

1. INTRODUÇÃO

Considerando a importância que modernamente se dá à composição volumétrica dos concretos, tendo em vista o seu relacionamento com as propriedades fundamentais para obtenção de um concreto com qualidades específicas, apresentamos a seguir uma análise do problema, realçando o novo enfoque, nos procedimentos para dosagem dos concretos.

Antes, porém, examinemos a composição do concreto fresco.

O concreto fresco é constituído dos agregados miúdo e graúdo envolvidos por pasta de cimento e espaços cheios de ar. A pasta, por sua vez, é composta essencialmente de uma solução aquosa e grãos de cimento. O conjunto pasta e espaços cheios de ar é modernamente chamado de matriz (6), denominação já consagrada para a rocha que envolve um fóssil.

O ar pode encontrar-se envolvido pela pasta, sob a forma de bolhas ou em espaços interligados, determinando, através da predominância de uma dessas formas de apresentação, respectivamente, a plasticidade ou a não plasticidade da mistura.

Os valores da resistência e de outras propriedades do concreto endurecido são limitados pela composição da matriz, particularmente pelo seu teor de cimento. Essa composição pode ser expressa pela relação vazios/cimento ou pelo seu inverso, considerando-se como vazios o volume de ar e água da matriz. Na maioria dos casos os vazios são ocupados principalmente por água, o que torna possível estabelecer a composição da matriz em termos de fator água/cimento. Essa regra é, entretanto, discutível quando a mistura possui ar artificialmente incorporado.

Universitas, Salvador, (23, Especial):153-168, 1978.

Tendo em vista a qualidade do concreto endurecido, as propriedades desejáveis para o concreto fresco são as que assegurem a obtenção de mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, e que, depois do endurecimento, se apresenta homogênea, com um baixo teor de vazios.(8)

2. MISTURAS DE AGREGADOS

Desde que se produz concreto os engenheiros e pesquisadores têm se esforçado em elaborar teorias mais ou menos inspiradas na experiência, a fim de definir as regras de sua composição.(9)

Assim é que nos primeiros tempos da tecnologia do concreto ao se comparar agregados dizia-se que o melhor seria o que apresentasse o mínimo volume de vazios. Hoje em dia, já não se pode falar nestes termos, a não ser para os concretos magros.

Por essas razões Powers (6) enfatiza certas características das misturas secas para compará-las com as misturas úmidas, plásticas e mostrar porque as dosagens baseadas na arrumação dos materiais secos não são totalmente satisfatórias.

Analisemos a Figura 1 onde estão ilustradas algumas relações fundamentais. Em ordenadas estão representados os índices de vazios,

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

como na tecnologia dos solos e em abscissas a relação entre a soma dos volumes das partículas do agregado graúdo e a soma dos volumes das partículas do agregado graúdo e miúdo, assim expressa

$$n = \frac{b \cdot v_b}{a v_a + b v_b}$$

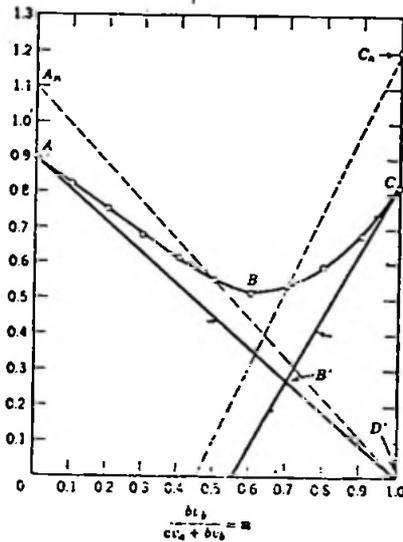


Fig. 1 - Diagrama de índice de vazios.

onde a e b são os pesos dos agregados miúdo e grão respectivamente e v_a e v_b são os volumes específicos dos sólidos dos agregados miúdos e grãos, ou seja, os inversos dos pesos específicos dos sólidos desses agregados.

A letra A significa o índice de vazios do agregado miúdo e a C a do agregado grão, qualquer mistura dos dois apresenta um índice de vazios que se encontra sobre a curva ABC . A linha AD' representa a equação hipotética.

$$e = A (1 - n) \quad (1)$$

o ponto D' representa um material sem vazios, na hipótese de ser possível a substituição continuada do material com vazios por material sólido. A hipótese não se verifica em face da característica dos agregados que são materiais constituídos de partículas.

