

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Zeólitas

2.1.1. Características Gerais

A estrutura das zeólitas é baseada em tetraedros de TO_4 (T= Si, Al, P, etc.) que se ligam entre si através de um átomo de oxigênio comum para formar unidades básicas de construção (u.b.c.)¹⁷, como esquematizado na Figura 1.

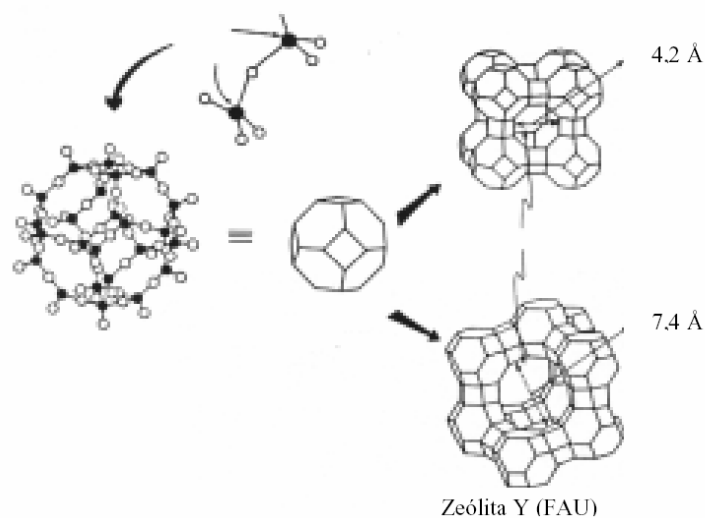


Figura 1- Gênese das estruturas FAU e LTA a partir de tetraedros de TO_4 ¹⁷.

Os tetraedros primários são formados por um átomo denominado T cercado de quatro átomos de oxigênio localizados nos vértices. Arranjos tridimensionais variados das unidades básicas de construção resultam nas superestruturas contendo os canais de dimensões moleculares que caracterizam as peneiras moleculares¹⁸. O sistema poroso pode ser uni-, bi- ou tridimensional. A dimensionalidade do sistema de canais pode determinar a suscetibilidade de

uma zeólita à desativação. A mobilidade das moléculas reagentes no interior de uma zeólita contendo canais em todas as três direções é maior do que em um sistema unidimensional e, portanto, menor a possibilidade de bloqueio dos canais ¹⁹.

Esta estrutura microporosa faz com que as zeólitas apresentem uma superfície interna muito maior que a externa e permite a transferência de matéria entre o espaço intracristalino e o meio que o rodeia, limitada não somente pelo diâmetro dos poros (seletividade física), mas também pelas propriedades físico-químicas do material (seletividade química) ¹⁰. Por essa propriedade, as zeólitas pertencem a uma família chamada de peneiras moleculares. Dependendo dos elementos presentes na estrutura, as peneiras moleculares podem ser denominadas como galossilicatos, ferrissilicatos, borossilicatos, galoaluminofosfatos, aluminofosfatos, aluminossilicatos, germanoaluminofosfatos, etc. O termo zeólita, por sua vez, é utilizado apenas em relação aos aluminossilicatos, ou seja, os tetraedros de TO_4 que formam a estrutura são constituídos apenas por átomos de silício ou de alumínio. Sendo o alumínio um elemento trivalente, os tetraedros AlO_4^- induzem cargas negativas na estrutura, como mostrado na Figura 2, as quais são neutralizadas por cátions de compensação. Estes cátions junto com moléculas de água ocupam o espaço intracristalino destes aluminossilicatos.

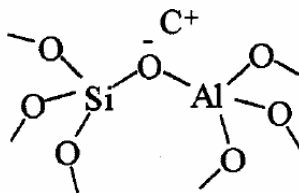


Figura 2 – Representação de uma rede de aluminossilicato, com o cátion de compensação C^+

O arranjo espacial contínuo dessas estruturas pode ser visualizado através da existência de unidades secundárias (Figura 3), originadas da união dos tetraedros (TO_4).

