P.C.A. em 1918.

Esse artigo foi re-impresso em 2009 pela **BIBLIO**LIFE. www.bibliolife.com

Abrams introduziu, como fatores básicos para a dosagem do concreto :

- Relação Água /Cimento
- Módulo de Finura do agregado.
- Abatimento do concreto para medir a trabalhabilidade. (Slump) (*Usava ainda um cilindro e não um tronco de cone.*)

As sugestões de **Abrams** se basearam em mais de 50.000 ensaios realizados em Chicago entre 1914 e 1918. Suas proposições são usadas até hoje, quase 100 anos depois.



Bulletin 1

Structural Materials Research Laboratory
Lewis Institute
Chicago

Design of Concrete Mixtures

By

DUFF A. ABRAMS
Professor in Charge of Laboratory

Published by the
STRUCTURAL MATERIALS RESEARCH LABORATORY
Lewis Institute
Chicago
MAY, 1919

"Design of Concrete Mixtures"

(Projeto de misturas de concreto*)

Duff Andrew **Abrams**

Professor Chefe do Laboratório do Instituto Lewis , Chicago.

* Reimpressão dos Anais da Reunião Anual da Associação de Cimento Portland, P.C.A., ocorrida em New York , Dezembro 1918.

"... O "projeto" de misturas de concreto é um assunto de interesse vital para todos os engenheiros e construtores ligados a obras de concreto. O problema em questão pode ser um dos seguintes:

1. Que mistura é necessária para produzir um concreto com resistência adequada para uma determinada obra ?
2. Com determinados materiais quais as proporções que darão o melhor concreto com o custo mínimo ?
3. Entre diferentes lotes de materiais, de diferentes características, qual é o mais adequado para o objetivo.
4. Qual é o efeito na resistência do concreto quando há variações na mistura, na consistência, no tamanho ou na granulometria do agregado?

"Proporcionar" (dosar) concreto envolve, freqüentemente, a seleção dos materiais e também as suas combinações.

Em geral, a questão dos custos relativos também está presente.

O termo "projeto" é usado no título desse artigo diferentemente de " proporcionamento" porque há a intenção de mostrar que cada parte do problema é abordada racionalmente com determinado objetivo.

O projeto de misturas de concreto, tendo em vista produzir um resultado desejado, da maneira mais econômica, envolve muitas complicações que até o presente têm desafiado qualquer análise.

Muitos métodos diferentes de "proporcionamento" (dosagem) têm sido sugeridos. Os mais importantes podem ser caracterizados da seguinte maneira :

1. ***Seleção arbitrária*** , como mistura 1 **:** 2 **:** 4 , (cimento **:** areia **:** pedra), sem referência ao tamanho ou à granulometria do agregado fino e do agregado graúdo;
2. ***Densidade dos agregados***, tendo como objetivo assegurar um agregado de máxima densidade;
3. ***Densidade do concreto***, no qual é feita a tentativa de assegurar um concreto de máxima densidade;
4. ***Análise das peneiras***, no qual a granulometria dos agregados é feita para se aproximar de alguma curva de peneiramento pré-determinada, que é considerada como a que dá os melhores resultados;
5. ***Área da superfície dos agregados*** (superfície especifica).

É de conhecimento geral que o método da ***seleção arbitrária***, no qual quantidades pré-fixadas de agregados finos e graúdos são misturadas, sem levar em conta o tamanho e a granulometria de cada material, está longe de ser satisfatório.

Nossos experimentos mostraram que os outros métodos mencionados acima também são sujeitos a sérias limitações.

Nós constatamos que a máxima resistência do concreto não depende de um agregado de máxima densidade ou de um concreto com máxima densidade. Constatamos também que os métodos que têm sido propostos para o "proporcionamento" do concreto, pela análise das peneiras dos agregados (granulometria) são baseados em uma teoria errônea.

Todos os métodos já propostos até hoje para o "proporcionamento" falharam em não dar a atenção adequada à quantidade de água na mistura. Nosso trabalho experimental enfatizou a importância da água na mistura do concreto e mostrou que a água é, de fato, o ingrediente mais importante, visto que pequenas variações no teor de água produzem mudanças mais importantes na resistência e em outras propriedades do concreto do que as variações similares dos outros ingredientes da mistura.

Obs: Segundo Abrams : O cimento usado tinha um peso aparente = 94lb /cub. ft = 94 x 0,45359 kg / $(30,48\ cm)^3$ = 0,0015057kg/cm3 =1,506 kg/litro = 1506 kg /m3

Novos Estudos das Misturas de Concreto

Durante os últimos 3 anos um grande número de investigações têm sido feitas no Laboratório de Pesquisas de Materiais Estruturais, *Lewis Institute*, Chicago.
Lançaram luz sobre o assunto "proporcionar" (dosar) o concreto.
Essas investigações foram executadas em colaboração do Instituto Lewis com a P.C.A. , Portland Cement Association.

Esses estudos cobriram uma investigação sobre a inter-relação entre os seguintes fatores.

1. A consistência (quantidade de água na mistura).
2. O tamanho e a granulometria dos agregados.
3. A mistura (proporção dos componentes do concreto).

Qualquer estudo abrangente do "proporcionamento" do concreto, deve levar em conta todos esses fatores.

Durante esse período, 1914 a 1919, cerca de 50 000 testes foram executados e tiveram por base esse tema.

A maioria desses ensaios ficou restrita à resistência à compressão dos concretos e das argamassas.

Essas investigações nos deram uma nova compreensão dos fatores que embasam o "proporcionamento" correto das misturas do concreto, e que mostram as limitações dos métodos antigos.

Algumas fases dessas investigações ainda estão em andamento.

A seguir os mais importantes princípios que foram estabelecidos para o projeto de misturas de concreto.

Num trabalho resumido como esse é impraticável, até o momento, apresentar mais do que um resumo da aplicação dos princípios básicos aos problemas práticos.

Apenas em alguns casos, são fornecidos dados experimentais, nos quais essas conclusões são baseadas.

Com materiais predeterminados para fazer o concreto, e com condições de teste bem definidas, a quantidade da água usada na mistura determina a resistência do concreto, desde que a mistura tenha uma plasticidade suficiente para ser trabalhável.

A análise do peneiramento (granulometria) fornece a única base correta para o "proporcionamento" dos agregados da mistura do concreto.

Foi desenvolvido um método simples de medida do tamanho efetivo e da granulometria de um agregado. Esse método deu origem a uma função conhecida como "módulo de finura" do agregado.

O módulo de finura de um agregado fornece um método racional de misturar materiais de diferentes tamanhos para as misturas de concreto.

A curva do peneiramento do agregado (granulometria) pode ser muito diferente na forma sem que tenha qualquer influência na resistência do concreto.

Agregados de qualidades equivalentes na feitura do concreto podem ser produzidos por um número infinito de diferentes granulometrias de um dado material.

Agregados de qualidades equivalentes na feitura do concreto podem ser produzidos a partir de materiais com tamanhos e granulometrias muito diferentes.

Em geral, agregados finos e agregados graúdos, de tamanhos ou granulometrias muito diferentes, podem ser combinados de modo a produzir resultados similares no concreto.

A granulometria do agregado que produz o concreto mais resistente não é a graduação que dá a maior densidade (menos vazios). Para concretos com a maior resistência é necessária uma granulometria mais graúda que a granulometria que dá a maior densidade.

Quanto mais rica a mistura (em cimento), mais graúda deve ser a granulometria de um agregado com um dado diâmetro máximo; portanto maior será a discrepância entre máxima densidade e a melhor graduação (granulometria).

Uma análise completa foi feita sobre as necessidades de água das misturas de concretos.

A quantidade de água necessária é regida pelos seguintes fatores:

- A condição de "trabalhabilidade", que deve ser usada para o concreto, a plasticidade relativa ou a consistência;
- A consistência normal do cimento;
- O tamanho e a graduação do agregado – medida pelo módulo de finura;
- Os volumes relativos do cimento e dos agregados – a mistura (mix) ;
- A absorção dos agregados;
- A água contida no agregado.

Existe uma estreita relação entre a graduação do agregado (granulometria) e a quantidade de água necessária para produzir um concreto trabalhável.

O teor de água da mistura do concreto é mais bem avaliado em relação ao volume de cimento, isto é, a razão água/cimento (em volume).

A forma da partícula e a qualidade do agregado têm menos influência na resistência do concreto do que tem sido relatado por outros experimentadores.

Efeito da quantidade de água na resistência do concreto.

A Figura 1 mostra a relação entre o teor de água e a resistência à compressão, em ensaios aos 28 dias, em cilindros de 6” X 12” (polegadas).

Foram feitas misturas desde o mix 1:15 (muito agregado) até a pasta de cimento (neat); cada mistura foi feita com agregados variando de tamanho, da areia da peneira 14 até a pedra 1 ½” polegada ; foi usada uma ampla variação nas consistências para todas as misturas e granulometrias.

A quantidade de água do concreto é expressa como a razão entre o volume da água e o volume do cimento, considerando que o cimento pesa 94 lb./cu,ft (libra peso por pé cúbico = 1506 kg/m3) .

Na figura, cada mistura é representada por um símbolo (marcador) diferente, mas nenhuma distinção é feita entre agregados de tamanhos diferentes ou entre consistências diferentes.

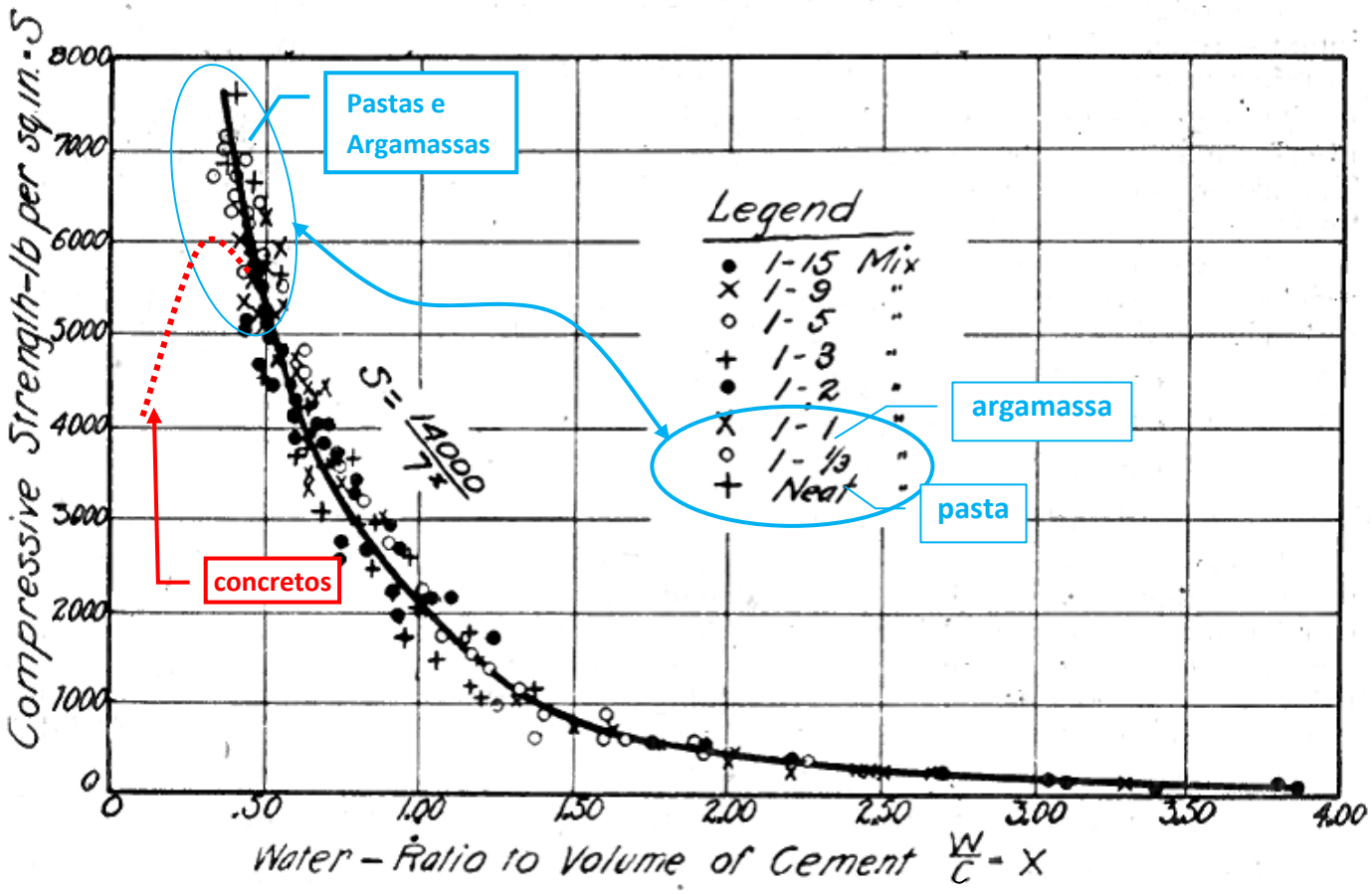


FIG. 1. RELATION BETWEEN STRENGTH OF CONCRETE AND WATER CONTENT
Twenty-eight-day compression tests of 6 by 12-inch cylinders. (Series 83.)

W/C = *X* = fator água cimento **(em volume)**

Obs. de E.C.S Thomaz : A quantidade de água do concreto é expressa como a razão entre o volume da água e o volume aparente do cimento. Abrams considera que o cimento tem peso aparente de 94 lb./cu,ft (libra peso por pé cúbico = 1506 kgf/m3) .

Obs. de E.C.S Thomaz : para X < 0,50 em volume, Abrams só conseguia fazer argamassas ricas em cimento ou apenas pasta. Não existiam superplastificantes e a boa trabalhabilidade era obtida com muita pasta.

Obs. de E.C.S.Thomaz : Gráfico de Abrams transformado para fator água /cimento em peso.

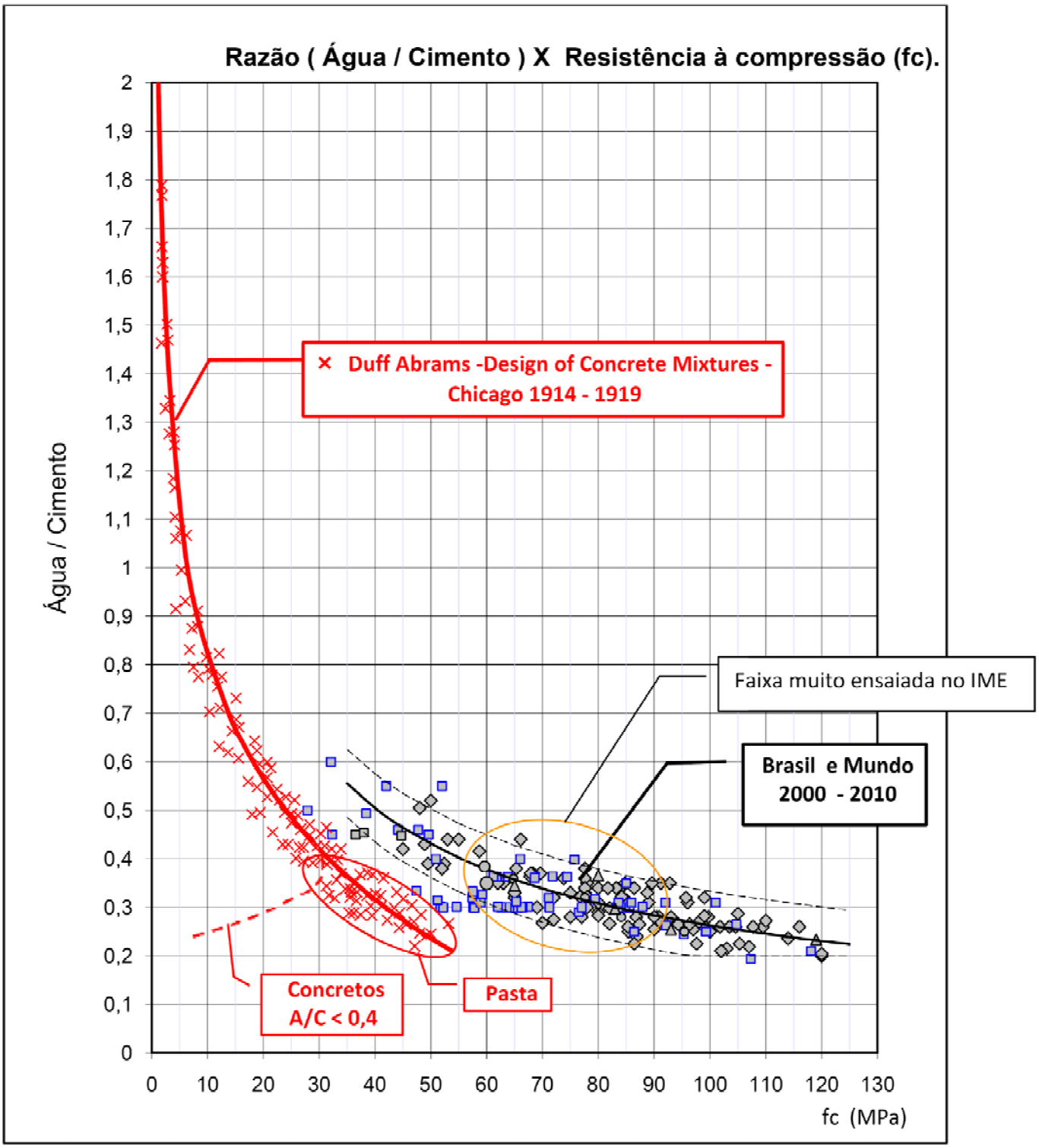


FIG. 1 Relação entre a resistência do concreto e o teor de água (A/C em peso).

