

Investigação do Efeito da Adição de Resíduos Vítreos nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios

Tulio Hallak Panzera*, Kurt Strecker,

Antônio Luiz Ribeiro Sabariz, Francisco Marcelino Silva

*Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ,
Campus Sto Antônio, Praça Frei Orlando 170, São João del-Rei - MG, 36.307-352, Brazil*

**tuliopanzera@hotmail.com*

Resumo: Este trabalho investiga o efeito da adição de particulados de vidro nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios. O aproveitamento das partículas de vidro oriundas do processo de coleta seletiva tem grande relevância ambiental e sócio-econômica para o país, visto que a reciclagem deste material ainda apresenta grandes dificuldades. Neste sentido, o presente estudo foca no desenvolvimento de um material compósito particulado de forma a promover a reutilização do vidro. Embora a adição de vidro tenha promovido uma queda da resistência mecânica, os compósitos cimentícios exibiram propriedades mecânicas aceitáveis para diversas aplicações.

Palavras-chave: *compósito cimentício, reutilização do vidro, cimento Portland.*

1. Introdução

O Brasil produz aproximadamente 890 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, usando cerca de um quarto de matéria prima reciclada na forma de fragmentos. Parte deles foi gerada como refugo nas fábricas e parte retornou por meio da coleta¹. Devido ao peso, uma das principais dificuldades para a reciclagem do vidro é o custo do transporte da sucata. Outros fatores relevantes como contaminação por outras classes de materiais e heterogeneidade da sucata de vidro implica em limitações para reutilização do material. Os vidros não são biodegradáveis, o material se funde a 1200 graus e seu efeito abrasivo pode causar problemas aos fornos e equipamentos de transporte². Por estes motivos, a reutilização do vidro torna-se de suma importância ambiental e sócio-econômica do país.

Existem muitos exemplos de aplicações da reciclagem do vidro na construção: isolamento térmico, agregados para concreto e asfalto e constituinte do cimento, como aditivo pozolânico³. O desenvolvimento de um compósito cimentício utilizando particulados de vidro será abordado neste trabalho.

Quando resíduos de vidro são propostos como constituinte de materiais cimentícios, existe uma preocupação sobre a redução da resistência mecânica e a existência da reação álcali-silica (ASR)⁴. A adição de vidro amorfo de granulometria fina pode acarretar na ativação da ASR promovendo uma expansão do corpo cimentício e prejudicando a estrutura do material. Algumas precauções para evitar este tipo de reação têm mostrado eficazes, como por exemplo, o uso de um cimento menos alcalino e aditivos pozolânicos. Segundo Xie et al.⁵, a sílica fina em misturas cimentícias participa com reações pozolânicas em pequena quantidade evitando a formação da reação álcali-silica.

O uso de resíduos vítreos como agregado em compósitos particulados cimentícios tem como objetivo promover a reutilização do material descartado, como também o desenvolvimento de um material de baixo custo, mais leve e resistente. As propriedades de resistência à compressão mecânica e densidade volumétrica serão investigadas neste trabalho.

2. Metodologia experimental

Os compósitos particulados podem ser classificados como sendo um material contendo duas fases principais, a fase reforçadora composta por partículas/agregados e a fase matriz, contínua e responsável

pela adesão do mesmo. As relações agregado/cimento e água/cimento contribuem efetivamente nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios e serão detalhadas nesta seção.

2.1. Fase matriz: cimento Portland

O cimento Portland utilizado no experimento como fase matriz foi o CPB 40 do fabricante Cauê (ASTM Tipo III), indústria Brasileira. A Tabela 1 exhibe a análise química do cimento.

2.2. Fase dispersa: partículas de quartzo, vidro

A fase dispersa presente nos compósitos em estudo foram partículas de quartzo e de vidro. Partículas de quartzo (SiO_2) de alta pureza (99,98%) originadas da empresa Moinhos Gerais, Brasil, foram selecionadas. Com intuito de investigar o efeito do tamanho dos agregados na resistência mecânica dos compósitos, as partículas reforçadoras foram classificadas em faixas granulométricas distintas. As partículas de quartzo foram classificadas através do processo de peneiramento na faixa de 8 a 20 US-Tyler, e na malha monodispersa, 200 US-Tyler, pelo processo de aero classificação. A adição de partículas de quartzo em compósitos cimentícios para obtenção de alta resistência tem sido investigada por vários pesquisadores⁶⁻¹⁰.