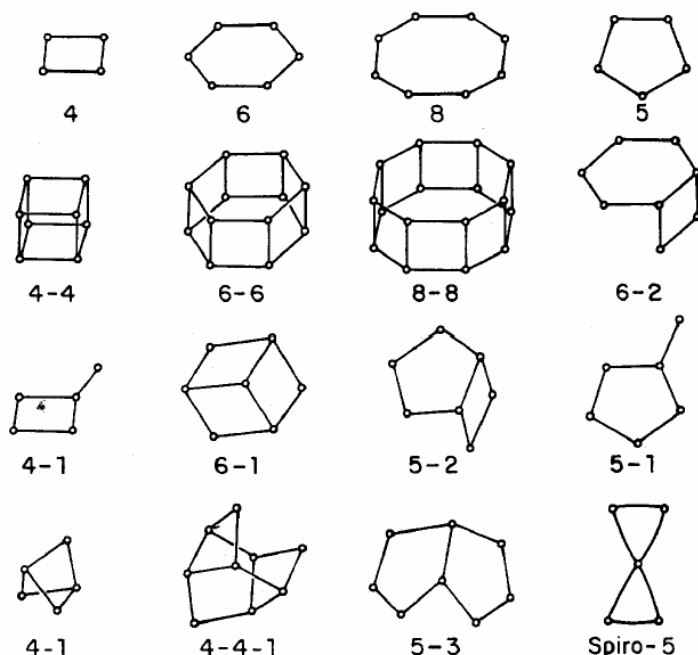


Figura 3 - Unidades secundárias de construção ²⁰.

A estrutura de uma zeólita define, sua possível aplicação industrial tanto em processos físicos de separação e purificação, quanto em processos químicos de refino ¹⁰. Por isso torna-se tão importante a elucidação das estruturas dos materiais ²¹. As aplicações destes materiais incluem separação por adsorção, catálise de reações envolvendo hidrocarbonetos, além de poderem ser usados como suporte de catalisadores metálicos ou de óxidos metálicos. Estes processos são o resultado do efeito de peneiramento molecular de reagentes e produtos que depende do tamanho e da forma dos canais e cavidades da zeólita e das dimensões das moléculas dos reagentes e produtos que ingressam ou difundam pelos canais e cavidades ^{10, 22}.

2.1.2. Síntese de Zeólitas

A síntese de zeólitas ocorre via nucleação seguida de crescimento espontâneo desses mesmos núcleos depois que atingem um tamanho crítico ²³. A pesquisa na síntese destes materiais está centrada na preparação de novas estruturas e no entendimento do mecanismo de nucleação e crescimento da zeólita. A caracterização de um novo material como zeólita deve ser considerada

com cuidado e envolve a contribuição de uma variedade de técnicas que permitem a boa elucidação das propriedades e características do material ²¹.

Via de regra, peneiras moleculares são sintetizadas a partir de géis aquosos contendo fontes dos elementos estruturais (Al, Si, P, etc.), um agente mineralizante (F^- , OH^-) e o agente direcionador da estrutura desejada (uma amina orgânica ou um sal de amônio quartenário).

Água e íons hidroxila são agentes mineralizantes clássicos em sínteses hidrotérmicas. Mineralizantes são espécies que ajudam a dissolução da fonte de sílica e sua remineralização ²⁴, e também ajudam a estabilização da estrutura a ser formada. Os íons alcalinos hidratados dissolvem óxidos anfóteros promovendo sua mobilidade e a mistura de espécies moleculares e iônicas. A água por sua vez, estabiliza a estrutura pelo preenchimento de seus canais e cavidades ²³.

