

Influência do teor de alumina (Al_2O_3) na performance mecânica de porcelanatos sob diferentes condições de queima

Reginaldo Francisco Zeferino Junior^{a*}, Fábio Rosso, Reinaldo Luiz da Silva Boaroli^a, Ana Paula Martins^a

^aColégio Maximiliano Gaidzinski, Rua Dr Edson Gaidzinski 352, Cocal do Sul, Santa Catarina, Brasil

*e-mail: reginaldozeferinojr@gmail.com

Resumo

O porcelanato é um revestimento cerâmico com ampla visibilidade no mercado nacional e internacional na área de construção civil, sendo empregado em aplicações internas e externas, em razão de sua baixa absorção de água, elevada resistência mecânica e boa durabilidade. Entretanto, apesar destas propriedades, o produto pode apresentar fraturas durante as etapas de manuseio, transporte e instalação, além de custos logísticos elevados associados à sua espessura e massa específica. Diante deste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da adição de óxido de alumínio (Al_2O_3) em massas de porcelanato esmaltado, visando à melhoria das propriedades mecânicas do material e redução de sua espessura. Para tal, formulou-se massas com diferentes teores de Al_2O_3 e realizados ensaios de absorção de água, resistência mecânica à flexão e densidade aparente, em corpos de prova sinterizados em diferentes temperaturas. Os corpos de prova confeccionados para os testes não possuíam aplicação de camada vítrea (não esmaltados), afim de permitir avaliar exclusivamente a influência do teor de Al_2O_3 na matriz cerâmica. Os resultados demonstraram que o aumento do teor de Al_2O_3 foi responsável por promover um incremento significativo na resistência mecânica à flexão, especialmente quando empregada temperaturas de queima superiores às usualmente empregadas na produção convencional de porcelanatos. Contudo, observou-se que ganhos semelhantes de resistência podem ser alcançados sem o aumento da temperatura de queima, desde que seja realizado um balanço químico adequado da composição da massa cerâmica. Em relação aos testes realizados, os ensaios de absorção de água e densidade aparente se mostraram pouco sensíveis tanto a variação do teor de alumina quanto às temperaturas de queima adotadas, permanecendo praticamente constantes em todas as condições avaliadas. Assim, os resultados obtidos fornecem subsídios para ampliação do estudo e posterior aplicação industrial em porcelanatos esmaltados.

Palavras-chave: Massa cerâmica, Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Resistência mecânica à flexão.

1. INTRODUÇÃO:

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, ANFACER, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial de produção de revestimentos cerâmicos, figurando como terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos, o que acaba por evidenciar a importância tecnológica e econômica da indústria brasileira de revestimentos cerâmicos no cenário internacional [1]. Este cenário é impulsionado

pela crescente competitividade ao longo do globo, juntamente com a evolução tecnológica e aprimoramento contínuo dos processos produtivos [2] [14].

Neste contexto, o porcelanato se destaca como um dos principais produtos comercializados dentro e fora do país, tal aceitação de mercado está intimamente ligada as propriedades técnicas superiores em comparação aos revestimentos cerâmicos tradicionais. Onde, segundo dados do INMETRO, a consolidação do porcelanato está diretamente relacionada à evolução dos processos produtivos e ao controle rigoroso de matérias-primas e parâmetros de queima [2] [9] [13].

O porcelanato é definido como um revestimento cerâmico obtido através de massas de baixa porosidade, conformadas por prensagem e submetidas a elevadas temperaturas de sinterização, dando origem a um produto denso, homogêneo, com baixa absorção de água e boas propriedades mecânicas. Tais características são de suma importância para a aplicação em ambientes internos e externos, conferindo elevada resistência à abrasão, à compressão, à flexão e ao ataque químico, associadas à uniformidade de coloração e microestrutura refinada. De modo geral, as placas convencionais apresentam uma espessura que varia entre 9 e 12 mm, apresentando resistência mecânica à flexão da ordem de 17 kgf/mm², valor diretamente relacionado ao baixo índice de porosidade do material [8] [9] [15].

