

RAFAEL SALLES KURUSU

**O CONCEITO DE MATERIAL COM GRADAÇÃO FUNCIONAL (FGM)
APLICADO AO DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS**

**São Paulo
2008**

RAFAEL SALLES KURUSU

**O CONCEITO DE MATERIAL COM GRADAÇÃO FUNCIONAL (FGM)
APLICADO AO DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS**

**Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Engenheiro**

**São Paulo
2008**

RAFAEL SALLES KURUSU

**O CONCEITO DE MATERIAL COM GRADAÇÃO FUNCIONAL (FGM)
APLICADO AO DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Engenheiro

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Livre-Docente Douglas
Gouvêa

São Paulo
2008

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Mary, que é muito mais do que uma namorada.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Vanderley John, pela oportunidade e pelas idéias. Ao Cleber Dias, que me acompanhou de perto e me ensinou muito. Ao professor Douglas Gouvêa pela confiança. Ao Rafael Pileggi e ao Juarez Hoppe Filho pela ajuda em horas importantes. E à todas as outras pessoas que contribuíram de alguma forma, e que fazem parte da excelente infra-estrutura que tive ao meu dispor durante a execução deste trabalho.

À minha família e aos amigos de verdade, pela ajuda indireta mas não menos importante.



1	Introdução	5
2	Revisão bibliográfica	8
2.1	Materiais com gradação funcional (FGM)	8
2.1.1	Conceito	8
2.1.2	Processamento e aplicações de materiais com gradação funcional	12
2.2	Concretos Convencionais	14
2.2.1	Componentes	14
2.2.1.1	Pasta de Cimento (cimento e água)	14
2.2.1.2	Agregados	17
2.2.2	Estudo do Concreto no estado Fresco	18
2.2.2.1	Considerações sobre Reologia	18
2.2.2.2	Aspecto Prático	21
2.2.3	Resistência mecânica dos concretos	23
2.2.3.1	Relação água/cimento	25
2.2.3.2	Influência dos agregados	26
2.2.3.3	Resistência à tração	27
2.2.4	Durabilidade	29
2.2.5	Método de Dosagem convencional	30
2.2.6	Sustentabilidade	33
2.3	Conceito de concreto com gradação funcional	35
3	Arranjo experimental	37
3.1	Materiais	37
3.2	Projeto de misturas pelo EVD	38
3.3	Procedimento de mistura e ensaios reológicos no concreto fresco	42
3.4	Procedimento de moldagem e ensaios mecânicos	43
3.4.1	Moldagem dos concretos homogêneos	43
3.4.2	Moldagem dos concretos com gradação funcional	44
3.5	Análise dos dados	45
4	Resultados e discussão	47
4.1	Parâmetros reológicos	47



4.2	Propriedades mecânicas	54
4.2.1	Projeto de Misturas.....	54
4.2.2	Concretos com gradação	60
4.3	Sustentabilidade e Economia	68
4.3.1	Projeto de Misturas.....	68
4.3.2	Concretos com gradação	68
5	Aplicações Possíveis.....	73
5.1	Edificações.....	73
5.2	Pavimentação.....	74
5.2.1	Noções Básicas	74
5.2.2	Execução do Pavimento	76
6	Conclusões	79
7	Referências Bibliográficas.....	80



O conceito de material com gradação funcional aplicado ao desenvolvimento de concretos

RESUMO

Concretos com gradação funcional (CGF) formam uma nova classe de concretos que apresentam propriedades variando espacialmente, de forma controlada, dentro do próprio material, com a finalidade de se obter um desempenho desejado. Neste trabalho explora-se o uso do conceito de materiais com gradação funcional para o desenvolvimento de concretos. Foi realizado um estudo experimental visando-se obter regras de mistura para concretos com resistência à compressão entre 10 e 50 MPa. Para isso, foi empregado um procedimento estatístico de projeto de misturas denominado de *extreme vertices design* que permitiu relacionar as frações das matérias-primas: cimento, agregado graúdo e miúdo com propriedades mecânicas: resistência à compressão e resistência à tração na flexão e parâmetros reológicos. Depois, os modelos obtidos, juntamente com uma ferramenta de otimização múltipla, foram utilizados para a escolha de traços para concretos com gradação funcional. A otimização levou em consideração o desempenho mecânico e o custo dos concretos. Concretos com gradação funcional foram então submetidos à tração na flexão e confrontados com os concretos convencionais.

Os resultados mostram que o *extreme vertices design* é uma ferramenta valiosa para o estabelecimento de regras de mistura para concreto e para auxiliar a escolha de traços em concretos com gradação funcional. Os concretos com gradação funcional apresentaram maior eficiência comparados aos concretos homogêneos.

Palavras-chave: concreto, FGM, concreto com gradação funcional, desempenho mecânico, propriedades reológicas.



Functionally Graded Materials concept applied in the development of concretes

ABSTRACT

Functionally Graded Concretes (FGC) constitute a new class of materials whose properties vary spatially, in a controlled way, to achieve a desired performance to the material. In this article we establish the concept of FGC. The first stage of the study was to develop mixture rules for concretes. For this, the statistical procedure called extreme vertices design was employed. Parameters of mixing were related to mechanical properties - compression and bending strength, and rheological parameters (yield stress and shear stress x rotational frequency) obtained with a rheometer for concrete. Then, the models obtained were used for the selection of the compositions for molding functionally graded concretes, each with different mix arranged in layers. Optimization techniques were used to select the mix that meets the desired mechanical performance with lower cost. Functionally graded concretes were then submitted to bending tests and compared with conventional concretes.

The results show that extreme vertices design is a potential tool to obtain mixture rules for concretes and also to support choice mixtures for a functionally graded concrete. Functionally graded concrete were more effective than homogeneous ones.

Keywords: concrete, FGM, functionally graded concrete, mechanical performance, rheological properties.



1 INTRODUÇÃO

Materiais com gradação funcional (FGM¹) formam uma nova classe de materiais com distribuição de propriedades dependente da posição, projetada para se obter um desempenho desejado ao material (NEUBRAND; RÔDEL, 1997; DIAS; SAVASTANO; JOHN, 2006). Os componentes ordinários empregados na construção civil são homogêneos, projetados para suportar a tensão máxima a que eles estão submetidos, são, portanto, não eficientes já que existem regiões nos componentes que apresentam desempenho acima do que realmente eles necessitam. Por outro lado, materiais com gradação funcional apresentam distribuição de propriedades heterogênea estrategicamente projetada.

Atualmente existe uma intensa busca pelo uso mais racional de matérias-primas devido aos problemas ambientais que ocorrem no mundo moderno. Dessa forma, a redução do consumo dos recursos naturais, a destinação dos resíduos gerados pelas indústrias e a produção de produtos mais duráveis são necessárias.

A construção civil consome até 75% dos recursos naturais que estão sendo extraídos do planeta. A extração de matérias primas para a construção destrói biomas e os serviços de transporte destas matérias-primas emitem grande quantidade de poluentes para a atmosfera. A construção civil é também um setor que produz grande quantidade de resíduos tanto durante a construção como pela reposição de componentes de baixa durabilidade.

Outro importante aspecto está relacionado à produção de cimento Portland. Este produto é o material sintético mais consumido pelo homem, e a sua produção emite grande quantidade de CO₂ proveniente da decomposição térmica do calcário utilizado para produzir o cimento bem como da queima de combustível fóssil para gerar energia

¹ A sigla FGM vem do termo em inglês Functionally Graded Materials.



para a produção do cimento. Estima-se que aproximadamente 10% do CO₂ emitido para a atmosfera no Brasil seja proveniente da indústria do cimento (JOHN, 2007).

A sustentabilidade da construção demanda tanto o baixo consumo de matérias-primas, cimento em especial, como a melhora da durabilidade dos componentes e o uso de resíduos. Neste cenário, inovações são positivas e necessárias para produzir componentes economicamente mais acessíveis e ecoeficientes.

Os materiais com gradação funcional são um avanço no uso mais eficiente das matérias-primas. A aplicação do conceito de materiais com gradação funcional é incipiente na tecnologia da construção e apresenta grande potencial para o desenvolvimento de componentes mais sustentáveis (DIAS; SAVASTANO; JOHN, 2006), podendo promover mudanças radicais na concepção dos projetos e nas tecnologias de produção de componentes para a construção. Acredita-se que elementos de concreto possam ser fabricados com gradação a fim de se obter melhores desempenhos mecânicos e durabilidades comparados aos concretos convencionais. Paralelamente pode-se obter redução de custos, podem-se aplicar matérias-primas alternativas e reduzir o consumo de cimento tornando os componentes de concreto economicamente mais acessíveis e ecoeficientes (MAALEJ; AHMED; PARAMASIVAM, 2002).

Este trabalho apresenta um estudo exploratório inovador visando aplicar o conceito de materiais com gradação funcional para o desenvolvimento de concretos. Foram produzidos corpos-de-prova de concreto constituídos de diferentes camadas com propriedades diversas, visando torná-las mais econômicas e eficientes aos esforços mecânicos. Para a escolha dos traços que foram utilizados na confecção dos concretos com gradação funcional (FGCs²), foi utilizado um projeto de misturas pelo método estatístico *extreme vertices design* (EVD³) (McLEAN; ANDERSON, 1966; DING et al., 1999) obtendo-se regras de misturas que correlacionam as propriedades dos concretos com as frações volumétricas das matérias-primas utilizadas. Este

² FGC – Functionally Graded Concrete.

³ EVD – Extreme Vertices Design.



procedimento distingue-se dos procedimentos corriqueiramente utilizados na dosagem dos concretos.

Os concretos produzidos tiveram algumas de suas propriedades mecânicas caracterizadas: a) resistência à compressão e b) resistência à tração na flexão. Foram realizados também testes com o concreto fresco a fim de se obter parâmetros reológicos das misturas. Foram caracterizados os torques máximos atingidos pelo reômetro durante as misturas dos concretos e os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para ajustar as curvas de torque x rotação.

Para a escolha dos traços nos concretos com gradação foram utilizadas as regras de misturas obtidas para os concretos homogêneos combinadas a ferramentas de otimização múltipla que levaram em conta o custo do componente e as propriedades desejadas (DERRINGER; SUICH, 1980).



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais com gradação funcional (FGM)

2.1.1 Conceito

Materiais naturais como o bambu, conchas marinhas e osso humano apresentam uma microestrutura otimizada para alcançar o melhor desempenho sob as ações do ambiente. O bambu, por exemplo, apresenta em sua seção transversal uma distribuição densa de fibras na região periférica mais próxima da casca, que necessita de maior resistência; e esparsa na região interna, que é menos solicitada pela ação do vento (AMADA et al., 1997). Esta distribuição de resistência mecânica é resultado de uma evolução natural que otimizou o desempenho do bambu para as cargas de vento. Um estudo realizado por Ghavami; Rodrigues e Paciornik (2003) mostra a concentração de fibras de acordo com a região ao longo da espessura. As amostras foram retiradas, como o exemplo mostrado pela Figura 1, polidas e observadas no microscópio óptico. As imagens foram então divididas em 4 e 16 camadas que representam uma determinada concentração de fibras. A Figura 2 ilustra a divisão em quatro camadas. O resultado da distribuição de fibras está na Figura 3.

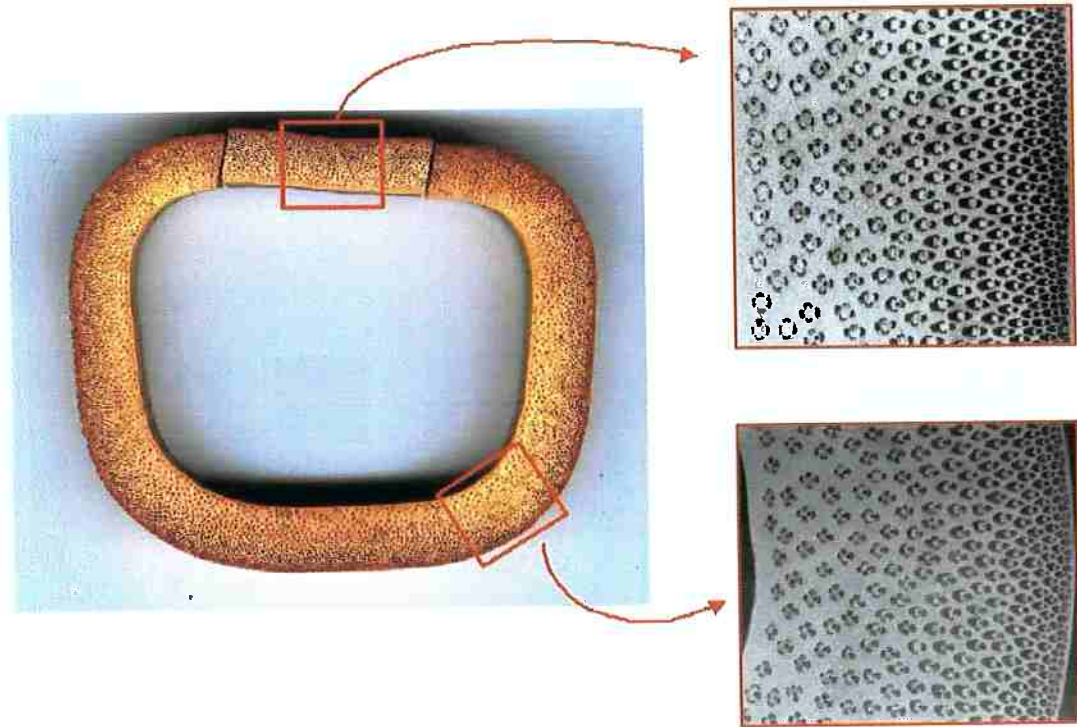


Figura 1 - Bambu da espécie *Phyllostachys heterocycla pubescens* e as duas amostras analisadas com microscopia óptica (GHAVAMI; RODRIGUES; PACIORNIK, 2003).

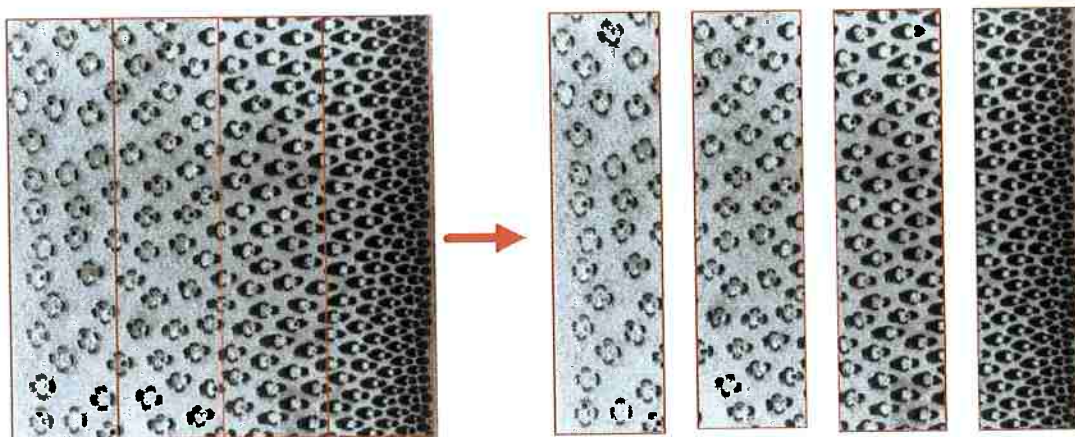


Figura 2 - Método utilizado para determinar a concentração de fibras, com a divisão da micrografia em quatro camadas (GHAVAMI; RODRIGUES; PACIORNIK, 2003).

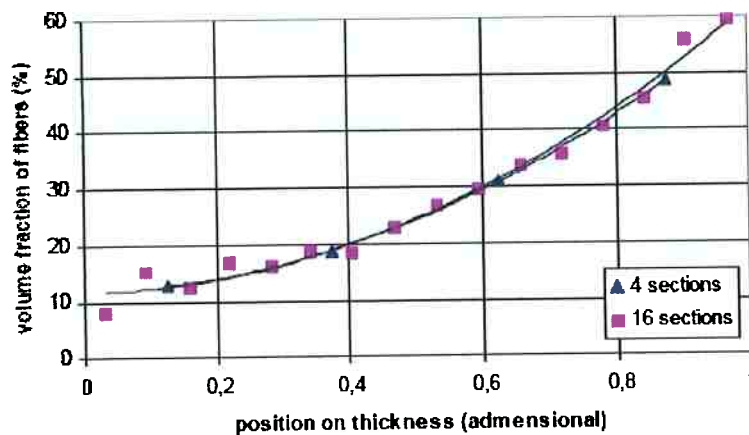


Figura 3 - Gráfico da fração volumétrica de fibras em função da posição na espessura, com 4 e 16 cortes analisados na amostra da seção reta (GHAVAMI; RODRIGUES; PACIORNIK, 2003).

O bambu é portanto um material natural com gradação funcional (FGM), isto é, um material que apresenta uma distribuição de propriedades heterogênea, com a resistência variando de acordo com o teor de fibras.



Bever e Duwez (1972) foram os primeiros a tratar de compósitos com gradientes na microestrutura e composição. Estes autores reconheceram que os componentes poderiam ser projetados com gradientes de forma a conseguir melhores desempenhos em diversas aplicações. De uma forma geral, os objetos desenvolvidos pelo homem, quando em uso, estão sujeitos a solicitações mecânicas, térmicas ou químicas de intensidades diferentes em diferentes pontos do objeto. No entanto, na maioria dos casos, estes objetos são construídos com propriedades homogêneas.

Porém é importante observar que alguns materiais já eram produzidos com microestrutura heterogênea e eficiente mesmo antes do conceito FGM ter sido estabelecido. Como exemplo, podem ser citadas as ferramentas metálicas com tratamento superficial de cementação. Nesse processo a peça é colocada em uma atmosfera controlada com alta concentração de carbono para que este elemento se difunda no metal. A superfície fica rica em carbono e, após um tratamento térmico adequado, o carbono reage com o metal e forma compostos de elevada dureza. Assim, a região superficial se torna mais resistente ao desgaste e o núcleo mantém as características originais. Têm-se então em uma mesma peça microestruturas diferentes, adequadas a cada tipo de solicitação, o que é o cerne da idéia de FGM.

Considere o exemplo de uma hélice de turbina que deve suportar alto fluxo de calor não-estacionário e acelerações centrífugas. Uma estrutura ideal para essa aplicação consistiria de um espesso núcleo de metal para conferir resistência mecânica e uma camada de cerâmica resistente ao calor e a corrosão na superfície da hélice. Se a cerâmica é diretamente ligada ao metal podem ocorrer problemas na interface devido a tensões geradas durante o ciclo térmico. Como mostra a Figura 4, um material com gradação funcional que possui uma suave transição da superfície cerâmica para o núcleo de metal pode evitar a concentração de tensões termomecânicas na interface (NEUBRAND; RÔDEL, 1997; ABOUDI; PINDERA; ARNOLD, 1999).

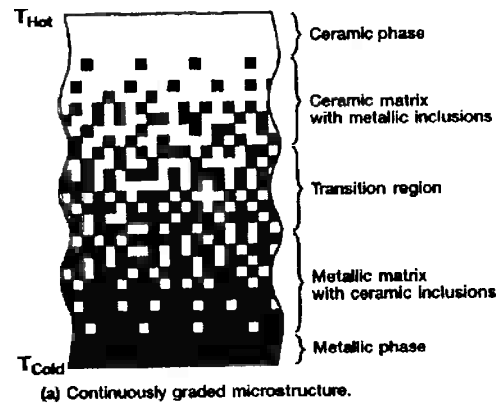


Figura 4 - Exemplo de FGM metal/cerâmica (ABOUDI; PINDERA; ARNOLD, 1999).

Em resumo, pode ser considerado como um FGM qualquer material, natural ou sintético, que possua dentro de um mesmo “corpo” variação de microestrutura adaptada às solicitações de natureza diversa que este corpo sofre. A variação pode estar na forma de uma gradação suave ou disposta em camadas com diferentes propriedades.