Os géis são cristalizados em autoclaves a temperaturas entre 100^o e 200^oC, sob pressão autógena, por períodos que podem variar desde algumas horas até várias semanas. O sólido obtido, depois de lavado para eliminação de resquícios de gel não cristalizado, deve ser seco e calcinado entre 500 e 600^oC para queima do direcionador de estrutura ainda presente no interior dos canais ²⁵. É necessário também um alto pH, para garantir que as soluções de aluminatos sejam compostas quase exclusivamente por $Al(OH)_4^-$. Por outro lado, nas soluções de silicato coexistem vários ânions de acordo com a natureza e concentração alcalina do meio ²³. Um dos prováveis mecanismos da síntese hidrotérmica de zeólitas, chamado “mão-na-luva” (hand-in-the-glove), está esquematizado na Figura 4 ²⁶.

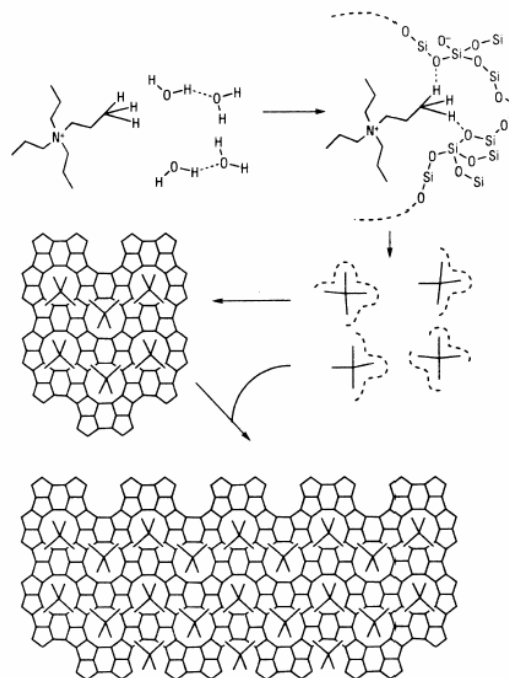


Figura 4 - Mecanismo “mão-na-luva” na síntese de zeólitas ²⁵.

O mecanismo consiste na organização de tetraedros TO₄ segunda uma dada topologia em torno do direcionador de estrutura orgânico durante as etapas de formação ou nucleação do gel, produzindo a unidade primária a partir do qual o retículo cristalino iniciará seu crescimento. O direcionador de estrutura tem pelo menos duas funções na síntese de zeólitas. Além de definir a topologia específica, em que fatores como densidade de carga, forma e volume da molécula são determinantes; o direcionador também atua para moderar o pH do gel de síntese, portanto tanto a solubilidade quanto a constante de dissociação (pK_b) da amina são fatores a ser considerados na escolha do direcionador mais apropriado para cada estrutura. Uma dada topologia geralmente pode ser sintetizada com o uso de vários direcionadores diferentes e a maioria dos direcionadores pode ser utilizada para a síntese de mais de uma estrutura ²⁷.

Outro parâmetro de grande importância na síntese é a presença e natureza dos cátions inorgânicos, uma vez que eles têm uma grande influência no processo de cristalização. Esses cátions podem exercer três tipos de efeito na reação: o primeiro como cátions estruturantes que rompem a organização entre as moléculas de água (formada através de pontes de hidrogênio) e geram uma organização mais ordenada, uma vez que a hidratação desses cátions é favorecida; o segundo tipo é de cátions desestruturantes: quando a relação

carga/raio dos cátions é pequena e neste caso o cátion não tem grande capacidade de polarização, isto é, ao romper as ligações entre as moléculas de água não formam outras ligações mais fortes. Cátions orgânicos grandes, pouco carregados e pouco hidrofílicos é o terceiro tipo observado. Eles não rompem a organização da água e favorecem as pontes de hidrogênio em sua vizinhança. A água se organiza ao redor dessas moléculas, formando “clusters” (Figura 5). Propõe-se que da substituição parcial destas moléculas de água por ânions silicato ou aluminossilicato presentes em solução, e da interação destas espécies como o cátion orgânico, depende a formação de estruturas estáveis a partir das quais tem lugar a nucleação e o crescimento cristalino ²².