- Segundo Abrams, para fator água /cimento (A/C) < 0,40 (em peso) os concretos não eram trabalháveis e a resistência era muito baixa. Ver tracejado na figura. Nessa faixa, Abrams só conseguia fazer argamassas e pastas ricas em cimento.
- Não havia superplastificantes e a boa trabalhabilidade era obtida com muita pasta.
- **Ver também os anexos 1 a 5 nas últimas páginas .**

- Quando a resistência à compressão é plotada versus o fator (água/cimento), obtêm-se uma curva contínua devido à superposição dos pontos das diferentes misturas (mixes).
  Valores correspondentes aos concretos secos foram omitidos. Se esses pontos fossem mostrados obteríamos uma série de curvas caindo para baixo e para a esquerda da curva mostrada.
  Vê-se imediatamente que o tamanho e a granulometria do agregado, e também a quantidade de cimento, não têm qualquer importância, exceto no fato de que esses fatores influenciam a quantidade de água necessária para produzir uma mistura trabalhável.
  Isto nos dá um conceito inteiramente novo acerca da influência dos materiais constituintes da mistura do concreto. É o princípio mais básico que aflorou dos nossos estudos do concreto.

- A equação da curva é da forma :

$$S = \frac{A}{B^x} \quad \text{.....} \quad (1)$$

  Onde :
  S = é a resistência à compressão do concreto
  $\boldsymbol{x}$ = a relação entre o volume da água e o volume do cimento na mistura.
  A e **B** = constantes cujos valores dependem da qualidade do cimento usado, da idade do concreto, das condições de cura, etc ...
  Esta equação expressa a lei da resistência do concreto, no que concerne às proporções dos materiais.
  Foi visto que para um dado material do concreto, a resistência depende apenas de um fator, a razão entre a água e o cimento.

- Equações que têm sido propostas no passado para esse fim contêm termos que levam em conta fatores como quantidade de cimento, proporções entre agregado fino e agregado graúdo, vazios no agregado, etc., mas todas elas omitiram o único termo importante; isto é, ***a água***.

  Para as condições desses testes, a equação (1) fica :

$$S = \frac{14000}{7^x} \quad \text{.....} \quad (2)$$

  A relação dada acima vale enquanto o concreto não for muito seco, para a máxima resistência, e o agregado não for muito graúdo para uma dada quantidade de cimento; em outras palavras , vale enquanto tivermos uma mistura trabalhável.

  Outros ensaios feitos em nosso laboratório mostraram que a característica do agregado não faz muita diferença, desde que ele seja limpo e que não seja estruturalmente deficiente.
  Deve-se levar em conta a absorção do agregado, se forem feitas comparações entre diferentes agregados.

- A resistência do concreto responde a mudanças na quantidade de água, independentemente do motivo dessas mudanças.
  A relação água/cimento pode ser mudada devido a qualquer uma das causas abaixo:
  1. Mudança na mistura (teor de cimento)
  2. Mudança no tamanho ou da granulometria do agregado
  3. Mudança na consistência relativa
  4. Qualquer combinação de (1) a (3).

  Em certas condições, uma mistura 1:9 é tão resistente quanto uma mistura 1:2, dependendo apenas do teor de água.
  Não se deve concluir que esses ensaios indiquem que misturas "magras" possam substituir misturas "ricas" sem limites.
  Nós estamos sempre limitados pela necessidade de usar água suficiente para garantir uma mistura trabalhável. O mesmo para a granulometria dos agregados.
  A trabalhabilidade da mistura ditará em todos os casos a quantidade mínima de água que pode ser usada.
  A importância do fator trabalhabilidade no concreto é trazida à baila na sua devida importância.

- O problema do **projeto de misturas de concreto** se resume no seguinte:
  Produzir um concreto trabalhável, que tenha uma dada relação água/cimento, usando uma quantidade mínima de cimento; ou ao contrário , produzir um concreto trabalhável com uma relação água/cimento mínima, usando uma dada quantidade de cimento.
  Os métodos para assegurar a melhor granulometria do agregado e o uso do concreto mais seco, que seja trabalhável, são considerados apenas como ferramentas que nos permitam alcançar os resultados acima mencionados.

Módulo de finura do agregado

Os trabalhos experimentais realizados no laboratório, deram origem ao que nós denominamos módulo de finura do agregado.
Essa função fornece um método para a medida do tamanho e da granulometria do agregado.
Ela pode ser definida como:
"A soma das porcentagens na análise de peneiras, dividida por 100".
A analise das peneiras é determinada usando as seguintes peneiras da série padrão de Tyler :
100, 48, 28, 14, 8, 4, 3/8", 3/4", 1. 1/2".
Cada peneira tem a abertura livre exatamente o dobro da abertura livre da anterior.
As dimensões exatas das peneiras e o método para determinar o módulo de finura encontram-se na tabela 1.
Note-se que a análise das peneiras é expressa em termos de porcentagem do material por volume, (ou por peso), mais graúdo que cada peneira.

Uma areia "torpedo", bem graduada até à peneira No. 4 dará um módulo de finura de cerca de 3.00 ; um agregado graúdo graduado 4 — 1.1/2" (polegada) dará um módulo de finura de 7,00. Uma mistura dos materiais acima em proporções apropriadas para uma mistura (mix) 1 : 4 terá um módulo de finura de cerca de 5,80.
Uma areia muito fina, como uma areia de dunas, carregada pelo vento, pode ter um módulo de finura tão baixo quanto 1,50.

MÉTODO DE CÁLCULO DO MÓDULO DE FINURA DOS AGREGADOS.

As peneiras usadas são comumente conhecidas como peneiras padrão de Tyler.
Cada peneira tem a abertura livre exatamente o dobro da abertura livre da peneira anterior.
A análise das peneiras pode ser expressa em termos de volume ou de peso.
O módulo de finura de um agregado é a soma das porcentagens dadas pela análise das peneiras, dividida por 100.

TABELA 1

Módulo de finura de Abrams - livro de Abrams pag 5.

				AREIA			**SEIXO**		**CONCRETO**
Tamanho da peneira	Tamanho da abertura quadrada		Fina	Média	Graúda	Fino	Médio	Graúdo	Agregado 25%(B) + 75%(E)
	polegada	mm	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
malha 100	0,0058	0,147	82	91	97	100	100	100	98
malha 48	0,0116	0,295	52	70	81	100	100	100	92
malha 28	0,0232	0,590	20	46	63	100	100	100	86
malha 14	0,0460	1,170	0	24	44	100	100	100	81
malha 8	0,0930	2,360	0	10	25	100	100	100	78
malha 4	0,1850	4,700	0	0	0	86	95	100	71
3/8 polegada	0,3700	9,400	0	0	0	51	66	86	49
¾ polegada	0,7500	18,800	0	0	0	9	25	50	19
1 1/2 polegada	1,5000	38,100	0	0	0	0	0	0	0
Módulo de Finura			1,54	2,41	3,1	6,46	6,86	7,36	5,74

Obs.: O agregado do concreto (G) é composto de 25% da areia (B) misturada com 75% de seixos (E).
Granulometrias equivalentes poderiam ser obtidas misturando:

- 33% da areia média (B) com 67% de seixos graúdos (F)
- 28% da areia fina (A) com 72% de seixos graúdos (F)
- etc ... Ver figuras abaixo.

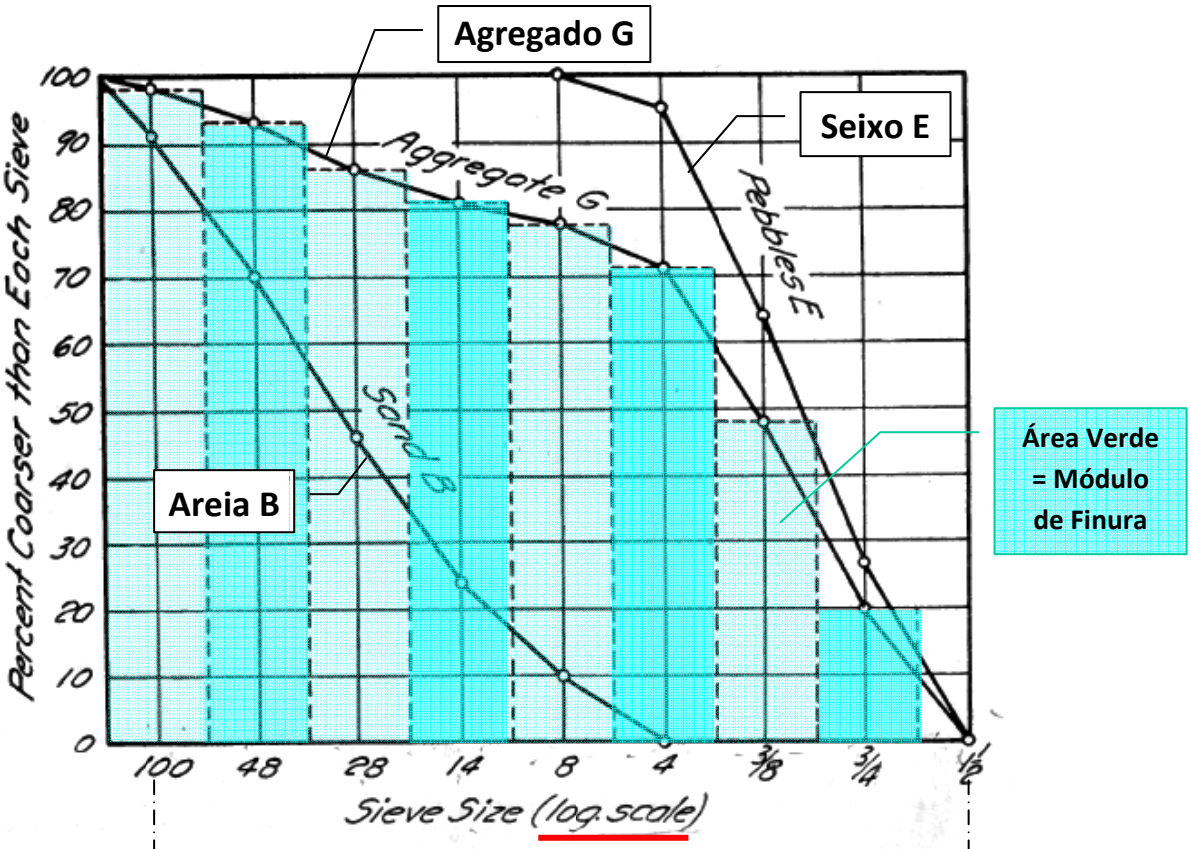
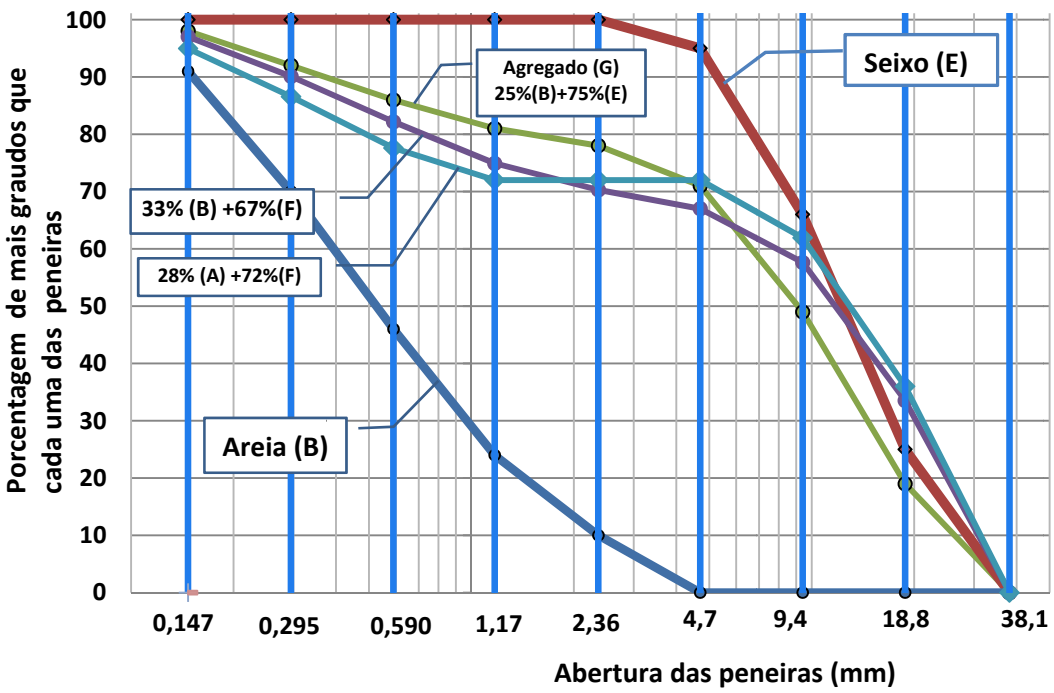


FIG. 2. METHOD OF PLOTTING SIEVE ANALYSIS OF AGGREGATES
Sieve analysis curves for aggregates B, E and G in Table 1.

Análise das peneiras (granulometria) dos agregados



Análise de Peneiras dos Agregados (Granulometria)

- Existe uma estreita relação entre a curva de análise das peneiras para os agregados e o **módulo de finura**.
  De fato, o módulo de finura nos permite, pela primeira vez, interpretar adequadamente a análise de peneiras (granulometria) de um agregado.
  Se o resultado do peneiramento de um agregado for plotado do modo indicado na figura 2 , isto é, usando como ordenada o porcentual de agregado mais graúdo que uma dada peneira, e como abscissa a abertura da peneira (em escala logarítmica) , *o módulo de finura do agregado é definido como a área abaixo da curva da granulometria do agregado.*
  Os retângulos tracejados para o agregado (G), na figura 2, mostram como isso é obtido. Cada retângulo elementar é o módulo de finura do material de um determinado tamanho. O módulo de finura do agregado é a soma dessas áreas elementares.
  Qualquer outra curva granulométrica que der a mesma área total, corresponderá ao mesmo módulo de finura e requererá a mesma quantidade de água para produzir uma mistura com a mesma plasticidade e fará concretos com a mesma resistência, desde que o agregado não seja muito graúdo para a quantidade de cimento usada.

- O **módulo de finura** pode ser considerado como um número abstrato, na realidade ele é a soma de volumes do material.
  Existem vários modos diferentes de calcular o módulo de finura, todos eles dando o mesmo resultado.
  O método dado na tabela 1 é provavelmente o mais simples e o mais direto.
  Algumas das relações matemáticas envolvidas são de interesse.
  A expressão a seguir mostra a relação entre o módulo de finura e o tamanho da partícula:

$$m = 7{,}94 + 3{,}32 \times \log d$$

Onde : **m** = módulo de finura ; **d** = diâmetro da partícula em polegadas

Essa relação é perfeitamente geral, desde que seja usado o conjunto padrão das peneiras mencionadas acima.
As constantes são fixadas para os tamanhos particulares das peneiras usadas.
A base logarítmica é a decimal.
Esta relação se aplica a um material de um só tamanho, ou a uma dada partícula.
O módulo de finura é, então, uma função logarítmica do diâmetro da partícula.
Não é necessário usar essa fórmula para um material peneirado, porque o mesmo valor do módulo de finura pode ser obtido mais facilmente e mais diretamente pelo método usado na Tabela 1.
Esta relação é aplicável a um material peneirado, desde que sejam usadas as quantidades relativas de cada tamanho e que seja usado o diâmetro de cada grupo.
Aplicando a fórmula a um material peneirado estaremos calculando os valores dos retângulos elementares mostrados na Figura 2.

Relação entre o Módulo de Finura e a Resistência do Concreto

Muitas séries diferentes de ensaios mostraram que, para uma determinada condição plástica do concreto e para um mesmo mix (cimento — agregado), existe uma estreita relação entre o módulo de finura do agregado e a resistência e outras propriedades do concreto.
Vimos que a razão para esse fato é que o módulo de finura reflete as mudanças no fator (água/cimento) necessárias para produzir uma dada condição plástica.

Figuras 3 e 4 dão os resultados de alguns ensaios à compressão, que mostram a relação entre a resistência do concreto e o módulo de finura do agregado.