Embora tenha elevado desempenho técnico, o porcelanato ainda possui limitações mecânicas e de logística, tais limitações possuem um destaque na ocorrência de fraturas durante o transporte e ao aumento dos custos associados à massa e à espessura das placas. Estes problemas acabam cada vez mais relevantes frente à crescente demanda de produtos de grandes formatos e menor espessura, exigindo maior resistência mecânica sem comprometer as propriedades físicas. Com este cenário em mente, estratégias de reformulação das massas cerâmicas se tornam cada vez mais investigadas, tendo destaque a incorporação de matérias-primas de alto desempenho, a exemplo do óxido de alumínio (Al₂O₃) [3] [15] [17].

Devido às suas propriedades abrasivas, elevada dureza, alto ponto de fusão, estabilidade química e excelente resistência mecânica e térmica, a alumina acaba sendo amplamente utilizada na indústria cerâmica. Estas características fazem da alumina um componente estratégico na formulação de cerâmicas técnicas e porcelanas aluminosas, possuindo a capacidade de promover ganhos significativos de desempenho quando incorporado nas corretas proporções na matriz cerâmica. Entretanto, devido a sua alta refratariedade, materiais com altos teores de alumina tendem por exigir temperaturas de queima superiores às comumente empregadas na produção de porcelanatos convencionais, criando desafios energéticos e tecnológicos ao processo industrial [4] [11] [15] [16].

O desenvolvimento de massas aluminosas para porcelanatos acaba por se encontrar na interface entre a cerâmica tradicional e a cerâmica técnica, tendo em mente conciliar alto desempenho mecânico com viabilidade industrial. A cerâmica técnica, conhecida pelo seu alto desempenho, caracterizou-se durante os anos pelo seu controle rigoroso de composição química e microestrutura, tal controle se deve a aplicações que visam estabilidade dimensional, resistência térmica e propriedades mecânicas superiores como requisitos essenciais. Materiais à base de alumina, zircônia, mulita, carbetos e nitretos possuem uma ampla empregabilidade em setores como o automotivo, elétrico, eletrônico, químico e metalúrgico, o que reforça o potencial de transferência de conceitos desse segmento para o desenvolvimento de revestimentos cerâmicos avançados [1] [5] [6] [7].

Um exemplo consolidado dessa convergência tecnológica é a porcelana aluminosa, sendo tradicionalmente formulada a partir de caulim, argilas, quartzo, feldspato e alumina, e queimada em temperaturas próximas ou iguais à 1300 °C. Na etapa de sinterização ocorrem transformações de fases fundamentais, sendo o principal destaque a formação de mulita (3Al₂O₃·2SiO₂), fase cristalina que proporciona ao material elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e baixa expansão térmica do material. Através de reações sólido-líquido entre sílica e alumina acaba ocorrendo a formação da mulita, sendo favorecida através do aumento do teor de Al₂O₃ quanto por um balanço químico adequado da composição da massa [11] [12] [15].

O processo de transformações microestruturais associadas à vitrificação e à formação de fases cristalinas, a exemplo da mulita primária e secundária, desempenham um papel de suma importância no processo de densificação e desenvolvimento das propriedades finais do porcelanato. Em patamares de 1000–1100 °C, a formação de fase líquida promove o rearranjo dos grãos e redução da porosidade, ao mesmo tempo reações de dissolução e recristalização favorecem o crescimento

de cristais alongados de mulita, que por sua vez reforçam a matriz vítrea. Diante estas informações, o controle da composição química e condições de queima possui papel determinante para maximizar a resistência mecânica sem que haja comprometimento de outros parâmetros, tais como absorção de água e densidade aparente [12] [15] [16] [17] [18].