Os resíduos de vidro de cor marrom foram selecionados, moídos e classificados em duas faixas granulométricas, 4 a 8 US-Tyler e 8 a 20 US-Tyler. O vidro de cor marrom foi selecionado entre os demais por existir em maior quantidade, mantendo assim uma homogeneidade e consistência no experimento. Estas faixas granulométricas foram escolhidas baseadas na quantidade de tamanhos de partículas obtidas do processo de cominuição.

2.3. Relação particulado/cimento

A relação particulado/cimento influencia na resistência de materiais cimentícios, já que exhibe um efeito significativo sobre a relação água/cimento. Em certos casos, uma quantidade da água é absorvida pela fase de particulado: uma grande quantidade de partículas absorve uma grande quantidade de água, desta forma a relação água/cimento é conseqüentemente reduzida⁴. A porosidade e a área superficial específica do particulado influenciam diretamente na relação água/cimento. O resíduo de vidro, por sua vez, apresenta porosidade baixa, não contribuindo de forma significativa no efeito de absorção de água.

Li e Ding¹¹ estudaram os efeitos da quantidade de cimento Portland em termos dos aspectos físicos e químicos. A relação sílica/cimento de 0,67 apresentou a maior resistência mecânica. O cimento Portland é sem dúvida o componente de maior custo no material desenvolvido. Visando a obtenção de compósitos cimentícios de alto desempenho através do reaproveitamento de partículas de vidro, as relações particulado/cimento investigadas neste trabalho foram: 1, 1,5 e 1,85 que representam 50, 40 e 35% em peso de material cimentício na mistura.

2.4. Relação água/cimento

A redução da relação água/cimento (a/c) promove i) uma diminuição da porosidade total da pasta enrijecida; ii) uma aceleração da hidratação do cimento durante seu período inicial; e iii) a formação de produtos de hidratação com grande capacidade de pega específica^[12,13]. Altas resistências mecânicas com baixas relações a/c são atribuídas pela formação direta da fase cúbica C_3AH_6 . A pequena quantidade de água é suficiente para proporcionar a pega e formar grãos densos de clínquer, modificando o campo de tensão entre as superfícies das partículas.

Segundo Toossi e Iran^[14], a redução da relação a/c de 0,30 para 0,20 não representou uma redução significativa da porosidade total comparado com relações a/c superiores. Zhang and Gjorv¹⁰ afirmaram que embora a porosidade diminuisse com a diminuição da relação a/c, a distribuição de tamanhos de poros não varia muito entre

Tabela 1. Análise química do cimento CPB 40 (Cimento Portland Branco - Cauê).

Perda ao fogo (%)	5,08
SiO ₂	23,59
Al ₂ O ₃	7,52
Fe ₂ O ₃	2,48
CaO	55,85
MgO	2,96
SO ₃	1,47
Na ₂ O	0,37
K ₂ O	0,89
CO ₂	4,87
Blaine (cm ² /g)	5004

Fonte: Cimentos Cauê.

Tabela 2. Condições experimentais.

C.E.	Água (%)	Cimento branco (%)	Vidro	Vidro	Quartzo	Quartzo
			[4-8 US-TYLER] (%)	[8-20 US-TYLER] (%)	[8-20 US-TYLER] (%)	[200 US-TYLER] (%)
CB1	25	100	-	-	-	-
CB2	30	100	-	-	-	-
CB3	35	100	-	-	-	-
C1	35	50	-	-	37,5	12,5
C2	35	40	-	-	45	15
C3	35	50	-	50	-	-
C4	35	40	-	60	-	-
C5	35	50	-	30	15	5
C6	35	50	-	10	30	10
C7	35	40	-	30	22,5	7,5
C8	35	40	-	10	37,5	12,5
C3b	35	50	50	-	-	-
C4b	35	40	60	-	-	-
C5b	35	50	30	-	15	5
C6b	35	50	10	-	30	10
C7b	35	40	30	-	22,5	7,5
C8b	35	40	10	-	37,5	12,5

0,25 a 0,20. Foi mostrado^[15] que quanto menor a relação a/c, menor é a permeabilidade na pasta de cimento para um nível de hidratação específico. Além disso, os valores de permeabilidade não variaram entre as relações 0,20 a 0,30.