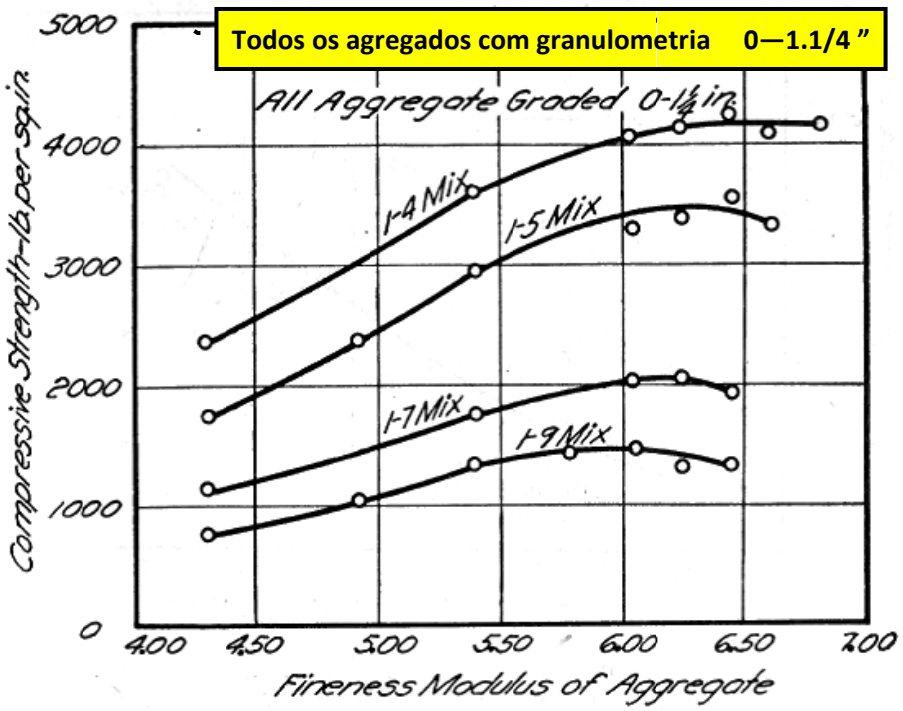


FIG. 3. RELATION BETWEEN FINENESS MODULUS OF AGGREGATE AND STRENGTH OF CONCRETE

FIG. 3 - RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE FINURA DO AGREGADO E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO. Resistência à compressão em psi. (libras por polegada quadrada).

Agregado de Areia e Seixo rolado com grãos de 0 a 1.1/4” polegada ;
Ensaios de compressão a 28 dias em cilindros de 6 polegadas (15cm) x 12 polegadas (30cm).
(Series 78.)
As granulometrias dos agregados são dadas abaixo.

Tabela da Figura 3 – **RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE FINURA DO AGREGADO E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO**

Agregado de Areia e Seixo rolado com granulometria de 0 até 1.1/4". Ensaios de compressão aos 28 dias em cilindros 6" x 12" (Serie 78). A granulometria é dada abaixo.

Faixa de tamanho	Módulo de finura	Porcentagem de agregado mais graúdo que as peneiras da série Tyler								
		100	**48**	**28**	**14**	**8**	**4**	**3/8"**	**3/4 "**	**1 ½"**
0 - 1 ¼"	4,30	89	82	72	62	51	38	25	11	0
0 - 1 ¼"	4,93	95	89	82	73	61	47	32	14	0
0 - 1 ¼"	5,40	98	94	88	80	69	55	38	18	0
0 - 1 ¼"	6,04	99	98	95	90	81	68	49	24	0
0 - 1 ¼"	6,25	100	99	97	92	85	72	53	27	0
0 - 1 ¼"	6,45	100	99	98	95	88	77	58	30	0
0 - 1 ¼"	6,60	100	100	99	96	91	80	62	32	0
0 - 1 ¼"	6,82	100	100	99	98	94	86	68	37	0

Vê-se na Figura **3**, que pode ser traçada uma curva separada para cada mix (cimento — agregado). Para cada caso existe um crescimento contínuo da resistência à compressão do concreto com o módulo de finura do agregado, até que seja atingido certo valor, que corresponde ao máximo.
Nota-se também que esse máximo corresponde a valores cada vez mais altos do módulo de finura, na medida em que se aumenta a quantidade de cimento na mistura.
Em outras palavras, a máxima resistência ocorre com um módulo de finura de 5,80 para um mix 1:9 , e com um módulo de finura de 6,40 para um mix de 1:4 .
Nesses ensaios, os diferentes valores do módulo de finura foram obtidos usando agregados mais graúdos, mas em todos os casos mantendo o tamanho limite de 1.1/4".

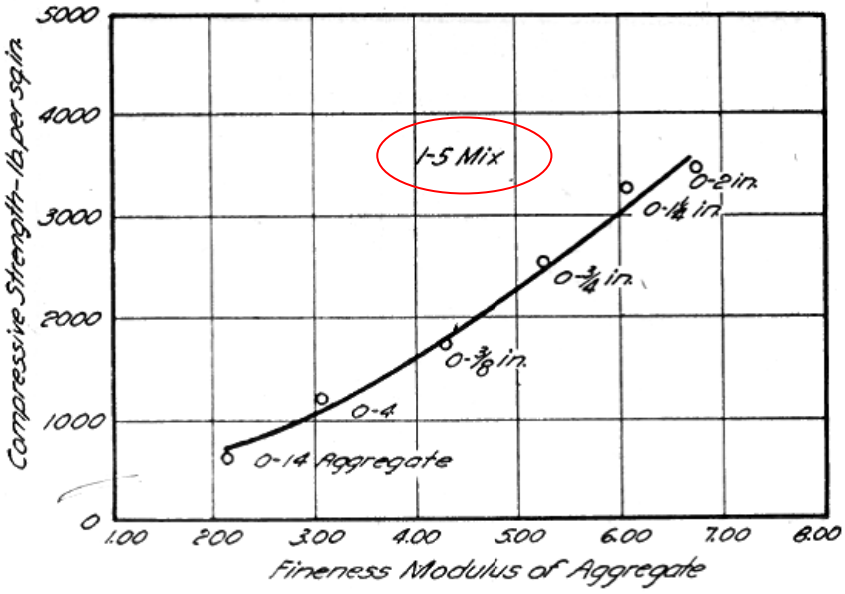


FIG. 4. RELATION BETWEEN FINENESS MODULUS OF AGGREGATE AND STRENGTH OF CONCRETE

FIG. 4 - RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE FINURA DO AGREGADO E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO.
Resistência à compressão em psi. (libras por polegada quadrada).
Ensaios de compressão aos 28 dias em cilindros 6" (15cm) x 12" (30cm). (Serie 78.)
Deve ser observado o contraste entre a relação mostrada nesses ensaios e os ensaios da Figura 3 .

As granulometrias são mostradas abaixo:

Faixa do tamanho	Módulo de finura	Tabela da Fig. 4 - Porcentagem de agregado mais graúdo que cada peneira										
		100	48	28	14	8	4	3/8"	3 /4 "	1.1/2 "	2"	← Nome da Peneira
		0,0058	0,0116	0,0232	0,046	0,093	0,185	0,37	0,75	1,5	2	← Abertura polegada
		0,147	0,295	0,590	1,170	2,360	4,700	9,400	18,800	38,100	50,80	← Abertura milímetro
0 - 14	2,16	95	84	37	0	0	0	0	0	0	0	
0 - 4	3,06	96	90	62	40	18	0	0	0	0	0	
0 – 3/8"	4,26	96	91	83	71	54	31	0	0	0	0	
0 – 3/4"	5,24	98	96	91	83	71	54	31	0	0	0	
0 – 1. 1/4"	6,04	99	98	95	90	81	68	49	24	0	0	
0 – 2"	6,72	100	99	97	94	87	77	62	42	14	0	

- Na Figura 4 nota-se uma relação semelhante entre a resistência à compressão e o módulo de finura do agregado, exceto pelo fato de que não foi encontrado nenhum máximo.
  Essa condição resulta do fato de que o tamanho máximo do agregado é crescente sem mudança do tipo de curva granulométrica, conseqüentemente a curva resistência X módulo de finura continua a crescer indefinidamente.
  A altura, até aonde a curva cresce, é limitada apenas pelo tamanho máximo do agregado que pode ser usado.

- É importante notar que não há contradição entre as indicações da Figura 3 e da Figura 4.

- Para todos os objetivos práticos e para os mixes usuais dos concretos a relação entre a resistência à compressão e o módulo de finura do agregado pode ser considerada como linear.
  A comparação entre a relação verdadeira e a relação aproximada é comentada na discussão na "Fórmula da água" abaixo.

- Um dado valor do módulo de finura de um agregado pode ser obtido com várias combinações de porcentagens nas peneiras, desde que dêem a mesma soma total. Conseqüentemente, pode ser encontrada uma variedade infinita de granulometrias que dêem um agregado com a mesma resistência do concreto. A tabela 2, a seguir, dá os resultados de grupos de testes que evidenciam a grande variação que pode ser feita na granulometria do agregado sem causar qualquer variação apreciável na resistência do concreto.

- Vinte e sete (27) diferentes granulometrias foram feitas com o mesmo agregado.
  Essas granulometrias cobriram a mais ampla faixa possível, mas elas tinham uma propriedade em comum : o módulo de finura igual a 6,04.
  Todas as amostras foram misturadas com a mesma quantidade de cimento e água.
  Foram feitos dois grupos de corpos de prova com duas consistências diferentes.

A variação média da resistência média foi de cerca de 3%.

- Tabela 2 também fornece dados sobre o método “área da superfície” (superfície especifica) para proporcionar os agregados. Pode-se observar que existe uma grande variação da “área da superfície” do agregado sem que haja uma diferença apreciável na resistência do concreto. Nossos estudos mostraram claramente que a “área da superfície” não é uma base satisfatória para proporcionar os agregados.

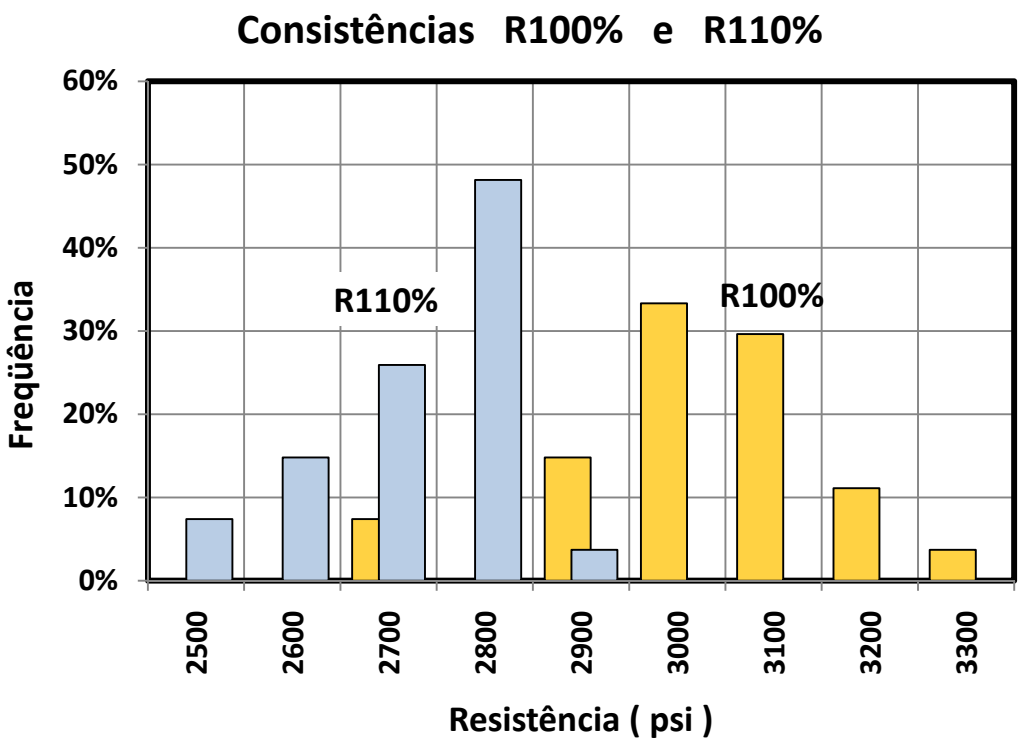
EFEITO DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Tabela 2 - Duas consistências diferentes

Ref. No	Sieve Analysis of Aggregate Per Cent Coarser than Each Sieve 100	48	28	14	8	4	⅜	¾	1¼	1½	2	Fineness Modulus of Aggregate	Surface Area of Aggregate sq in per lb of Aggregate	per g. of Cement	Compressive Strength of Concrete at 28 days (lb. per sq. in) 100% Consistency	110% Consistency
40	99	98	95	90	81	68	49	24	0			6.04	602	8.8	3,300	2,890
259	99	98	96	92	84	67	46	22	0			6 04	569	8 2	2,950	2,650
260	98	97	93	88	80	67	52	29	0			6.04	764	11.4	3,120	2,760
261	97	94	91	85	77	67	58	35	0			6 04	999	15.2	3,140	2,790
262	95	92	87	82	75	67	67	39	0			6 04	1,292	20.1	3,100	2,800
263	95	90	84	78	73	67	62	55	0			6 04	1,451	23 0	2,830	2,740
264	95	89	82	75	67	67	67	62	0			6 04	1,565	25 2	2,680	2,580
265	100	97	91	79	72	67	58	40	0			6 04	761	11.9	3,070	2,690
266	100	97	93	88	83	67	50	27	7	0		6 04	616	9 0	3,080	2,790
267	99	97	94	86	77	67	47	27	16		0	6.04	709	10 5	3,150	2,710
268	98	95	90	83	83	83	50	22	0			6 04	834	12 6	3,080	2,500
269	98	94	90	86	83	80	55	18	0			6 04	898	13.3	3,050	2,550
270	96	90	80	80	80	80	60	39	0			6 04	1,391	21.5	2,970	2,550
271	100	96	92	87	81	75	50	23	0			6.04	672	10.0	2,930	2,710
272	95	91	87	82	77	73	59	40	0			6 04	1,315	20.2	3,000	2,580
273	99	95	88	80	76	73	61	32	0			6 04	911	13.9	2,950	2,740
274	90	85	81	78	75	73	66	56	0			6.04	1,992	31.3	2,680	2,440
275	100	93	82	73	73	73	63	47	0			6 04	1,076	16.7	2,820	2,620
276	100	100	100	92	81	60	45	26	0			6.04	390	5 6	3,040	2,780
277	100	98	95	90	80	60	50	31	0			6.04	557	8.3	2,900	2,770
278	100	99	96	92	84	55	50	28	0			6.04	483	7 0	2,940	2,750
279	100	99	96	91	80	50	50	38	0			6.04	514	7.6	3,080	2,750
280	98	84	84	84	84	57	57	57	0			6.04	1,276	19.7	3,000	2,780
281	99	98	91	86	80	76	38	38	0			6 04	701	10.4	2,940	2,700
282	99	98	91	86	80	76	46	30	0			6 04	697	10.2	3,020	2,660
283	99	98	91	86	80	76	61	15	0			6 04	689	10 1	2,930	2,670
284	99	98	91	85	80	76	67	8	0			6 04	685	9 9	2,970	2,630
Average												6 04	904	13 8	2,990	2,690
Minimum Value												....	390	5.6	2,680	2,440
Maximum Value												. ..	1,992	31 3	3,300	2,890
Mean Variation from Average—per cent												....	34 4	37.2	3 41	3 04

- Ensaios de compressão em cilindros de 6” (15cm) X 12” (30cm).
- Mix em volume 1—5 = 1 volume de cimento + 5 volumes de agregado (areia +pedra)
- Idade no dia do teste: 28 dias
- **Ver histograma na próxima página**

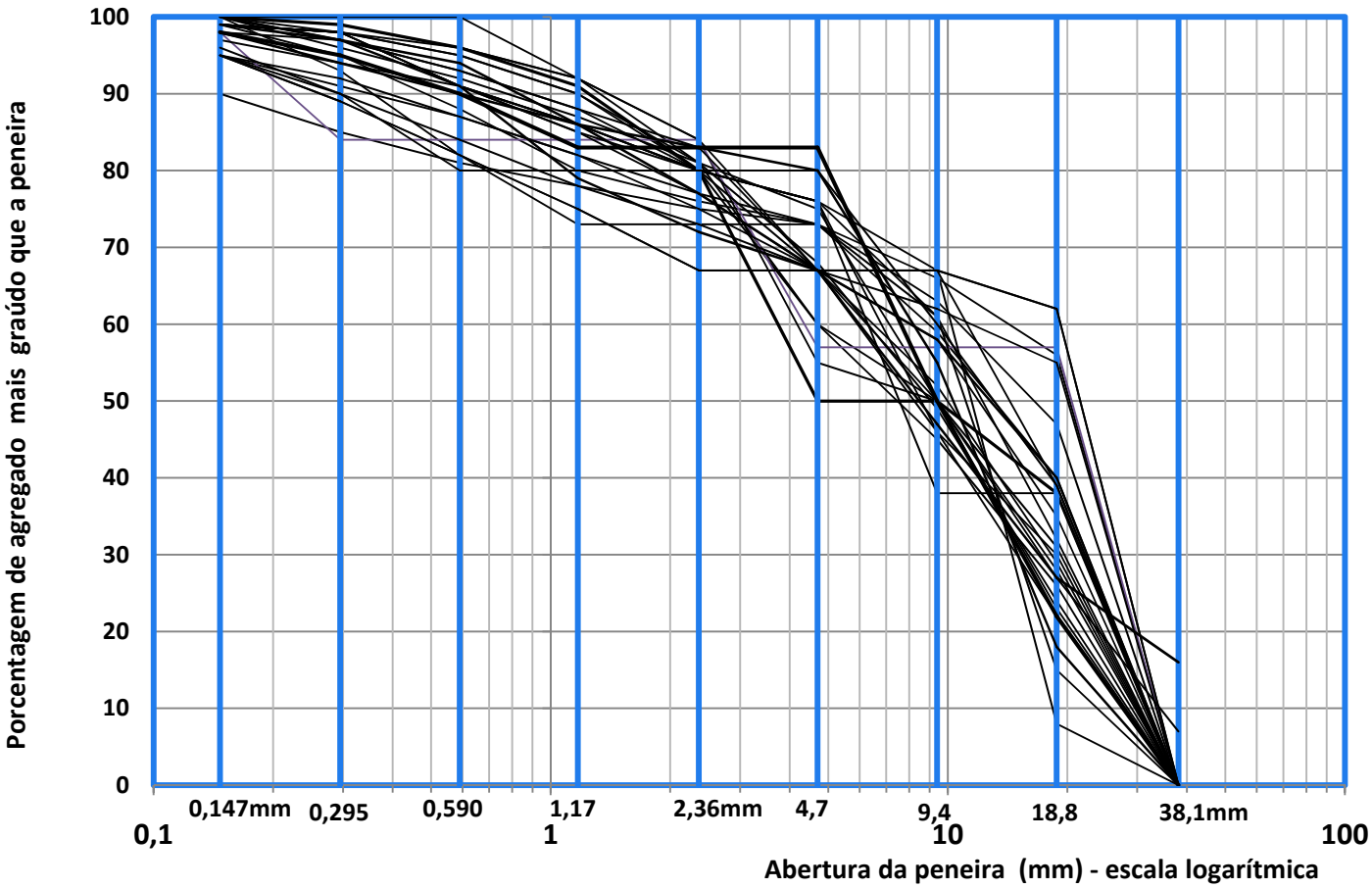
Obs: Gráfico de E.C.S.Thomaz - Histogramas com os dados da Tabela 2