Se partimos de outra hipótese, ou seja, um agregado grão ao qual acrescentamos agregado miúdo, a equação seria

$$e = (1 + C) n - 1 \quad (2)$$

c significa que o agregado miúdo seria tão pequeno e se ac_0

modaria de tal modo aos vazios do agregado graúdo que determinaria uma contínua redução do volume de vazios.

Em vista das equações (1) e (2) teremos o mesmo valor em B' cujas coordenadas podem ser facilmente determinadas:

$$n_{B'} = \frac{1 + A}{1 + A + C} \quad (3)$$

$$s_{B'} = \frac{AC}{1 + A + C} \quad (4)$$

Observando ainda a Fig.1 vemos que os pontos das misturas não coincidem com a reta AD'. A razão disso é o efeito do agregado graúdo na estrutura do agregado miúdo.

Sé considerarmos cada ponto da curva poderíamos ter varias retas partindo de D', passando por esses pontos e de terminando valores de An diferentes, que seriam os diversos índices de vazios do agregado miúdo nas misturas, no estado de acomodação correspondente n.

$$A = \frac{c}{1 - n} \quad (5)$$

Vários autores explicarem essa acomodação. A melhor dessas explicações é de que a uma partícula isolada e maior, inserida no agregado miúdo, passa a ser o centro de perturbação local. Tal como uma deformação produzida no meio elástico por um corpo sólido que se expande.

Quando o agregado graúdo é o componente dominante, apesar das partículas menores produzirem afastamento das maiores, os índices das misturas são mais baixos.

Pode-se adotar o seguinte princípio da autoria de Weymouth para o que se chama de interferência da partícula: se o afastamento entre as partículas de um dado diâmetro é menor do que as partículas imediatamente menores, configura-se a interferência da partícula com modificação na arrumação da mistura.

Essas idéias, embora explicadas de outro modo já tinham sido consideradas por Feret em 1896, dando margem a uma linha de raciocínio que levou os pesquisadores à granulometrias

descontínuas, que exigiam o emprego de determinados agregados com a eliminação de outros. Por este fato começaram a tomar vulto as experiências que levassem em conta todas as dimensões das partículas com o fim de tornar mais prático e econômico o emprego dos agregados.

Estudos posteriores nos levam a considerar a lógica das granulometrias descontínuas. Impõe-se ao nosso espírito como uma verdade intuitiva e parece dar os melhores resultados, se for geometricamente aplicado. Mas os agregados, naturais ou artificiais, de que dispomos não são entidades geométricas. São conjuntos que possuem partículas com maior ou menor variabilidade de dimensões (2).

3. MISTURAS DE PASTA E AGREGADOS

À pasta deve-se a menor ou maior plasticidade das misturas de cimento, agregado e água e então teremos de considerar não somente propriedades geométricas, mas também um novo parâmetro: a consistência.

Para um concreto fresco o índice de vazios é expresso por

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V}{cv_c^0 + av_a + bv_b} - 1 \quad (6)$$

onde c é o peso de cimento e v_c^0 volume específico aparente dos sólidos de cimento.

O índice de vazios de um concreto tendo uma determinada consistência e constituído de materiais dados é função da proporção do volume agregado no volume total de sólidos. As características desta função podem ser estabelecidas empiricamente realizando uma série de misturas tendo a mesma consistência, medindo o volume de vazios de cada uma e, em seguida, levando a um gráfico cartesiano os índices de vazios e a frações sólidas do agregado.

3.1 CARACTERÍSTICOS DA MISTURA

3.1.1 - Relações básicas

Chamemos de M a relação entre os volumes de sólidos dos agregados e c volume de sólidos do cimento.

$$M = \frac{av_a + bv_b}{cv_c^0} \text{ e de } s = \frac{av_a + bv_b}{cv_c + a va + bv_b} \quad (7)$$

O índice de água:

$$i = \frac{Pag}{cv_c^0 + av_a + bv_b} \text{ ou } i = \frac{Pag Vag}{cv_c^0} \frac{1}{1 + M} \quad (8)$$

onde Pag é o peso de água e Vag o volume específico da água.