As relações a/c de 0,33, 0,43 e 0,54 foram investigadas para a pasta de cimento Portland Branco. Os compósitos foram fabricados com as relações 0,54 e 0,67, proporcionando uma mistura com boa trabalhabilidade e homogeneidade.

3. Procedimento e resultados experimentais

3.1. Condições experimentais

A partir dos parâmetros discutidos anteriormente, as condições experimentais investigadas neste trabalho podem ser observadas na Tabela 2. Com o intuito de investigar o efeito de particulados de vidro nas propriedades mecânicas dos compósitos, corpos de prova foram confeccionados com diferentes porcentagens de vidro (10, 30, 50, 60%). As partículas de quartzo foram também adicionadas ao compósito, promovendo o aumento da resistência mecânica e colaborando no sistema de empacotamento de partículas.

Os corpos de prova foram fabricados utilizando moldes cilíndricos poliméricos de dimensão 29,88 mm de diâmetro e 42 mm de altura e uma bancada para vibração e compactação dos mesmos. Após o período de cura de 28 dias, eles foram sacados e cortados, garantindo o paralelismo necessário para execução do ensaio de resistência à compressão, e para determinação da densidade volumétrica do mesmo. A Figura 1 mostra o processo de corte dos corpos de prova garantindo o paralelismo para realização dos ensaios.

3.2. Resultados experimentais

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi baseado nas recomendações da norma britânica BS-12390^[16]. Cinco corpos de prova foram fabricados para cada condição experimental. Os testes foram realizados de forma aleatória. A pasta cimentícia e os compósitos cimentícios foram medidos para um período de cura de 28 dias. A densidade volumétrica dos compósitos foi calculada dividindo a massa do compósito seco (após 24 horas na estufa a 105 °C) pelo volume das amostras (29,88 mm de diâmetro e 42 mm de altura). A Tabela 3 exibe as médias e os desvios-padrão (DP) dos resultados de resistência à compressão (Rc) e densidade volumétrica (Dv) para as condições experimentais investigadas.

As condições experimentais CB1, CB2 e CB3 representam as pastas cimentícias sem adição de partículas reforçadoras, elas possuem relações água/cimento de 0,33, 0,43 e 0,54, respectivamente.

A Figura 2 exibe os resultados de resistência à compressão média e densidade volumétrica média do cimento Portland branco em função da relação de água/cimento. Observa-se que o cimento CB1 contendo o menor teor de água (25%) apresenta um valor de resistência à compressão superior as demais misturas CB2 (30%) e CB3 (35%). A variação percentual entre o CB1 e o CB2 é de 19,35% e entre o CB2 e o CB3 de 45,57%. A influência do teor de água sobre a resistência mecânica de pastas de cimento já foi bastante discutida^[6,11,12,17,18], mas é importante identificarmos o percentual de variação, visto que este comportamento é influenciado pela composição de cada cimento.

O decréscimo da densidade volumétrica em função do aumento do teor de água é observado na Figura 2. A diferença percentual entre as misturas CB1 e CB2 é de 4,81 e de 6,85% entre as misturas CB2 e CB3. Segundo resultados apresentados por diversos autores^[9,14,16], existe uma correlação entre resistência mecânica, densidade e porosidade de compósitos cimentícios. Esta correlação esta baseada na análise microestrutural do material, onde uma baixa porosidade implicaria no aumento da densidade e conseqüentemente no aumento

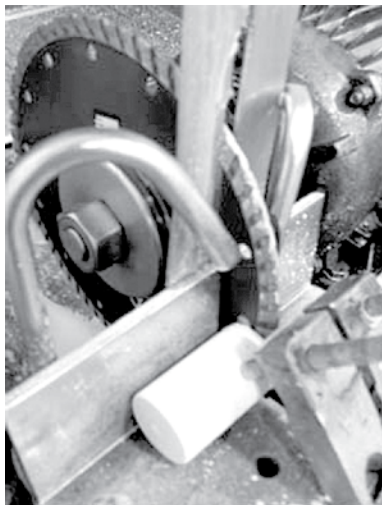


Figura 1. Corte dos corpos de prova cimentícios.