2.1.2 Processamento e aplicações de materiais com gradação funcional

A aplicação do conceito de gradação funcional tem ênfase em dois aspectos essenciais: o primeiro inclui o controle da microestrutura e/ou composição química de acordo com uma predição quantitativa do perfil de distribuição das propriedades. O segundo aspecto essencial é a viabilidade dos processos de produção. Os processos devem ter a capacidade de produzir um perfil da composição química precisamente controlado e devem ser diretamente fabricáveis a partir dos resultados do projeto computacional (KAWASAKI; WATANABE, 1997).

A produção de um FGM geralmente pode ser dividida em duas etapas: a) construir a estrutura não-homogênea (“gradação”) e b) consolidar esta estrutura em um



“volume” desejado (“consolidação”). A gradação pode ser realizada de forma que o objeto fabricado possua camadas com diferentes microestruturas e/ou composições ou que possua uma variação gradual ao longo de seu corpo. A secagem e sinterização ou solidificação são os principais métodos de consolidação para cerâmicas e metais em pó, seguindo a etapa de gradação (KIEBACK; NEUBRAND; RIEDEL, 2003). Para produtos cimentícios, a consolidação se dá com a hidratação do cimento.

A fabricação de FGMs em laboratórios atingiu um nível de maturidade considerável. As idéias estão sendo utilizadas em diversas áreas como, por exemplo, na medicina, em materiais para implantes (POMPE et al., 2003), na mecânica, como no exemplo da hélice de turbina (ABOUDI; PINDERER; ARNOLD, 1999). Existem vários métodos de processamento para diversas combinações de material. Escolher o método mais apropriado depende não apenas dos materiais envolvidos, mas também do tipo e da extensão do gradiente, e da geometria do componente requerido. Apesar dos diversos avanços, existem novos desafios para as aplicações dos FGMs evoluírem, que incluem:

- a) Adaptação para a produção em massa;
- b) Repetibilidade dos processos de produção e confiabilidade dos FGMs produzidos;
- c) Custo-benefício dos processos;
- d) Controle de qualidade.

O modelamento dos processos de produção pode contribuir para resolver alguns desses problemas (KIEBACK; NEUBRAND; RIEDEL, 2003).



2.2 Concretos Convencionais

O concreto é o material artificial mais consumido no mundo e pode ser considerado como um compósito. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a sua estrutura macroscópica pode ser dividida em duas fases: (1) matriz porosa (pasta) - composta por cimento (aglomerante), água, produtos de hidratação do cimento e a zona de transição entre as fases; (2) agregados: composta por rochas “miúdas” e “graúdas”, em geral areia e brita respectivamente. A ligação entre a pasta de cimento e o agregado resulta não só de um entrelaçamento mecânico influenciado pela rugosidade, como muitos autores consideram, mas também de reações químicas (PAULON, 2005).

A tecnologia atual do concreto está intimamente ligada ao estudo de sua microestrutura e composição e da relação destas com as suas propriedades. O conhecimento dos mecanismos responsáveis pela resistência, estabilidade dimensional e durabilidade das misturas, tem permitido que se atue de maneira a melhorar o desempenho dos concretos.

2.2.1 Componentes

2.2.1.1 *Pasta de Cimento (cimento e água)*

O cimento mais utilizado para a produção de concretos para a construção é o cimento Portland, um pó anidro que consiste de partículas angulares de tamanho entre 1 e 50 μm . Quando o cimento é disperso em água, as espécies presentes em sua composição, como sulfato de cálcio, aluminatos e outros compostos formados em alta temperatura tendem a entrar em solução, e a fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies iônicas. Como resultado das combinações entre cálcio,



sulfato, aluminato e íons hidroxila, após alguns minutos de hidratação do cimento Portland, aparecem os primeiros cristais aciculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratado chamado etringita. Algumas horas depois, cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrilares de silicatos de cálcio hidratado (chamado comumente de C-S-H⁴) começam a preencher o espaço vazio ocupado inicialmente pela água e as partículas de cimento em dissolução (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A estrutura contínua formada pelos produtos de hidratação liga as partículas de cimento para formar uma rede tri-dimensional (HÄKKINEN, 1993). Através da análise de micrografias, pode-se notar que as várias fases não são uniformemente distribuídas nem são uniformes em tamanho e morfologia. Nos sólidos, as heterogeneidades micro-estruturais podem trazer efeitos negativos sobre a resistência mecânica e outras propriedades mecânicas relacionadas a ela, porque estas propriedades são controladas pelos extremos micro-estruturais e não pela microestrutura média. Tanto a composição química quanto propriedades reológicas influenciam determinadamente a microestrutura da pasta endurecida. As variações locais na relação água/cimento e as condições de cura são as principais fontes de evolução da estrutura porosa e heterogênea. Em sistemas de pasta de cimento altamente floculada não somente o tamanho e a forma dos poros, mas também os produtos hidratados cristalinos são diferentes quando comparados aos formados em sistemas consideravelmente dispersos (MEHTA; MONTEIRO, 1994; PAULON, 2005). A "idade" do concreto também tem alta influência na microestrutura, já que as reações de hidratação continuam por períodos muito longos. Após a primeira semana, as reações tornam-se mais lentas, mas podem continuar por meses e anos. A heterogeneidade da microestrutura dificulta um estudo além do caráter qualitativo e subjetivo. Uma das alternativas que podem fornecer informações quantitativas são programas que analisam imagens digitalizadas da microestrutura do material polido. Os métodos mais utilizados para obtenção de

⁴ C-S-H – CaO.SiO.H₂O.



imagens são as microscopias eletrônicas de transmissão e varredura, como o exemplo da Figura 5 (PAULON, 2005).



Figura 5 - Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de Cimento Portland. Fases presentes: Ettringita, C-S-H e Portlandita (Hidróxido de cálcio cristalino) (LABOR DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, 2004).

A porosidade total da pasta de cimento Portland fica entre 25 e 30% em volume para uma relação água/cimento de 0,5 (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Esta porosidade é decomposta nos seguintes tipos de vazios: a) *espaço interlamelar entre os cristais de C-S-H*, de alguns nanômetros de comprimento, muito pequeno para ter um efeito desfavorável sobre a resistência e a permeabilidade da pasta; b) *poros capilares entre os compostos hidratados, bolhas e fissuras*, com tamanho variando entre 10nm e alguns milímetros (MORANVILLE-REGOURD, 1992).

Tem sido sugerido que a distribuição de tamanhos de poros, e não a porosidade capilar total, é o melhor critério para avaliação da microestrutura dos vazios capilares maiores que 50 nm de uma pasta, referidos na literatura atual como macro-poros (MEHTA; MONTEIRO, 1994), que são prejudiciais à resistência e à impermeabilidade,



enquanto vazios menores do que 50 nm, micro-poros, são mais importantes para a retração por secagem e a fluência.

O ar também pode ser aprisionado na pasta fresca de cimento durante a operação de mistura. Os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm; os vazios de ar incorporado variam comumente de 50 a 200 μm . Conseqüentemente, esses vazios são muito maiores do que os vazios capilares, sendo capazes de afetar negativamente a sua resistência e impermeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A porosidade é assim o fator mais importante que irá determinar as propriedades mecânicas do concreto.

2.2.1.2 Agregados

A fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade, e estabilidade dimensional do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Estas propriedades dependem em larga extensão da densidade e resistência do agregado, que, por sua vez, são determinadas mais por características físicas do que por características químicas da estrutura do agregado. Em outras palavras, a composição química ou mineralógica das fases sólidas do agregado são comumente menos importantes do que as características físicas tais como volume, tamanho, e distribuição de poros.

Os agregados são divididos em miúdos e graúdos. O agregado miúdo é na maioria dos casos algum tipo de areia, com faixa granulométrica intermediária entre o cimento e os agregados graúdos, e com resistência muito superior a do concreto. No caso do agregado graúdo, a porosidade, a forma e a textura também afetam as propriedades do concreto (ERDOGAN et al., 2008). Geralmente, o seixo natural tem uma forma arredondada e uma superfície de textura lisa. Rochas britadas têm uma textura rugosa; dependendo do tipo de rocha e da escolha do britador, o agregado



britado pode conter uma proporção considerável de partículas chatas ou alongadas, que afetam negativamente muitas propriedades do concreto. Partículas de agregado leve de pedra-pome, que é altamente celular, são também angulares e de textura rugosa, mas as de argila ou folhelho expandidos são geralmente arredondadas e lisas.

2.2.2 Estudo do Concreto no estado Fresco

2.2.2.1 Considerações sobre Reologia

Um dos principais problemas do estudo do concreto em seu estado fresco é o caráter qualitativo das análises convencionais. Segundo a norma ASTM C 125-93, por exemplo, trabalhabilidade é a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável de homogeneidade. Esse conceito varia de acordo com a geometria da peça a ser moldada, dos equipamentos de mistura, transporte, lançamento e adensamento, e com a técnica de acabamento desejada. Os termos utilizados comumente para aferir a qualidade ao concreto em estado fresco são fluidez e coesão. A fluidez é a facilidade de mobilidade, e a coesão é a resistência à exsudação e a segregação (GUIMARÃES, 2005).

Uma abordagem recente utilizada por alguns pesquisadores é considerar o concreto fresco como um fluido e utilizar a reologia para descrever seu comportamento.

A hipótese de concreto fresco como um fluido leva em conta que este material é homogêneo. Para caracterizar um fluido reologicamente se usam conceitos como tensão e taxa de cisalhamento. A maioria dos autores considera o concreto como um fluido de Bingham (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001). Por este modelo reológico linear os parâmetros de fluxo são a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, pela seguinte equação:



$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Na qual τ é a tensão de cisalhamento, τ_0 é a tensão de escoamento, μ é a viscosidade plástica e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento. Pelas definições tradicionais, para ter maior coesão o concreto fresco deverá ter maior tensão de escoamento inicial, e para ter maior fluidez, o material deverá ter menor viscosidade (GUIMARÃES, 2005).

O procedimento mais comum para medir estes parâmetros é através de um reômetro, com controle da taxa de cisalhamento. O concreto é misturado a uma alta taxa que durante o ensaio vai sendo alterada gradualmente, medindo-se a tensão para cada taxa. A relação entre a tensão e a taxa é plotada e o valor extrapolado para a taxa zero é a tensão de escoamento, enquanto que o coeficiente angular fornece a viscosidade plástica. A Figura 6 mostra dois exemplos, dos quais a curva b seria a desejada segundo os critérios discutidos de maior coesão e menor viscosidade (GUIMARÃES, 2005).

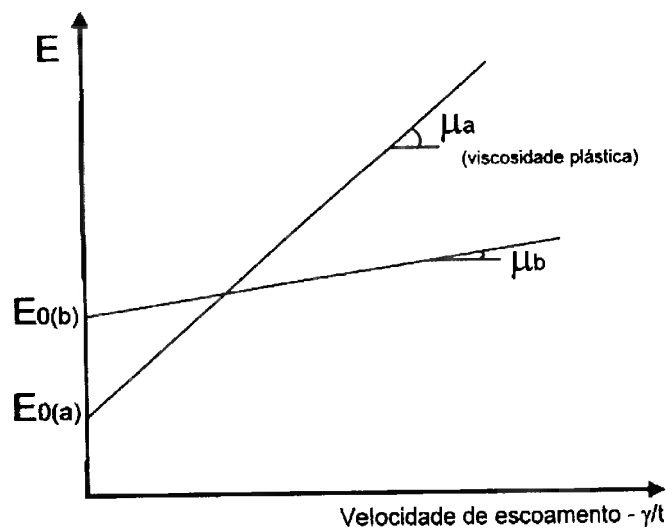


Figura 6 – Gráfico de tensão versus velocidade de escoamento pelo modelo de Bingham (GUIMARÃES, 2005).



Porém, como foi verificado por De Larrard; Ferraris e Sedran (1998), o modelo de Bingham pode gerar em alguns casos valores de tensão de escoamento negativos, e o comportamento do concreto fresco pode ser melhor representado por outro modelo reológico, o de Herschel-Bulkley, cuja equação não-linear é:

$$\tau = \tau_0' + a \dot{\gamma}^b$$

Na qual a e b são novos parâmetros empíricos, e τ_0 é a tensão de escoamento do modelo. Tem-se então um modelo com três parâmetros que pode ser difícil de lidar. Porém, caso exista uma relação sistemática entre a e b , o modelo então possui apenas dois parâmetros independentes (DE LARRARD; FERRARIS; SEDRAN, 1998).

No caso do modelo de Herschel-Bulkley, a viscosidade plástica não pode ser calculada diretamente. De Larrard; Ferraris e Sedran (1997) também estudaram a possibilidade de se reduzir o n° de parâmetros para dois considerando a equação de Herschel-Bulkley como uma relação linear durante um curto intervalo da taxa de cisalhamento aplicada. Assim a viscosidade poderia ser calculada pela seguinte equação:

$$\mu' = \frac{3a}{b+2} \dot{\gamma}_{máx}^{b-1}$$

Na qual μ' é o coeficiente angular da nova reta. Esse modelo foi denominado Bingham-modificado. A Figura 7 mostra a comparação entre os três modelos.

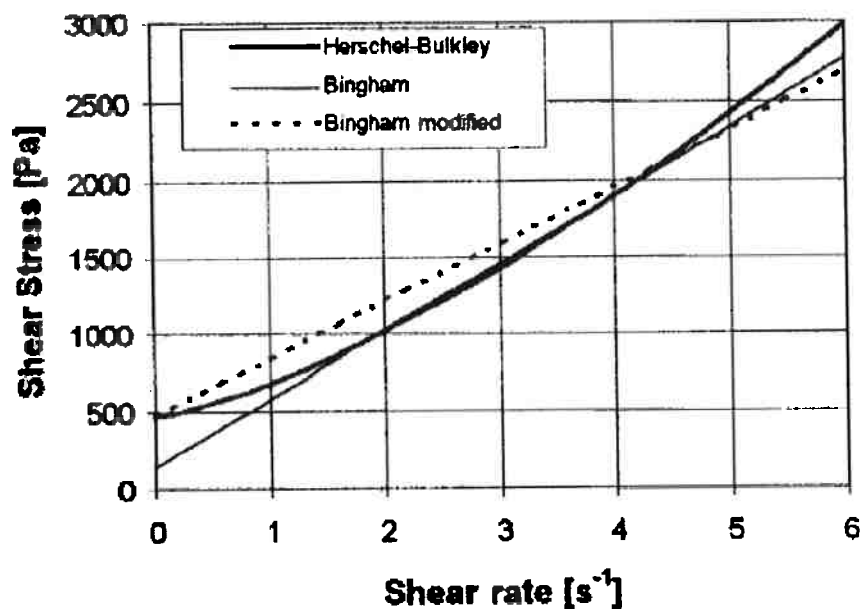


Figura 7 – Cálculo dos parâmetros de Bingham utilizando o modelo de Herschel-Bulkley (HB). A linha pontilhada parte do mesmo ponto que o modelo de HB (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001).

O comportamento do concreto em seu estado fresco deve estar ser definido por ao menos dois parâmetros: a *tensão de escoamento* caracteriza a resistência inicial ao fluxo; a *viscosidade plástica* caracteriza o fluxo depois de iniciado (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001). Entretanto os testes mais comuns determinam apenas 1 parâmetro, que muitas vezes não possui relação com os dois parâmetros citados.

2.2.2.2 Aspecto Prático

Os testes para caracterizar concreto fresco podem ser divididos em dois tipos: os utilizados em obra e os utilizados em laboratório.



O teste mais utilizado em obra é o slump test, no qual o concreto fresco é moldado no interior de uma fôrma com o formato de um tronco de cone. Quando a fôrma é retirada mede-se a altura que o concreto desceu em relação à altura original da fôrma. A força aplicada é portanto o próprio peso do concreto e o resultado têm uma relação com a tensão de escoamento.

Para o estudo reológico mais preciso, são usados diversos tipos de reômetros em laboratórios.

O reômetro coaxial consiste de dois cilindros concêntricos, sendo que usualmente o cilindro externo é fixo enquanto o interno rotaciona e as tensões de cisalhamento são medidas. O espaço entre os dois cilindros deve ser pequeno em relação aos raios dos cilindros, e tem que ser de 3 a 5 vezes maior que a dimensão máxima dos agregados (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001). Isso causa uma limitação dimensional para a utilização desse reômetro em obra.

Um reômetro que diminui os problemas dimensionais é o reômetro rotacional que consiste de um eixo com pás (“raquete”) que rotaciona e em alguns casos translada no interior de uma cuba com o concreto analisado, controlando-se em geral a velocidade de rotação. O torque é medido na raquete. A Escola Politécnica da USP possui no Departamento de Construção Civil um reômetro desse tipo, desenvolvido por Pileggi et al. (1999). Esse método não permite o cálculo da viscosidade e da tensão de escoamento em unidades fundamentais, mas permite o ensaio em diversas taxas de cisalhamento.

Existe ainda outro tipo de reômetro, o BTRHEOM, desenvolvido por De Larrard et al. (1994) que se encontra no LCPC⁵ em Nantes. A geometria deste reômetro é de placas paralelas, na qual a placa superior rotaciona e mede a resistência ao cisalhamento. Com essa geometria, a taxa de cisalhamento depende da posição, sendo zero no centro da placa e máxima na borda. O último caso é utilizado em geral para medir a viscosidade e a tensão de escoamento. Porém um cálculo analítico se faz

⁵ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Nantes, França.



necessário já que para um fluido não-newtoniano a viscosidade depende da taxa de cisalhamento. A vantagem desse teste é fornecer os resultados em unidades fundamentais. Além disso o uso desse reômetro em campo é mais promissor, pois é relativamente pequeno e pode ser facilmente carregado (FERRARIS; DE LARRARD; MARTYS, 2001).

Para resumir, existem vários testes que caracterizam o concreto fresco. O problema é que muitos deles não fornecem resultados em unidades fundamentais, o que impede a comparação direta entre os métodos. Outra questão é a viabilidade desses testes em obra, já que a maioria dos equipamentos se restringe ao laboratório.

2.2.3 Resistência mecânica dos concretos

De acordo com Neville apud Jacintho e Giongo (2005), na prática de Engenharia, se o concreto for adensado corretamente, a sua resistência depende apenas da relação a/c , seguindo o comportamento previsto pela lei de Abrams.

No entanto, na realidade, a resistência mecânica do concreto endurecido está atrelada a diversas variáveis e a interação entre elas, como mostra a Figura 8 proposta por Mehta e Monteiro (1994).



Figura 8 – Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Porém, a relação água/cimento-porosidade é indiscutivelmente o fator mais importante porque, independentemente de outros fatores, ela afeta a porosidade tanto



da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo.

2.2.3.1 Relação água/cimento

A partir do entendimento dos fatores responsáveis pela resistência da pasta de cimento endurecida e o efeito do aumento do fator água/cimento na porosidade para um dado grau de hidratação do cimento, a relação água/cimento-resistência no concreto pode ser facilmente explicada como uma consequência natural do progressivo enfraquecimento da matriz devido ao aumento da porosidade com o aumento do fator a/c . Parte da água usada na mistura reage com o cimento e gera produtos de hidratação, enquanto o resto da água seca e forma a estrutura porosa da pasta. Um concreto com a proporção água/cimento 0,65 é muito poroso e rico em produtos menos resistentes de hidratação formados através de processos de solução-precipitação, enquanto um com proporção água/cimento 0,25 é muito compacto e essencialmente composto de produtos de hidratação mais resistentes se assemelhando a um gel desenvolvido por difusão (Figura 9). Essa diferença essencial da microestrutura resulta em uma grande diferença de propriedades mecânicas e durabilidade (AÏTCIN, 2003).