Todas as relações analíticas apresentadas a seguir de correm de simples aplicações algébricas das expressões:

$$V = c v_c^0 + av_a + b v_b + V_v \quad (9)$$

$$V_v = Pag Vad + Ar \quad (10)$$

onde Ar é o volume de ar.

Por outro lado

$$tv = \frac{Pag Vag}{V} + \frac{Ar}{V} \quad (11)$$

onde tv é o teor de vazios ou porosidade.

Chamamos também de Z a relação entre o volume de ar e o volume de água:

$$Z = \frac{Ar}{Pag Vag} \quad (12)$$

donde

$$tv = \frac{Pag Vag}{V} (1 + Z) \quad (13)$$

Com êsses elementos é possível obter relações tendo como base as coordenadas do diagrama de vazios e e s .

3.1.2 - Consumo de cimento

$$\frac{c v_C^0}{V} = \frac{c v_C^0}{c v_C^0 + a v_a + b v_b + V_v} = \frac{1}{1 + M + (V_v / c v_C^0)} = \frac{1-s}{1+e}$$

donde

$$C = \frac{V}{v_C^0} \cdot \frac{1-s}{1+e} \quad (14)$$

3.1.3 - Teor de vazios ou porosidade

Como já conhecemos de Mecânica dos Solos

$$tv = \frac{e}{1+e} \quad (15)$$

3.1.4 - Teor de água

$$\frac{P_{ag} V_{ag}}{V} = \frac{P_{ag} V_{ag}}{c v_C^0 + a v_a + b v_b + V_v} = \frac{i}{1+e}$$

$$Ag = \frac{i}{1+e} \quad (16)$$

onde Ag é o teor de água e i o índice de água, ou seja relação entre volume de água e o volume de sólidos.

Quando há espaços não ocupados por água a expressão abaixo tem a forma

$$Ag = \frac{i}{1+c(1+Z)} \quad (17)$$

3.1.5 - Teor de agregado

$$\frac{a v_a + b v_b}{V} = \frac{M}{1 + M + (V_v / c v_C^0)} = \frac{S}{1+e}$$

$$B = \frac{s}{1+c} \quad (18)$$

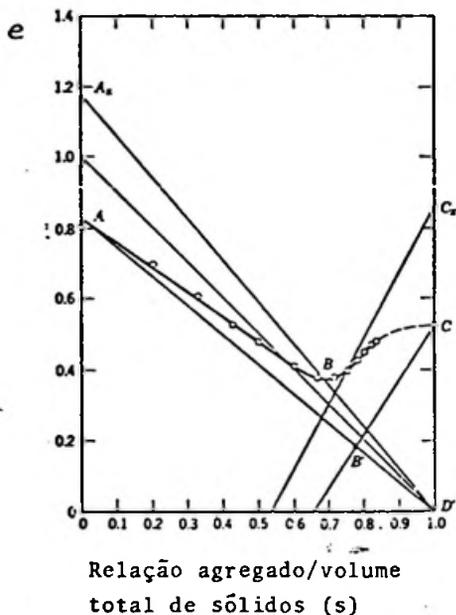


Fig.2 - Diagrama de índices de vazios de uma mistura de cimento e areia.

3.2 FATORES QUE INFLUEM NO TEOR DE VAZIOS

A razão de adicionarmos agregado à pasta é produzir uma mistura tendo uma baixa percentagem de vazios ou, mais precisamente, uma menor percentagem. Sabemos no entanto, que a adição de agregado exige, para as mesmas condições de compactação, adição de água. Em vista disso a redução de vazios não é tão acentuada como se espera.

A diferença fundamental entre os fenômenos que ocorrem na adição de um agregado grão em um miúdo e os do agregado numa pasta de cimento está na natureza reológica destes últimos.

A pasta contendo a água que lhe assegura um mínimo de vazios comporta-se como um corpo elástico e requer uma certa força para se deformar. Essa força é função do teor de

água e de outros fatores secundários.

As deformações plásticas na mistura pasta agregado são bem maiores, por ocasião da moldagem, do que na pasta pura. Daí a necessidade de maior esforço ou alternativa da adição de água.

Além desse fator deve ser considerada a influência das dimensões do agregado e o que observamos nos agregados se pode ser considerado aqui. Assim é que quanto maior a dimensão do agregado maior será sua influência.

4. INFLUÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA NA CONSISTÊNCIA

4.1 A Equação da Consistência

Vários pesquisadores têm procurado relacionar o teor de água, com a consistência do concreto fresco e tentado medi-lo. Alguns tem se preocupado com aspectos parciais da consistência, tais como Glanville (3) Ritchie (7) e L'Hermite (4). Outros se dedicaram a métodos meramente comparativos, práticos, mas que não medem diretamente as propriedades reológicas fundamentais dos concretos.

Baseado em resultados de suas experiências e nas de outros pesquisadores Powers (6) obteve para equação da consistência de qualquer mistura a seguinte expressão:

$$\log \left(\frac{G}{G_0} \right) = K_2 (1 + M) \left(\frac{cv_c^0}{Pag Vag} \right) \quad (19)$$

onde K_2 é uma constante.

G a atual rigidez, G_0 uma constante de integração que corresponde ao valor de G quando o volume de sólidos por unidade de volume de água torna-se zero, sendo seu significado a consistência da água.

Dessa forma configura-se a natureza exponencial da consistência, evidenciada experimentalmente pelas retas obtidas nos diagramas semi-logarítmicos quando são registrados os resultados dos ensaios em ordenadas e as relações volume de água/volume de cimento, em abscissas.

Uma rápida pesquisa na literatura técnica e os resultados de várias observações em laboratório nos levam a uma hipótese simplificadora para a relação entre a mudança de consistência e a composição da mistura. Assim é que, somos levados a supor que, dentro de limites bem amplos, a variação da consistência depende unicamente da variação do teor em água, sendo independente da composição do concreto.

Essa hipótese, foi chamada por Popovics (5) "hipótese da independência". O mesmo autor mostrou que o valor da consistência é uma função parabólica do teor de água no concreto fresco o que o grau da parábola é independente da composição.

A expressão matemática do fator K é

$$K = \left(\frac{y}{yb} \right)^{\frac{1}{r}} \quad (20)$$

onde y = valor especificado para a consistência prevista;

yb = valor especificado da consistência inicial;

r = constante relativa ao método de ensaio e independente da composição.

Por outro lado o valor da oconsistência como função do teor de água é a seguinte

$$y = C Ag^T \quad (21)$$

onde

C = termo dependente da composição do concreto e do método de ensaio;

Ag = Teor de água.

A identidade das duas expressões foi provada por Popovics (8), que em seguida analisou os resultados da aplicação de vários métodos de ensaios de consistência para confirmação da teoria.

Dessa forma para uma dada mistura, as variações de água para passarmos de uma consistência à outra, poderão ser avaliadas a partir das expressões acima apresentadas

Para considerar a variação da mistura analisemos os resultados dos trabalhos de Powers (6) apresentados na Fig. 3

Chamemos agora K_y o fator correspondente as varias composições.

Para misturas a esquerda do ponto B temos as equações

$$K_y (1+M) = K_c + (m_{AB}) M \quad (22)$$

e considerando a definição de s

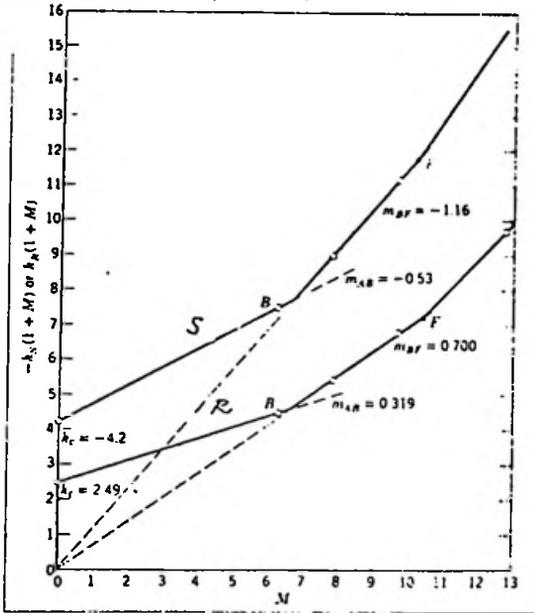


Fig. 3 - Comparação entre os teores de água necessários para consistências medidas pelo abatimento (S) e pela remoldagem (R)

$$K_y = K_c (1 - s) + m_{AB} s \quad (23)$$

e para misturas à direita do ponto B e acima de F

$$K_y (1 + M) = (m_{BF}) M \quad \text{donde} \quad (24)$$

$$K_y = (m_{BF}) s \quad (25)$$

Essa análise permite classificar os concretos em três categorias. A categoria AB compreende os concretos muito ricos, os BF os correntes e FC os magros.