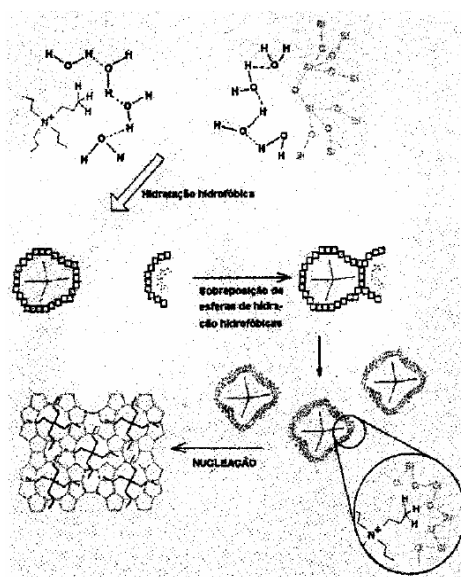


Figura 5 - Proposta de mecanismo de formação da zeólita ZSM-5, baseada na presença de cátions estruturantes II ²².

2.1.3. Modificações das Propriedades das Zeólitas

A química de superfície tem grande aplicação industrial e as zeólitas têm uma participação significativa nestes processos, visto a sua grande capacidade catalítica. Sua atividade depende da estrutura da rede (topologia e forma dos poros), assim como da densidade e força dos sítios ácidos.

Zeólitas estruturalmente diferentes, com propriedades características, podem ser obtidas ajustando-se variáveis que participam do processo de síntese, como temperatura, pressão, concentração, tempo, pH, fontes de alumínio, silício e contraíons catiônicos ¹³.

Mesmo após a síntese pode-se agir sobre a zeólita, alterando sua composição química e, conseqüentemente, suas propriedades. Para modificar estas propriedades, ou introduzir novos centros ativos na estrutura de modo a ampliar seu uso como catalisador, pode-se substituir isomorficamente silício por outros átomos T^{III} ou T^{IV} como já citado ²².

Um grande número de compostos podem ser introduzidos nas zeólitas para funcionar como centros ativos: (i) metais nobres (Pd, Pt...), (ii) metais de transição (Ni, Co...), (iii) óxidos metálicos (ZnO, CuO, NiO...), sulfetos metálicos (NiS, Co/MoS) e complexos metálicos. Estes componentes podem ser introduzidos por métodos que incluem: mistura física do componente, impregnação da zeólita, deposição química a vapor (CVD), troca iônica e adsorção ²⁸.

A estabilidade da ligação química entre os metais introduzidos e o retículo cristalino das peneiras é um dos principais entraves à aplicação de peneiras moleculares isomorficamente substituídas como catalisadores heterogêneos em fase líquida. Os principais fatores que influenciam a substituição do alumínio ou fósforo por metais de transição são: (i) a compatibilidade entre o raio iônico do metal substituinte e o oxigênio e (ii) a geometria assumida pelo metal substituinte. A incompatibilidade entre o retículo e o metal substituinte resulta no aparecimento de falhas estruturais no cristal e, mais graves, lixiviação dos metais substituintes para o meio reacional durante a reação catalítica em fase líquida ²⁵.

Para que ocorra uma substituição isomórfica, ou seja, substituição dos átomos formadores da estrutura por outros, sem que ocorra a modificação da mesma, é necessário seguir o critério de Pauling, que define que tal substituição é possível, quando se respeita a razão r_c/r_o (raio do cátion/raio do oxigênio) que fica entre 0,141 e 0,225 para estruturas tetraédricas e iônicas ²⁹. Na prática, observa-se que a incorporação de cátions pode ocorrer mesmo se a razão $r(M^+)/r(O^{2-})$ exceder esse limite superior. A experiência também revela que mudanças na esfera de coordenação do cátion substituinte podem ser causadas por variações no estado de oxidação que resultam de processos de calcinação necessários para eliminação do direcionador de estrutura orgânica e da água remanescente na zeólita recém-sintetizada ¹⁹.