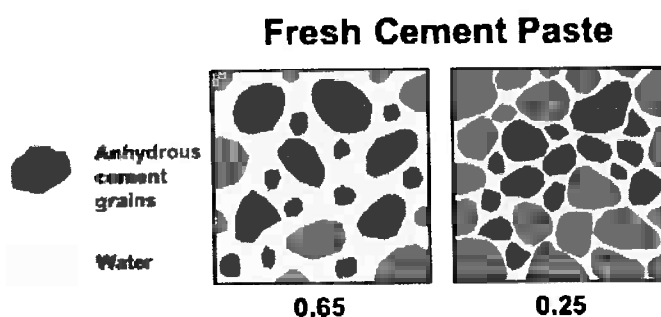


Figura 9 - Representação esquemática da microestrutura de duas pastas de cimento com relação água/cimento de 0,65 e 0,25 (AÏTCIN, 2003).



Esta explicação, contudo, não leva em conta a influência do fator água/cimento sobre a resistência da zona de transição. Num concreto de baixa (Resistência à compressão < 20 MPa) e média resistência (Resistência à compressão entre 20 e 40 MPa) preparado com agregados comuns, ambas as porosidades da zona de transição e da matriz determinam a resistência, e é válida a relação direta entre o fator água/cimento e a resistência do concreto. Para fatores água/cimento abaixo de 0,30, aumentos desproporcionalmente elevados na resistência à compressão podem ser conseguidos para pequenas reduções no fator água/cimento. O fenômeno é atribuído principalmente à melhora significativa da resistência da zona de transição obtida para fatores água/cimento muito baixos. Uma das explicações é que o tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio diminui com a redução dos fatores água cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.2.3.2 Influência dos agregados

A resistência do agregado não é normalmente um fator determinante na resistência do concreto. Isso porque, à exceção dos agregados leves, a partícula do agregado é muito mais resistente que a matriz e a zona de transição. Assim a ruptura é determinada pelas outras duas fases. Existem, contudo, evidências de que, independentemente do fator água/cimento, o tamanho, a forma, a textura da superfície e a mineralogia das partículas do agregado influenciarão as características da zona de transição e, portanto, afetará a resistência do concreto. Agregados grandes tendem a formar zonas de transição mais fracas contendo mais micro-fissuras.

Uma mudança na granulometria dos agregados sem qualquer mudança no diâmetro máximo do agregado gráudo e com o fator água/cimento mantido constante, pode influenciar a resistência do concreto se esta mudança provocar melhor empacotamento e conseqüente alteração na consistência da mistura de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).



Outro fator importante é que uma mistura com a presença de agregado de textura rugosa ou britado apresentará resistência maior nas primeiras idades, em relação a um concreto com agregado liso. Uma ligação física mais forte entre o agregado e a pasta de cimento endurecida é admitida como responsável por esse fato. Em idades maiores, quando a interação química entre o agregado e a pasta de cimento começa a fazer efeito, a influência da textura superficial do agregado sobre a resistência poderá reduzir-se.

Resumindo, melhora-se a resistência do concreto quando:

- a) diminui-se o diâmetro máximo do agregado;
- b) agregados mais resistentes são escolhidos;
- c) adota-se uma distribuição granulométrica que propicie maior empacotamento da mistura;
- d) utiliza-se agregado com forma de partículas mais próximas às de um cubo, com arestas rugosas;
- e) emprega-se agregados com características que favoreçam maior aderência com a pasta.

2.2.3.3 Resistência à tração

Elementos estruturais como as vigas, são submetidos a forças cortantes e conseqüentemente momentos fletores que acabam gerando tensões de tração no concreto. Quando a intensidade da tensão fica próxima da resistência a tração, existe uma grande chance de começar o processo de fissuração (JACINTHO; GIONGO, 2005).

Uma das maneiras de se determinar a resistência a tração é o ensaio de flexão com corpos-de-prova prismáticos. Como ilustrado pela Figura 10, durante o ensaio a viga é biapoiada e são aplicadas duas forças transversais nos exatos terços da região entre os



apoios. A fratura do concreto ocorre na região entre os planos de aplicação de carga, onde o momento fletor é máximo e as forças cortantes são praticamente nulas.

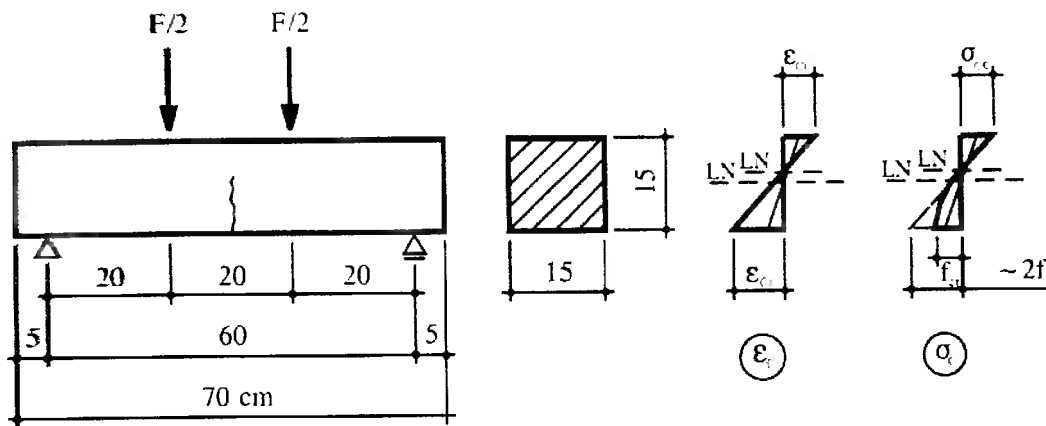


Figura 10 - Ensaio de flexão de viga prismática (JACINTHO; GIONGO, 2005).

A resistência a tração é calculada pela seguinte expressão:

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bh^2}$$

Onde F é a força aplicada, l é a medida do terço da região entre apoios e b e h são as medidas do corpo-de-prova. Essa equação considera uma distribuição linear de tensões (hipótese de Navier). Porém, a ruptura da viga de concreto simples não ocorre dessa maneira. Pela hipótese de Bernoulli, considerando que as seções planas permaneçam planas depois da deformação, a distribuição de tensões não é linear, sendo correspondente a curva de tensão-deformação, na qual ocorre um desvio da linearidade perto da região de rompimento. O que se pode dizer é que no instante da ruptura, a tensão de tração máxima na parte mais afastada da linha neutra, é consideravelmente menor do que a calculada pela equação acima (JACINTHO; GIONGO, 2005).



Segundo Metha e Monteiro (1994) a resistência a tração determinada em corpos de prova prismáticos submetidos a ensaio de flexão é maior que a resistência determinada com corpos-de-prova à tração axial. A Tabela 1 mostra esse comportamento. Vale ressaltar que o ensaio de tração direta é muito complicado de ser realizado.

Tabela 1 - Relação entre as resistências à compressão, flexão e tração direta do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Resistência do concreto (MPa)			Razão (%)		
Compressão	Tração na flexão	Tração direta	Resistência a flexão pela resistência a compressão	Resistência a tração direta pela resistência a compressão	Resistência a tração direta pela resistência a flexão
7	1,6	0,8	23,0	11,0	48
14	2,6	1,4	18,8	10,0	53
21	3,3	1,9	6,2	9,2	57
28	4,0	2,3	14,5	8,5	59
34	4,7	2,8	13,5	8,0	59
41	5,3	3,2	12,8	7,7	60
48	5,9	3,6	12,2	7,4	61
55	6,4	4,0	11,6	7,2	62
62	7,0	4,3	11,2	7,0	63

2.2.4 Durabilidade

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 1994).



O desempenho do concreto em longo prazo depende das interações com as condições de serviço, das quais a penetração de substâncias deletérias é uma das mais significantes (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

Os poros e micro-fissuras presentes no concreto têm uma influência marcante na permeabilidade do concreto (HÄKKINEN, 1993). Quanto menor a permeabilidade maior a durabilidade (AÏTCIN, 2003).

Concretos de alta performance (HPC) que tem a proporção água/cimento entre 0,3 e 0,4 são geralmente mais duráveis do que concreto comum não só porque são menos porosos, mas também por possuírem as redes de capilares e poros “menos” conectadas (AÏTCIN, 2003).

Nenhum material é inerentemente durável; como um resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil quando as sua propriedades sob dadas condições de uso deterioram a tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada como insegura, ou antieconômica. O uso de materiais inadequados, controle de qualidade insuficiente, reduz a vida útil das estruturas ou força a reparos constantes, com enorme custo (BASHEER; KROPP; CLELAND, 2001).

2.2.5 Método de Dosagem convencional

O método utilizado atualmente mais versátil para a dosagem de concretos considera a relação a/c como o parâmetro mais importante para o concreto estrutural. Segundo Helene (2005), definidos os materiais e essa relação a/c , a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas, sempre que mantida a mesma trabalhabilidade.

As principais leis utilizadas para avaliar o comportamento dos concretos são:



Lei de Abrams

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} *$$

Lei de Lyse

$$m = k_3 \cdot (a/c) + k_4 **$$

Lei de Molinari

$$C = \frac{1000}{k_5 \cdot m + k_6} ***$$

Obs: *a/c = fator água/cimento, f_c = resistência à compressão do concreto em MPa, k_i = constantes empíricas; **m = relação agregados/cimento em massa; ***C = consumo de cimento (kg/m^3).

O método adota ainda como modelos de comportamento:

Teor de argamassa seca (α)

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m}$$

Relação água /materiais secos (H)

$$H = \frac{a/c}{(1+m)}$$

Consumo de cimento (C) (kg/m^3)

$$C = \frac{\gamma}{1+a+p+\frac{a}{c}}$$

Obs: γ = massa específica do concreto em kg/m^3 ; a = relação agregado miúdo seco / cimento em massa; b = relação agregado graúdo seco / cimento em massa (HELENE, 2005)

A dosagem se baseia nas seguintes etapas (HELENE, 2005):

- Escolha da dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- Escolha do abatimento desejado e compatível;
- Estabelecimento da resistência média que se deseja alcançar na idade específica;
- Escolha de pelo menos três traços diferentes em massa seca de cimento, que contenham ou estejam próximos do traço pretendido (1 : m - 1; 1 : m; 1 : m + 1);



- Acerto experimental em laboratório do traço (1 : m) até atingir a trabalhabilidade especificada, por meio de um abatimento constante. Nessa etapa encontra-se o valor ótimo de α por meio de observações visuais e manuseios;
- Moldagem de corpos de prova para os ensaios em concreto endurecido;
- Confeção dos demais traços, mantendo fixo o abatimento, α e H. A diferença vem da relação a/c. Moldagem de corpos de prova para os ensaios no estado endurecido.
- Verificação das resistências e outros parâmetros nas idades especificadas.
- Construção de um diagrama de dosagem utilizando as três leis empíricas citadas acima (Figura 11), e a partir do diagrama obter o traço otimizado entrando com alguma propriedade desejada, como a resistência média.

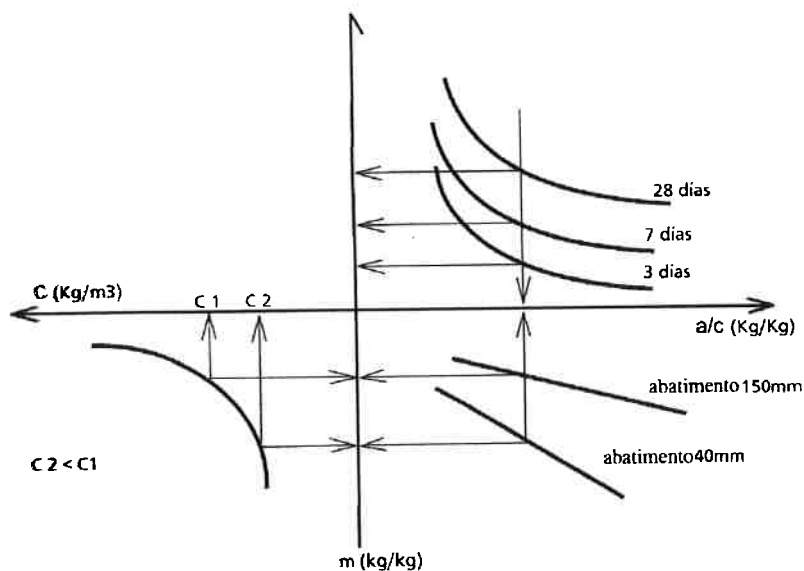


Figura 11 - Diagrama de dosagem de concretos de Cimento Portland (HELENE, 2005).



2.2.6 Sustentabilidade

Um dos aspectos mais importantes atualmente é o impacto ambiental causado pelos materiais. A emissão de CO₂ atrelada à produção de cada material é um dos parâmetros mais utilizados, já que o excesso deste gás na atmosfera intensifica o aquecimento global pelo efeito estufa.

O concreto convencional, quando comparado a outros materiais de Engenharia bastante utilizados, possui uma baixa emissão de CO₂. O gás vem da calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis durante a fabricação de cimento. A Tabela 2, com dados do software *Cambridge Engineering Selector*⁶, mostra essa comparação em quilogramas de CO₂ criado na produção de um quilograma do material.

Tabela 2 – Comparação da geração de kg de CO₂ / por kg de material produzido.

Material	Criação de CO₂ (kg/kg)
Ligas de Titânio	53,8 – 59,5
Ligas de Alumínio	11,6 – 12,8
Ligas de Cobre	3,97 – 4,38
Aços de Baixo Carbono	1,9 – 2,1
PVC	1,85 – 2,04
Concreto	0,16 – 0,18

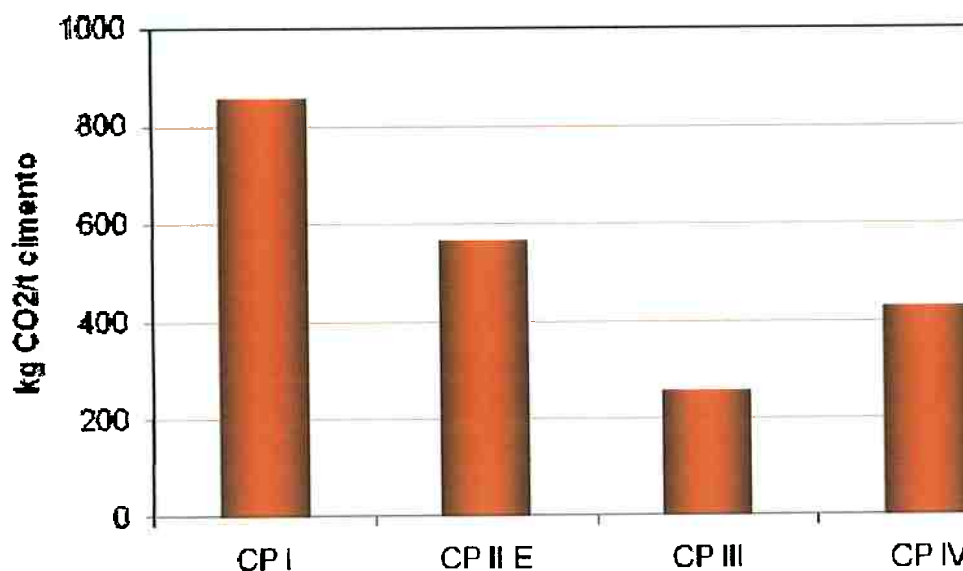
Porém essa simples análise não dá uma imagem real, já que é preciso considerar as escalas de produção de cada material. Segundo a estimativa de John (2007) no ano de 2006 foram consumidos cerca de 250 milhões de toneladas de

⁶ Software que contém banco de dados com todos os materiais de Engenharia, suas propriedades e processos de fabricação, e possibilita a filtragem por performance baseada nos objetivos e restrições de projeto, desenvolvido pelo Depto. de Eng. Mecânica Da Universidade de Cambridge.



produtos a base de cimento (cerca de 1,4 ton/hab.ano). No mesmo ano, a indústria automotiva que utiliza metais e polímeros principalmente, produziu 2,1 milhões de automóveis, com massa provavelmente inferior a 2,5 milhões de toneladas, o que é 100 vezes menor do que o consumo de produtos a base de cimento. A indústria de cimento é responsável por cerca de 10% de todo o CO₂ gerado no Brasil (JOHN, 2007).

A substituição do clínquer produzido pela queima do calcário por outras matérias-primas reduz significativamente a emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido, como indica a Figura 12. CP I é o cimento Portland comum sem adições. CP II E é a sigla para o cimento Portland composto com Escória de alto-forno em teores de 6-34%. CP III indica o cimento de alto-forno, com 35-70% dessa adição. CP IV é o cimento com 15-50 % de material pozzolânico, em geral cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral em usinas termelétricas. Todos esses materiais possuem características aglomerantes na presença de água (BOLETIM TÉCNICO; ABCP⁷, 2002)



⁷ ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.



Figura 12 - Efeito da substituição do clínquer por escória e cinzas volantes na emissão de CO₂ de cimentos, estimado por análise do ciclo de vida. Foram admitidos teores máximos de substituição permitidos na normalização nacional produzidos por uma fábrica hipotética utilizando pet-coke⁸ como combustível (CARVALHO, 2001 apud JOHN, 2007).

A consequência é que a indústria de materiais para construção causa um grande impacto ambiental, mesmo que seus componentes produzam menos poluentes por unidade de massa. É preciso não só buscar alternativas para os resíduos gerados mas também buscar usar o mínimo de materiais, fazendo uma seleção otimizada dos materiais mais eficientes para cada tipo de solicitação.

2.3 Conceito de concreto com gradação funcional

Os conceitos desenvolvidos na área dos materiais com gradação funcional (FGM) ainda são muito pouco aplicados na construção civil, se restringindo ao laboratório. Um dos estudos mais recentes na área, desenvolvido por Dias; Savastano e John (2006), utilizou o conceito para a produção de telhas de fibrocimento com diferentes camadas. Uma das possibilidades é o desenvolvimento de concreto com gradação funcional (FGC²), ou seja, um concreto projetado e fabricado de tal forma que possui propriedades que variam gradualmente com a posição.

Primeiramente, um projeto para a determinação das regiões do corpo que sofrerão maiores esforços sob as condições de serviço, por modelamento, é uma etapa importante para o desenvolvimento de um concreto otimizado que terá, por exemplo, maior resistência nas regiões mais solicitadas. Depois vem a etapa da fabricação no laboratório, que depende de uma junção das técnicas de produção de concreto e das tecnologias já existentes para a obtenção de um gradiente desejado para determinada função. Por fim, é necessária uma avaliação do produto. Estas três etapas sintetizam o

⁸ Pet-coke é um subproduto do refinamento catalítico do petróleo (NOLDIN JR et al. 2005 apud JOHN 2007).



tipo de abordagem que deve ser tomada para o desenvolvimento de um FGM (KAWASAKI; WATANABE, 1997).

Existem muitas possibilidades para o desenvolvimento de FGC, devido à grande diversidade de componentes e aditivos que podem alterar certas propriedades do material de origem. Em concreto reforçado com barras de aço, por exemplo, estudos mostram que a utilização de fibrocimento aumenta a resistência à corrosão nas barras de maneira significativa (Figura 13). O conceito de FGM está no fato de a concentração de fibras variar com a posição, sendo mais alta apenas nas regiões que circundam as barras (MAALEJ; AHMED; PARAMASIVAM, 2002). Tal inovação pode acarretar numa redução dos custos, em relação a um concreto com fibras no corpo inteiro. Assim, seria possível produzir concreto de alta qualidade a preços mais acessíveis.

Outra maneira de tornar o concreto um FGM seria a impregnação do concreto para reduzir a porosidade da pasta em regiões mais susceptíveis a agentes externos, ou a mudança gradual do tipo de agregado, etc.

Algumas possíveis aplicações para o concreto FGM serão discutidas com mais detalhes no presente Trabalho.



Figura 13 - corrosão em (a) concreto convencional e (b) concreto com gradação funcional (MAALEJ; AHMED; PARAMASIVAM, 2002).