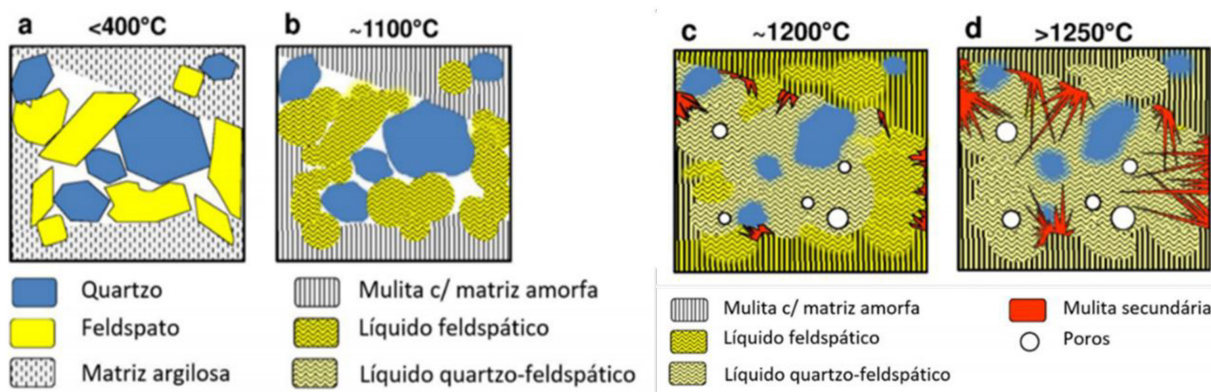


Figura 1. Evolução microestrutural de materiais porcelânicos durante a queima [18]

Exposto os conceitos, a investigação da influência do de Al₂O₃ em massas de porcelanato, conjuntamente associada à análise das transformações de fases na etapa de sinterização, apresenta uma abordagem promissora para o desenvolvimento de revestimentos cerâmicos com maior resistência mecânica e potencial de redução de espessura, tendo em mente manter compatíveis com a exigências normativas e industriais do setor de revestimentos cerâmicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

Através de uma formulação base de porcelanato se estabeleceu modificações composicionais com o intuito de avaliar a influência do teor de óxido de alumínio (Al₂O₃) nas propriedades do material. Para tal, obteve-se as análises químicas das matérias-primas empregadas, permitindo um correto balanço químico dos óxidos constituintes das massas cerâmicas. Com base nas análises feitas a partir dos óxidos constituintes, foram definidas seis formulações distintas, sendo uma formulação padrão (PD) e cinco formulações modificadas (F1 a F5), conforme apresentado na Tabela 1.

Nas formulações F1 e F2, obteve-se o aumento do teor de Al₂O₃ através do ajuste do balanço dos óxidos das matérias-primas convencionais. Na formulação F3, além da modificação do balanço químico houve a adição direta de óxido de alumínio, enquanto nas formulações F4 e F5, manteve-se a formulação base promovendo exclusivamente a adição de Al₂O₃, de modo a isolar o efeito desse óxido na composição final da massa.

Tabela 1. Composição química das formulações (% em massa)

Formulações	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P.F.
PD	63,83	21,63	0,58	2,08	0,73	1,07	2,36	2,84	4,60
F1	60,92	23,85	0,51	1,94	1,03	1,00	2,47	2,59	4,53
F2	58,20	26,23	0,40	1,70	1,32	0,87	2,52	2,18	4,38
F3	55,43	29,74	0,38	1,62	1,26	0,83	2,40	2,07	4,17
F4	52,91	32,94	0,36	1,54	1,20	0,79	2,29	1,98	3,98
F5	56,99	30,02	0,52	1,86	0,65	0,96	2,11	2,53	4,11

As formulações foram submetidas ao processo de moagem via úmida, utilizando moinhos do tipo gira-rápido de capacidade de 1000 mL. Após o processo de moagem, as suspensões obtidas do processo anterior foram secas em estufa a 100 °C até a completa eliminação de umidade, logo em seguida, o material já seco foi desagregado manualmente e peneirado em malha 325 mesh para

homogeneização granulométrica. Os pós cerâmicos foram umidificados com 7% em massa de água afim de garantir plasticidade para a conformação por prensagem, onde o processo de conformação foi feito por prensagem uniaxial em prensa hidráulica manual, ao todo foram confeccionados 15 corpos de prova para cada formulação desenvolvida, sendo utilizados aproximadamente 20 g de material por amostra e uma pressão de 210 kgf/cm².