Para a obtenção dos teores de água para concretos são

utilizadas as expressões:

$$\frac{p_{ag}}{c} = \frac{v_c^0}{V_{ag}} \left[\frac{Kc}{Q} + \frac{m_{AB}}{Q} \right]$$

Para os BF:

$$\frac{p_{ag}}{c} = \frac{v_c^0}{V_{ag}} \left(\frac{m_{BF}}{Q} - M \right)$$

Para os FC

$$\frac{p_{ag}}{c} = \frac{v_c^0}{V_{ag}} \frac{Q}{Q} \left(C M - 1 \right) \quad (28)$$

onde Q é o índice de consistência e Q_b índice de consistência básica ou seja correspondente a um concreto com um mínimo de vazios.

5. DIAGRAMA DO ÍNDICE DE ÁGUA

Toda essa análise anterior nos leva aos diagramas fundamentais do índice de água e do índice de vazios.

O do índice de água é apresentado na Fig.4

Os parâmetros A_w e D, são obtidos pelas fórmulas:

$$A_w = \frac{Kc}{Q} \quad (29)$$

$$D = \frac{m_{AB}}{Q} \quad (30)$$

O primeiro depende fundamentalmente das características do cimento, principalmente da superfície específica e é uma função da consistência e o segundo uma necessidade do agregado nas misturas ricas, para a mesma consistência.

6. DIAGRAMA DE ÍNDICE DE VAZIOS

A Fig. 5, representa não só um diagrama de índice de água mas também um diagrama de índice de vazios, construído de acordo com os princípios anteriormente estabelecidos.

Com base no valor de Z , o trecho AB do diagrama de vazios pode ser construído a partir do diagrama de índice

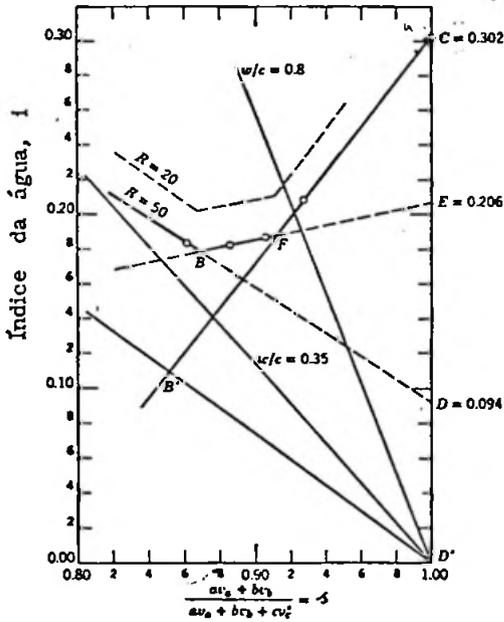


Fig. 4 - Diagrama do Índice de água

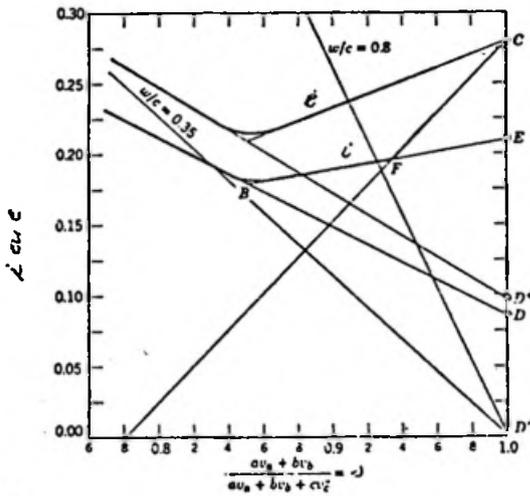


Fig. 5 - Diagrama do Índice de vazios derivado do diagrama do índice de água.