3 ARRANJO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados os materiais convencionais empregados para a produção de concreto no Brasil. Foi empregado o cimento CP II-E por ser o mais utilizado e de maior disponibilidade no mercado brasileiro. Os agregados empregados foram: a) areia grossa (agregado miúdo) e b) brita 1 (agregado graúdo com dimensão máxima característica igual a 19 mm). Estes materiais tiveram suas densidades caracterizadas através de picnometria com gás hélio. A areia apresentou densidade média igual a 2,63 g/cm³ enquanto a brita, 2,68 g/cm³. Para o cimento determinou-se uma densidade média igual a 3,01 g/cm³.

Uma análise termogravimétrica do cimento, realizada em uma termobalança NETZSCH STA409PG em atmosfera de nitrogênio (fluxo de 60 ml/min), com taxa de aquecimento igual a 10°C/min até 1000°C, mostrou que o cimento utilizado era constituído de cerca de 10% de *filler* carbonático, indicado pela perda de CO₂ durante o ensaio. Os materiais tiveram também suas distribuições granulométricas caracterizadas ou por granulometria à laser, no caso do cimento, ou por peneiramento conforme os procedimentos da NBR 26 (2000), NBR 27 (2000) e NBR 248 (2001), no caso dos agregados. A Figura 14 e a Figura 15 apresentam, respectivamente, as curvas granulométricas do cimento e dos agregados.

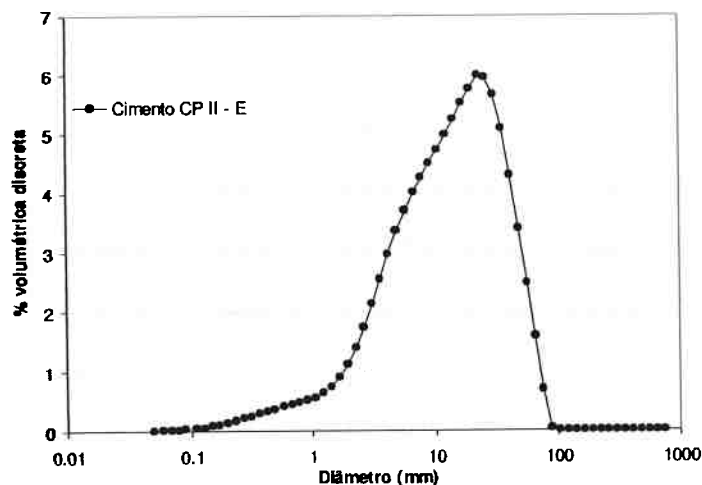


Figura 14 – Distribuição granulométrica do cimento.

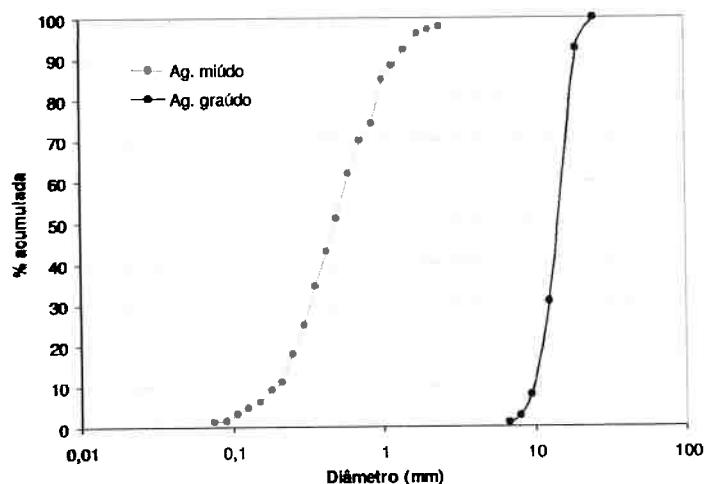


Figura 15 – Distribuições granulométricas dos agregados.

3.2 Projeto de misturas pelo EVD

Os traços estudados foram projetados com o software MINITAB 15® utilizando uma ferramenta DOE (design of experiments) para misturas. Aplicou-se um tipo de projeto estatístico denominado de *Extreme Vertices Design* (EVD). Este tipo de projeto foi desenvolvido por McLean e Anderson (1996) para o caso no qual não é possível estudar misturas puras. Baseado nos limites de consumo de cada ingrediente da



mistura, esta ferramenta determina como pontos experimentais, as proporções localizadas nos vértices, no centróide do campo experimental, e os centróides das superfícies de fronteira conforme descrito por McLean e Anderson (1996) e Jian-Tong Ding et. al (1999).

Previamente à geração dos traços com o MINITAB 15®, estabeleceram-se os limites de consumo de cada matéria-prima - cimento, areia e brita, baseando-se em limites de resistências à compressão desejadas aos concretos. Foi definido inicialmente que os traços de concretos a serem estudados deveriam atender resistências características entre 10 e 50 MPa. Dessa forma, para atender esta faixa de resistência, estabeleceram-se os parâmetros da Tabela 3. Com estes parâmetros pôde-se estimar as faixas das frações volumétricas dos materiais para atender as resistências desejadas (Tabela 4). Estas frações foram utilizadas como dados de entrada para o projetar as misturas com o MINITAB 15.

A Tabela 5 apresenta as proporções geradas pelo MINITAB 15. As demais colunas foram obtidas considerando o consumo de água igual a 200 L/m³, o que gerou relações a/c entre 0,38 e 0,69 e relações água/mistura seca (H) entre 9,3 e 10 que possibilitou a moldagem dos corpos-de-prova sem a necessidade de aditivos superplastificantes.

A Figura 16a apresenta a região limitada pelos consumos das matérias-primas e os pontos experimentais do projeto de mistura. O projeto original era composto por 19 traços, que depois foi otimizado para 14 traços (Figura 16b) aplicando uma ferramenta de otimização baseada na distância entre os pontos. O ponto 14 (ver Tabela 5) foi escolhido aleatoriamente para ser um ponto de checagem dos modelos. Dessa forma, os modelos foram construídos sem considerar as respostas obtidas para este ponto.



Tabela 3 - Parâmetros para o planejamento das misturas.

Material	Consumo (kg/m ³)	
	Mínimo	Máximo
Cimento	300	500
Agregado miúdo	650	850
Agregado graúdo	800	1100
Água/cimento	0,4	0,7

Tabela 4 – Frações volumétricas estimadas.

Material	Fração volumétrica	
	Mínimo	Máximo
Cimento	0,13	0,22
Agregado miúdo	0,30	0,40
Agregado graúdo	0,40	0,52

Tabela 5 – Misturas projetadas a partir do método dos vértices extremos.

Ordem de moldagem	N° da mistura	Fração em volume			Consumo kg/m ³			a/c	H	Teor de argamassa seca (%)
		Cimento	Ag. miúdo	Ag. graúdo	Cimento	Ag. miúdo	Ag. graúdo			
15	1	0,155	0,378	0,468	372	791	995	0,54	9,3	53,9
12	2	0,155	0,325	0,520	372	681	1107	0,54	9,3	48,8
1	4	0,220	0,300	0,480	528	629	1021	0,38	9,3	53,1
19	5	0,200	0,368	0,433	480	770	920	0,43	9,4	57,6
4	9	0,130	0,350	0,520	312	734	1107	0,67	9,7	48,6
10	10	0,220	0,340	0,440	528	713	936	0,40	9,6	57,0
11	11	0,165	0,400	0,435	396	838	926	0,53	9,7	57,1
7	12	0,130	0,375	0,495	312	786	1053	0,68	9,8	51,0
16	13	0,180	0,328	0,493	432	686	1048	0,49	9,8	51,6
17	14	0,155	0,353	0,493	372	739	1048	0,57	9,9	51,5
3	15	0,180	0,300	0,520	432	629	1107	0,50	9,9	48,9
13	16	0,180	0,355	0,465	432	744	990	0,50	9,9	54,3
2	17	0,130	0,400	0,470	312	838	1000	0,69	10,0	53,5
6	19	0,220	0,380	0,400	528	796	851	0,41	10,0	60,9
Mínimo		0,130	0,300	0,400	312	629	851	0,38	9,3	48,6
Máximo		0,220	0,400	0,520	528	838	1107	0,69	10,0	60,9

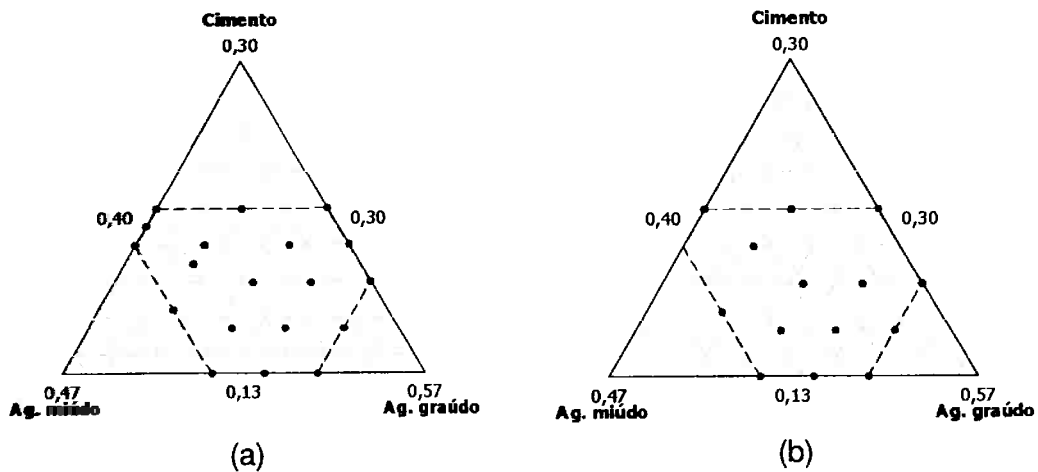


Figura 16 - Representação gráfica das misturas previstas pelo EVD: a) projeto com 19 pontos e b) projeto com 14 pontos após otimização pelo método baseado nas distâncias.

Devido a falhas no procedimento experimental, as misturas não foram dosadas com 200 L de água por m³. O volume de água variou de aproximadamente 200 à 214 L/m³ gerando relações a/c entre 0,38 e 0,69 e Hs entre 9,22 e 9,99. A Tabela 6, além de apresentar as massas e as frações volumétricas dos materiais em cada mistura, mostra os novos valores de a/c e H. Devido a essa falha, os modelos estatísticos utilizados para ajustar os resultados experimentais consideraram as frações volumétricas das quatro matérias-primas: cimento, areia, brita e água.



Tabela 6 – Novo projeto.

Traço	Massa de material (kg)				Fração volumétrica				a/c	H
	Cimento	Areia	Brita	Água	Cimento	Areia	Brita	Água		
1	4,74	10,10	12,74	2,54	0,124	0,302	0,374	0,200	0,54	9,22
2	4,74	8,69	14,17	2,56	0,124	0,260	0,416	0,201	0,54	9,25
4	6,73	8,02	13,08	2,58	0,175	0,239	0,383	0,202	0,38	9,27
5	6,12	9,83	11,79	2,59	0,159	0,293	0,345	0,203	0,42	9,35
9	3,98	9,36	14,17	2,64	0,103	0,278	0,413	0,206	0,66	9,61
10	6,73	9,09	11,99	2,66	0,174	0,270	0,349	0,207	0,39	9,55
11	5,05	10,70	11,86	2,67	0,131	0,317	0,345	0,208	0,53	9,67
12	3,98	10,03	13,49	2,68	0,103	0,297	0,392	0,209	0,67	9,75
13	5,51	8,76	13,42	2,70	0,142	0,259	0,389	0,209	0,49	9,73
14	4,74	9,43	13,42	2,71	0,122	0,278	0,389	0,210	0,57	9,81
15	5,51	8,02	14,17	2,72	0,142	0,237	0,410	0,211	0,49	9,82
16	5,51	9,50	12,67	2,73	0,142	0,280	0,367	0,212	0,50	9,87
17	3,98	10,70	12,81	2,75	0,102	0,315	0,370	0,213	0,69	9,99
19	6,73	10,16	10,90	2,77	0,173	0,299	0,314	0,214	0,41	9,97
Mínimo	3,98	8,02	10,90	2,54	0,102	0,237	0,314	0,200	0,38	9,22
Máximo	6,73	10,70	14,17	2,77	0,175	0,317	0,416	0,214	0,69	9,99

3.3 Procedimento de mistura e ensaios reológicos no concreto fresco

Todas as misturas feitas com os traços planejados pelo EVD passaram por ensaios reológicos em um reômetro projetado para estudo de concretos e argamassas mostrado na Figura 17 (PILEGGI et al., 1999). Foram avaliadas misturas com volume de aproximadamente 20L. As misturas passaram inicialmente por um período de homogeneização constituído de duas etapas: a) com rotação igual a 500 rpm por 2 min e b) com 1000 rpm por 5 min. Depois, as misturas passaram por ciclos em que a rotação da hélice aumentou gradualmente de 25 a 1000 rpm, “ida” do ciclo, e reduziram de 1000 à 25 rpm, conforme mostrado na Figura 18. Nestes ensaios obtêm-se curvas de torque x rotação denominadas de curvas de mistura.



Figura 17 – Mistura no reômetro com detalhes da geometria da hélice utilizada para misturar.

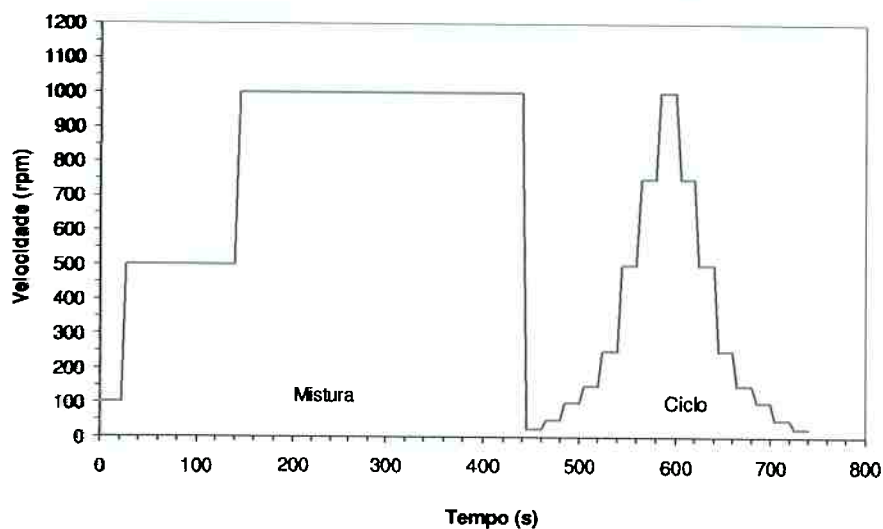


Figura 18 – Gráfico de rotação x tempo para o programa utilizado em todas as misturas.

3.4 Procedimento de moldagem e ensaios mecânicos

3.4.1 Moldagem dos concretos homogêneos

Cada um dos traços apresentados na Tabela 5 foi utilizado para moldar os corpos-de-prova para avaliação mecânica. Logo após os ensaios reológicos foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos ($h = 20\text{cm}$; $d=10\text{cm}$) para ensaios de



resistência à compressão (NBR 5739, 1996) e dois corpos-de-prova prismáticos ($l = 40\text{cm}$; $b = h = 10\text{cm}$) para ensaios de resistência à tração na flexão (NBR 12142, 1991). Os corpos-de-prova foram moldados segundo procedimento recomendado pela NBR 5738 (2003), com o adensamento feito em mesa vibratória. No dia seguinte a moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados e ficaram em câmara úmida até completarem 28 dias quando foram ensaiados numa prensa Shimadzu com capacidade de 200 toneladas.

3.4.2 Moldagem dos concretos com gradação funcional

Os concretos com gradação funcional foram moldados após as análises com os concretos homogêneos e construção dos modelos estatísticos. Os corpos-de-prova de concretos com gradação foram moldados com diferentes camadas que apresentam diferentes propriedades mecânicas. Escolheram-se cinco séries de corpos-de-prova: a) série denominada de CG40/20_1/3 que é constituída de duas camadas, uma com aproximadamente 20MPa de resistência e outra com 40 MPa sendo que esta última apresentando espessura (h) igual a 1/3 da altura (H) do corpo-de-prova (Figura 19a); b) séries CG40/20/40_1/3 e CG40/20/40_1/4, constituídas de três camadas, com a distribuição mostrada na Figura 19b, em que o concreto com resistência à compressão de 20 MPa foi posicionado na camada central e o de 40 MPa, nas camadas externas com 1/3 e 1/4 da altura do CP; c) séries CH20 e CH40, correspondentes a concretos homogêneos, com resistências à compressão previstas pelos modelos de 20 e 40 MPa, respectivamente.

Os traços com resistência á compressão de 20 e 40 MPa foram escolhidos através dos modelos estatísticos em conjunto com otimização múltipla (DERRINGER; SUICH, 1980). Os critérios de otimização são apresentados graficamente na Figura 20. O traço de 40 MPa foi escolhido como “alvo”, independente de outros parâmetros, enquanto o de 20 MPa foi escolhido tendo como objetivo o custo mínimo dentro da região experimental.

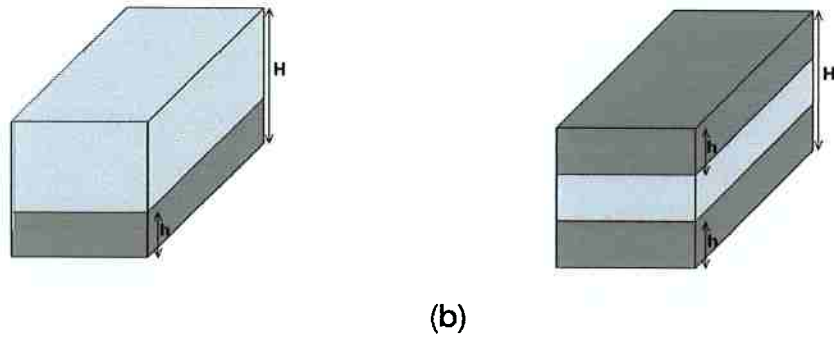


Figura 19 – Corpos-de-prova com gradação: a) série CG40/20_1/3 e b) série CG40/20/40.

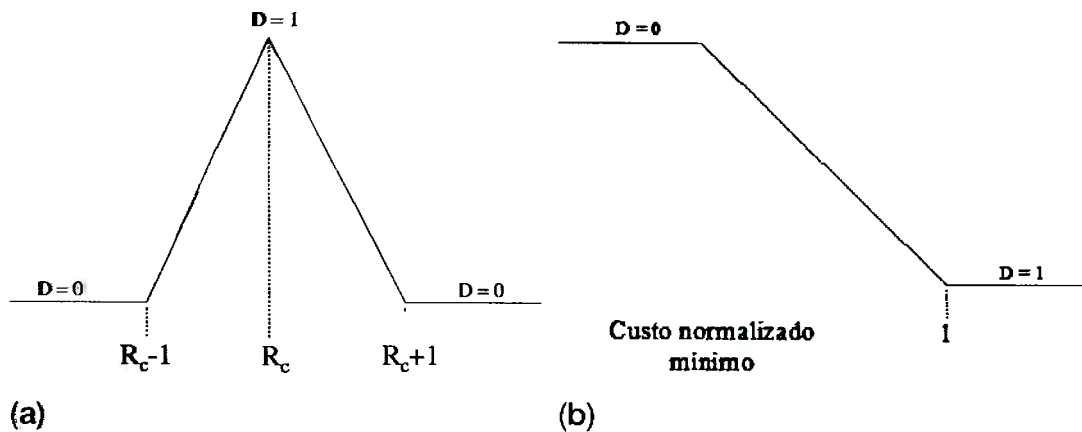


Figura 20 – Critérios de otimização utilizando o conceito de desejabilidade descrito por Derringer e Suich (1980): a) escolha de um valor “alvo” utilizado para a resistência de 40 MPa, e b) escolha do valor mínimo utilizado para os custos.