Os corpos de prova foram submetidos as medições iniciais de comprimento, largura, espessura e massa, sendo colocados posteriormente à secagem em estufa a 100 °C durante 4 horas, após este período na estufa as amostras foram retiradas e deixadas esfriar até a temperatura ambiente para novamente realizar as medidas das dimensões e massa dos corpos de prova para averiguação posterior da expansão pós-prensagem e da retração de secagem. Feitas as medições passou-se para a etapa de sinterização, sendo selecionados 10 corpos de prova de cada formulação, exceto a formulação padrão, esses 10 corpos de prova foram queimados à temperatura de 1345 °C, enquanto os demais foram queimados a 1200 °C. A formulação padrão apresentou uma excessiva expansão quando queimada a 1200 °C, assim sendo necessário que as demais amostras do padrão fossem sinterizadas a 1190 °C.

Posteriormente a etapa de sinterização, os corpos de prova foram resfriados naturalmente até a temperatura ambiente e novamente sendo realizadas as medições das dimensões finais e de massa, para a avaliação da retração de queima. A absorção de água foi determinada através do método de fervura conforme ABNT NBR ISO 10545-3, para a realização dos ensaios mecânicos foi necessário secar os corpos de prova em estufa a 100 °C por 72 horas para atingirem a mesma massa que apresentaram antes de submetidas ao ensaio de absorção de água – lembrando que foram utilizadas as mesmas amostras, pois o ensaio de absorção de água não se trata de um ensaio destrutivo sendo possível utilizar as mesmas amostras após secas as amostras.

Com as amostras secas, realizou-se o ensaio de resistência mecânica à flexão, utilizando equipamento do tipo crômetro da Empresa Mohawk Brasil, conforme os procedimentos adotados para esse tipo de ensaio descritos na ABNT NBR ISO 10545-4, Por fim, realizou-se a determinação da densidade aparente (DAP) nas amostras remanescentes, para correlacionar densificação, porosidade e desempenho mecânico das diferentes formulações avaliadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com a finalização dos ensaios realizados com as amostras, iniciou-se a análise dos resultados obtidos para as diferentes formulações testadas, tendo como objetivo principal avaliar a influência do teor de óxido de alumínio (Al₂O₃) incorporado à massa de porcelanato em relação as características físicas e mecânicas, incluindo densidade aparente, absorção de água, retração de queima e resistência mecânica à flexão em três pontos.

A formulação padrão apresentou deformação pirolástica ao ser sinterizada a 1200 °C, evidenciando excesso de fase líquida nessa condição de queima, em função desse comportamento as demais amostras do material padrão foram sinterizadas a 1190°C. Para as demais formulações queimadas na temperatura de 1200 °C (Tab. 2), pode-se perceber que as formulações F1 e F2 apresentaram valores de absorção de água dentro dos limites da norma, em contrapartida as formulações F3, F4 e F5, que apresentaram maiores teores de Al₂O₃, exibiram valores de absorção superiores aos limites recomendados, indicando insuficiente densificação nessa temperatura, atribuída ao aumento do caráter refratário da massa.

Na temperatura de sinterização de 1345 °C (Tab. 3), todas as formulações apresentaram baixos valores de absorção de água, o que evidencia um maior grau de densificação, porém as formulações F1 e F2 apresentaram sinais de expansão pirolástica, associados à formação excessiva de fase líquida. Observou-se a promoção da redução da deformação pirolástica das amostras conforme o aumento progressivo dos teores de Al₂O₃, comportamento relacionado à elevada refratariedade da alumina, contribuindo diretamente para o aumento da viscosidade da fase líquida e maior estabilidade dimensional durante a etapa de queima.