- Todas as granulometrias tinham uma propriedade comum, o módulo de finura era exatamente o mesmo: M.F. = m = 6,04
- A série R110 tinha 10% a mais de água que a série R100.
- Corpos de prova armazenados em areia úmida
- Corpos de prova testados úmidos
- Agregados : areia e seixos rolados, da cidade de Elgin, Illinois. (às margens do rio Fox)
- Agregados foram separados em diferentes tamanhos e recombinados para obter granulometrias pré-determinadas.
- Os agregados foram feitos de tal modo a dar a mais ampla variação na granulometria das partículas. **Todas as granulometrias tinham uma propriedade comum, o módulo de finura era exatamente o mesmo: M.F. = m = 6,04**
- O módulo de finura é a soma das porcentagens no ensaio por peneiramento, dividida por 100.
- A mesma quantidade de água foi usada em todos os espécimes de mesma consistência. A consistência R=110% contém 10% a mais de água que a consistência 100%.
- Cada espécime foi feita em uma mistura (betonada) separada.
- Cada valor nos ensaios de compressão é a média de 5 testes feitos em dias diferentes. (Serie 78)

Tabela 2 (representação gráfica)

As 27 granulometrias da Tabela 2 de Abrams, todas com o mesmo Módulo de Finura = 6,04



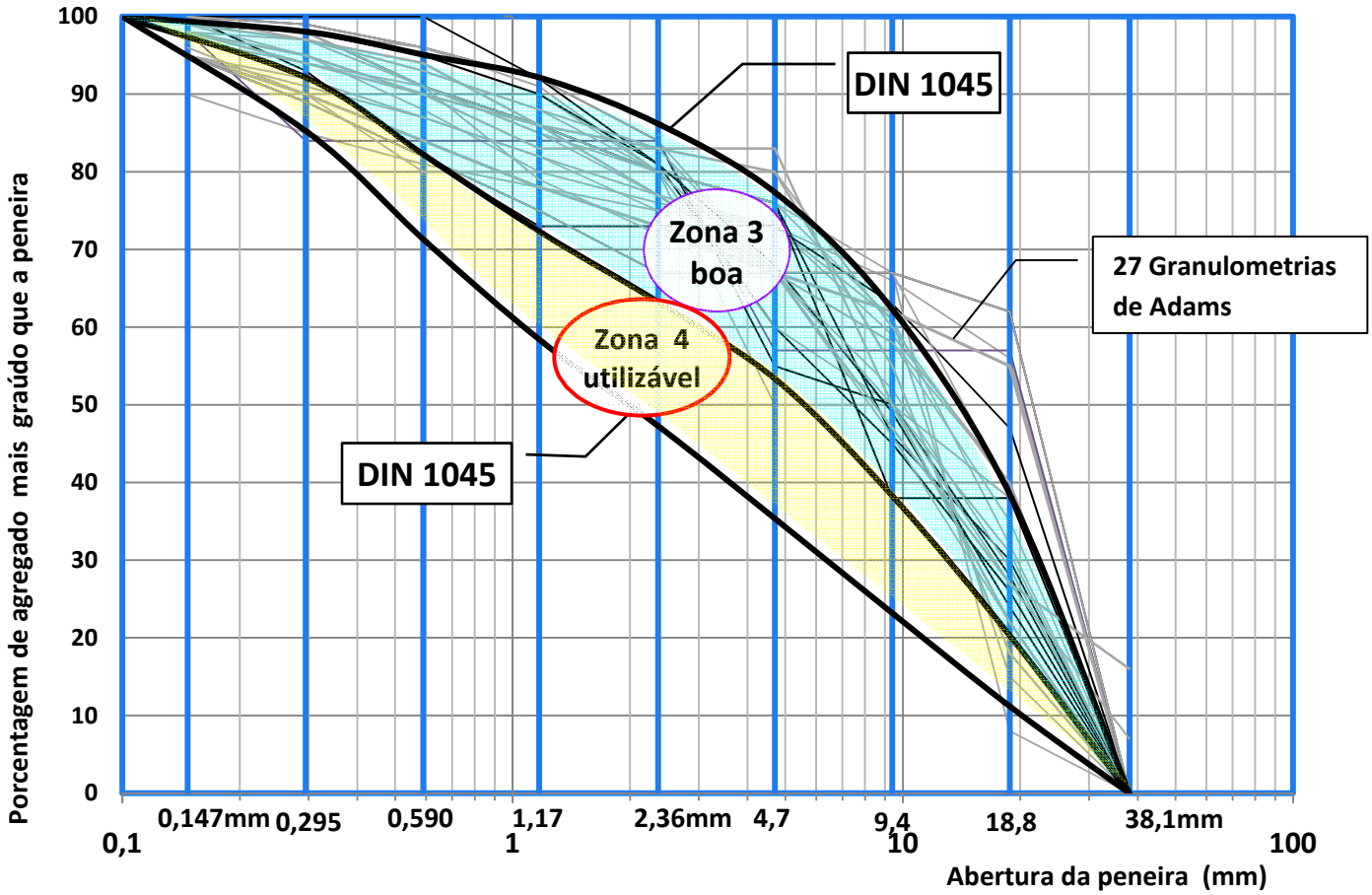
Concreto com Resistência média fcm = **21MPa** ; fc mínimo = **19MPa** ; fc máximo =**23MPa**

Comentário de E.C.S. Thomaz: **ABRAMS** x **DIN 1045**

A faixa de "granulometria boa" da norma DIN 1045 atual equivale à faixa de granulometria indicada por Abrams.

Todas as 27 granulometrias dos agregados (pedra + areia) da Tabela 2 de Abrams , tinham o mesmo módulo de finura = 6,04

Comparação com a granulometria da norma DIN 1045 atual.



Obs. E.C.S.Thomaz : As peneiras da norma DIN 1045 são quase iguais às de Abrams. Ajustamos as aberturas para poder desenhar no mesmo gráfico.

Abrams (mm)	0,147	0,295	0,59	1,17	2,36	4,7	9,4	18.8	38,1
DIN 1045 (mm)		0,250	0,50	1,00	2,00	4,0	8,0	16,0	31,5

Projeto de Misturas de concreto.

De acordo com o que afirmamos previamente, o problema de se projetar misturas de concreto, usando determinados materiais, se resume em achar a combinação que, com um dado fator água/cimento, dê um concreto com trabalhabilidade adequada, usando um mínimo de cimento.

A seguir mostramos as etapas a serem seguidas no projeto de misturas de concreto, com base em nossos estudos do concreto.

Etapas do Projeto de Misturas de Concreto.

1. Conhecendo-se a resistência à compressão desejada, determinar com a Figura 1 o máximo fator (água/cimento) que se pode usar.

   As etapas seguintes são apenas instrumentos para garantir um concreto trabalhável usando o (fator água / cimento) já escolhido e uma quantidade mínima de cimento.

   É óbvio que uma quantidade mínima de cimento pode ser obtida se a granulometria do agregado for tão graúda quanto permitida (considerando seu tamanho e o mix usado) e se usarmos a mistura mais seca que possa ser lançada trabalhável.

   Assegurando um agregado graúdo, bem graduado, usando misturas ricas, usando a consistência mais seca que possa ser trabalhável, usando métodos mecânicos de lançamento do concreto, etc..., todos são métodos de produção de um concreto trabalhável com um mínimo de água/cimento.

   Experiência e tentativa são a única maneira de determinar a consistência relativa do concreto, necessária para uma obra. Obviamente a mais seca consistência que seja trabalhável é que deve ser usada.

   O tamanho do agregado disponível, ou que deva ser usado, e os outros fatores fornecerão um guia para o mix.

   O mix é expresso como um volume de cimento para um dado número de volumes de agregado.

   Em geral, deve ser dada certa folga para as altas resistências obtidas em ensaios de laboratório. Em outras palavras, deve-se usar um fator água/cimento um pouco menor do que o dado pela Figura 1 para uma resistência desejada.

   Por conveniência, nas próximas etapas lidaremos com a resistência do concreto ao invés do fator água/cimento (como na figura 6 **), embora deva ser entendido que é o fator água/cimento que fixa a resistência, desde que tenhamos uma mistura plástica.**

2. Fazer a análise de peneiramento do agregado miúdo (areia) e do agregado graúdo (pedra), usando as peneiras padrão Tyler com os seguintes tamanhos : 100, 48, 28, 14, 8 , 4 , 3/8” , 3/4" , e 1.1/2” . Expressar o resultado do peneiramento em porcentagem em peso (ou volume) de material mais graúdo que cada peneira.

100	**48**	**28**	**14**	**8**	**4**	**3/8"**	**3 /4 "**	**1.1/2 "**	**2"**	**Nome da ← Peneira**
0,0058	**0,0116**	**0,0232**	**0,046**	**0,093**	**0,185**	**0,37**	**0,75**	**1,5**	**2**	**Abertura ← polegada**
0,147	**0,295**	**0,590**	**1,170**	**2,360**	**4,700**	**9,400**	**18,800**	**38,100**	**50,80**	**Abertura ← milímetro**

3. Calcular o Módulo de finura de cada agregado, somando as porcentagens achadas no item 2 , e dividindo por 100.

4. Determinar o tamanho máximo dos agregados usando as seguintes regras:

   - Se mais que 20% do agregado é mais graúdo do que uma peneira, o tamanho máximo será o da próxima peneira mais graúda;

   - Se entre 11% e 20% é mais graúdo que uma peneira, o tamanho máximo será o da próxima "meia-peneira" mais graúda;

   - Se menos que 10% é mais graúdo que algumas peneiras, a mais miúda dessas peneiras será considerada como o tamanho máximo.

5. A partir da tabela 3 determinar o máximo valor do Módulo de Finura que pode ser usado para a mistura, para esse tipo e tamanho de agregado, e para essa obra que está sendo considerada. (Valores da Tabela 3 estão plotados na Figura 5).

6. Calcular as porcentagens de agregado miúdo e de agregado graúdo necessárias para produzir o módulo de finura desejado para a mistura final dos agregados, aplicando a fórmula:

$$p = 100.\frac{A-B}{A-C} \quad \text{.....} \ (3)$$

Onde p = porcentagem de agregado fino na mistura total

A = Módulo de Finura do agregado graúdo

B = Módulo de Finura da mistura final dos agregados

C = Módulo de finura do agregado miúdo

A figura 7 pode ser usada para resolver a equação (3) e para fazer comparações do efeito de certas mudanças na proporção do agregado fino e do agregado graúdo.

A distinção entre agregado miúdo e agregado graúdo é somente pela conveniência de obter uma granulometria uniforme. A divisão entre miúdo e graúdo pode ser feita em qualquer ponto desejado.

7. Com a mistura estimada (**mix**), com o módulo de finura (**M.F.**) e com a consistência (**R**) **,** entrar na Figura 6 e determinar a resistência do concreto produzida pela combinação. Se a resistência mostrada no gráfico não for a resistência desejada, o ajuste necessário pode ser feito mudando o mix , ou a consistência , ou o tamanho, ou a granulometria dos agregados. A quantidade de água necessária pode ser determinada pela fórmula 4 abaixo, ou aproximadamente pela Tabela 5.

NOTA IMPORTANTE :

- Deve ser bem entendido que os valores na Figura 6 foram determinados a partir de ensaios a compressão de cilindros 15cm x 30cm, armazenados durantes 28 dias em local úmido.
- Os valores obtidos na obra dependerão de fatores tais como consistência do concreto, qualidade do cimento, métodos de mistura, manuseio, lançamento do concreto, etc..., e da idade e das condições de cura.
- Valores de resistência mais altos que os dados para a consistência relativa de R= 1,10 raramente devem ser considerados no projeto, pois somente em casos excepcionais é que concretos com a consistência mais seca do que esta podem ser lançados satisfatoriamente.

VALORES MÁXIMOS PERMISSÍVEIS DO MÓDULO DE FINURA DOS AGREGADOS.

- Para misturas (mixes) diferentes dos dados na tabela 3, usar os valores para a mistura mais magra seguinte.
- Para tamanhos máximos de agregado diferentes daqueles dados na tabela, usar os valores para o tamanho menor que seguir.
- Agregado miúdo inclui todo material mais fino que a peneira numero 4;
- Agregado graúdo inclui todo material mais graúdo que a peneira número 4.
- Argamassa é a mistura de cimento, água e agregado miúdo.
- Esta tabela é baseada nas exigências para agregados areia e seixo rolado (*gravel*) compostos de partículas aproximadamente esféricas, para uso comum do concreto em estruturas de concreto armado.
- Para outros materiais, e em outras classes de obras, o valor máximo permissível para o módulo de finura de um agregado, de um dado tamanho, está sujeito às seguintes correções:
  - Se for usada pedra britada ou escória, como agregado graúdo, reduzir os valores da tabela em 0,25.
  - Para material britado consistindo de partículas extremamente achatadas (“*flat*”), ou alongadas, reduzir os valores em 0,40.
  - Para seixos consistindo de partículas achatadas, reduzir os valores em 0,25.
  - Se for usada o fino da pedra britada como agregado miúdo, reduzir os valores em 0,25.
  - Para a camada superior de pavimentos de concreto de estradas, reduzir os valores em 0,25. Se o acabamento é feito por meios mecânicos, essa redução não precisa ser feita.
- Em obras de proporções massivas, tais que a menor dimensão seja maior que 10 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo, podem-se fazer adições aos valores da tabela como :
  - Para agregados de 3/4” 0,10
  - Para agregados de 1.1/2”..... 0,20
  - Para agregados de 3” 0,30
  - Para agregados de 6” 0,40

- Areia com módulo de finura menor que 1,50 é indesejável como agregado fino em misturas de concretos usuais. Areias naturais com esse módulo de finura são raramente encontradas.

- Areias ou areias de pedra britada (0,15 a 0,48 mm), usadas como agregados finos no concreto, não devem ter um módulo de finura maior que aquele permitido para argamassas de mesmo mix. Misturas (mixes) de argamassa são cobertos pela tabela e pela equação (3) acima.
- Pedra britada misturada com areia mais fina e com seixos rolados mais graúdos não precisa de redução no módulo de finura, desde que a quantidade de pedra britada seja menor que 30% do volume total do agregado.

Tabela 3 - Módulo de Finura máximo do agregado

Peneira →	Tamanho do Agregado													
					* Meio tamanho		* Meio tamanho		* Meio tamanho		* Meio tamanho		* Meio tamanho	
	0-28	0-14	0-8	0-4	0-3	0-$\left(\frac{3''}{8}\right)$	0- $\left(\frac{1''}{2}\right)$	0-$\left(\frac{3''}{4}\right)$	0-1"	0-$\left(1.\frac{1''}{2}\right)$	0-2"	0-3"	0-$\left(4.\frac{1''}{2}\right)$	0-6"
	0,59 mm	1,170 mm	2,36 mm	4,70 mm	7,26 mm	9,52 mm	12,70 mm	19,05 mm	25,4 mm	38,10 mm	50,80 mm	76,20 mm	114,3 mm	152,4 mm
Mix. Cimento_ Agregado	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.		M.F.		M.F.		M.F.		M.F.		M.F.
1 _ 12	1,20	1,80	2,40	2,95	3,35	3,80	4,20	4,60	5,00	5,35	5,75	6,20	6,60	7,00
1_9	1,30	1,85	2,45	3,05	3,45	3,85	4,25	4,65	5,00	5,40	5,80	6,25	6,65	7,05
1_7	1,40	1,95	2,55	3,20	3,55	3,95	4,35	4,75	5,15	5,55	5,95	6,40	6,80	7,20
1_6	1,50	2,05	2,65	3,30	3,65	4,05	4,45	4,85	5,25	5,65	6,05	6,50	6,90	7,30
1_5	1,60	2,15	2,75	3,45	3,80	4,20	4,60	5,00	5,40	5,80	6,20	6,60	7,00	7,45
1_4	1,70	2,30	2,90	3,60	4,00	4,40	4,80	5,20	5,60	6,00	6,40	6,85	7,25	7,65
1_3	1,85	2,50	3,10	3,90	4,30	4,70	5,10	5,50	5,90	6,30	6,70	7,15	7,55	8,00
1_2	2,00	2,70	3,40	4,20	4,60	5,50	5,45	5,90	6,30	6,70	7,10	7,55	7,95	8,40
1_1	2,25	3,00	3,80	4,75	5,25	5,60	6,05	6,50	6,90	7,35	7,75	8,20	8,65	9,10
	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.	M.F.