3.5 Análise dos dados

A análise dos dados foi feita no software MINITAB 15®. As propriedades dos concretos tais como, resistência à compressão (R_c), resistência à tração (R_t), custo e os parâmetros reológicos foram correlacionados com as frações das matérias-primas: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, usando os polinômios de primeira ordem (lineares) e quadráticos (Eq. 1 e Eq. 2).



$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad \text{Eq. 1}$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, \hat{y} é a resposta para determinada propriedades do concreto, β_i e β_{ij} são os coeficientes do polinômio.

A seleção e a checagem da adequabilidade dos modelos foram feitas analisando-se parâmetros estatísticos tais como, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (adj- R^2) e o valor-F fornecidos pelo MINITAB 15®.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros reológicos

As Figuras 21 e 22 apresentam as curvas de mistura e dos ciclos dos 14 traços. Os resultados mostram que os traços 4, 5, 10 foram os que apresentaram os maiores torques durante todo o período de mistura e ciclo de velocidades. Estes traços são os que apresentam os mais altos teores de cimento como pode ser visto na Tabela 6. O traço 19 apresenta teor semelhante ao do traço 10, no entanto os torques medidos durante a mistura do traço 19 foram consideravelmente menores que o do traço 10. Esta diferença de torques pode ser explicado pela fração volumétrica de água que na mistura 19 foi igual a 214 L/m^3 enquanto na mistura 10 esta fração foi igual a 207 L/m^3 (Tabela 6).

Nas curvas de mistura de todos os traços, os trechos de 20 a 120 s e de 140 a 440 s, correspondentes, respectivamente, às rotações de 500 e 1000 rpm, observa-se um comportamento tixotrópico, ou seja, ocorre redução do torque com o tempo devido à homogeneização da mistura e quebra de aglomerados. Esse efeito é mais marcante nas misturas com maior teor de cimento, que tem uma tendência maior de formar aglomerados.

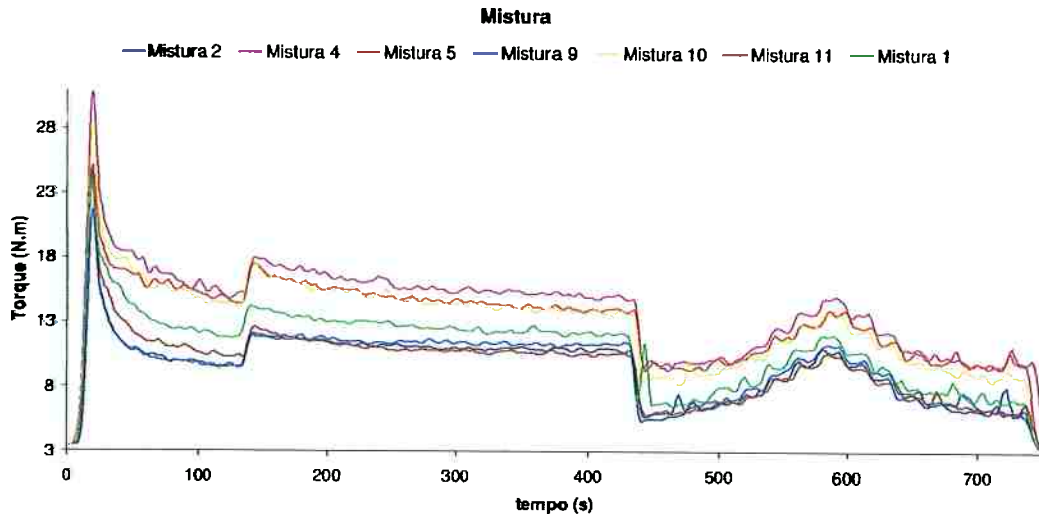


Figura 21 – Curvas do ensaio reológico para a primeira metade das misturas.

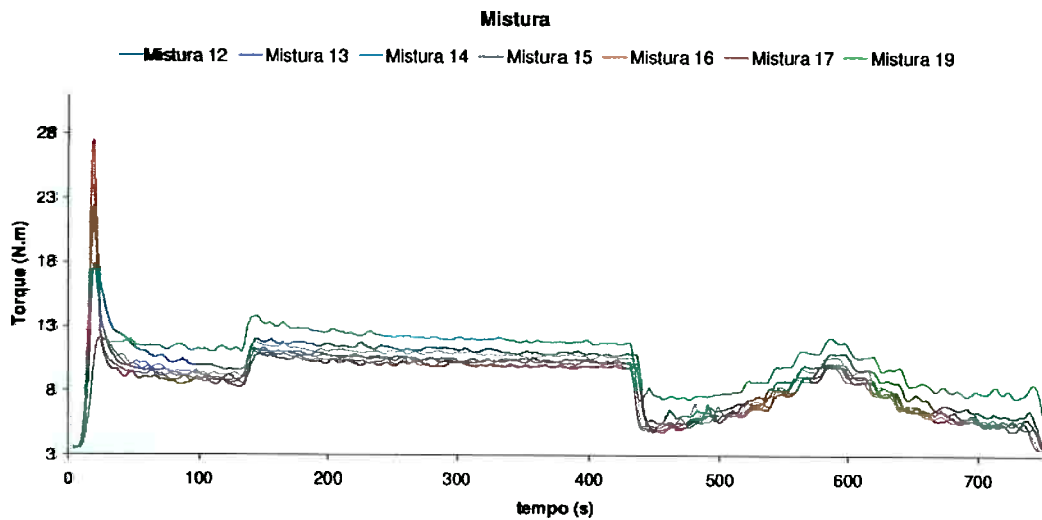


Figura 22 – Curvas do ensaio reológico para a segunda metade das misturas.

Para a análise do comportamento reológico das misturas nos ciclos de rotação, foram elaboradas curvas de torque x rotação que, em seguida, foram ajustadas com



modelos reológicos. As Figuras 23 e 24 mostram as curvas de torque x rotação para os traços estudados. As medidas de torque realizadas em rotações muito baixas - até aproximadamente 200 rpm – são imprecisas e dificultam a extrapolação da curva para determinação do torque para a rotação zero. Conforme mostrado por De Larrard; Ferraris e Sedran (1998) as curvas geralmente desviam da linearidade e a simples regressão linear não é o procedimento mais adequado para estimar a tensão de escoamento da mistura.

Para ajustar as curvas de torque x rotação e determinar o torque para a rotação zero, utilizou-se o modelo reológico de Herschel-Bulkley (HB), representado pela Eq. 3, e de Bingham. No entanto os dados experimentais não foram bem ajustados com o modelo de Bingham.

Na Eq. 3, Γ é o torque medido, N é a velocidade de rotação e, Γ_0 , A e b são parâmetros do modelo proposto por De Larrard; Ferraris e Sedran (1998) baseando-se no modelo de Herschel-Bulkley. Esses parâmetros são obtidos pelo método numérico que minimiza a soma dos quadrados dos desvios do modelo com relação aos dados experimentais.

$$\Gamma = \Gamma_0 + AN^b \quad \text{Eq. 3}$$

Fazendo uma análise de semelhança entre a Eq. 3 e o modelo real de Herschel-Bulkley, espera-se que os parâmetros Γ_0 e A estejam intrinsecamente relacionados com a tensão de escoamento e viscosidade aparente da mistura, respectivamente.

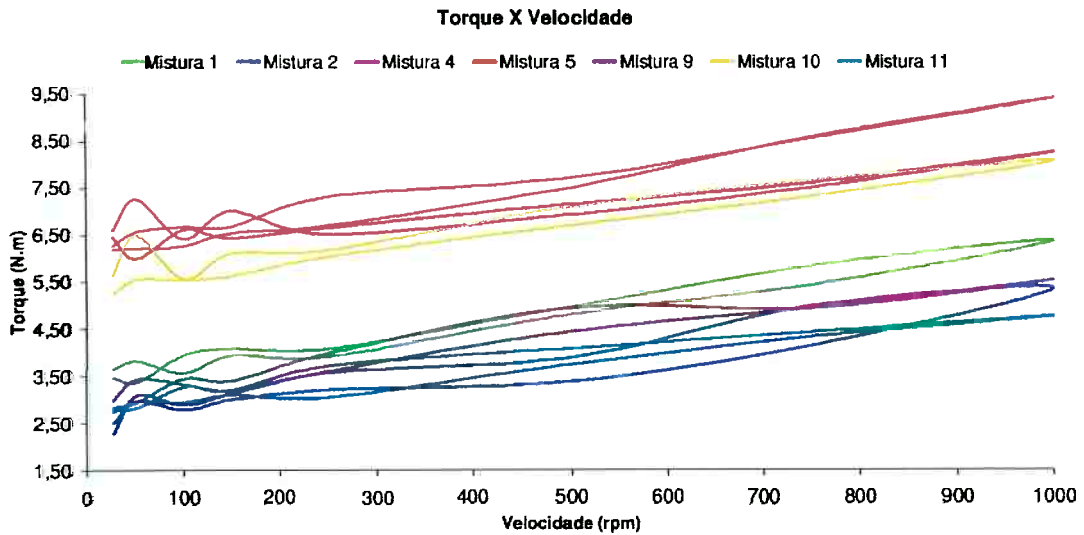


Figura 23 - Resultados dos ciclos para a primeira metade das misturas do projeto.

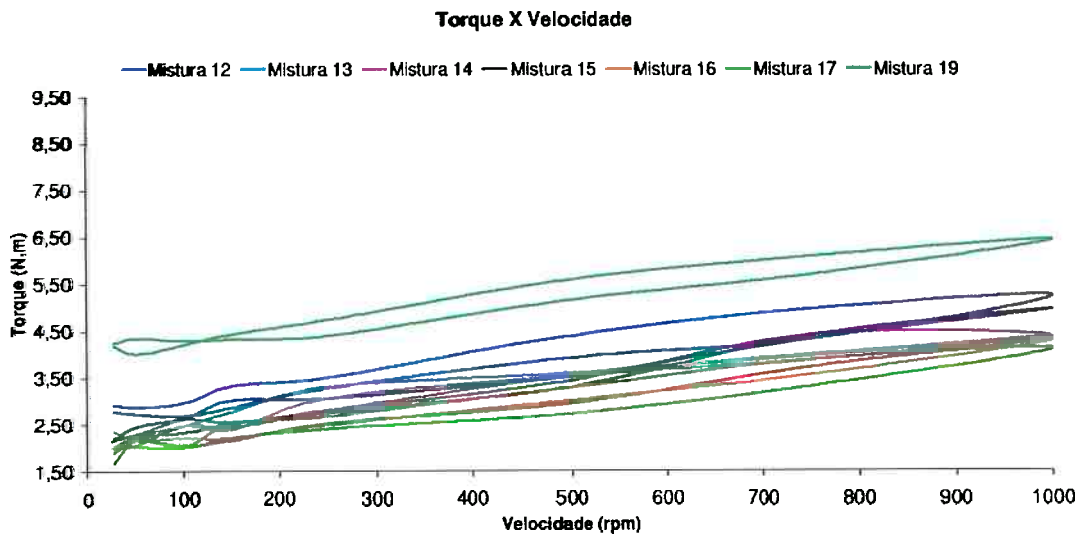


Figura 24 - Resultados dos ciclos para a segunda metade das misturas do projeto.



A Tabela 7 apresenta os dados extraídos das curvas de mistura de cada traço, a saber: a) torque máximo – determinado na rotação de 1000 rpm; b) área de histerese – diferença entre as áreas sob as curvas de ida e volta; c) parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley utilizado para ajustar as curvas e o coeficiente de determinação (R^2) do modelo.

O torque máximo e o parâmetro Γ_0 foram bem ajustados com os polinômios linear e quadrático conforme mostra a Tabela 8. Os modelos foram significantes para $T_{\text{máx}}$ e Γ_0 ao nível de confiança de 95%. Os demais parâmetros não foram bem explicados pela proporção entre as matérias-primas. Porém, foi verificado que há boa correlação entre os parâmetros A e b (Figura 25). Boa correlação entre esses parâmetros foi obtida também por De Larrard; Ferraris e Sedran (1998). A Figura 26 mostra a aproximação entre uma curva experimental e o modelo de HB.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios reológicos e parâmetros do modelo HB.

Mistura	Torque máximo (N.m)	Área de histerese (N.m.rpm)	Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley			
			Γ_0	A	b	R^2
1	6,4	181,7	3,302	0,009	0,845	0,983
2	5,3	419,3	2,318	0,024	0,698	0,954
4	9,4	195,5	6,314	0,004	0,970	0,987
5	8,3	20,4	6,276	0,001	1,178	0,948
9	5,5	192,5	1,948	0,218	0,405	0,974
10	8,1	287,7	5,772	0,002	1,040	0,892
11	4,8	248,2	2,177	0,141	0,420	0,986
12	5,2	374,3	2,583	0,019	0,719	0,985
13	4,4	145,2	1,421	0,194	0,392	0,986
14	4,4	378,0	1,668	0,038	0,627	0,970
15	4,9	158,0	2,136	0,014	0,767	0,979
16	4,3	358,3	1,425	0,118	0,462	0,987
17	4,1	356,4	1,333	0,087	0,504	0,978
19	6,4	392,0	3,826	0,015	0,749	0,984



Tabela 8 – Parâmetros estatísticos dos modelos de ajuste linear e quadrático para $T_{m\acute{a}x}$ e Γ_0 .

Parâmetros estatísticos	Linear		Quadrático	
	$T_{m\acute{a}x}^*$	Γ_0	$T_{m\acute{a}x}$	Γ_0
R^2	0,7636	0,7644	0,9901	0,9821
Adj- R^2	0,6927	0,6938	0,9679	0,9418
Valor-F	10,77	10,82	44,50	24,38

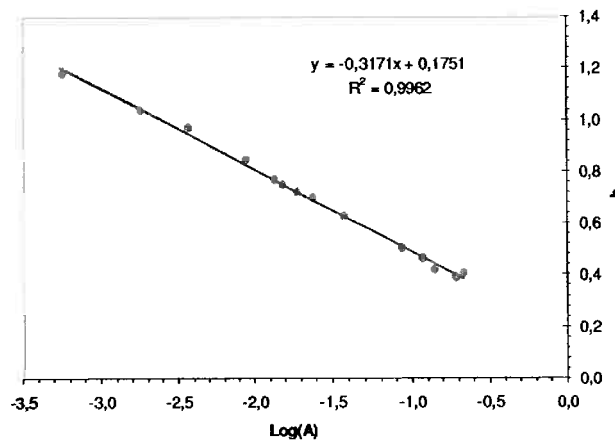


Figura 25 - Relação entre os parâmetros a e b do modelo de HB, para todas as misturas na "ida" do ciclo de velocidades no reômetro.

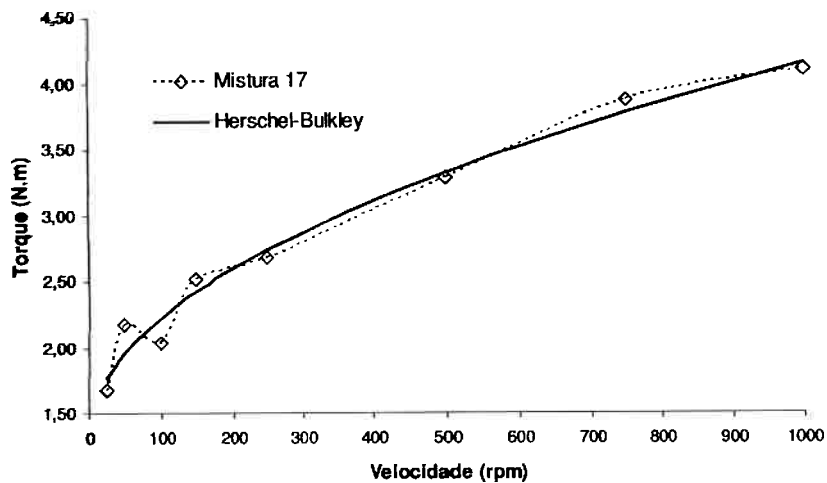


Figura 26 - Comparação de uma das curvas experimentais (Mistura 17) com o modelo reológico de Herschel-Bulkley. A comparação foi feita apenas em metade do ciclo de velocidades, na "ida" do sistema, curva de cima da mistura.



A Eq. 4 e a Eq. 5 são os modelos linear e quadrático de ajuste dos resultados experimentais para o torque máximo. A Figura 27 apresenta os contornos das superfícies para água igual a 200 L/m³ onde fica claro o efeito das matérias-primas no torque máximo. De acordo com o modelo quadrático as misturas que apresentam torques menores, ou seja, que necessitam de menor energia de mistura são aquelas com os mais baixos teores de cimento e com as frações mais elevadas de agregado graúdo. Comportamento similar foi observado para o parâmetro Γ_0 , dessa forma, as tensões de escoamento foram maiores para os traços com maiores teores de cimento.

$$T_{\max} = 85,5x_c + 46,9x_{Am} + 38,8x_{ag} - 161,9x_{\text{água}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$T_{\max} = 2032x_c + 718x_{Am} + 21x_{Ag} + 4442x_{\text{água}} - 1215x_c x_{Am} - 1683x_c x_{Ag} - 11500x_c x_{Ag} - 239x_{Am} x_{Ag} - 8785x_{Am} x_{\text{água}} - 5243x_{Ag} x_{\text{água}} \quad \text{Eq. 5}$$

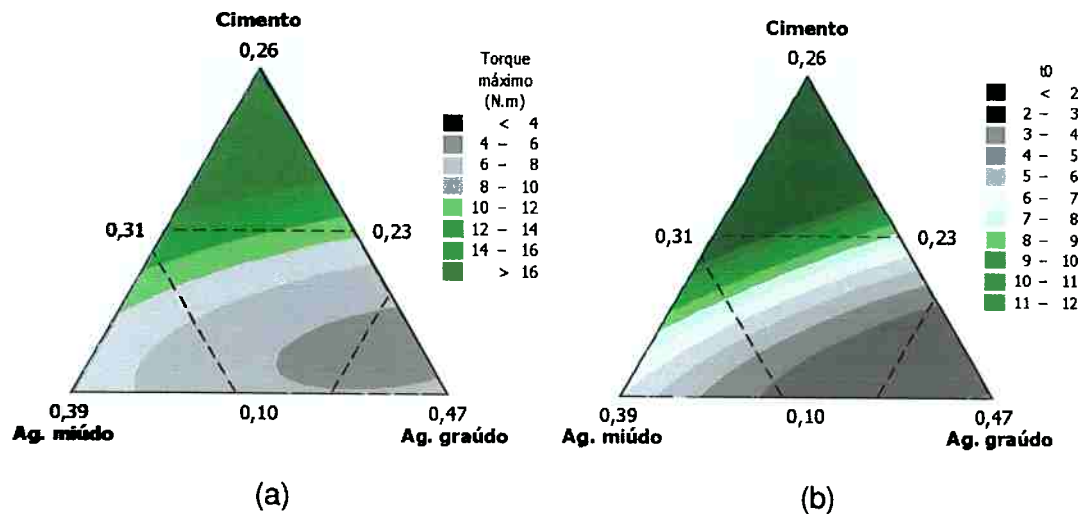


Figura 27 - Respostas do T_{\max} e Γ_0 para consumo de água igual a 200 L/m³: a) modelo quadrático para T_{\max} e b) modelo quadrático para Γ_0 .

A Tabela 9 apresenta um teste das equações obtidas de torque máximo para a mistura 14 e para os traços que compuseram os concretos com graduação – CH20 e CH40.



Tabela 9 – Teste das equações de torque máximo para a mistura 14, e para os traços escolhidos para os concretos com gradação.