Tabela 3. Resultados médios de resistência à compressão e densidade volumétrica.

	Rc (Mpa)	DP	Dv (g/cm ³)	DP
CB1	54,94	1,28	1,96	0,00
CB2	43,39	1,77	1,87	0,05
CB3	31,62	1,38	1,75	0,01
C1	46,84	0,46	2,17	0,01
C2	40,05	1,69	2,20	0,01
C3	29,09	1,65	2,06	0,01
C3b	27,52	1,03	2,17	0,03
C4	25,69	1,13	2,12	0,01
C4b	21,52	1,37	2,17	0,01
C5	35,56	1,14	2,17	0,01
C5b	33,75	1,73	2,20	0,11
C6	42,49	0,85	2,15	0,01
C6b	42,61	1,13	2,15	0,04
C7	31,52	1,11	2,17	0,00
C7b	29,75	1,62	2,19	0,01
C8	36,39	1,42	2,18	0,01
C8b	36,54	1,96	2,19	0,01

da resistência mecânica. Este mesmo comportamento é observado para o cimento branco analisado neste trabalho (Figura 2).

O gráfico da Figura 3 exibe os resultados médios de resistência à compressão e densidade volumétrica das condições experimentais avaliadas.

Os resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 3 serão analisados nos itens seguintes:

- C1 e C2: a diminuição da quantidade de cimento em 25% promoveu uma queda percentual de 16,95% na resistência à compressão. O compósito C1 apresentou uma resistência à compressão média de 46,84 MPa;
- C1 e C3: os compósitos C1 e C3 foram fabricados utilizando 50% de cimento Portland. A substituição do quartzo granulado por vidro acarreta numa queda percentual de 61,18% na resistência mecânica. O valor médio da resistência à compressão apresentado pelo C3, fabricado com partículas de vidro, foi de 29,09 MPa;
- C2 e C4: os compósitos C2 e C4 foram fabricados utilizando 40% de cimento Portland. A substituição total do quartzo granulado por vidro promoveu uma queda percentual de 55,89% na resistência à compressão. Os valores obtidos de resistência à compressão para os compósitos C2 e C4 foram 40,05 e 25,69 MPa, respectivamente;
- C3, C5 e C6: a substituição parcial de 40% (C3-C5) e 80% (C3-C6) de vidro por quartzo implicou no aumento percentual da resistência à compressão em 22,24 e 46,06%, respectiva-

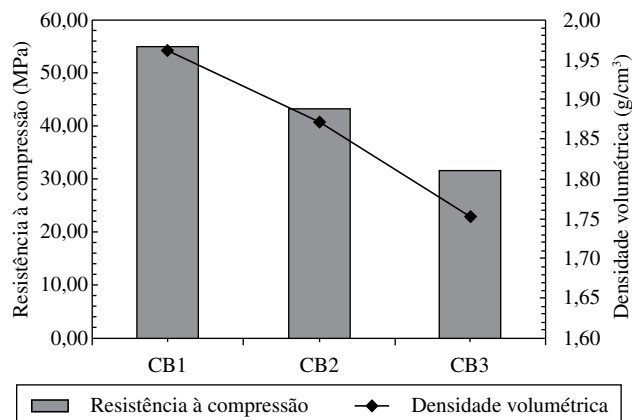


Figura 2. Teor de água em função da resistência a compressão e densidade volumétrica de pastas de cimento branco.