*** = Peneiras "meio-tamanho"; não usadas no cálculo do módulo de finura.**

- **M. F. = peneiras usadas no cálculo do módulo de finura**
- **Em vermelho, um exemplo para checar a Tabela 3 e o Gráfico da Figura 5.**
- **Assinalado com 6,00 um agregado para concreto de pavimento de estrada. Ver páginas 26 e 27.**

Cálculo da água necessária ao concreto .

Devido à importante influencia da quantidade de água no concreto, é desejável ter uma base sólida para "proporcionar" (dosar) a água.
A quantidade de água necessária, para dadas proporções e condições, pode ser determinada pela seguinte fórmula:

$$x = R \times \left[\frac{3}{2} \times p + \left(\frac{0{,}30}{1{,}26^m} + a - c \right) \times n \right] \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Onde :

x = quantidade necessária de água referida ao **volume** de cimento na mistura (fator água / cimento em **volume**)

Obs. : A quantidade de água do concreto é expressa como a razão entre o volume de água e de cimento, considerando que o cimento pesa 94 lb./cu,ft (libra peso por pé cúbico = 1506 kgf/m3) .

R = Consistência relativa do concreto, ou "fator de trabalhabilidade".

Consistência normal (consistência relativa = 100) requer uma tal quantidade de água na mistura de modo a causar um abatimento ("*slump*") de 1/2" a 1" em um cilindro 15cm x 30cm de uma mistura 1:4 ainda fresca, quando se puxa a forma suavemente para cima .

Uma consistência relativa de 1,10 requer o uso de 10% a mais de água e, nas mesmas condições acima, dá um abatimento ("*slump*") de 5" a 6 ".

p = Consistência normal do cimento, razão em peso.

m = Módulo de finura do agregado

n = Volumes dos agregados misturados para um volume de cimento.

a = absorção do agregado , razão da água absorvida para o volume do agregado. Determinada após imersão por 3 horas em água. Valores médios para calcário britado e para seixo rolado podem ser adotados como 0,02; arenitos porosos podem alcançar 0,08 ; agregados muito leves e porosos podem alcançar 0,25.

c = Umidade contida no agregado, razão entre a água contida e o volume do agregado.
(Considerar zero para o agregado seco em ambiente interno.)

Esta fórmula leva em conta todos os fatores que afetam a quantidade de água necessária para uma mistura de concreto. Esses fatores podem ser classificados como:

1. Fator "**Trabalhabilidade**", ou a consistência relativa do concreto.
   Essa Trabalhabilidade é função do tipo de obra a ser feita. O concreto deve ser mais plástico em uma obra de concreto armado (o que em geral significa uma consistência mais molhada) do que em uma obra de concreto massa .
   O termo **R** considera esse fator. **(R)** pode variar de 0,90 para um concreto seco até 2,00 ou mais, para misturas com muita água.

2. Fator "**Cimento**", que é composto de duas partes: a qualidade do cimento no que concerne a uma consistência normal **(p)** ; a quantidade de cimento em uma mistura (**n**).

3. O Fator "**Agregado**" . Esse fator inclui os 3 termos dentro do parêntesis na equação 4.
   O primeiro termo, envolvendo **(m)** leva em conta o tamanho e a granulometria ; o segundo termo **(a)** leva em conta a absorção; e o terceiro **(c)** a água contida no agregado.

Se forem usadas adições de qualquer espécie, deve-se inserir mais um termo na equação. Essa relação tem sido muito estudada e ensaiada, mas não foi incluída nesse relatório.

Fórmula simplificada para a Água.

A equação (4) representa a verdadeira relação para a água, mas é um pouco complicada pelo fato de que o módulo de finura aparece como um expoente. A equação pode ser expressa de um modo mais simples, como segue:

Para as faixas comuns de mix e de granulometria dos agregados, a equação (5) dá valores praticamente iguais aos da equação (4).

OBS.: A quantidade de água do concreto é expressa como a razão entre o volume de água e de cimento, considerando que o cimento pesa 94 lb./cu,ft (libra peso por pé cúbico = 1506 kg/m3) .

Mix (volume) × **Tamanho máximo do agregado** (polegada) × **Módulo de Finura Máximo**

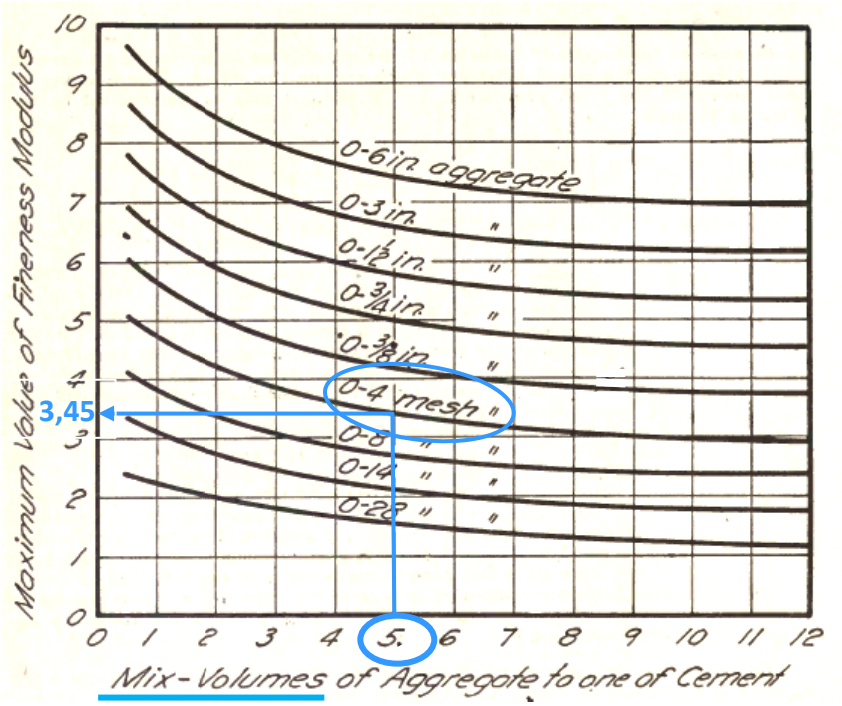


Figura 5 : VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA O MÓDULO DE FINURA DO AGREGADO.

Reprodução gráfica da Tabela 3. Essas curvas são baseadas nas exigências para agregado de areia e **seixo rolado**. Se for usada pedra britada ou escória, como agregado graúdo, reduzir os valores da tabela em 0,25. Ver página 22.

- **Em azul, um exemplo para checar a Tabela 3 e o Gráfico da Figura 5.**

Valores Máximos permitidos para o Módulo de Finura dos agregados

Como para cada tamanho de agregado, e para cada mix, encontra-se um valor máximo praticável para o Módulo de Finura, é necessário colocar limites no Módulo de Finura, que possam ser usados para proporcionar os materiais em misturas de concreto.
A tabela 3 dá limites que são considerados praticáveis. Experiências posteriores podem ditar mudanças nos detalhes.
O objetivo da tabela 3 é evitar a tentativa de assegurar uma granulometria do agregado que seja muito graúda para seu diâmetro máximo e para a quantidade de cimento usado.
É também útil em evitar o uso de areias que sejam muito graúdas para um bom resultado na mistura de concretos.
Por exemplo, seria achado, a partir dessa tabela, que o uso de uma areia com a característica da areia padrão de Ottawa não é permitida, exceto em misturas 1–2 (mix) , ou em misturas mais ricas em cimento.
As curvas da figura 5 são plotadas diretamente a partir dos valores dados para as peneiras padrão da tabela 3.

Nomograma para projeto de misturas de concreto.

A Figura 6 é um nomograma para o projeto de misturas de concreto. Esse gráfico leva em conta os seguintes 4 fatores:

1. O mix (teor de cimento).
2. A consistência relativa
3. A granulometria do agregado (módulo de finura).
4. A resistência à compressão do concreto.

Dados quaisquer 3 desses 4 fatores o gráfico permite encontrar o 4º fator.
Esse gráfico, obviamente, é baseado no resultado de certos ensaios. Para a aplicação prática, esses valores devem, em geral, ser reduzidos por certos fatores, que dependerão do julgamento do projetista.

De modo a fornecer bases para comparação, são dados os resultados de ensaios de compressão de argamassas 1:3 feitas com areia padrão e com o cimento usado nesses ensaios.
Suponha que estamos considerando o caso de um concreto para construção de estrada. Em geral , ele é especificado com um mix (1: 1.1/2 : 3) ou um mix (1:2:3), com agregado com granulometria até 1.1/2”. Essas misturas são quase iguais às misturas denominadas de (1: 4).
A mistura exatamente equivalente depende do tamanho e da granulometria do agregado fino e do agregado graúdo.

Suponha que seja usado agregado Britado (*gravel*) com granulometria até 1.1/2”.
A tabela 3 mostra que podemos usar o módulo de finura tão alto como 6,00 - 0,25 = 5,75
Conhecendo as análises granulométricas e o módulo de finura dos dois tamanhos de agregado, aplicar a Fórmula (3) ou a Figura 7 para determinar a proporção de cada agregado que deve ser misturado para obter esse valor.

Suponha que o concreto seja uma mistura com uma consistência relativa de 1.10, que tenha uma plasticidade que dê um abatimento (“*slump”*) de 5” a 6”, no teste de “slump” descrito acima.

Trace uma linha reta na figura 6 passando no mix 1:4 e no módulo de finura 5,75, e marque o ponto onde essa reta corta a linha de referencia para consistência 100.
A partir desse ponto projete a linha horizontalmente (como indicado em outros exemplos) até à consistência relativa 110. Isso dará uma resistência a compressão de 3400 psi. aos 28 dias.

Observação : Ver a solução no nomograma abaixo.

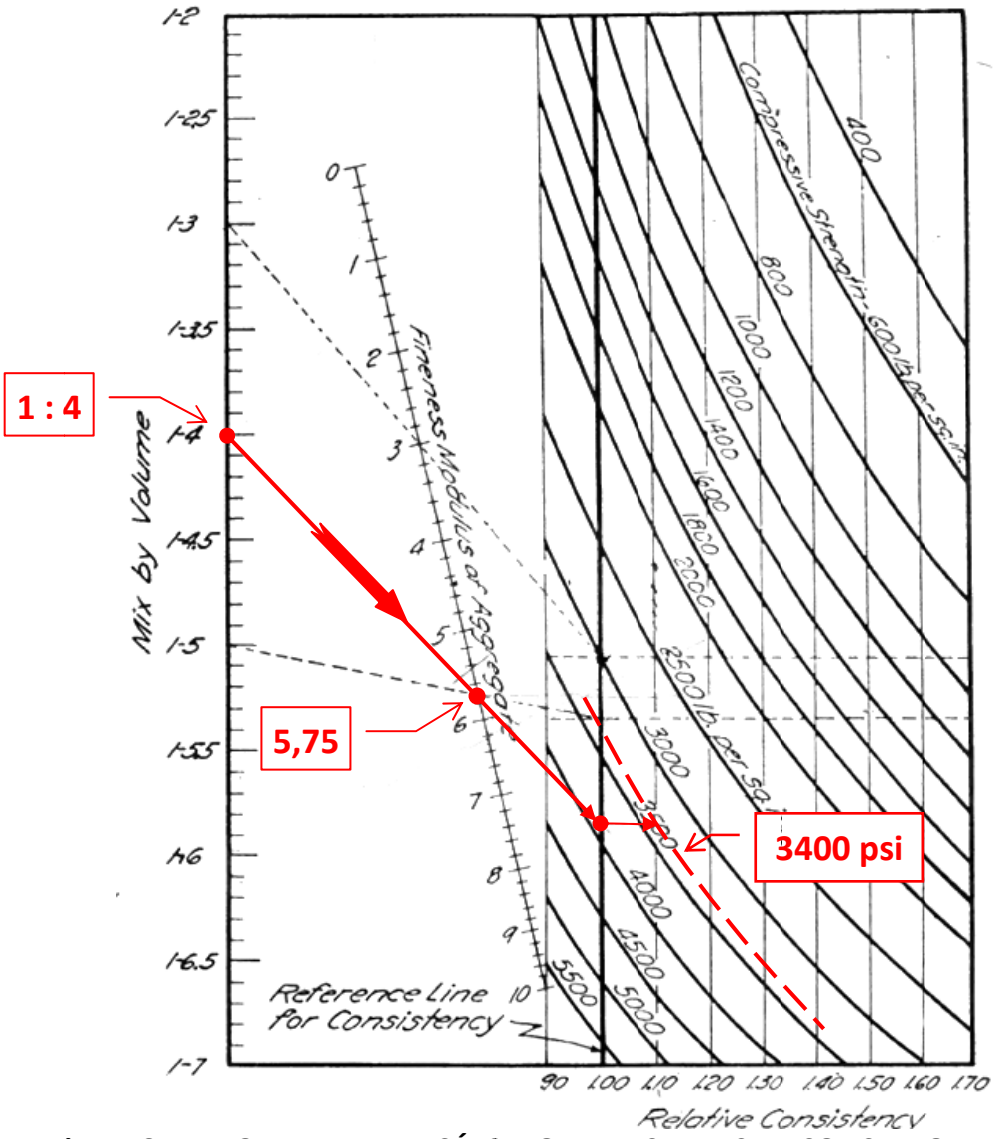


Figura 6. DIAGRAMA PARA CÁLCULO DE MISTURAS DE CONCRETO.

Este gráfico é baseado em ensaios de compressão em cilindros de 15cm X 30cm, com idade de 28 dias , armazenados em areia úmida.
O cimento usado dava resistências à compressão na argamassa 1:3 de areia padrão, como segue:

Resistência à compressão		
Idade	Libra por polegada quadrada (psi.)	MPa
7 dias	1900	13,3
28 dias	3200	22,4
3 meses	4200	29,4
1 ano	4300	30,1

EXEMPLO DA QUANTIDADE DE ÁGUA DE MISTURA NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Valores calculados pela equação

$$S = \frac{A}{B^x} = \frac{14000}{8{,}2^x}$$

Onde:

S = Resistência à compressão do concreto (psi. = libra por polegada quadrada)

x = fator água cimento (em volume)

Obs.: A quantidade de água do concreto é expressa como a razão entre o volume de água e o volume de cimento, considerando que o cimento pesa 94 lb./cu,ft (libra peso por pé cúbico = 1506 kgf/m3) .

A e B são constantes cujos valores dependem da quantidade de cimento e de outras condições do teste. Os valores dados para A e B são baseados em ensaios a 28 dias de uma mistura (mix) 1: 4, agregado de seixo rolado com granulometria 0–1.1/4", módulo de finura 5,75.
O fator água /cimento é equivalente à água em pés cúbicos para 1 saco de cimento (1 pé cúbico) .
Os valores das resistências são apenas para propósito de comparação, ao mostrar a influência da mudança no conteúdo de água.

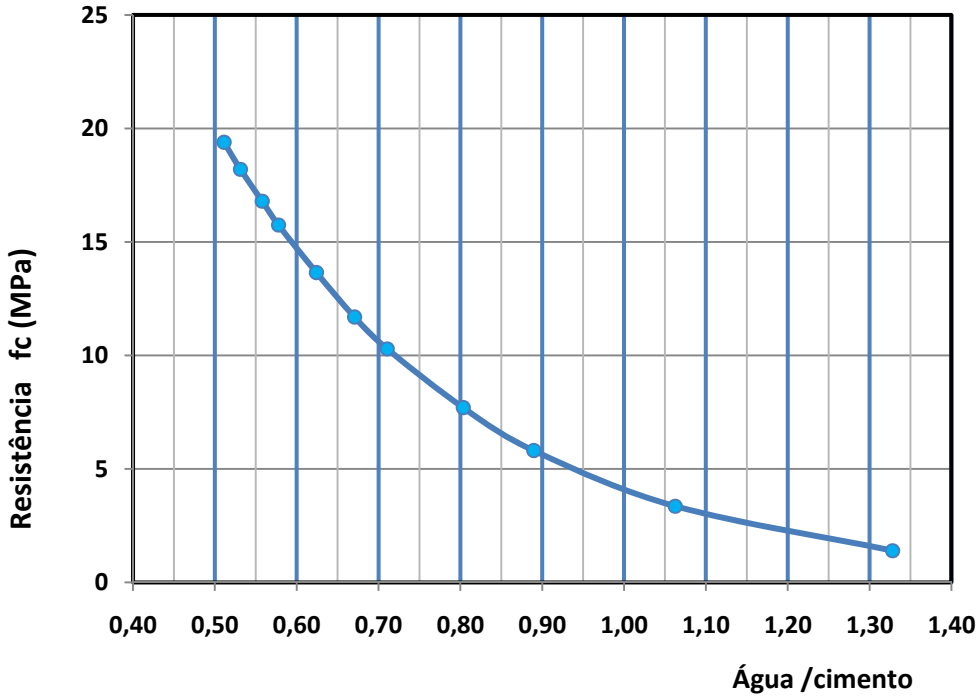
TABELA 4

Água para 1 saco de cimento (50,8kg)			Consistência Relativa (%)	Resistência aos 28 dias		
galões	Fator água cimento em volume (x=W/C)	Fator água cimento em peso (A/C)		S (psi)	S (MPa)	Resistência Relativa (%)
5,75	0,77	**0,51**	100	2770	**19,4**	100
6,00	0,80	**0,53**	104	2600	**18,2**	94
6,25	0,84	**0,56**	109	2400	**16,8**	87
6,50	0,87	**0,58**	113	2250	**15,8**	81
7,00	0,94	**0,62**	122	1950	**13,7**	70
7,50	1,01	**0,67**	131	1670	**11,7**	60
8,00	1,07	**0,71**	139	1470	**10,3**	53
9,00	1,21	**0,80**	157	1100	**7,7**	40
10,00	1,34	**0,89**	174	830	**5,8**	30
12,00	1,60	**1,06**	208	480	**3,4**	17
15,00	2,00	**1,33**	260	200	**1,4**	7

Obs: Foi feita a conversão para (água/cimento) em peso e para a resistência em (MPa).