Mistura	T _{máx} (N.m)		
	Experimental	Modelo linear	Modelo quadrático
Nº14	4,35	4,57	4,38
CH20	6,27	5,78	6,09
CH40	9,38	8,42	9,31

4.2 Propriedades mecânicas

4.2.1 Projeto de Misturas

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos corpos-de-prova dos 14 traços do projeto. Esta tabela apresenta também os custos dos traços, normalizados em relação ao menor custo. As equações 6, 7, 8 e 9 representam os modelos linear (6 e 7) e quadrático (8 e 9) para a resistência a compressão (R_c) e resistência a tração na flexão (R_t). As Figuras 28 e 29 mostram as superfícies de resposta do campo experimental para essas resistências, com o consumo de água fixado em 200 L/m³.

Com os dados da Tabela 10 e Tabela 5 foi possível checar as principais leis de dosagem de concretos (MEHTA; MONTEIRO, 1994; REZENDE; DJANIKIAN, 1998). A Figura 30 apresenta os diagramas correspondentes às principais leis. Os valores encontrados para as constantes empíricas dessas leis são apresentados na Tabela 11.



Tabela 10 - Resultados dos ensaios mecânicos e custo estimado de cada mistura.

Mistura	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à tração na flexão (MPa)			Custo estimado normalizado
	CP A	CP B	Média	CP A	CP B	Média	
1	28,2	28,9	28,6	4,8	4,5	4,7	1,11
2	27,7	25,7	26,7	4,9	4,9	4,9	1,10
4	39,9	46,5	43,2	5,9	5,3	5,6	1,34
5	39,0	45,0	42,0	5,5	5,5	5,5	1,27
9	21,0	22,0	21,5	4,6	4,2	4,4	1,00
10	42,4	46,6	44,5	5,8	6,5	6,1	1,33
11	30,6	30,4	30,5	4,4	5,2	4,8	1,13
12	22,6	22,0	22,3	4,8	4,9	4,8	1,00
13	32,5	30,1	31,3	5,8	5,0	5,4	1,18
14	26,6	25,5	26,0	4,0	4,6	4,3	1,09
15	24,8	25,8	25,3	5,1	5,0	5,0	1,18
16	30,2	32,7	31,4	5,0	4,9	4,9	1,18
17	17,3	17,2	17,2	3,5	4,0	3,7	1,00
19	41,6	43,6	42,6	5,2	5,9	5,5	1,32

$$Rc(MPa) = 385,3x_c + 109,1x_{Am} + 35,4x_{ag} - 316,4x_{\acute{a}gua} \quad Eq. 6$$

$$Rt(MPa) = 26,8x_c + 4,5x_{Am} + 6,6x_{ag} - 11,7x_{\acute{a}gua} \quad Eq. 7$$

$$Rc(Mpa) = -1823x_c - 3609x_{Am} - 2155x_{Ag} - 36028x_{\acute{a}gua} + 1192x_c x_{Am} - 514x_c x_{Ag} \quad Eq. 8$$

$$+ 56232x_c x_{\acute{a}gua} + 1661x_{Am} x_{Ag} + 60359x_{Am} x_{\acute{a}gua} + 54914x_{Ag} x_{\acute{a}gua}$$

$$Rt(Mpa) = -676,0x_c - 401,0x_{Am} - 431,0x_{Ag} - 6988,0x_{\acute{a}gua} - 142,0x_c x_{Am} - 88,0x_c x_{Ag} \quad Eq. 9$$

$$+ 12541,0x_c x_{\acute{a}gua} + 90,0x_{Am} x_{Ag} + 10688x_{Am} x_{\acute{a}gua} + 10847x_{Ag} x_{\acute{a}gua}$$

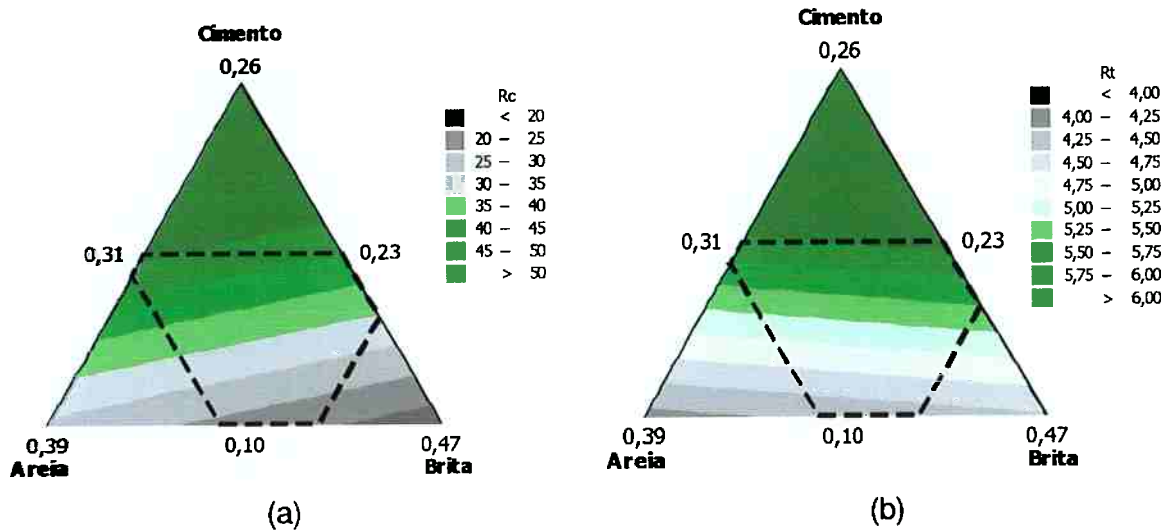


Figura 28 – Superfície de resposta do modelo linear para a (a) Resistência à compressão e para a (b) Resistência à tração na flexão. Consumo de água igual a 200 L/m^3 .

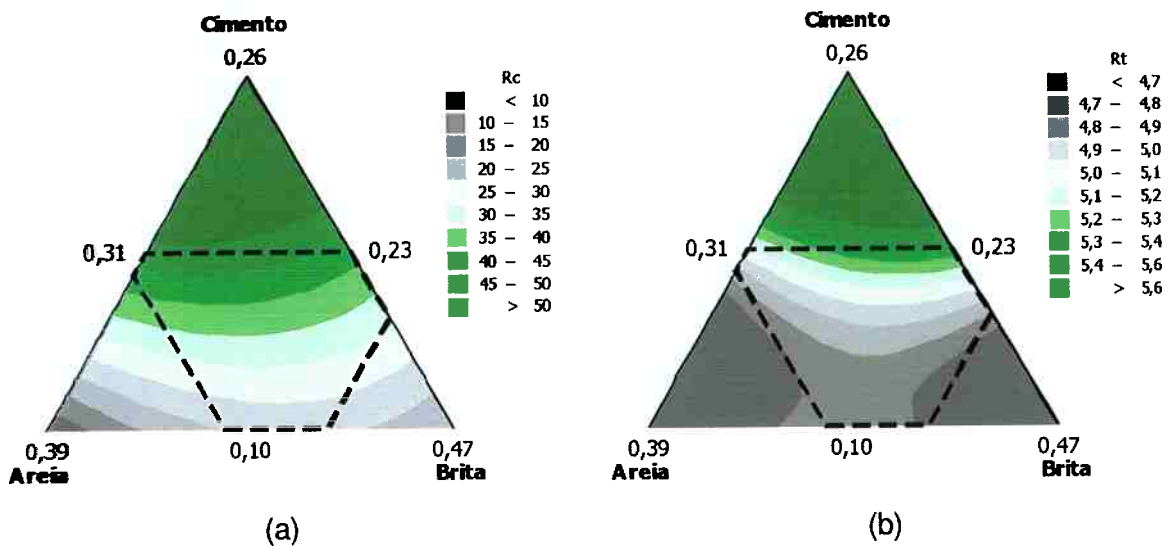


Figura 29 - Superfície de resposta do modelo quadrático para a (a) Resistência à compressão e para a (b) Resistência à tração na flexão para consumo de água de 200 L/m^3 .

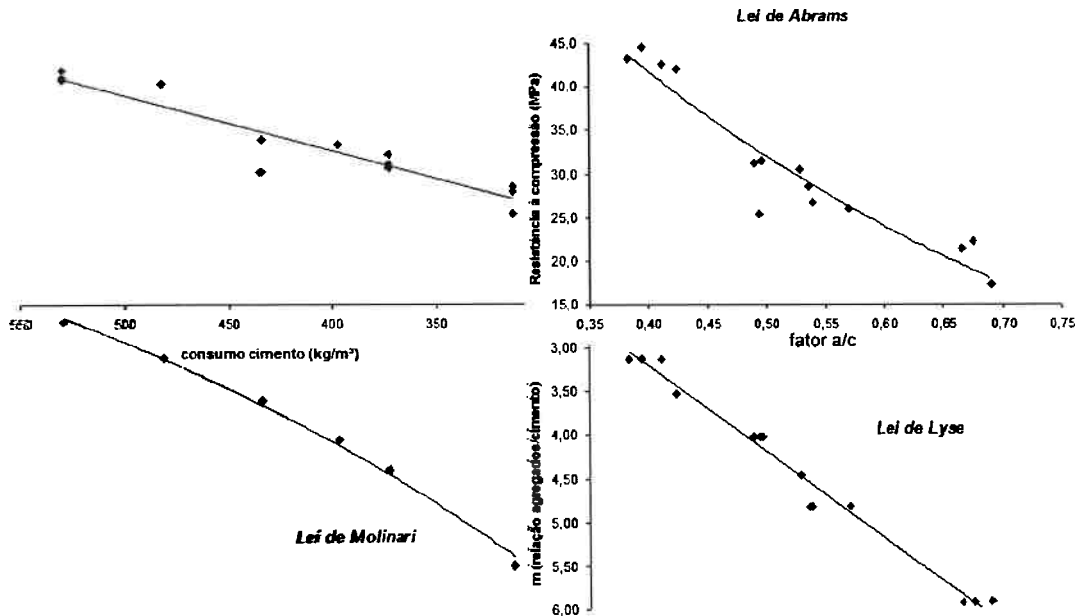


Figura 30 - Diagrama relacionando as principais leis de dosagem com os dados obtidos no experimento.

Tabela 11 – Constantes das leis de Abrams, Lyse e Molinari para os concretos avaliados.

Lei	Equação	Parâmetros
Abrams	$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} *$	$k_1=123,00$ e $k_2=15,24$
Lyse	$m = k_3 \cdot (a/c) + k_4 **$	$k_3=9,88$ e $k_4=-0,74$
Molinari	$C = \frac{1000}{k_5 \cdot m + k_6} ***$	$k_5=0,47$ e $k_6=0,42$

Obs: *a/c = fator água/cimento, **m = relação agregado/cimento em massa, ***C = consumo de cimento (kg/m³).

Pelo diagrama de dosagem verifica-se que os resultados experimentais, com exceção de um ponto, se encaixam bem à Lei de Abrams para resistência à compressão. No caso da Lei de Lyse, que considera que concretos com o mesmo



abatimento possuem relação linear com a relação água/cimento e o valor m , é interessante verificar que os concretos do experimento seguem essa tendência, o que sugere que iriam ter abatimentos similares.

A Tabela 12 mostra as correlações do software para cada tipo de modelo de equação relativa a cada propriedade mecânica. Pela tabela nota-se também que o software considerou que todos os modelos são estatisticamente significantes (*Sig*).

Tabela 12 - Análise da variância dos modelos linear, quadrático e cúbico para as propriedades testadas.

Modelo	R_c	R_t
Linear	Sig	Sig
R^2	0,9388	0,6972
Adj- R^2	0,9311	0,6593
Valor-F	122,64	18,42
Quadrático	Sig	Sig
R^2	0,9673	0,7873
Adj- R^2	0,9509	0,681
Valor-F	59,09	7,4

Analogamente aos ensaios reológicos, o teste que confrontou os resultados medidos da mistura 14 com os dos modelos é apresentado na Tabela 13. Os traços CH20 e CH40 só tiveram a resistência à flexão testada pelos modelos (Tabela 14).

Tabela 13 - Teste de comparação das equações obtidas com os resultados medidos da mistura 14, que ficou de fora do modelo.

Propriedade	Mistura 14		
	Experimental	Modelo linear	Modelo quadrático.
R_c (MPa)	26,0	24,8	25,9
R_t (MPa)	4,3	4,6	4,8

Tabela 14 – Teste do modelo de resistência à tração na flexão dos traços CH20 e CH40.

Mistura	R_t (Mpa)		
	Experimental	Modelo linear	Modelo quadrático
CH20	3,50	4,45	4,91
CH40	6,70	5,58	5,26



Nota-se pelas superfícies geradas que existe uma clara relação entre o consumo de cimento e as resistências testadas. A influência dos agregados é menor segundo o modelo. É possível verificar a influência do cimento também por um diagrama Consumo de cimento versus Resistência, como mostram as Figura 31 e Figura 32.

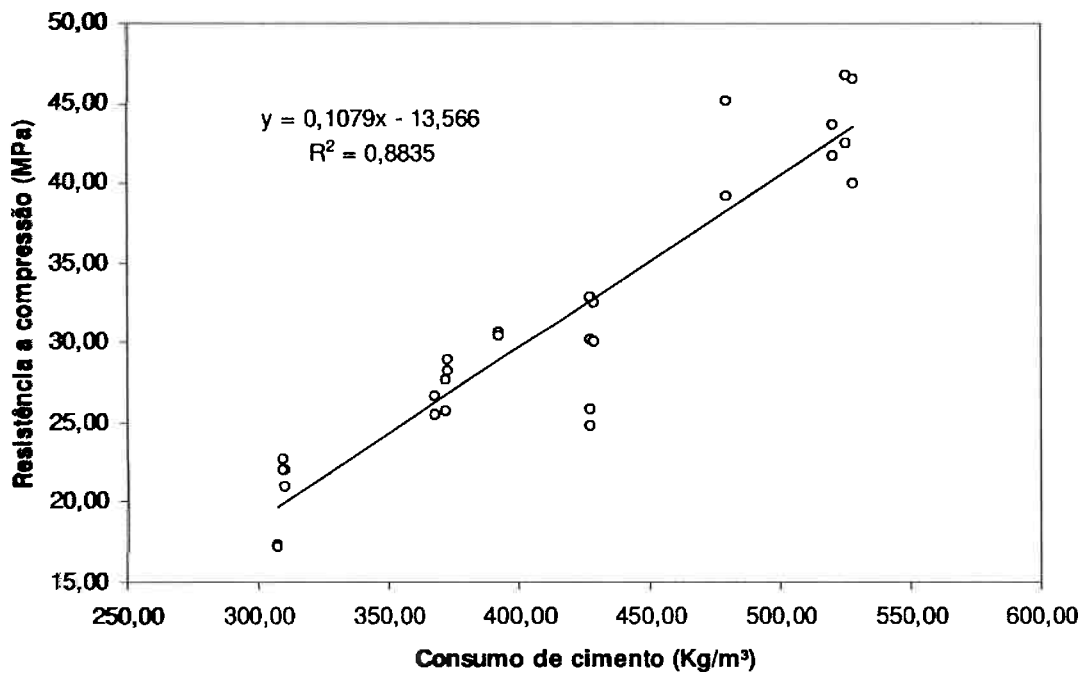


Figura 31 - Gráfico de consumo de Resistência a Compressão em função do consumo de cimento

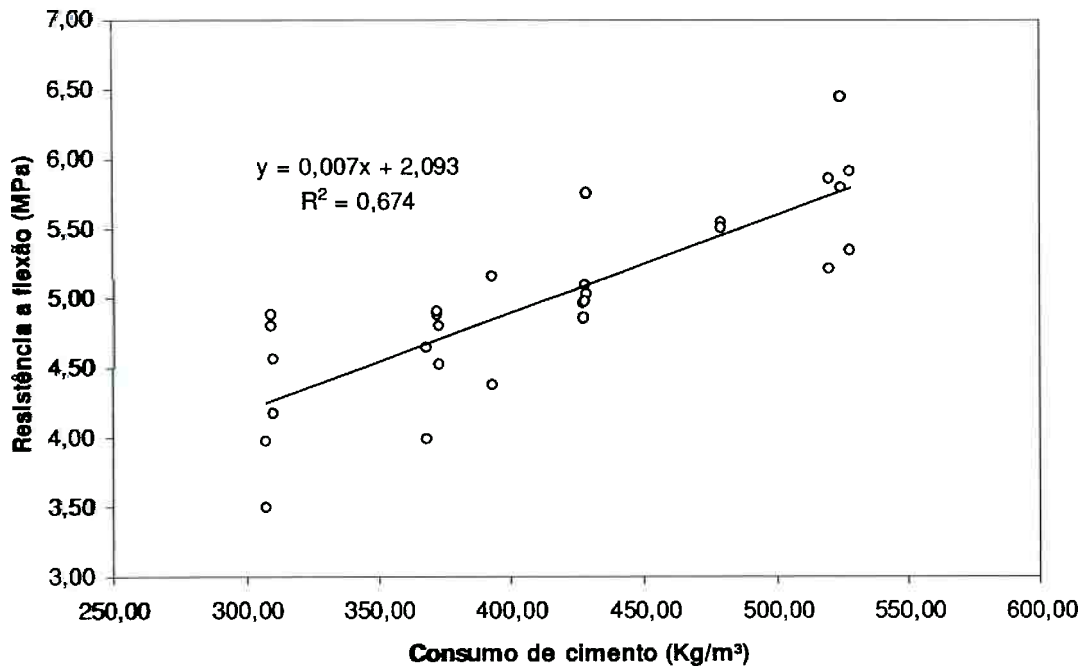


Figura 32 - Gráfico de Resistência a Flexão em função do consumo de cimento

Pelas figuras fica clara a influência positiva do cimento nas resistências. No caso da resistência a flexão, a correlação linear com o consumo de cimento não possui valor alto, mas é possível observar uma clara tendência.

4.2.2 Concretos com gradação

Após o rompimento dos concretos com gradação funcional (Tabela 15), uma primeira análise superficial nos permite verificar que os três tipos apresentaram resultados próximos a resistência do traço homogêneo de 40 MPa – CH40 – com uma diferença considerável do traço homogêneo de 20 MPa – CH20. É interessante ressaltar a pequena diferença entre os modelos CG40/20_1/3 e CG40/20/40_1/3, o que mostra que a camada superior tem influência mínima durante a flexão, resultado que



era esperado devido às diferenças de resistência à tração e à compressão da microestrutura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994; JACINTHO; GIONGO, 2005). A idéia de uma camada superior mais resistente pode ser usada em aplicações em que as vigas sofram esforços de desgaste, que será discutido mais adiante. A Figura 33 mostra exemplos de corpos de prova após o rompimento. A Figura 34 apresenta uma comparação entre as resistências à tração na flexão dos concretos homogêneos e com graduação.

Tabela 15 - Resultados dos rompimentos para os concretos com graduação funcional.

CPs	Tipo de concreto				
	CH20	CH40	CG40/20 1/3	CG40/20/40 1/3	CG40/20/40 1/4
1	-	-	6,250	5,928	-
2	-	-	6,432	6,018	5,944
3	3,620	6,750	6,090	6,763	5,664
4	3,164	6,369	5,841	6,114	5,327
5	3,843	6,977	5,678	6,282	5,238
Média	3,503	6,698	6,058	6,221	5,543
Desv Pad	0,480	0,307	0,304	0,330	0,324



Figura 33 - Fractografia dos três tipos de concreto com graduação projetados. É possível notar uma diferença de coloração entre os dois traços utilizados (CH20,CH40) em cada corpo-de-prova.