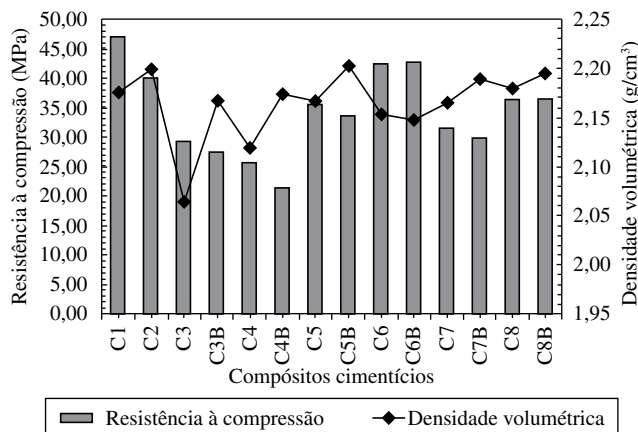


Figura 3. Resultados médios de resistência à compressão dos compósitos cimentícios.

mente. Nota-se que estes compósitos exibem 50% de cimento Portland em suas composições;

- C4 e C7: a substituição parcial (50%) de vidro por quartzo promoveu o aumento percentual de 22,69% na resistência à compressão do compósito C7 (31,52 MPa); e
- C7 e C8: a substituição parcial (67%) do quartzo pelo vidro no compósito C8 exibiu um aumento percentual de 15,45% no valor médio obtido de resistência mecânica.

Uma nova faixa granulométrica (4 a 8 US-Tyler) de tamanhos de partículas de vidro maiores, denominada grupo “b”, foi classificada permitindo investigar o efeito do tamanho das partículas de vidro nos valores de resistência mecânica. Observando o gráfico da Figura 3, nota-se que para alguns compósitos esta variação de tamanho influenciou nos resultados de resistência a compressão. Por outro lado, outros compósitos não apresentaram o mesmo efeito. Segue abaixo uma análise da variação percentual de cada tratamento experimental:

- C3 e C3b: o aumento do tamanho do vidro promoveu uma diminuição percentual da resistência à compressão de 5,7%;
- C4 e C4b: o mesmo comportamento foi observado para os compósitos C4 e C4b, exibindo uma queda percentual de 19,37% no valor da resistência mecânica;
- C5 e C5b: o aumento do tamanho de vidro provocou uma diminuição da resistência à compressão dos compósitos de 5,36%;
- C6 e C6b: os compósitos C6 e C6b não apresentaram variação da resistência mecânica com a alteração do tamanho do vidro, exibindo uma queda não tanto significativa de 0,28%. Este pequena variação era esperada visto que o percentual de vidro na mistura é de apenas 10%;
- C7 e C7b: uma queda percentual de 5,95% é observada com o aumento do tamanho de vidro presente nos compósitos; e
- C8 e C8b: a variação percentual de 0,41% entre os compósitos C8 e C8b demonstra que não existiu efeito do tamanho do vidro na resistência à compressão apresentada. Este comportamento se deve devido à pequena porcentagem de vidro presente nesta mistura.

Portanto, foi possível identificar que o aumento do tamanho do vidro não favoreceu o aumento de desempenho mecânico dos compósitos, mas sim, colaborou para uma queda percentual média de 9% da resistência à compressão obtida inicialmente.

A relação densidade e resistência à compressão existente entre compósitos cimentícios não é inteiramente verdadeira comparando os resultados obtidos de resistência à compressão e densidade volumétrica (Figura 3). Os compósitos de maior densidade volumétrica deveriam apresentar valores superiores de resistência mecânica. Isto pode ocorrer devido à resistência mecânica de compósitos cimentícios depender não somente do empacotamento das partículas e propriedades das fases presentes, como também, e principalmente, das condições de interface entre a fase dispersa e a fase matriz^[4]. Os compósitos que apresentam valores superiores de densidade e não apresentam uma resistência mecânica também elevada, sugerem a presença de uma microestrutura com interface comprometida. O estudo da microestrutura dos compósitos não será avaliada neste trabalho, todavia será objeto de estudo da seqüência deste trabalho.

Observou-se que as condições experimentais com menor quantidade de cimento exibiram maiores valores de densidade volumétrica, contribuindo com uma maior porcentagem de agregados. Por outro lado, as partículas de vidro promovem uma diminuição da densidade volumétrica, visto que apresentam um valor de massa inferiores aos particulados de quartzo.