Obs: Gráfico de E.C.S. Thomaz :

Influência da água na resistencia -Dados da Tabela 4



Quantidade de água de mistura, necessária para o concreto.

$$x = R \times \left[\frac{3}{2} \times p + \left(\frac{0{,}30}{1{,}26^m} + a - c\right) \times n\right] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

ou

$$x = R \times \left[\frac{3}{2}p + \left(0{,}22 - \frac{m}{42} + a - c\right) \times n\right] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Onde :

- x = quantidade necessária de água referida ao volume de cimento na mistura (fator água / cimento) . Obs. **:** A quantidade de água do concreto é expressa como a razão entre o volume de água e de cimento, considerando que o cimento pesa 94 lb./cu,ft (libra peso por pé cúbico = 1506 kgf/m3) .
- **R** = Consistência relativa do concreto, ou "fator de trabalhabilidade" .
  Quando R = 100 o concreto é dito de Consistência normal . Consistência relativa = 100 requer uma tal quantidade de água na mistura de modo a causar um abatimento ("*slump*") de 1/2" a 1" em um cilindro 15cm x 30cm de uma mistura 1:4 ainda fresca, quando se puxa a forma suavemente para cima .
  Uma consistência relativa de 1,10 requer o uso de 10% a mais de água e, nas mesmas condições acima, dá um abatimento ("*slump*") de 5" a 6 ".
- **p** = Consistência normal do cimento, razão em peso. (assumido p = 0,23)

- **m** = Módulo de finura do agregado
- **n** = Volumes dos agregados misturados para um volume de cimento.
- ***a*** = absorção do agregado, razão da água absorvida para o volume do agregado.
- **c** = Umidade contida no agregado, razão entre a água contida e o volume do agregado.
- ***a - c*** = absorção útil do agregado em volume.
  - Nessa tabela (a-c) é considerado como 0,02. Em outras palavras a quantidade real de água tomada pelo agregado é de 2% em volume. Esse valor pode ser usado para calcário comum e seixos rolados (cascalho) . Para pedra britada e para granito esse valor é um pouco maior. É muito elevada em alguns casos quando o agregado está saturado de água.
  - **Uma consistência relativa de 1,00** (consistência normal) requer o uso de uma tal quantidade de água de mistura que produza um abatimento ("*slump*") de 1/2" a 1" (1,2cm a 2,5cm) , em cilindros de 15cm x 30cm, recém moldados, com um mix 1: 4 , em que se retira a forma puxando para cima, de modo continuo . Essa consistência é seca para a maioria dos trabalhos com concreto, mas pode ser usada onde se aplica o método de adensamento por socagem (apiloamento).
  - **Uma consistência relativa de 1,10** (10% a mais de água que para a consistência normal), representa aproximadamente o concreto mais seco que pode ser usado satisfatoriamente em concreto de construção de estradas. Nas condições mencionadas acima essa consistência dará um abatimento ("slump") de 5" a 6" (12,7cm a 15,2cm) .
  - **A consistência relativa de 1,25** representa aproximadamente a consistência mais molhada que deve ser usada na construção de prédios de concreto armado.
    Nas condições mencionadas acima, essa consistência dará abatimento ("slump") de 8" a 9" (20,3cm a 22,9cm) .
  - Para misturas (mix) e módulo de finura diferentes dos dados na tabela pode-se obter valores aproximados por interpolação. Para casos específicos use as fórmulas (4) ou (5).

TABELA 5

Comentário E.C.S.Thomaz : Ampliamos e comentamos a tabela 5, com os concretos de consistência 100%, que é o ***mais resistente*** *concreto, porém* ***pouco trabalhável,*** que podia ser produzido segundo Abrams.

TABELA 5 A - GALÕES DE ÁGUA POR SACO DE CIMENTO usando agregados com diferentes módulos de finura

Consistência R=100 % (pouco trabalhável)

Comentário E.C.S.Thomaz :

Transformamos os números da tabela de Abrams em fator água cimento A/C em peso

Galão = 3,785 litros = 3,785 kg de água

Saco de cimento =50,8kg de cimento

Galão de água por saco de cimento = 3,785 kg/50,8 kg =0,07450

Mix : (1⁻ m)	**Módulo de Finura**											
1 = cimento **m**= areia+pedra	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
1-12	23,5	21,4	19,5	17,8	16,4	15,2	13,9	12,9	12	11,1	10,4	9,8
A/C	**1,75**	**1,59**	**1,45**	**1,33**	**1,22**	**1,13**	**1,04**	**0,96**	**0,89**	**0,83**	**0,77**	**0,73**
1-9	18,1	16,7	15,2	14	12,9	12	11	10,2	9,6	9	8,4	7,9
A/C	1,35	1,24	1,13	1,04	0,96	0,89	0,82	0,76	0,72	0,67	0,63	0,59
1-7	14,7	13,5	12,3	11,4	10,6	9,9	9,1	8,6	8	7,6	7,2	6,7
A/C	1,10	1,01	0,92	0,85	0,79	0,74	0,68	0,64	0,60	0,57	0,54	0,50
1-6	13	12	11	10,2	9,5	8,9	6,3	7,7	7,3	6,8	6,5	6,2
A/C	0,97	0,89	0,82	0,76	0,71	0,66	0,47	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46
1-5	11,2	10,4	9,5	8,9	8,3	7,8	7,3	6,9	6,4	6,1	5,8	5,5
A/C	0,83	0,77	0,71	0,66	0,62	0,58	0,54	0,51	0,48	0,45	0,43	0,41
1-4	9,5	8,9	8,2	7,7	7,2	6,8	6,3	6,0	5,7	5,4	5,2	5,0
A/C	0,71	0,66	0,61	0,57	0,54	0,51	0,47	0,45	0,42	0,40	0,39	**0,37**
1-3	7,8	7,2	6,7	6,3	6,0	5,7	5,4	5,1	4,9	4,6	4,5	4,3
A/C	0,58	0,54	0,50	0,47	0,45	0,42	0,40	0,38	0,37	0,34	0,34	0,32
1-2	6	5,7	5,4	5,1	4	4,7	4,5	4,3	4,1	4	3,9	3,8
A/C	0,45	0,42	0,40	0,38	0,30	0,35	0,34	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28
1-1	4,3	4,1	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2	3,1
argamassa A/C	0,32	0,31	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	**0,23**

Obs. de E.C.S.Thomaz: O menor fator (água/cimento) era 0,23 , o mesmo limite inferior ainda usado até hoje, pois é apenas uma função da reação química entre o cimento e a água.

Comentário E.C.S.Thomaz : Ampliamos e comentamos a tabela 5, com os concretos de consistência 110%, que é o ***mais resistente*** *concreto,* ***bem trabalhável,*** que podia ser produzido segundo Abrams. Essa era a consistência usada em concretos de pavimentos de estradas.

TABELA 5 B - GALÕES DE ÁGUA POR SACO DE CIMENTO usando agregados de diferentes módulos de finura

Consistência R = 110 % (trabalhável)

Comentário E.C.S.Thomaz :

Transformamos os números da tabela de Abrams em fator água cimento A/C em peso

Galão = 3,785 litros = 3,785 kg de água

Saco de cimento U.S.A. =50,8kg de cimento

Galão de água por saco de cimento = 3,785 kg/50,8 kg =0,07450

PAVIMENTOS DE ESTRADAS

Mix : (1⁻ m)	**Módulo de Finura**											
1 = cimento **m** = areia+pedra	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	**5,5**	**6**	6,5	7
1-12	25,8	23,6	21,4	19,6	18,1	16,7	15,3	14,2	13,2	12,2	11,4	10,8
A/C	**1,92**	**1,76**	**1,59**	**1,46**	**1,35**	**1,24**	**1,14**	**1,06**	**0,98**	**0,91**	**0,85**	**0,80**
1-9	19,9	18,4	16,7	15,4	14,2	13,2	12,1	11,2	10,6	9,9	9,2	8,7
A/C	1,48	1,37	1,24	1,15	1,06	0,98	0,90	0,83	0,79	0,74	0,69	0,65
1-7	16,2	14,9	13,5	12,5	11,7	10,9	10	9,5	8,8	8,4	7,9	7,4
A/C	1,21	1,11	1,01	0,93	0,87	0,81	0,75	0,71	0,66	0,63	0,59	0,55
1-6	14,3	13,2	12,1	11,2	10,5	9,8	9,1	8,5	8	7,5	7,2	6,8
A/C	1,07	0,98	0,90	0,83	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,56	0,54	0,51
1-5	12,3	11,4	10,5	9,8	9,1	8,6	8	7,6	7	6,7	6,4	6,1
A/C	0,92	0,85	0,78	0,73	0,68	0,64	0,60	0,57	0,52	0,50	0,48	0,45
1-4	**10,5**	**9,8**	**9**	**8,5**	**7,9**	**7,5**	**6,9**	**6,6**	**6,3**	**5,9**	**5,7**	**5,5**
PAVIMENTOS DE ESTRADAS A/C	**0,78**	**0,73**	**0,67**	**0,63**	**0,59**	**0,56**	**0,51**	**0,49**	**0,47**	**0,44**	**0,42**	**0,41**
									fc28 ≈24 MPa ***Slump* de 12 a 15cm**			
1-3	8,6	7,9	7,4	6,9	6,6	6,3	5,9	5,6	5,4	5,1	5	4,7
A/C	0,64	0,59	0,55	0,51	0,49	0,47	0,44	0,42	0,40	0,38	0,37	0,35
1-2	6,6	6,3	5,9	5,6	5,4	5,2	5	4,7	4,5	4,4	4,3	4,2
A/C	0,49	0,47	0,44	0,42	0,40	0,39	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31
1-1	4,7	4,5	4,3	4,2	4,1	4	3,9	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4
A/C	**0,35**	**0,34**	**0,32**	**0,31**	**0,31**	**0,30**	**0,29**	**0,28**	**0,27**	**0,26**	**0,26**	**0,25**

Comentário E.C.S.Thomaz : Ampliamos e comentamos a tabela 5, com os concretos de consistência 125%, que era o concreto ***muito trabalhável***, *porém* ***menos resistente*** . Era produzido para construção de prédios de concreto armado.

TABELA 5C - GALÕES DE ÁGUA POR SACO DE CIMENTO
usando agregados de diferentes módulos de finura

Consistência R = 125 % (muito trabalhável)

Comentário E.C.S.Thomaz :
Transformamos os números da tabela de Abrams em fator água cimento A/C em peso
Saco de cimento U.S.A.= 50,8kg de cimento
Galão de água por saco de cimento = 3,785 kg/50,8 kg =0,07450

Mix : (1⁻ m)	**Módulo de Finura**											
1 = cimento **m** = areia+pedra	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	**5,5**	**6**	6,5	7
1-12	29,4	26,8	24,4	22,2	20,5	19,0	17,4	16,1	15	13,9	13	12,3
A/C	**2,19**	**2,00**	**1,82**	**1,65**	**1,53**	**1,42**	**1,30**	**1,20**	**1,12**	**1,04**	**0,97**	**0,92**
1-9	22,6	20,9	19,0	17,5	16,1	15,0	13,8	12,7	12,0	11,2	10,5	9,9
A/C	**1,68**	**1,56**	**1,42**	**1,30**	**1,20**	**1,12**	**1,03**	**0,95**	**0,89**	**0,83**	**0,78**	**0,74**
1-7	18,4	16,9	15,4	14,3	13,2	12,4	11,4	10,7	10	9,5	9	8,4
A/C	**1,37**	**1,26**	**1,15**	**1,07**	**0,98**	**0,92**	**0,85**	**0,80**	**0,75**	**0,71**	**0,67**	**0,63**
1-6	16,3	15	13,8	12,8	11,9	11,1	10,4	9,6	9,1	8,5	8,1	7,7
A/C	**1,21**	**1,12**	**1,03**	**0,95**	**0,89**	**0,83**	**0,77**	**0,72**	**0,68**	**0,63**	**0,60**	**0,57**
1-5	14,0	13,0	11,9	11,1	10,4	9,8	9,1	8,6	8,0	7,6	7,2	6,9
A/C	**1,04**	**0,97**	**0,89**	**0,83**	**0,77**	**0,73**	**0,68**	**0,64**	**0,60**	**0,57**	**0,54**	**0,51**
1-4	11,9	11,1	10,2	9,6	9,0	8,5	7,9	7,5	7,1	6,8	6,5	6,2
A/C	**0,89**	**0,83**	**0,76**	**0,72**	**0,67**	**0,63**	**0,59**	**0,56**	**0,53**	**0,51**	**0,48**	**0,46**
1-3	9,8	9,0	8,4	7,9	7,5	7,1	6,8	6,4	6,1	5,8	5,6	5,4
A/C	**0,73**	**0,67**	**0,63**	**0,59**	**0,56**	**0,53**	**0,51**	**0,48**	**0,45**	**0,43**	**0,42**	**0,40**
1-2	7,5	7,1	6,8	6,4	6,1	5,9	5,6	5,4	5,1	5,0	4,9	4,8
A/C	**0,56**	**0,53**	**0,51**	**0,48**	**0,45**	**0,44**	**0,42**	**0,40**	**0,38**	**0,37**	**0,37**	**0,36**
1-1	5,4	5,1	4,9	4,8	4,6	4,5	4,4	4,3	4,1	4,0	4,0	3,9
A/C	**0,40**	**0,38**	**0,37**	**0,36**	**0,34**	**0,34**	**0,33**	**0,32**	**0,31**	**0,30**	**0,30**	**0,29**

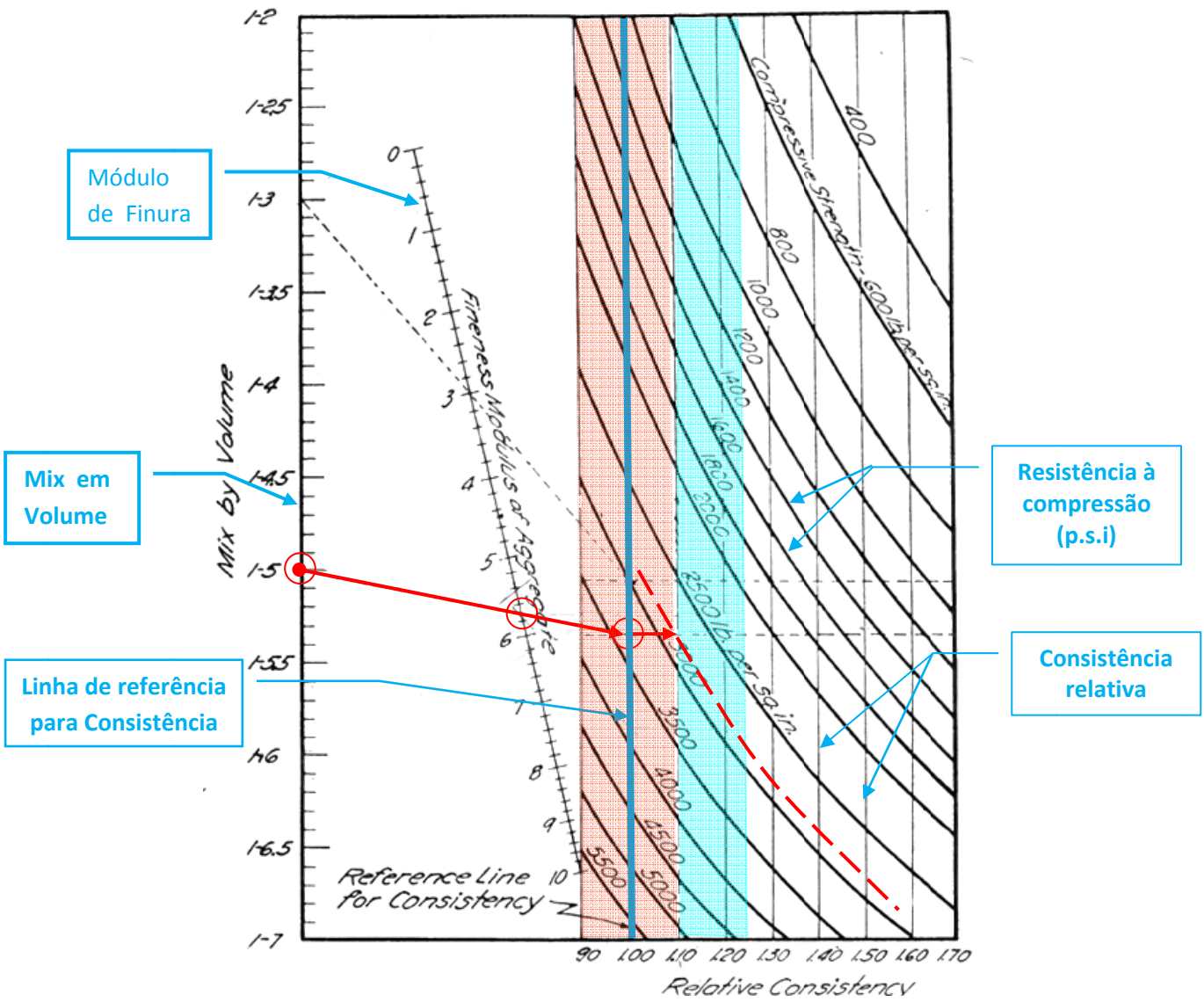


Figura 6. DIAGRAMA PARA CÁLCULO DE MISTURAS DE CONCRETO.