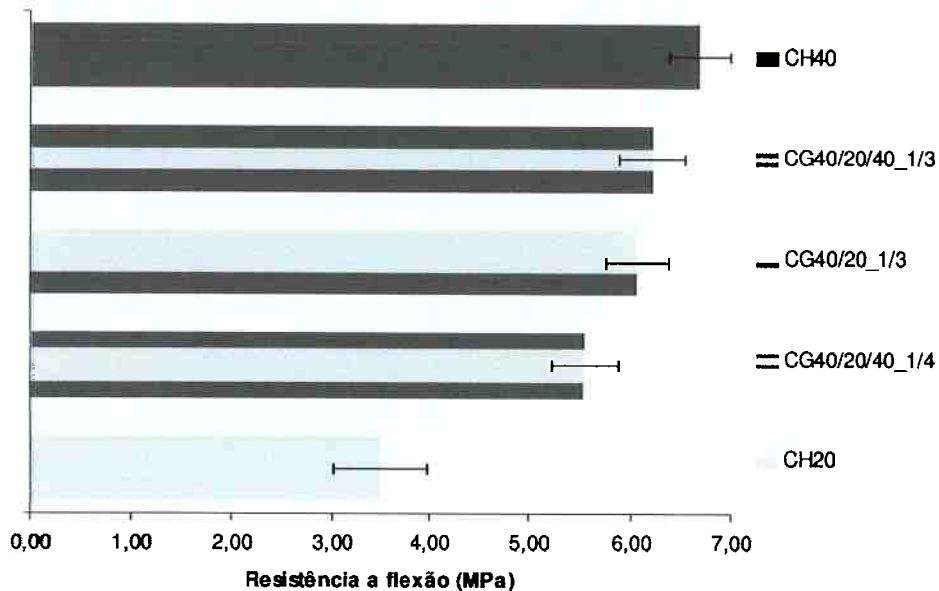


Figura 34 - Comparação entre as resistências a tração na flexão dos concretos homogêneos (CH) com os concretos FGM (CG).

Após a obtenção dos resultados das resistências, procedeu-se para um teste estatístico para comparar as diferentes séries de concreto. Como as amostras são pequenas e a comparação é sempre entre dois concretos, o teste *t* é o mais adequado (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005). Os resultados são mostrados na Tabela 16. A hipótese de diferença de média nula foi utilizada, ou seja, a hipótese de que um concreto apresenta resistência à flexão similar a de outro concreto. Como o intervalo de confiança é 95% ($\alpha = 5\%$), todos os valores de *P* que se encontram abaixo de 5 % são dos casos em que não há evidência estatística de que a hipótese nula é verdadeira, e portanto, nesses casos pode-se se dizer que o concreto *A* possui resistência à flexão superior que o concreto *B*. No caso em que *P* é maior que 5% há evidência estatística, nesse intervalo de confiança, de que a hipótese é verdadeira e portanto não há superioridade do concreto *A* em relação ao concreto *B*.



Tabela 16 – Teste t-student para alguns pares de concretos testados ($\alpha = 5\%$).

Par comparado		P (%)	Significativo (S/N)
A	B		
CH40	CG40/20/40_1/3	9,3	S
CH40	CG40/20_1/3	4,6	N
CH40	CG40/20/40_1/4	0,5	N
CG40/20/40_1/3	CG40/20_1/3	44,1	S
CG40/20/40_1/3	CG40/20/40_1/4	1,8	N
CG40/20_1/3	CG40/20/40_1/4	5,1	S

Assim os pares (CH40; CG40/20/40_1/3), (CG40/20/40_1/3; CG40/20_1/3) e (CG40/20_1/3; CG40/20/40_1/4) tiveram resultados que validam a hipótese de que a diferença entre suas média é nula, pelo teste t a 95% de confiança (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005).

Analogamente aos concretos das misturas, a relação entre o consumo de cimento e a resistência à tração na flexão é mostrada na Figura 35.

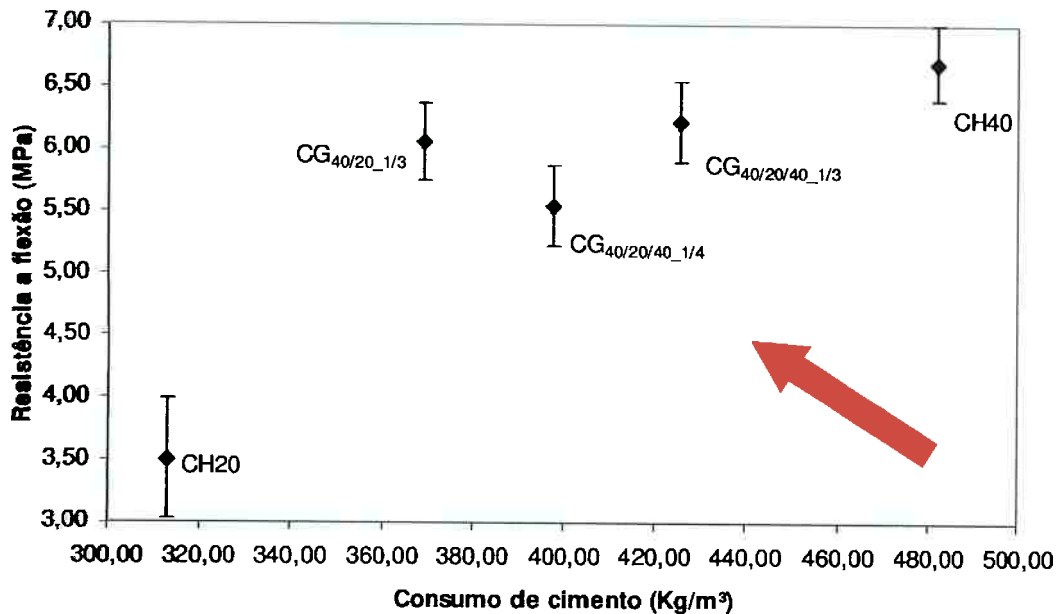


Figura 35 – Resistência a Flexão versus Consumo de cimento para os concretos com graduação.

Pela Figura 35 fica claro que, diferentemente das 14 misturas, não há uma boa relação linear entre o consumo de cimento e a Resistência a Flexão, e isso pode ser explicado pelo fato de que os concretos com graduação não possuem consumo de cimento uniforme no “corpo” inteiro. O consumo é maior na região mais solicitada, igual ao consumo máximo, mas é mínimo na região central, resultando em maior eficiência, indicada pela direção da seta no gráfico, minimizando o consumo de cimento e maximizando a resistência à flexão. Por essa análise os concretos homogêneos são prontamente excluídos já que o CH40 consome muito cimento e o CH20 tem a resistência muito baixa. É um caso de objetivos conflitantes para a seleção da classe de concreto mais adequada.

Outro valor utilizado para verificar tal eficiência de cada concreto foi o índice (*Consumo de cimento / Resistência à Flexão*) em (Kg/m³.MPa). Esse índice permite verificar o grau de otimização de cada concreto. Quanto menor esse valor mais eficiente



o concreto. Os resultados são vistos na Tabela 17. Para visualizar quais os concretos mais eficientes do estudo, o índice em questão foi plotado em função da resistência à flexão (Figura 36). Com esse diagrama é possível determinar uma faixa ou valor de resistência e escolher o concreto com base na eficiência dada pelo índice em questão.

Tabela 17 - Razão entre o Consumo de cimento e a resistência a flexão

concreto	Consumo de Cimento / Resistência à Flexão (Kg/m ³ .MPa)
CH20	89,4
CH40	72,0
CG _{40/20} 1/3	61,0
CG _{40/20/40} 1/3	68,4
CG _{40/20/40} 1/4	71,7

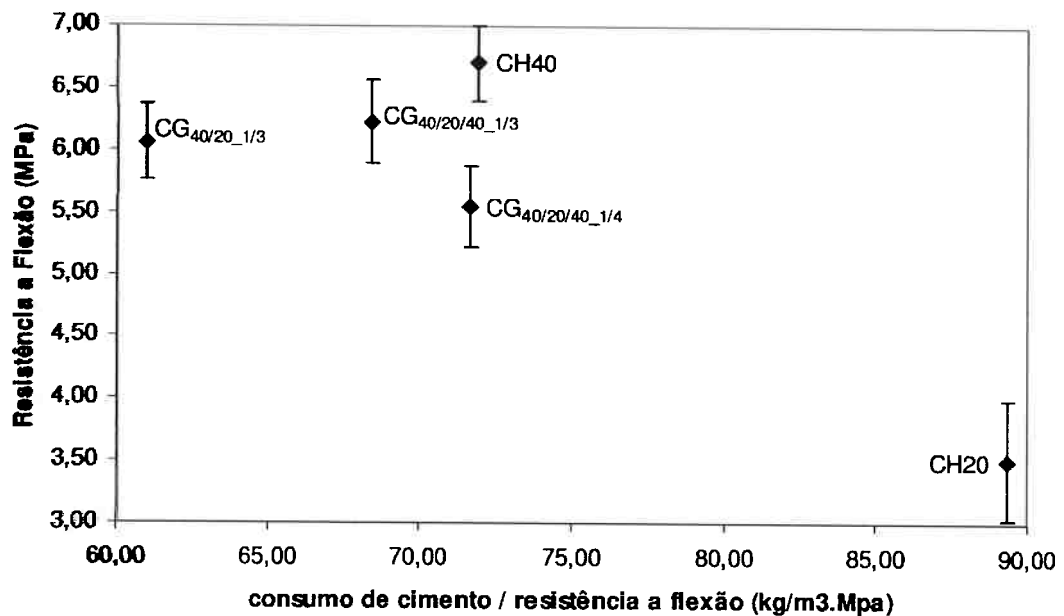


Figura 36 - Resistência a Flexão versus (Consumo de cimento / Resistência a Flexão).



Assim o concreto mais eficiente para o esforço de flexão é o do tipo CG40/20_1/3, que possui apenas o terço inferior com consumo máximo de cimento, e os outros dois terços com consumo mínimo. O tipo menos eficiente é o CH20 com Resistência a Flexão de 3,5 MPa aproximadamente, mas o interessante aqui é pensar que se essa Resistência a Flexão fosse desejada em algum projeto, esse concreto poderia ser otimizado, e ter por exemplo a mesma divisão em camadas, com a camada tracionada com o traço de 20 MPa, e nas outras camadas resistências ainda menores.

Os próprios concretos com gradação poderiam ser ainda otimizados. Pelos resultados obtidos fica claro que a camada superior não tem influência na resistência a flexão da viga. Nessa camada predominam os esforços de compressão, e com os tipos de concretos testados pode-se verificar o quanto da resistência à compressão de cada concreto foi exigida até o momento da ruptura por tração (R_t) considerando uma distribuição linear de tensões (Tabela 18). Mesmo no caso do concreto mais eficiente, o do tipo CG40/20_1/3, apenas 30% da resistência a compressão (R_c) foi exigida. Isso abre possibilidade para traços ainda menos resistentes na camada superior. O traço com Resistência a compressão de 20 MPa foi escolhido por ser o limite inferior do projeto de misturas.

Tabela 18 – Comparação entre a Resistência a compressão de ruptura e a exigida durante a flexão

concreto	R_c (MPa)	R_t (MPa)	R_c Exigida na Flexão (%)
CH20	20	3,5	17,5
CH40	40	6,7	16,7
CG _{40/20} 1/3	20	6,1	30,3
CG _{40/20/40} 1/3	40	6,2	15,6
CG _{40/20/40} 1/4	40	5,5	13,9



4.3 Sustentabilidade e Economia

4.3.1 Projeto de Misturas

O custo dos concretos das 14 misturas também foi transformado em um modelo, como mostra a Equação 10. Como o custo dependia apenas das proporções entre as matérias-primas, a correlação é obviamente máxima. A Figura 37 mostra a superfície gerada para ilustrar as variações. Mais uma vez a contribuição do cimento é a principal, enquanto os agregados têm praticamente a mesma influência, e a água quase nenhum efeito.

$$\text{Custo(normalizado)} = 5,2 \cdot x_c + 0,7 \cdot x_{am} + 0,6 \cdot x_{ag} + 0,03x_{\text{Água}} \quad \text{Eq. 10}$$

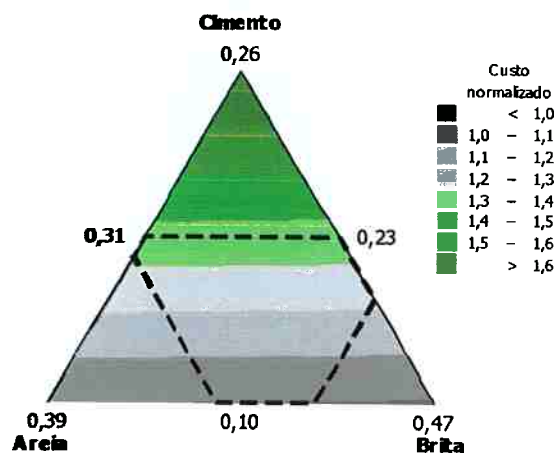


Figura 37 - Superfície de Resposta do Modelo para o custo normalizado das misturas.

4.3.2 Concretos com graduação

A tabela 17 apresenta os resultados relativos ao custo de cada tipo de concreto com graduação funcional. Pelo valor do custo individualmente todos os tipos de concreto com graduação são vantajosos em relação ao traço homogêneo mais resistente (CH40).



Porém, devemos analisar considerando a relação entre custo e a resistência à flexão, que é a propriedade almejada. Por essa análise o concreto CH40 apresenta eficiência similar aos concretos com graduação. Novamente o concreto do tipo CG40/20_1/3 é o mais eficiente. O diagrama da Figura 38 faz a relação da resistência a flexão com o índice (Custo / Resistência à Flexão).

Tabela – Resultados relativos ao custo

concreto	Custo (R\$/m³)	Custo normalizado	Custo/Resistência a Flexão (R\$/m³.MPa)
CH20	155,6	1,00	44,4
CH40	195,5	1,26	29,2
CG40/20_1/3	168,9	1,09	27,9
CG40/20/40_1/3	182,2	1,17	29,3
CG40/20/40_1/4	175,6	1,13	31,7

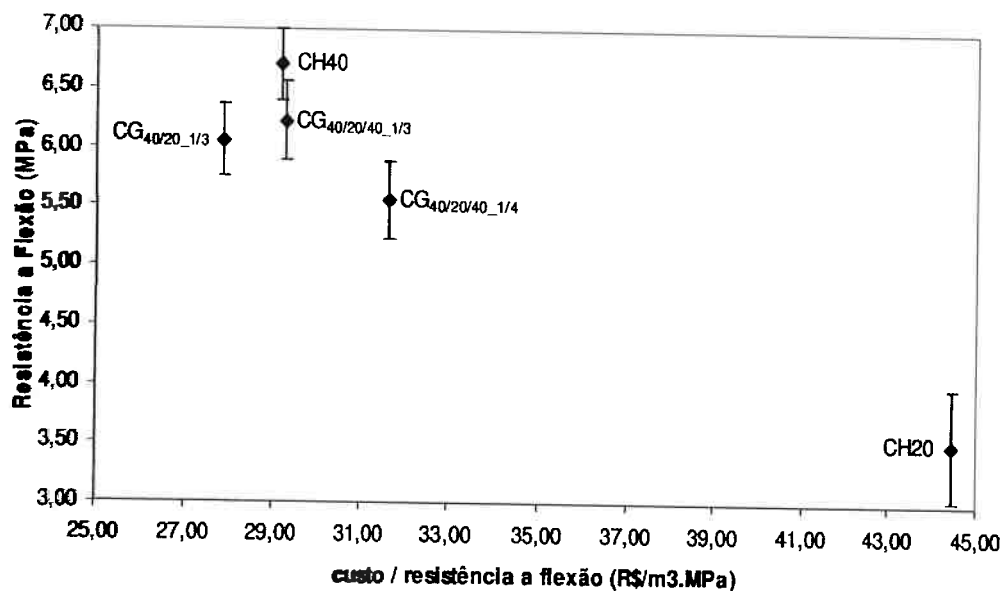


Figura 38 - Resistência a Flexão versus (Custo / Resistência a Flexão)



Para calcular a redução do impacto ambiental que os concretos do estudo poderiam causar, foi utilizado o parâmetro emissão de CO₂. A análise parte do consumo de cimento de cada concreto, já que essa matéria-prima é a responsável pelas emissões. O cimento utilizado foi do tipo CP II E, que emite cerca de 560 Kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido (CARVALHO 2001 apud JOHN, 2007). Com esse valor e os consumos de cimento em kg por m³, chega-se a um valor de emissão de CO₂ para cada concreto, como mostra a Tabela 19. O concreto homogêneo CH40 é o que causa maior impacto ambiental.

Para relacionar essa emissão de gás com a resistência mecânica, o índice (emissão de CO₂ / Rt) também foi calculado, mostrando que em relação ao impacto ambiental os concretos com graduação possuem desempenho melhor do que os homogêneos.

Tabela 19 - Emissão de gás carbônico para cada classe de concreto com graduação

concreto	Emissão de CO ₂ (Kg/m ³)	Emissão de CO ₂ / Rt (Kg/m ³ .MPa)
CH20	175,3	50,0
CH40	269,9	40,3
CG _{40/20} 1/3	206,8	34,1
CG _{40/20/40} 1/3	238,4	38,3
CG _{40/20/40} 1/4	222,6	40,2

Partindo da Figura 35 (Rt vs Consumo de cimento), é possível gerar um gráfico semelhante com a emissão de CO₂ no eixo x (Figura 39). Mais uma vez, a seta indica a direção que maximiza a resistência e minimiza a emissão de CO₂, na qual estão dois dos três tipos de concretos com graduação.

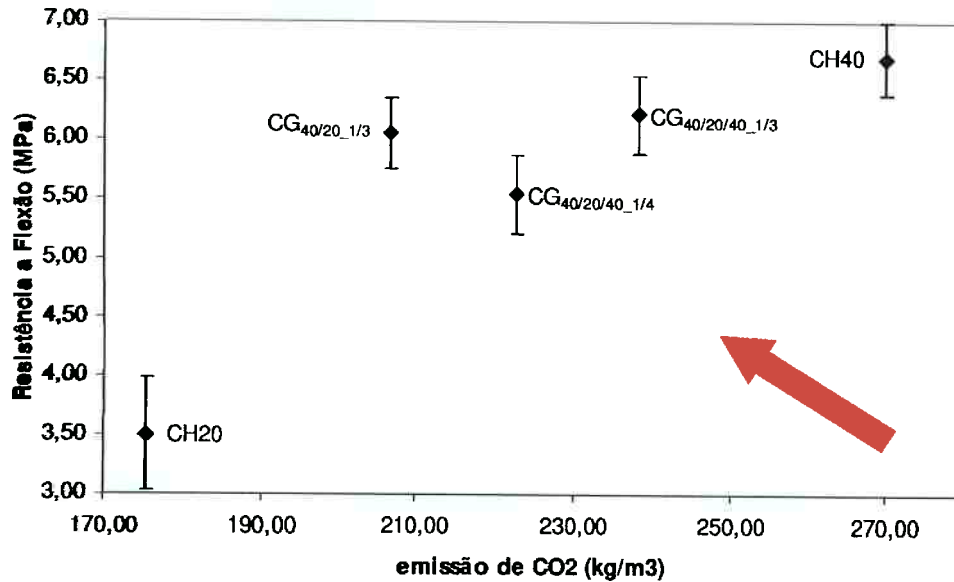


Figura 39 - Emissão de CO₂ versus Resistência à Flexão

A Figura 40 mostra a curva da resistência à flexão em função do índice de eficiência da Tabela 19, mostrando mais uma vez que a classe CH20 possui baixa eficiência, e esse tipo de concreto poderia ser otimizado da mesma maneira que o traço CH40 foi com os concretos com graduação.