Tabela 2. Testes de resistência mecânica, absorção de água e retração de queima (1200 °C)

Formulação	Temperatura (°C)	Retração de Queima (%)	Resistencia Mecânica (Kgf/cm ²)	Absorção de água (%)
PD	1190	7,78	583,529	0,127
PD	1200	5,76	473,279	0,072
F1	1200	8,73	559,536	0,044
F2	1200	8,89	616,242	0,147
F3	1200	8,46	495,714	1,858
F4	1200	8,25	441,697	4,188
F5	1200	9,25	508,544	2,179

Tabela 3. Testes de resistência mecânica, absorção de água e retração de queima (1345 °C)

Formulação	Temperatura (°C)	Retração de Queima (%)	Resistencia Mecânica (Kgf/cm ²)	Absorção de água (%)
F1	1345	6,07	386,981	0,257
F2	1345	7,75	376,828	0,081
F3	1345	8,18	425,429	0,046
F4	1345	8,08	596,153	0,233
F5	1345	9,17	635,537	0,122

Em relação aos resultados do ensaio de resistência mecânica à flexão feitos com as amostras sinterizadas a 1200 °C, a formulação F2 apresentou o melhor desempenho mecânico enquanto para as formulações com maiores teores de Al₂O₃ (F3, F4 e F5), tiveram uma redução da resistência mecânica, associado ao aumento da absorção de água e da conseqüente maior porosidade residual, oriunda da limitada formação de fase líquida nessa condição térmica. Todavia, para as amostras sinterizadas a 1345 °C houve uma inversão desse comportamento, em que as formulações com os maiores teores de Al₂O₃, em especial a formulação F5, apresentaram os maiores valores de resistência mecânica atribuída à maior densificação e formação significativa de fase de mulita. Enquanto as formulações F1 e F2 exibiram valores inferiores de resistência mecânica, conseqüência da presença de poros gerados pela expansão pirolástica observada nessas composições em temperaturas elevadas.

De forma geral, os resultados indicam que o aumento do teor de Al₂O₃ possui a tendência de elevar a resistência mecânica do porcelanato, desde que o nível de porosidade, seja aberta ou fechada, possua um controle adequado, comportamento esse que está correlacionado diretamente à formação de fase de mulita, que acaba sendo favorecida pelos maiores teores de Al₂O₃ e temperaturas elevadas de sinterização, discutidos anteriormente pela literatura [15] [16] [17] [19]. Além disso, os resultados indicaram que o aumento da resistência mecânica não está exclusivamente ligado ao aumento dos teores de óxido de alumínio puro, conforme observado na formulação F2 sinterizada a 1200 °C, um balanço adequado entre óxidos presentes na massa de porcelanato pode resultar um desempenho mecânico maior, mesmo em temperaturas de queima menores, evidenciando a importância do controle da composição química no desenvolvimento de massas.

4. CONCLUSÕES:

Os resultados dos testes realizados demonstram que a incorporação de óxido de alumínio (Al₂O₃) em massas de porcelanato possuem uma influência significativa sobre o comportamento durante a etapa de queima, estabilidade dimensional e as propriedades físico-mecânicas do produto final. Em temperatura de queima mais baixas (≈1200 °C), formulações com teores moderados de óxido de alumínio apresentaram desempenho superior, tendo baixos percentuais de absorção de água e boa resistência mecânica, demonstrando que o equilíbrio adequado entre os óxidos fundentes e refratários possui um papel determinante para a densificação eficiente do porcelanato nessa faixa de temperatura.

Ao utilizar ranges de temperatura maiores (1345 °C), teores mais elevados de Al₂O₃ contribuem para a redução da deformação pirolástica e para o aumento da resistência mecânica, tal fato é associado

a refratariedade da alumina e formação de fase de mulita, responsável pelo reforço microestrutural do material. Em contrapartida, nesta faixa de temperatura formulações com menores teores de Al₂O₃ acabaram apresentando expansão piropástica e redução da resistência mecânica, isso deve-se da formação excessiva de fase líquida e do aumento da porosidade induzida por instabilidades na etapa de sinterização.

Com a adição de alumina há uma contribuição significativa para o aumento de densidade do material, fato que impacta potencialmente os custos logísticos relacionados ao transporte, desta forma o equilíbrio entre maior desempenho estrutural e menor espessura pode resultar em uma otimização logística, mantendo a viabilidade técnica e econômica do produto, dependendo da redução de espessura que poderá ser viabilizada. Ainda considerando as questões levantadas quanto à viabilidade logística e industrial acerca de massas aluminosas, trabalhos futuros poderão complementar com testes de tensão versus deformação para determinação da tenacidade à fratura, avaliações da facilidade de corte das placas cerâmicas — pois a tendência de ao aumentar o percentual de alumina na massa cerâmica, consequentemente pioramos o corte do material — e estimativas de custo da massa com adição de Al₂O₃ em relação à formulação padrão.