- **Obs:** Não usar Consistência relativa menor que R=110, pois o concreto não é trabalhável (ver notas na página 23 e 29)

- Este gráfico é baseado em ensaios de compressão em cilindros de 15cm por 30cm, com idade de 28 dias, armazenados em areia úmida.
  O cimento usado dava resistências à compressão na argamassa 1:3 de areia padrão, como segue:

Resistência à compressão		
Idade	Libra por polegada quadrada	MPa
7 dias	1900	13,3
28 dias	3200	22,4
3 meses	4200	29,4
1 ano	4300	30,1

- O efeito na resistência quando se usam outros mixes, granulometrias ou consistências pode ser visto direto no diagrama.
- Por exemplo , se a água for aumentada para uma consistência relativa de 1,25 (...) a resistência será reduzida para 2700 psi – uma redução de mais de 20% .
- Se o mix fosse mudado para 1: 4.1/2 , e os outros fatores fossem mantidos iguais aos do primeiro exemplo, a resistência seria 3200 psi.
- Teríamos que mudar o mix para 1: 5.1/4 , para assegurar a mesma redução de resistência que foi encontrada acima para uma mudança de consistência de 1,10 para 1,25.
- Mesmo usando a consistência com mais água das duas misturas, asseguramos um concreto com a mesma resistência que se tivéssemos usado um terço menos cimento e uma mistura mais seca.
- **Em outras palavras, aumentar a água da mistura em 13% causa a mesma redução na resistência que se tivéssemos reduzido 33% do cimento.**
- Esse exemplo mostra a razão de se enfatizar a importância do controle adequado da água de mistura no concreto.
- Esse gráfico (Fig. 6) permite que respondamos a perguntas como :
- **O que é mais resistente, uma argamassa 1:3 ou um concreto 1:5 ?**

Supondo que seja usado concreto de uma mesma plasticidade, a resistência relativa dependerá , obviamente, da granulometria dos agregados e do mix.

- Um mix 1:3 , com módulo de finura igual a 3.00, dará uma resistência de 3000 psi para uma consistência normal (100%) .
- Um mix 1:5, com módulo de finura igual a 5.70, dará uma resistência de 3,300 psi para uma consistência normal (100%).
- As resistências para outras consistências podem ser achadas lendo na linha horizontal do gráfico, como indicado pelas linhas pontilhadas.

Infelizmente, não temos agora uma base de valores absolutos para a resistência do concreto. Isto torna necessário referir aos testes particulares como na Figura 6.
Essa condição enfatiza a importância de fazer um teste do cimento que nos dê diretamente a resistência do concreto para dados materiais , misturas , etc...
Com o atual (1918) método de testar o cimento é impossível fazer mais que uma grosseira estimativa da resistência do concreto a partir dos resultados de ensaios de briquetes (1918 ?)

- **Quantidade de água necessária para o concreto**.

  As fórmula dadas acima (4) e (5) mostram os elementos que compõem as necessidades de água de uma mistura de concreto.

  A tabela 5 dá a quantidade de água necessária para determinadas misturas e valores do módulo de finura. As quantidades são dadas em termos de galões de água por saco de cimento. Nessa tabela, a absorção real (quantidade de água tomada pelo agregado em adição à que já continha) é considerada como 0,02 (2% em volume).

  Essa tabela é de interesse quando consideramos que uma dada razão água/cimento corresponde a uma resistência constante do concreto, independente das combinações de mix, consistência ou granulometria do agregado que possa ter sido usado, desde que tenhamos um concreto trabalhável.

- **Mais discussão sobre misturas de concreto.**
  - A importância do fator água/cimento na resistência do concreto será mostrada nas seguintes considerações:
  - Um "pint" (0,473 litros) a mais de água do que o necessário para produzir um concreto plástico reduz a resistência de uma mesma quantidade do que se tivéssemos retirado 2 a 3 libras (0,90 kg a 1,36 kg) de cimento de uma mistura feita com 1 saco de cimento (50,8kg).
  - Nossos estudos deram uma concepção inteiramente nova à função desempenhada pelos vários materiais constituintes do concreto.
  - O uso de um agregado graúdo , bem graduado, não resulta em ganho de resistência a não ser que tiremos vantagem do fato de que a quantidade de água necessária para produzir uma mistura plástica pode ser reduzida.
  - D o mesmo modo podemos dizer que o uso de mais cimento em uma betonada não produz qualquer efeito benéfico exceto pelo fato de que uma mistura plástica e trabalhável pode ser produzida com um fator (água /cimento) mais baixo.
  - A razão pela qual uma mistura rica (em cimento) dá uma resistência maior do que uma mistura magra (em cimento) não é por que tenha sido usado mais cimento, mas sim por que o concreto pode ser misturado , e normalmente o é, com um fator água /cimento que é relativamente mais baixo para as misturas ricas que para as misturas magras.
  - Se não for tirada vantagem do fato de que em uma mistura rica (em cimento) pode-se usar relativamente menos água , não se ganha nenhum benefício, se comparado com uma mistura magra.
  - Em toda essa discussão a quantidade de água é comparada com a quantidade de cimento na betonada (pé cúbico de água por 1 saco de cimento) e não com o peso dos materiais secos ou com o peso do concreto, como é feito geralmente.

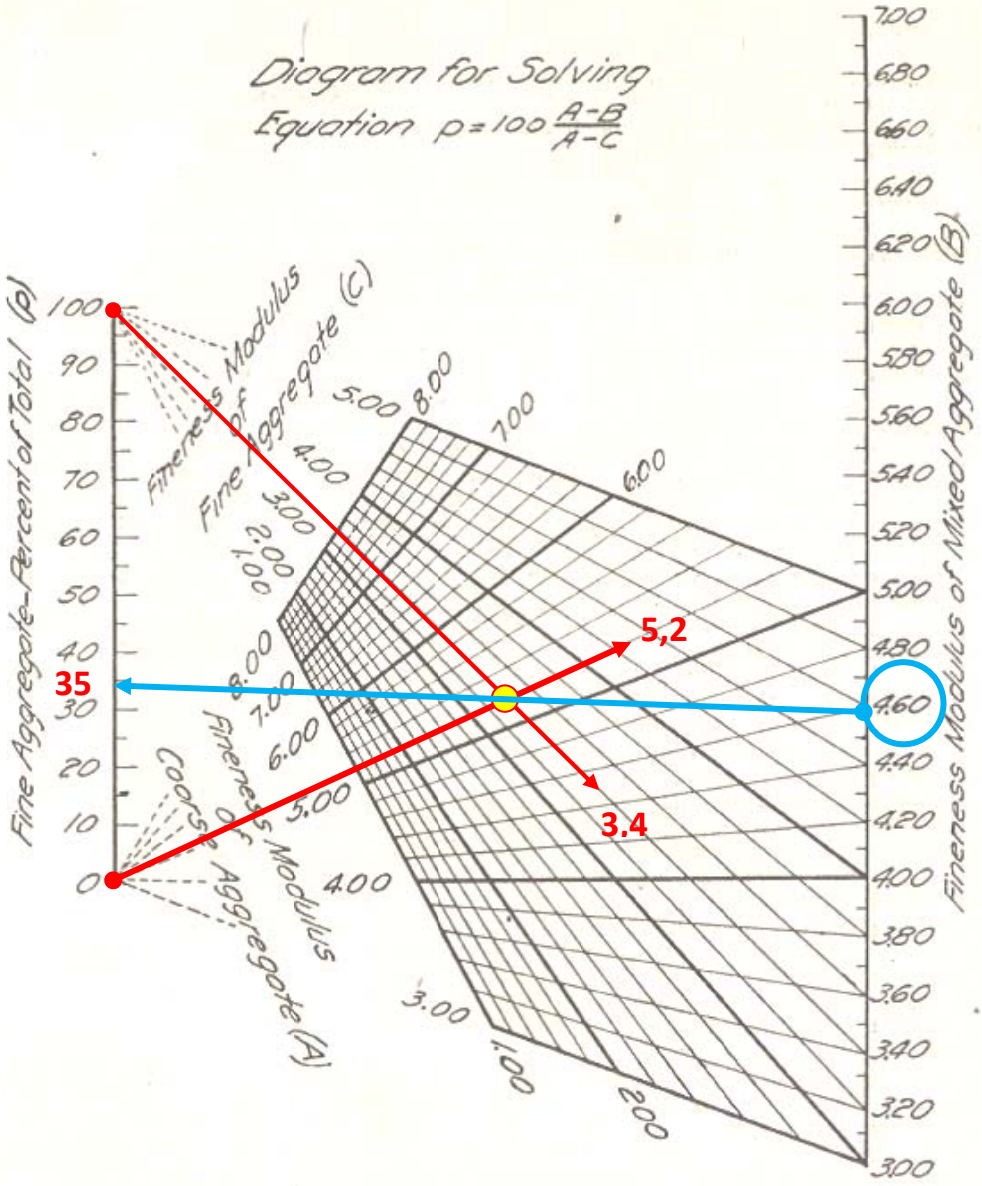


FIG. 7. DIAGRAM FOR DETERMINING QUANTITY OF SAND REQUIRED IN CONCRETE MIXES

Based on equation $p = 100 \frac{A-B}{A-C}$

where p = percentage of fine aggregate in total mixture.
A = fineness modulus of coarse aggregate.
B = fineness modulus of total aggregate.
C = fineness modulus of fine aggregate.

Exemplo feito por E.C.S.Thomaz :

Areia com módulo de finura = 3,40

Pedra com módulo de finura = 5,20

Módulo de finura desejado para o concreto = 4,60

Resultado : porcentagem de areia 35 % ; porcentagem da pedra 65% .

- O uso de misturas mais ricas (em cimento) dá uma sensação de segurança, ao passo que, em muitas situações, nada mais é feito do que desperdiçar uma grande quantidade de cimento, devido ao uso de um excesso de água na mistura.

  A aceitação universal dessa falsa teoria do concreto exerceu a mais perniciosa influência no uso correto dos materiais do concreto e mostrou-se uma barreira quase insuperável para o desenvolvimento de princípios corretos de dosagem do concreto e das construções com concreto.

- Misturas ricas em cimento e agregados com boa granulometria, são sempre essenciais, mas temos agora uma avaliação correta da verdadeira função dos materiais constituintes do concreto e uma compreensão mais completa do efeito nefasto da água em excesso.

  Misturas ricas em cimento e agregados com boa granulometria, são, antes de tudo, um meio para alcançar um objetivo: produzir um concreto plástico, trabalhável, com uma mínima quantidade de água em relação ao cimento usado.

- A trabalhabilidade das misturas de concreto é de fundamental importância. Esse fator é a única limitação que impede a redução do cimento e da água na mistura a limites muito mais baixos dos que atualmente são praticados.

  As considerações acima mostram que o teor de água é o elemento mais importante na mistura do concreto, porque pequenas variações na água causam uma mudança muito maior na resistência que variações similares no teor de cimento ou no tamanho ou na granulometria do agregado.

- Isto mostra o absurdo de nossa prática atual (em 1918) em especificar granulometrias bem definidas para os agregados e dosar cuidadosamente o cimento, e depois apenas estimar (guess = adivinhar) a quantidade de água. Seria mais correto medir cuidadosamente a água e estimar a quantidade do cimento na mistura.

  A granulometria do agregado pode variar, dentro de uma faixa muito ampla, sem produzir qualquer efeito na resistência do concreto, desde que o cimento e a água permaneçam os mesmos. A consistência do concreto mudará, mas isto não afetará a resistência do concreto se todas as misturas forem plásticas.

  A possibilidade de aumentar a resistência do concreto por meio de uma melhor granulometria dos agregados é pequena, se comparada com as vantagens que podem se alcançadas pelo uso de uma mistura tão seca, que a mistura ainda possa ser lançada corretamente.

- A tabela 4 mostra o efeito da água na resistência do concreto.

É impraticável colocar uma regra geral para a quantidade de água a ser usada na mistura do concreto, porque se vê nas fórmulas dadas acima, que a água total é governada por um o grande número de fatores.

No entanto, é apenas a água que se combina com o cimento (isto é , excluída a água absorvida pelos agregados) que afeta a resistência do concreto.

O fracasso em reconhecer este fato levou a muitas conclusões errôneas, a partir dos ensaios feitos para comparar diferentes agregados.

A tabela 4 dá a quantidade de água necessária para misturas, assumidas certas condições da consistência normal do cimento, da absorção do agregado e da consistência relativa. A água é expressa em termos de galões por saco de cimento. Usando a tabela 3, não se deve superestimar a dependência do valor do módulo de finura que pode ser usado, do tamanho máximo do agregado, e do mix.

Sem considerar a quantidade real da água de mistura, a seguinte regra é segura para ser seguida :

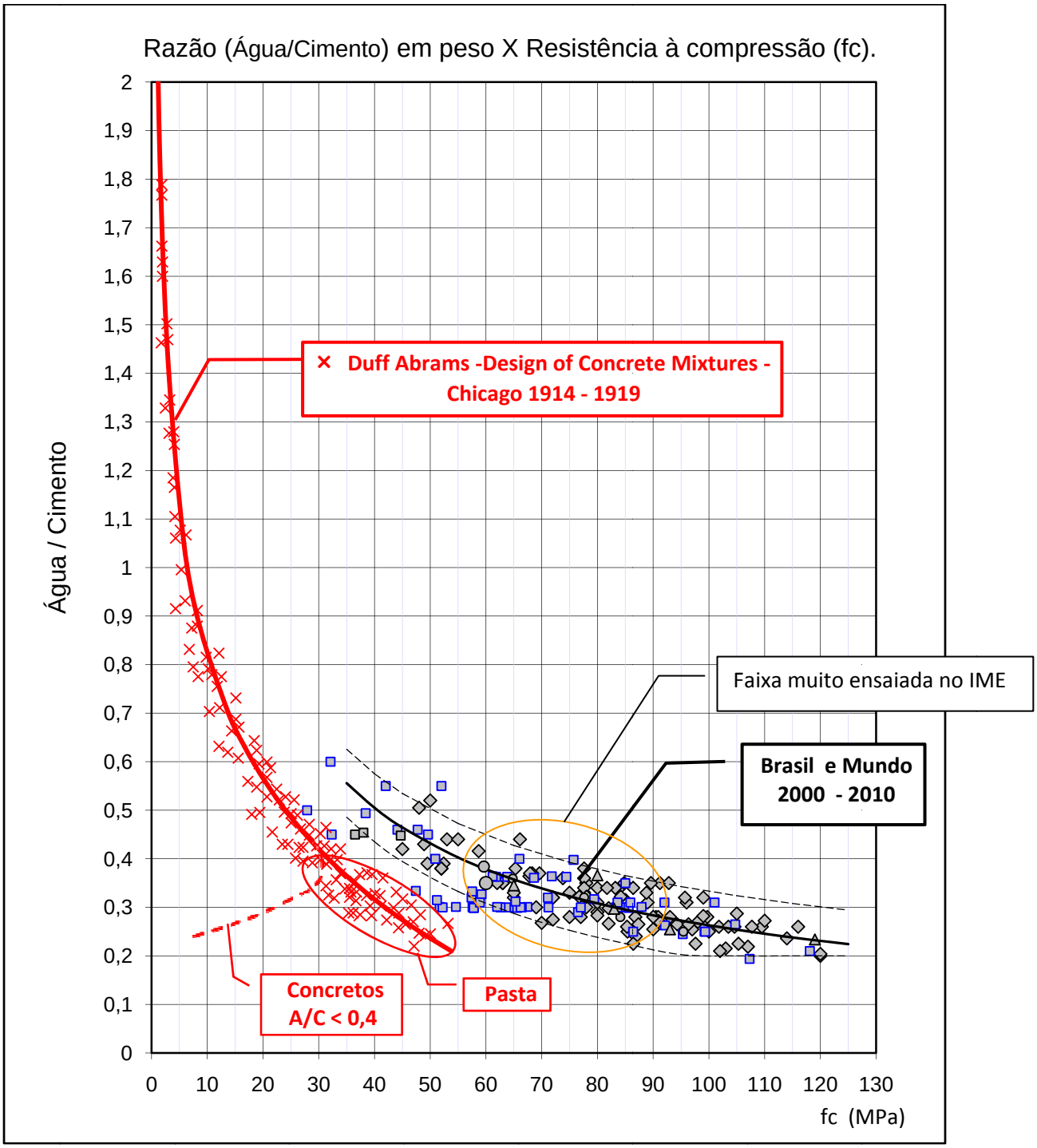
"Usar a menor quantidade de água de mistura que produza um concreto plástico e trabalhável."