4. Considerações finais

Segundo a norma Brasileira NBR 8953-92^[19] a resistência à compressão mecânica entre 20 a 40 MPa é considerada de nível moderado

para a construção civil. O compósito tipo C4b, composto de 60% de vidro e 40% de cimento, apresentou a menor resistência mecânica média de 21,52 MPa. Nota-se que, mesmo exibindo um baixo desempenho mecânico, este compósito apresenta condições de uso, tais como pisos, revestimentos, bases de máquinas, satisfazendo principalmente ao quesito custo econômico. O compósito C7 e C7b composto de 40% de cimento, 30% de vidro e 30% de quartzo demonstrou ser bastante promissor exibindo valores de resistência a compressão médio de 30,60 MPa. Por fim, constatou-se que embora exista uma queda percentual de resistência mecânica na adição do resíduo de vidro em compósitos cimentícios, o material desenvolvido exibe um potencial bastante promissor em aplicações de engenharia.

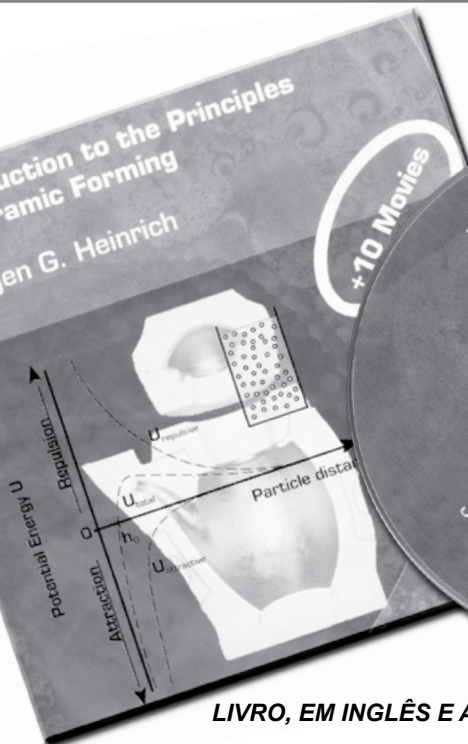
Referências

1. Compromisso Empresarial para Reciclagem-Cempre. **O mercado para reciclagem**. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas.php?lnk=ft_vidro.php>. Acesso em: 12 out. 2007.
2. Rawson, H. **Properties and applications of glass**. Oxford: Elsevier Scientific, 1980.
3. Sobolev, K.; Türker, P.; Soboleva, S.; Iscioglu, G. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. **Waste Management**, v. 27, p. 971-976, 2007.
4. Neville, A.M. **Properties of concrete**. 4. ed. Harlow: Longman, 1995.
5. Xie, Z.; Xiang, W.; Xi, Y. ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland Cement Mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 67-74, jan./feb., 2003.
6. Aitcin, P.C. **High performance concrete**. London: E & FN Spon, 1998.
7. Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
8. Ma, J.; Dietz J. Ultra high performance self compacting concrete. **Lacer**, v. 7, p. 33-42, 2002.
9. Sadrekarimi, A. Development of a light weight reactive powder concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 2, p. 409-417, 2004.
10. Zhang, M.; Gjorv O. E. Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 1006-1014, 1991.
11. Li, Z.; Ding, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 579-584, 2002.
12. Jambor, J. **Influence of water-cement ratio on the structure and strength of hardened cement pastes**. Conference held at University of Sheffield 8-9 april, 1976.
13. Febrillet, N.; Fuduka, H.; Ito, Y.; Ishibashi, K. Mechanical properties of ultra-high strength mortar made by using hot-press compaction. **Transactions of the Japan Concrete**, v. 23, p. 45-56, 2002.
14. Toossi, M.; Iran, T. Variation of concrete strength due to pressure exerted on fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 10, p. 845-852, 1980.
15. Powers, T.C.; Copeland, L.E.; Hayes, J.C. Mann HM. Permeability of Portland cement paste. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 51, p. 285-298, 1955.
16. British Standard. **BS EN 12390-3: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens**, 2002.
17. Cannillo, V.; Manfredini, T.; Montorsi, M. Boccaccini AR. Use of numerical approaches to predict mechanical properties of brittle bodies containing controlled porosity. **Journal of Materials Science**, v. 39, p. 4335-4337, 2004.
18. Regourd, M. Microstructure of high strength cement paste systems. **Materials Research Society Symposia**, 1985.
19. Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. **NBR 8953/92: concreto para fins estruturais - classificação por grupos de resistência**.