Assim, pode-se concluir que a melhoria da estabilidade dimensional e as propriedades físico-mecânicas do porcelanato não dependem exclusivamente da adição direta de óxido de alumínio puro, mas sobretudo do correto balanço químico da formulação, sendo capaz de promover a formação controlada de fases cristalinas e vítreas. Desta forma, o desenvolvimento de massas aluminosas, seja através da adição direta de óxido de alumínio ou apenas aumentando seu percentual através do balanço químico da formulação, permite a obtenção de porcelanatos com alto desempenho mecânico e estabilidade dimensional quando queimados em temperaturas adequadas, dessa forma viabilizando a redução da espessura e melhoria da resistência ao transporte e manuseio, conjuntamente mantendo as exigências tecnológicas da indústria cerâmica e as normas vigentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Colégio Maximiliano Gaidzinski e a equipe técnica da Empresa Mohawk Brasil, bem como aos seus colaboradores, pela disponibilização dos equipamentos, colaboração e orientação.

REFERÊNCIAS:

- [1] Abceram 2025. Cerâmica no Brasil: cerâmica técnica. Associação Brasileira de Cerâmica. <https://abceram.org.br/ceramica-tecnica>
- [2] Inmetro 2025. Revestimentos cerâmicos (pisos e azulejos). Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/revestimentos.asp>
- [3] Silva G 2025. Porcelanato ultrafino: saiba instalar. https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/porcelanato-ultrafino-saiba-instalar_9772_0_16
- [4] Alumina 2025. O que é alumina. <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-alumina.html>
- [5] Ceraltec 2025. Cerâmica técnica avançada. <http://www.ceraltec.com.br/ceramica-tecnica-avancada>
- [6] Ceramtec 2025. Materiais cerâmicos. <https://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/>
- [7] Abceram 2025. Cerâmica no Brasil: cerâmica técnica. Associação Brasileira de Cerâmica. <https://abceram.org.br/ceramica-tecnica>
- [8] Cerâmica Elizabeth 2025. 6 características de porcelanatos e cerâmicas que você precisa conferir. <http://www.ceramicaelizabeth.com.br/pt/blog/6-caracteristicas-de-porcelanatos-e-ceramicas-que-voce-precisa-conferir>
- [9] Archtrends 2025. O que é porcelanato? <https://archtrends.com/blog/o-que-e-porcelanato/>
- [10] Ariane et al 2019. Porcelana luminosa. São Paulo: Prezi, Color.
- [11] Chinellato A L, Souza D P F 2004. Porcelanas elétricas aluminosas: parte I, revisão da literatura. *Cerâmica* 50, 313, 62–68.
- [12] Fernandes L 2014. Formação de mulita (3Al₂O₃·2SiO₂) in situ a partir de diferentes tipos de sílicas amorfas sintéticas (SAS's). São Carlos: Universidade de São Paulo. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-24092014-191301/pt-br.php>
- [13] Archtrends 2025. O que é porcelanato. <https://archtrends.com/blog/o-que-e-porcelanato/>
- [14] Ceramics of Brazil 2025. Brasil é o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos. <https://www.ceramicsofbrazil.com/noticias/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-mundial-de-revestimentos-ceramicos>
- [15] Kingery W D, Bowen H K, Uhlmann D R 1976. *Introduction to ceramics*. New York: John Wiley & Sons.
- [16] Rashid M 2013. *Ceramic processing and sintering*. New York: Marcel Dekker Inc.
- [17] Reed J S 1995. *Principles of ceramics processing*. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience.
- [18] Zanelli C, Raimondo M, Guarini G, Dondi M 2011. Microstructural evolution of porcelain stoneware during firing. *J Eur Ceram Soc* 31, 6, 989–1000.
- [19] Lee W E, Rainforth W M 1994. *Ceramic microstructures: property control by processing*. London: Chapman & Hall.