Fica evidente a importância de qualquer método de mistura, manuseio, lançamento, e acabamento do concreto, que permita ao construtor reduzir o teor de água do concreto a um mínimo.

+ + +

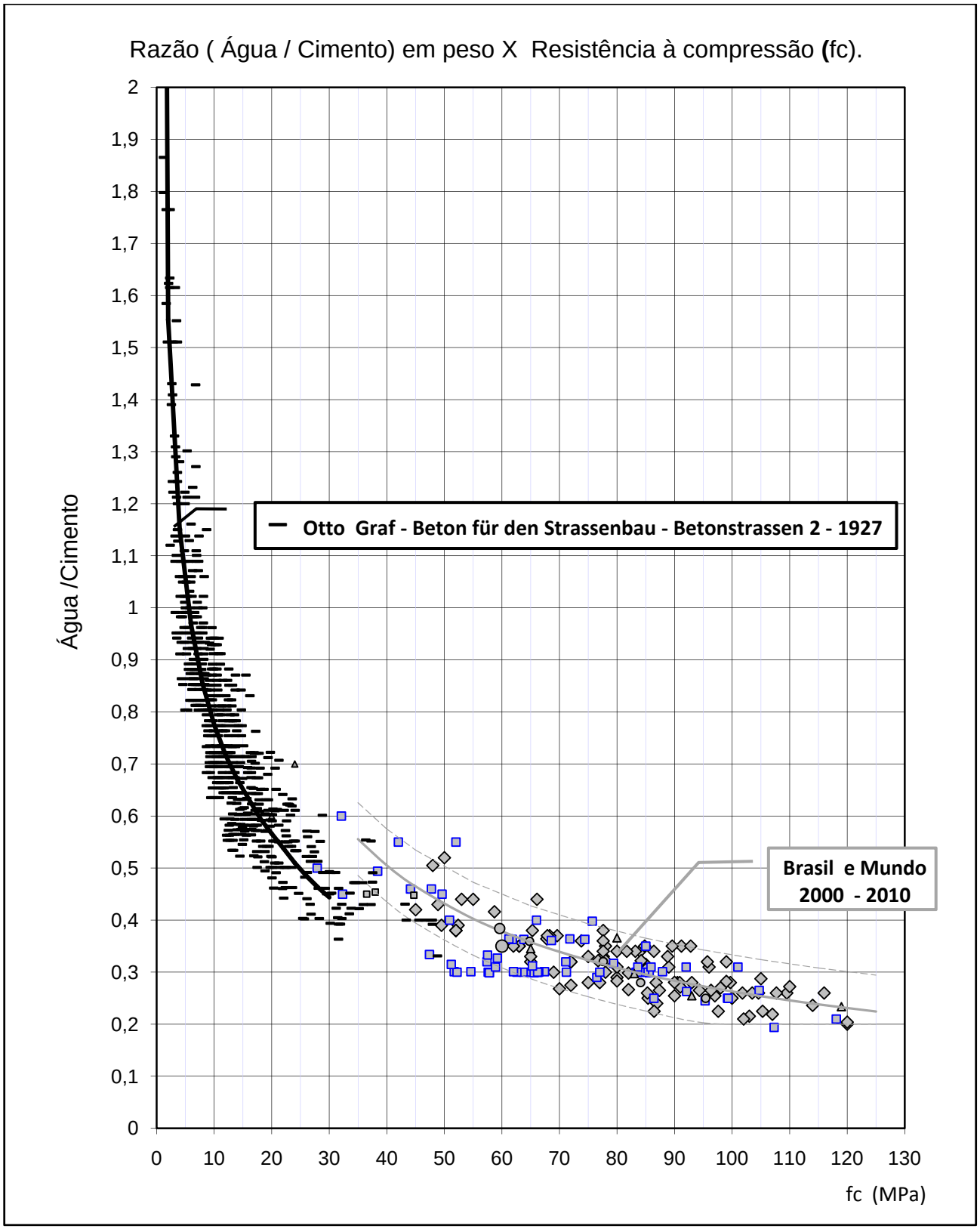
ANEXO 1 : (elaborado por E.C.S.Thomaz)

U.S.A. --- Abrams, Duff Andrews 1919



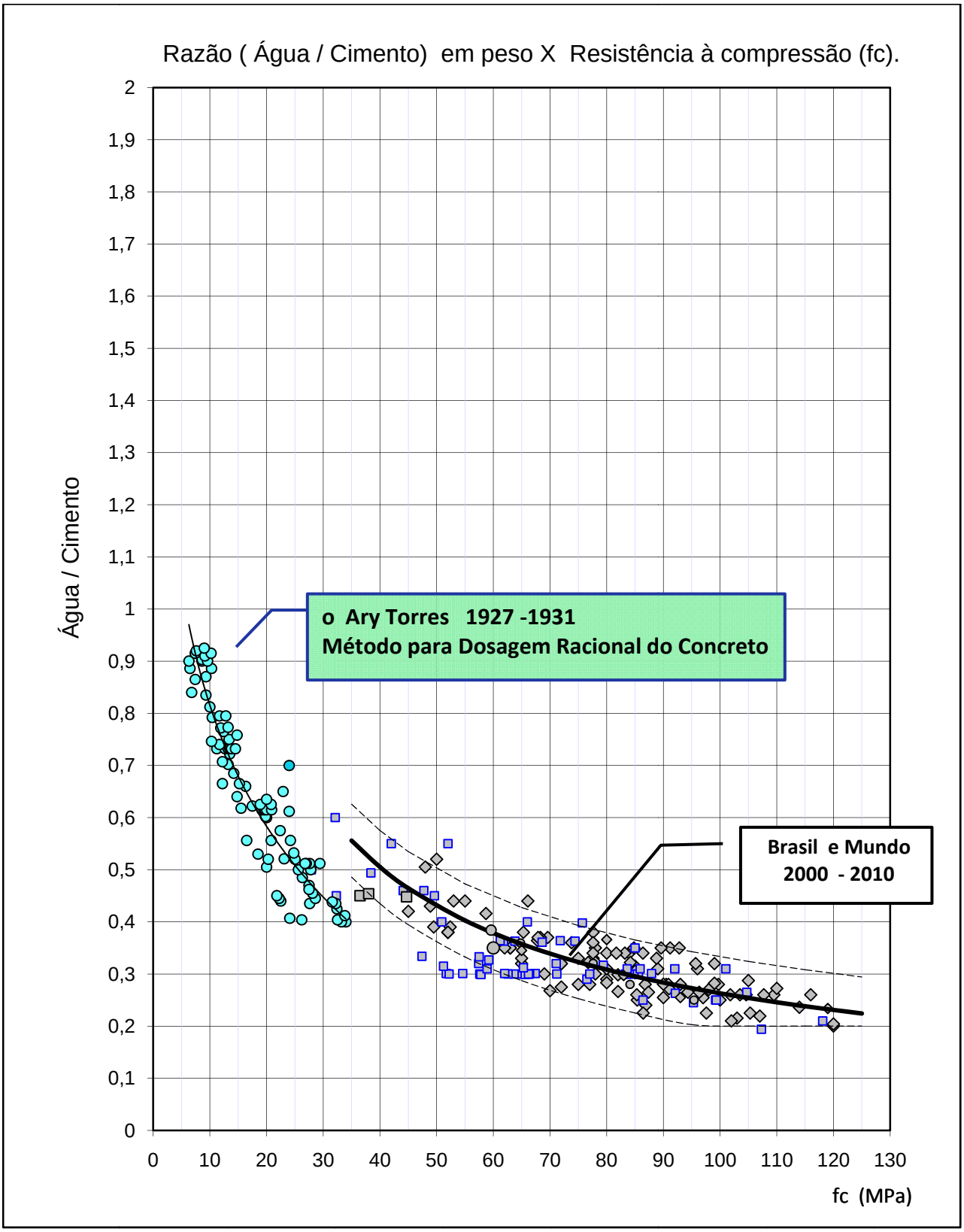
ANEXO 2 : (elaborado por E.C.S.Thomaz)

Alemanha --- Otto Graf 1927



ANEXO 3 : (elaborado por E.C.S.Thomaz)

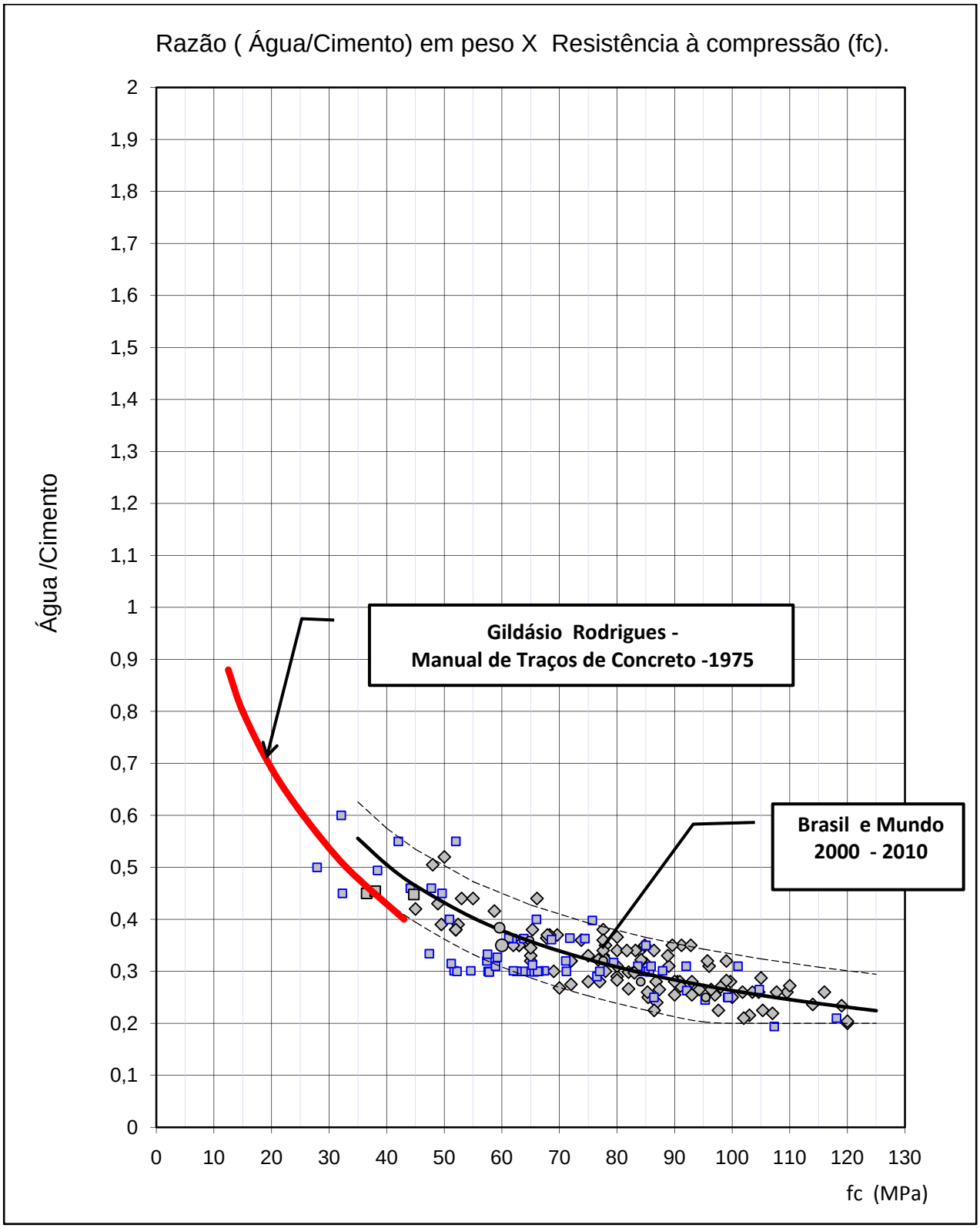
Brasil --- Ary Torres – 1927 -1931



Nessa época, 1927 a 1931, a maioria dos cimentos era importada.

ANEXO 4 : (elaborado por E.C.S.Thomaz)

Brasil --- Gildasio Rodrigues 1975



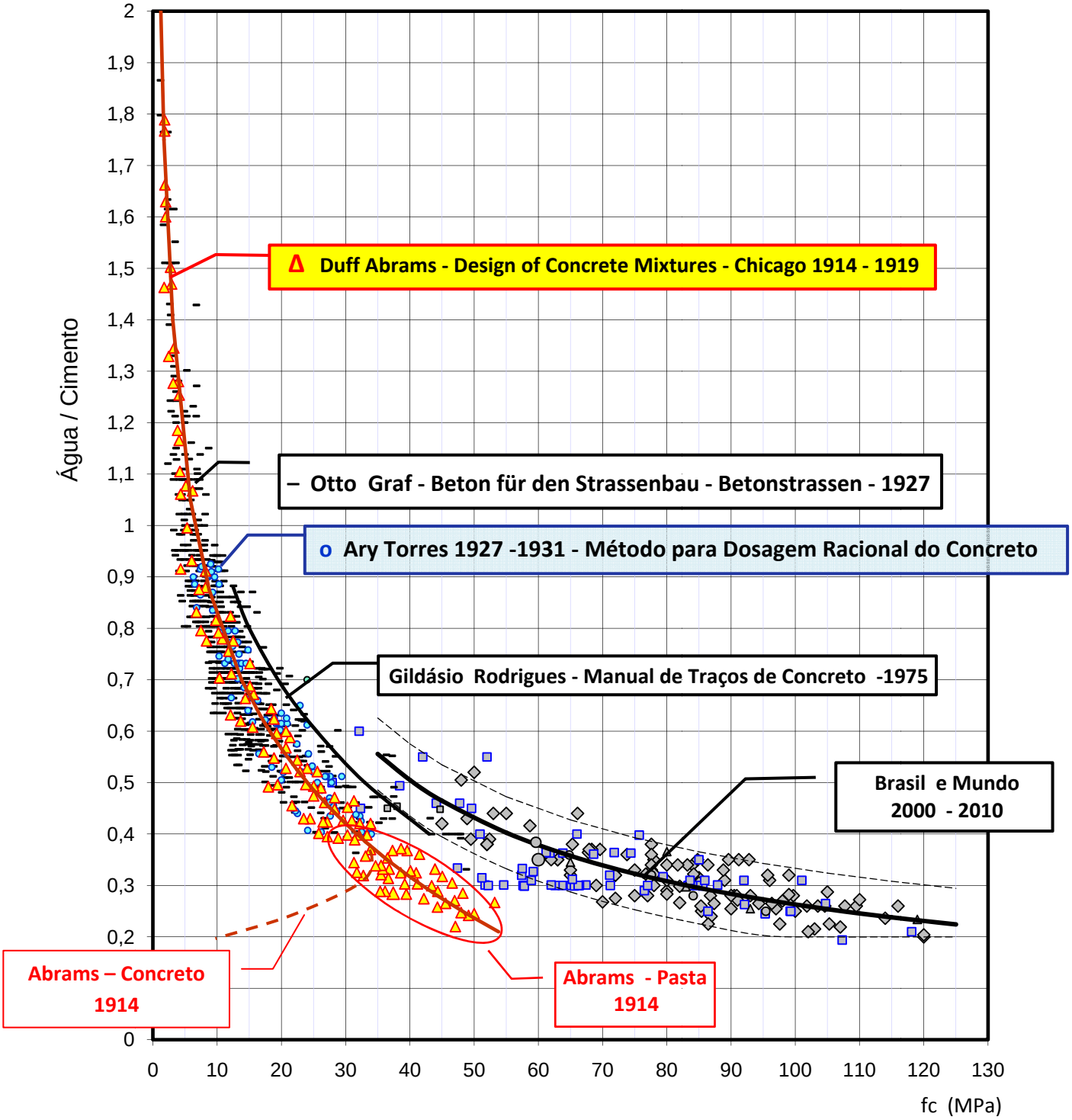
Época de Construção da ponte Rio-Niterói (1970 a 1975).

O eng. Gildásio Rodrigues fez a dosagem dos concretos usados na Ponte Rio-Niterói.

ANEXO 5 : (elaborado por E.C.S.Thomaz)

RESUMO DOS DADOS (1914 a 2010)

Razão (Água / Cimento) em peso X Resistência à compressão (fc).



Obs: Com os superplastificantes, o fator (água /cimento) pôde baixar de 0,40 até 0,20.
Com o aumento do teor de C3S no cimento e com o aumento da finura do cimento, as resistências aos 28 dias aumentaram, isto é, foram "antecipadas" no tempo.