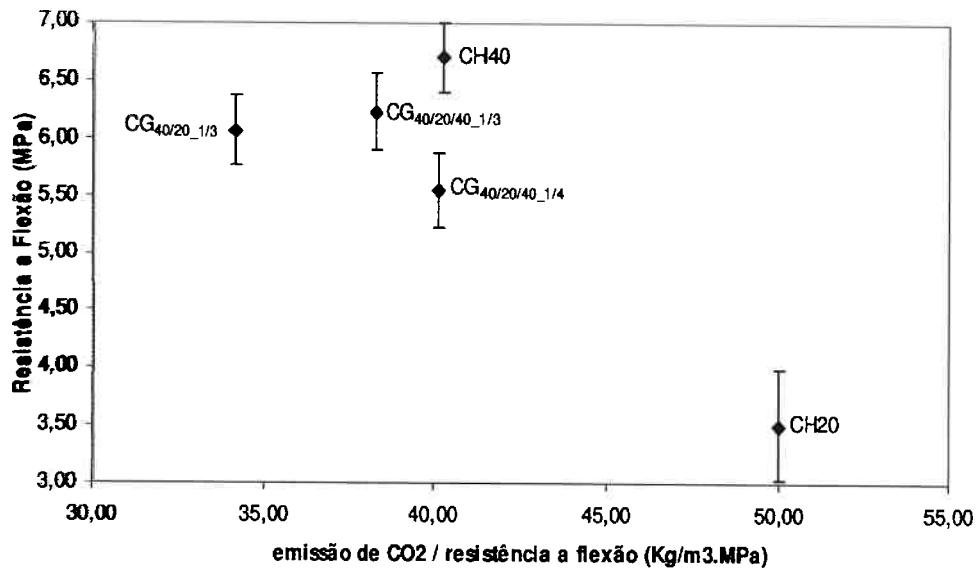


Figura 40 - Resistência à Flexão (Rt) em função de (emissão de CO₂ / Rt).

Para sintetizar, no que se refere à sustentabilidade, os concretos com gradação apresentam desempenho superior aos concretos homogêneos pois reduzem o consumo de cimento que é o ingrediente responsável pelas emissões de CO₂.



5 APLICAÇÕES POSSÍVEIS

Algumas das possíveis aplicações para os concretos com gradação funcional (CGF) apresentadas neste item são aquelas em que o material sofre o esforço estudado neste projeto, a flexão. A idéia é substituir um concreto homogêneo com desempenho acima do necessário por um concreto com camadas distribuídas de acordo com a solicitação. Assim, teríamos um produto novo mais eficiente mecanicamente, que causa menos impactos ambientais e que possui um custo mais baixo. As classes de concreto estudadas são utilizadas como exemplo.

5.1 Edificações

De acordo com a análise dos resultados e o estudo de Giordano (2008), os concretos com gradação poderiam ser aplicados em edificações, substituindo peças estruturais, vigas e lajes que de acordo com o projeto estrutural estariam sofrendo esforço de flexão. Giordano (2008) analisou um edifício típico da região metropolitana de São Paulo, com cerca de 25 andares e lajes de cerca de 500 m². Os resultados da substituição do concreto homogêneo CH40 pelos concretos com gradação são mostrados na Figura 41.

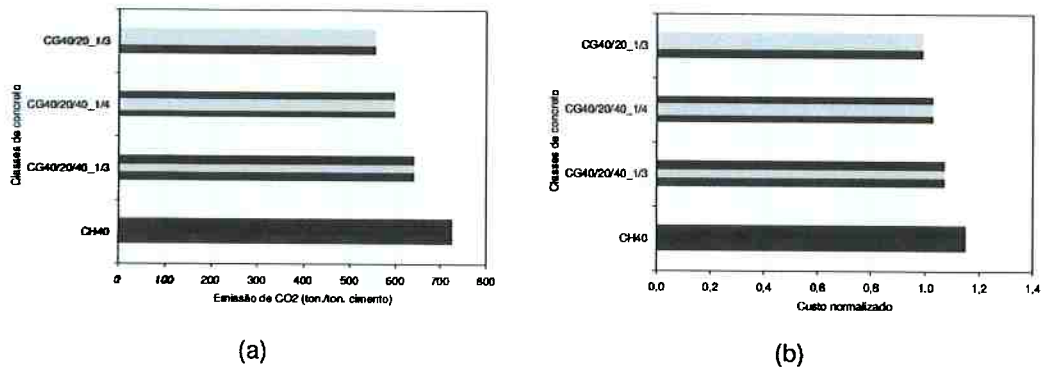


Figura 41 - Viabilização das classes de concreto: a) emissão de gás carbônico e b) custo normalizado (GIORDANO, 2008).

A redução total nos custos com o concreto é de aproximadamente 14 %, a diminuição de emissão de CO₂ chega a cerca de 23 %, com a utilização do concreto com gradação mais eficiente para a flexão, o do tipo CG40/20_1/3.

5.2 Pavimentação

5.2.1 Noções Básicas

No Brasil não há tradição na utilização de pavimentos de concreto de cimento Portland (CCP). Todavia, segundo Balbo (2005), esse tipo de pavimento apresenta uma característica muito importante: a durabilidade da via, que exige poucos custos de manutenção ao longo de sua utilização, quando comparada com qualquer outro tipo de solução. O pavimento de CCP é, portanto, mais adequado para tráfego pesado, ou quando intervenções rotineiras são indesejáveis (Portos, aeroportos, pátios e terminais de transporte, etc). Além disso, existem razões ambientais, quando se deseja um pavimento que tenha temperaturas mais baixas na superfície e repasse pouco calor para o solo.



Os pavimentos são estruturas complexas, formados por várias camadas de materiais com diferentes propriedades, o que gera enormes possibilidades de respostas estruturais (BALBO, 2005). A primeira camada inferior é o *subleito*. A camada superior, pela qual ocorre o tráfego, é chamada de *revestimento*, que recebe as cargas envolvidas e as transmite para as camadas inferiores. Abaixo do revestimento encontra-se a *base* de apoio que, em alguns casos, é dividida em duas camadas, *base* e *sub-base*. Se o solo inferior é de pouca qualidade a solução adequada pode ser uma camada intermediária entre subleito e base, chamada *reforço de subleito*. A Tabela 20 mostra os materiais aplicáveis nas respectivas camadas.

Tabela 20 - Nomenclatura e materiais utilizados nas camadas de um pavimento de CCP (BALBO, 2005)

Denominação	Materiais aplicáveis
Revestimento	Concreto simples, concreto armado, concreto protendido, concreto compactado com rolo, blocos de concreto pré-fabricados, placas pré-moldadas de concreto
Base	Brita graduada simples, macadame hidráulico, misturas solo-agregado, solo-cimento, brita graduada tratada com cimento, concreto compactado com rolo, concretos asfálticos
Sub-base	Brita graduada simples, mistura solo- agregado, macadame hidráulico
Reforço de subleito	Solo importado, solo melhorado com cimento
Subleito	Solo natural ou importado

A aplicação de concreto com graduação em pavimentação seria portanto no revestimento, e poderia ser feita tanto por meio de pré-moldados quanto por moldagem *in loco*.



De acordo ainda com Balbo (2005), se o pavimento for rígido, isto é, responde mecanicamente aos esforços com ação de placa, quando então as solicitações normais predominam, as placas sofrerão ações de tração na flexão. Dessa forma, deve-se determinar os esforços normais de acordo com teorias adequadas a cada tipo de pavimento. Assim os esforços normais servirão para determinar a resistência e a espessura da placa de concreto.

O Pavimento de Concreto Simples é o tipo mais utilizado, com a moldagem feita in loco. As juntas transversais são serradas propositalmente para induzir a fissura de retração. Nessas juntas poderão estar presentes barras de aço de transferência de cargas. Nas juntas longitudinais, também serradas, sempre estão presentes barras de ligação, cuja função é manter as placas unidas após a serragem.

5.2.2 Execução do Pavimento

Primeiramente têm-se a colocação das formas laterais, que podem ser metálicas ou de madeira. Depois vem a instalação das barras de aço. Assim a primeira camada de concreto, mais resistente, pode ser lançada e adensada por vibração com agulhas de vibração manuais ou régua vibratória (com motor acoplado e com as extremidades apoiadas nas barras laterais). As outras camadas poderiam ser executadas com procedimento análogo. Outras maneiras de execução tradicionais também poderiam ser utilizadas, tais como: Utilização de fôrmas-trilho ou fôrmas-deslizantes (MANUAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS; DNIT⁹, 2005).

No caso de três camadas, a central seria composta de um traço menos resistente (zona neutra), enquanto que a inferior deve ser de um traço mais resistente para resistir aos esforços de tração. O que se aplica em geral é um concreto com resistência à tração na flexão da ordem de 4,5 MPa após 28 dias da moldagem (DNIT, 2005). A camada superior deve ter resistência suficiente para resistir ao desgaste

⁹ DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.



produzido por alguns esforços de tráfego, além de proteger contra a ação de agentes agressivos que comprometeriam a durabilidade. É importante ressaltar que valores muito baixos de resistência à tração na flexão, como valores menores ou iguais a 4,0 MPa, correspondem a concretos que possuem permeabilidade alta, o que compromete a durabilidade e faz com que a espessura necessária para o pavimento seja muito alta (DNIT, 2005). Vale ressaltar que um estudo sobre como um revestimento com camadas de diferentes concretos resistiria à fadiga seria um passo importante antes da aplicação.

Considerou-se que os concretos utilizados neste estudo seriam adequados por possuírem resistência à tração na flexão superior a 4,5 MPa, com exceção do tipo CH20 que possui 3,5 MPa dessa resistência. Por essas razões escolheu-se para uma possível aplicação em pavimentação os concretos CG40/20/40_1/3 e CG40/20/40_1/4, que possuem o traço mais resistente na camada superficial e na camada tracionada. O concreto da classe CG40/20_1/3 poderia também ser testado desde que passasse por tratamento de endurecimento ou impermeabilização superficial. O desempenho desses concretos foi confrontado com o do concreto CH40.

Sendo a pavimentação um tipo de obra de imenso porte, qualquer redução no consumo de cimento sem comprometer o desempenho resultaria em uma expressiva redução de custos. Considere uma rodovia de 100 km de extensão, com revestimento de concreto de 20 cm de espessura e 20 m de largura. As espessuras dos pavimentos rígidos de concreto variam de 10 a 30 cm aproximadamente (DNIT, 2005). O volume de concreto para esse revestimento seria 400.000 m³. Para esta obra hipotética os resultados para os três diferentes concretos cogitados são apresentados na Figura 42.

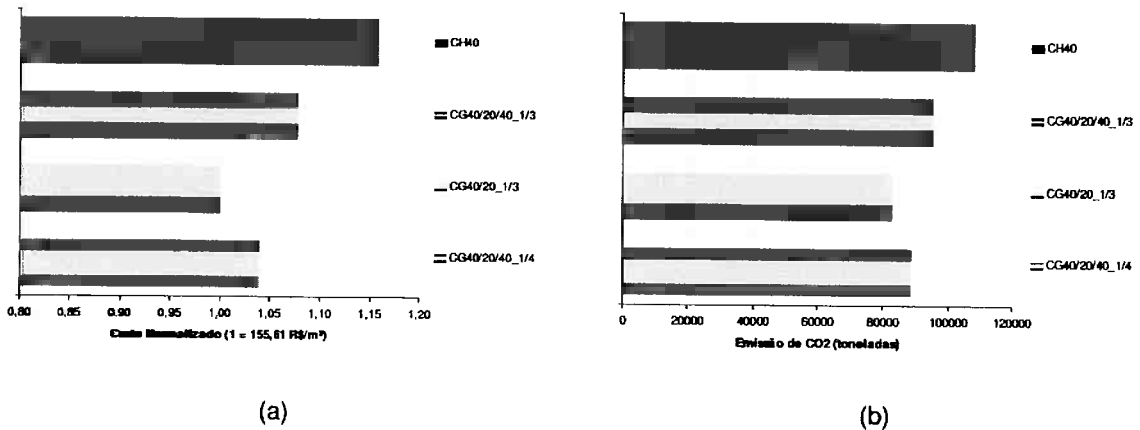


Figura 42 – Comparação de desempenho entre os tipos de concretos cogitados para pavimento em termos de (a) Custo Normalizado e (b) Emissão de CO₂

O resultado para a substituição do CH40 pelo CG40/20/40_1/3 seria uma economia de cerca de 7% no custo do material e 12% no consumo de cimento. Na prática isso significaria 5,3 milhões de reais a menos gastos e 13 mil toneladas de CO₂ a menos emitidas. Já para o uso do CG40/20/40_1/4 haveria redução aproximada de 10% do custo e 18% no consumo de cimento, ou seja, 8 milhões de reais e 19 mil toneladas de CO₂ a menos. A maior vantagem porém viria do concreto do tipo CG40/20_1/3, com economia de 14% (aproximadamente 11 milhões de reais), e redução no consumo de cimento de 23% (25 mil toneladas de CO₂ a menos).

Vale lembrar que esse cálculo é uma simplificação, apenas considerando o volume de material utilizado e desempenho mecânico dentro de uma faixa adequada. A utilização de concreto com graduação também poderia trazer um acréscimo de tempo que acabaria se traduzindo em custo, já que a concretagem teria mais etapas.



6 CONCLUSÕES

O cimento é o ingrediente que apresentou o maior efeito no torque medido através do reômetro. Também é responsável pela produção de gás carbônico em sua produção e, portanto é sempre desejável reduzir sua quantidade sem perder desempenho mecânico.

O EVD se mostrou uma ferramenta interessante para o projeto de misturas, podendo ser utilizada como alternativa ao método tradicional de dosagem, e sua utilização mostrou confiabilidade estatística. A sua principal vantagem é fornecer equações das propriedades estudadas, indicando qual matéria-prima tem mais influência em cada uma delas. Assim foi possível escolher os traços para os concretos com gradação funcional. É importante mencionar que o traço com resistência de 20 MPa foi escolhido pois representa o mínimo obtido dentro dos limites do projeto de misturas pelo EVD. Traços ainda menos resistentes e/ou com agregados reciclados podem ser adaptados nas regiões menos solicitadas para otimizar os concretos.

Os resultados provaram que o conceito de material com gradação funcional pode ser aplicado no desenvolvimento de concretos com um desempenho otimizado em relação aos concretos tradicionais, com uma conseqüente redução de custos e viés sustentável, já que diminui consideravelmente o consumo de energia e a emissão de gás carbônico provenientes da indústria de cimento, que é uma das grandes responsáveis pela criação desse gás no Brasil. O estudo em questão tem um grande potencial de aplicação em situações em que o concreto sofre tração na flexão, como em lajes de edifício e na pavimentação.

O conceito FGM também pode ser desenvolvido em situações envolvendo outras solicitações e é uma maneira de se otimizar a utilização dos materiais pela construção civil, e assim reduzir o impacto ambiental causado por esse setor.



7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUDI, J., PINDERA, M.J., ARNOLD, S.M. Higher-Order Theory for Functionally Graded Materials. *Composites Part B - Engineering*, vol. 30, no. 8, 777-832 (1999).

AÏTCIN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. In: *Cement & Concrete Composites* 25, 409–420 (2003).

AMADA, S., ICHIKAWA, Y., MUNEKATA, T., NAGASE, Y., SHIMIZU, H. Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo, *Composites part B* 28B, 13-20 (1997).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Boletim Técnico – Guia Básico de utilização do cimento Portland - São Paulo, dezembro, 2002.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 26 Agregados - Amostragem de agregados. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 27 Agregados - Redução da amostra para ensaio em laboratório. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 5738 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 12142 Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.



BALBO, J. T. Pavimentos Viários e Pisos Industriais de Concreto. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO. CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo, 2005. 2 v. Cap. 42. p.1298-1332.

BASHEER, L., KROPP, J., CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. In: Construction and building materials 15, 93–103 (2001).

BEVER, M. B., DUWEZ, P.E. Gradients in composite materials. In: Materials Science and Engineering (1972).

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistics for experimenters, an introduction to design, data analysis, and model building. New York, John Wiley, 1978 e 2005.

DE LARRARD, F., SZITKAR, J. C., HU, C. AND JOLY, M., “Design of a rheometer for fluid concretes”, Proceedings of the international RILEM Workshop Special Concretes. Workability and Mixing, P.J.M. Bartos ed. (E & FN SPON, 1994) 201 – 208.

DE LARRARD, F., FERRARIS, C. F., SEDRAN, T. Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, Vol. 31, August-September 1998, pp 494-498.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. MANUAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS - Cap 4 Projeto e Dimensionamento. 2 ed Rio de Janeiro 2005

DERRINGER, G., SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. Journal of Quality Technology. Vol. 12, N°4, Outubro 1980.

DIAS, C. M. R., SAVASTANO JR, H., JOHN, V. M. The FGM concept on the development of fiber cement components, FGM 2006. Hawai, 2006.

ELEKTRONENMIKROSKOPISCHES LABOR DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR. Micrografia eletrônica. Disponível em <http://gonzo.uni-weimar.de/~remlabor/> , 2004



ERDOGAN, S. T., MARTYS, N. S., FERRARIS, C. F., FOWLER, D. W. Influence of the shape and roughness of inclusions on the rheological properties of a cementitious suspension. *Cement and concrete composites* 2008

FERRARIS, C., DE LARRARD, F., MARTYS, N. Fresh Concrete Rheology: Recent Developments. *Materials Science of Concrete* p 215 – 241 VI 2001.

GHAVAMI, K., RODRIGUES, C. S., PACIORNIK, S. Bamboo: Functionally Graded Composite Material. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* Vol. 4, No. 1 (2003).

GIORDANO, B. L., JOHN, V. M. Viabilidade do concreto FGC em edifícios e pavimentos rígidos. Trabalho de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola Politécnica da USP, 2008

GUIMARÃES, A. T. C. Propriedades do Concreto Fresco . In: *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. Cap 16 v1. Ibracon, 2005.

HÄKKINEN, T. The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete – Part 1 Microstructure studies and basic mechanical properties. In: *Cement and concrete research*. Vol. 23, 407-421, 1993.

HELENE, P. Dosagem do concreto de Cimento Portland. In: *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. Cap 15 v1. Ibracon, 2005.

JACINTHO, A. E. P. G. A., GIONGO, J. S. Resistência Mecânica do Concreto. In: *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. Cap 20 v1. Ibracon, 2005.

JIAN-TONG DING, PEI-YU YAN, SHU-LIN LIU, JIN-QUAN ZHU. Extreme vertices design of concrete combined with mineral admixtures. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 957-960.



JOHN, V. M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. São Paulo, 2007. 1 v. Cap. 04. p.96-117.

KAWASAKI, A., WATANABE, R. Concept and P/M Fabrication of functionally gradient materials, *Ceramics International* 23, 73-83 (1997).

KIEBACK, B., NEUBRAND, A., RIEDEL, H. Processing techniques for functionally graded materials, *Materials Science and Engineering A* 362, 81-105 (2003).

MAALEJ, M., AHMED, S. F. U., PARAMASIVAM, P. Corrosion durability and structural response of functionally graded concrete beams, *JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation, 21-22 October 2002, Takayama, Japan, JCI, Japan*, pp. 161-170.

MCLEAN, R. A., ANDERSON, V. L. Extreme Vertices Design of Mixture Experiments. In: *Technometrics* Vol. 8, No. 3 (1966).

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 573p (1994).

MORANVILLE-REGOURD, M. Microstructure of high performance concrete. In: *Malier, Y., High performance concrete – from material to structure. London, E & FN Spon, 3 –13 (1992).*

NEUBRAND, A., RÔDEL, J. Gradient Materials: An Overview of a Novel Concept. In: *Z. Metallkd* 88, 359-371 (1997).

PAULON, V. A. A Microestrutura do Concreto Convencional. In: *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. Cap 19 v1. Ibracon.2005*

PILEGGI, R. G., PAIVA, A. E., GALLO, J., PANDOLFELLI, V. Carlos. Reômetro Planetário para concretos 1999.



POMPE, W., WORCH, H., EPPLE, M., FRIESS, W., GELINSKY, M., GREIL, P., HEMPEL, U., SCHARNWEBER, D., SCHULTE, K. Functionally Graded Material for biomedical applications. In: *Materials Science and Engineering A* 362, 40-60 (2003).

REZENDE, L. V. S., DJANIKIAN, J. G. Resistência ao cisalhamento do concreto fresco por compressão triaxial. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1998.*