água. O valor de e para qualquer valor de s à esquerda de B pode ser obtido de i multiplicado por (1+Z). Da mesma forma o valor de D* é obtido de D.

Valores de e na categoria BF não podem ser avaliados porque Z cresce com s.

A partir de

$$e_B = (1+Z) \quad (1) \quad B \quad (31)$$

podemos completar o diagrama traçando deste ponto uma reta até o ponto C.

A importância desses diagramas já foi demonstrado, no Brasil, nos trabalhos de Camargo e Mondragón (10) para a barragem de Piraítinga.

7. CONCLUSÕES

O reconhecimento de três categorias de misturas de concreto e as simples equações para cálculo de quantidade de água necessária para cada classe abrem caminho para uma melhor avaliação crítica de uma dada mistura.

O diagrama do índice de água ou do índice de vazios e os métodos analíticos apresentados, facilitam a comparação dentre os materiais disponíveis permitindo uma melhor escolha em função de suas características físicas.

A possibilidade de exprimir a interrelação entre a mistura, consistência e índice de água através de simples expressões matemáticas podem estimular a prática de dosagem tendo em vista uma combinação ótima de propriedades utilizando inclusive as vantagens do cálculo automático.

A análise proposta por Powers (6), que se baseou na mais seleta literatura técnica sobre o assunto, permite uma generalização das técnicas de dosagens, possibilitando uma visão muito mais ampla da propriedade do concreto do que as dos limitados métodos rotineiramente usados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMARGO, W. N. & MONDRACÓN, J. R. G. Resultados da pesquisa de otimização volumétrica de composição para os concretos do vertedouro da Barragem de Piraitinga. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. 8, S. Paulo, 1972. 49p.
- COUTINHO, A. S. *Fabrico e propriedade de betão*. Lisboa, LNEC, 1973. 610p.
- GLANVILLE, W. H.; COLLINS, A. R. ; MATTHEWS, D. *The grading of aggregates an workability of concrete*. London, Road Research Tech Paper nº 5, 1949. 72p.
- L'HERMITE, R. & TOUNONG. La vibration du betón frais. Ann. Inst. Tech. Bul/Trav. Publ., Paris, 1 (11):..... fev., 1948.
- POPOVICS, S. Relation between the change of water content and the consistence of fresh concrete. *Magazine of concrete research*, London, 14 (41): 99-108, 1962.
- POWERS, T. C. *The properties of fresh concret.*, New York, John Wiley and sons, 1968. 664p.
- RITCHIE, A. G. B. The Triaxial testing of fresh concrete. *Magazine os Concrete Research*.
- SOBRAL, H. S. *Propriedades do concreto fresco*. S. Paulo, A. B.C.P., 1976. 28p.
- VALETTE, R. *Manuel de composition des betón*. Paris, Editions Eyrolles, 1964. 162p.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de uma análise de composição volumétrica do concreto e sua influência nas propriedades do concreto fresco.

São apresentadas comparações entre as necessidades de água verificadas com base no método do abastecimento e as verificadas com base no método da remoldagem.

O reconhecimento de três categorias de misturas de concreto e as simples equações que expressam a necessidade de água para cada classe abrem caminho para uma melhor avaliação crítica de qualquer traço estudado, seja qual for o método

todo usado na dosagem.

O diagrama do índice de vazios de água e o diagrama do índice de vazios, além do método de análise sugerido por Powers possibilitam verificar facilmente se os materiais disponíveis têm ou não características físicas capazes de conduzir o processo de dosagem a resultados ótimos.

Programas de computadores para a consideração simultânea de varias propriedades para determinados fins utilizando as simples expressões matemáticas apresentadas podem ser organizados.

SUMMARY

This paper presents the results of a concrete mix volumetric analyse and its influence on the fresh concrete properties.

Comparisons of the water requirements on a slump basis with that on remolding basis are presented.

Recognition of the three categories of concrete mixtures and the simple water-requirement equations for each class opens the way to a more critical evaluation of any given concrete mix design whatever the procedure of design.

The water-ratio diagram, or the voids-ratio diagram, and the suggested by Powers analytical method make it easy to determine whether or not the materials at hand have physical characteristics as favorable to optimum results as another material might have.

Computer programs for the simultaneous weighting of various properties with respect to specific uses applying the simple mathematical expressions presented can be organized.