INTRODUÇÃO AOS PRINCÍPIOS DE CONFORMAÇÃO CERÂMICA

JÜRGEN G. HEINRICH

Publicado pela Ceramic Forum International (CFI) 2004

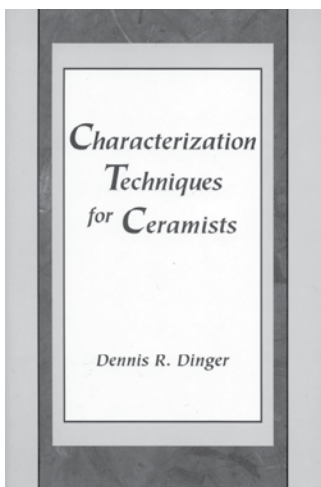


CONTEÚDO:

- *Princípios gerais*
- *Caracterização de suspensões*
- *Plasticidade de sistemas cerâmicos*
- *Granulação*
- *Conformação*
- *Colagem de barbotina*
- *Conformação plástica*
- *Prensagem*
- *Novos desenvolvimentos*

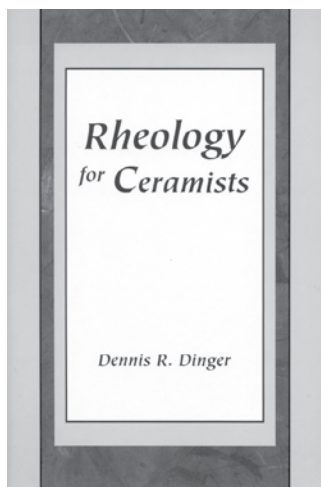
LIVRO, EM INGLÊS E ALEMÃO, NA FORMA DE CD-ROM COM MAIS DE 10 FILMES MOSTRANDO EM DETALHES A TEORIA APRESENTADA NO TEXTO.

LIVROS DENNIS R. DINGER

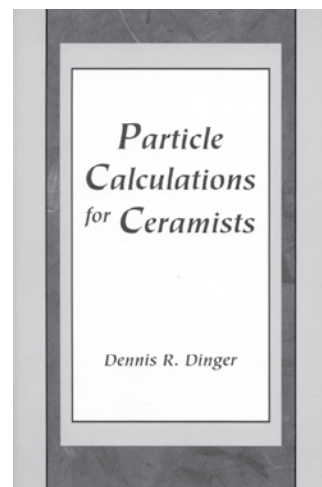


Atualmente os ceramistas dispõem de um considerável número de técnicas de caracterização que, se apropriadamente utilizadas, ajudam a compreender os comportamentos e características observados.

O objetivo do presente livro é apresentar de modo simples e aplicado considerável parte dessas técnicas. São 34 capítulos abordando aspectos relacionados a física de partículas, propriedades térmicas, raios X, química, reologia, espectroscopia, microscopia, etc.



Reologia sempre é vista como uma coisa complicada. O objetivo deste livro é quebrar esse mito e mostrar que, quando tratado de forma apropriada e aplicada à realidade do dia-a-dia do ceramista no chão de fábrica, o comportamento reológico pode ser compreendido e dominado. Para isso o autor apresenta uma série de exemplos práticos e aborda de forma simples, direta e aplicada todos os temas relacionados à reologia de suspensões de partículas cerâmicas.



O processamento cerâmico começa com pós. Atualmente há muitas técnicas que podem ser utilizadas para a caracterização desses pós. Entretanto, a interpretação dos resultados e sua utilização no controle do processo não é trivial. Nesse contexto o presente livro trata de forma simples e aplicada de vários temas, tais como, área superficial, barbotinas, distribuição de tamanho de partículas e suas várias formas de representação, interpretação e utilização, etc.

Os interessados em comprar os livros acima, entrar em contato com a nossa gerente editorial Patrícia, através do fone (16) 3351.8249 ou e-mail: patricia@ceramicaindustrial.org.br.