2.1.4. Classificação das Zeólitas

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) classifica as zeólitas utilizando um código de três letras baseado somente na estrutura, independente da composição química, como exemplificado na Tabela 1. Os microporos das zeólitas são classificados de acordo com o tamanho: poros pequenos ($< 4\text{Å}$), médios ($4 - 6\text{Å}$), grandes ($6 - 8\text{Å}$), ou supergrandes ($> 8\text{Å}$). Peneiras moleculares com poros maiores que 20Å , com paredes amorfas, são classificadas como mesoporosas²⁰.

Tabela 1 - Características dos poros de algumas peneiras moleculares³⁰.

Tamanho do microporo	Diâmetro do poro (Å)	Nome comum	Símbolo estrutural	Dimensionalidade *	Maior molécula adsorvível
Pequeno	4,1	Zeólita A	LTA	3	n-hexano
	5,3 x 5,6	TS-1, ZSM-5	MFI	3	Ciclohexano
Médio	3,9 x 6,3	AIPO-11	AEL	1	Ciclohexano
	5,5 x 6,2	ZSM-12	MTW	1	-
Grande	7,3	AIPO-5	AFI	1	Neopentano
	7,4	Zeólita X, Y	FAU	3	Tributilamina
	~6 x ~7	Zeólita β	BEA	3	-
Super grande	7,9 x 8,7	AIPO-8	AET	1	-
	12,1	VPI-5	VFI	1	Triisopropilbenzeno
Mesoporo	13,2 x 4,0	cloverita	CLO	3	-
	15-100	MCM-41		1	-

*Dimensionalidade 1= canais unidirecionais, 2= canais cruzados e 3= canais nas três direções x, y e z

2.2. A Zeólita MCM-22

A zeólita MC-22 foi desenvolvida por pesquisadores da Mobil e patenteada no ano de 1990¹⁵.

A patente menciona a possibilidade da preparação do material numa faixa de razões molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ desde 10 a 150 e a possibilidade da síntese com outros elementos como boro, ferro ou gálio ao invés de alumínio e, germânio em lugar de silício. Como agente direcionador orgânico cita-se uma série de aminas cíclicas como a ciclopentilamina, cicloheptilamina e

heptametilenoimina. No entanto, em todos os exemplos apresentados pela patente utilizou-se apenas silício e alumínio como átomos T, com razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 30 e hexametilenoimina (HMI) como agente direcionador orgânico. Além disso, menciona a possibilidade da síntese ser feita tanto em condição estática como sob agitação, em autoclaves de aço com reatores internos de teflon. A temperatura utilizada para a cristalização deste material pode variar desde 80°C até 225°C , por um período de tempo suficiente para que a cristalização ocorra à temperatura escolhida (variando de 24 horas a 60 dias de síntese).

O material, preparado de acordo com os exemplos da patente, tem uma área específica superior a $420\text{m}^2/\text{g}$ e alta estabilidade térmica, acima de 925°C ¹⁵. Pesquisadores³¹ comprovaram que a estrutura da MCM-22 possui microporos de 5Å de diâmetro, correspondentes aos canais sinusoidais de 10 membros presentes. Os valores encontrados foram de $453\text{m}^2/\text{g}$ para a área BET, $342\text{m}^2/\text{g}$ para a área de microporos, $111\text{m}^2/\text{g}$ para a área externa, volume total de poros de $0,53\text{cm}^3/\text{g}$ e volume de mesoporos igual a $0,17\text{cm}^3/\text{g}$.

2.2.1. Estrutura da MCM-22

Os primeiros estudos feitos sobre a estrutura da MCM-22 foram realizados por Leonowicz e colaboradores¹⁶, em 1994. Neste trabalho as técnicas de caracterização utilizadas foram difração de elétrons e de raios-X (síncrotron) e microscopia eletrônica de alta resolução.

A diferença entre a MCM-22 precursora (Figura 6) e a MCM-22 calcinada é devido à criação de ligações entre os anéis durante o procedimento de calcinação. A MCM-22 precursora possui uma camada bi-dimensional com estruturas de poros hexagonais. A condensação dos grupos OH durante a calcinação cria ligações na direção c, resultando num sistema tri-dimensional¹⁶.

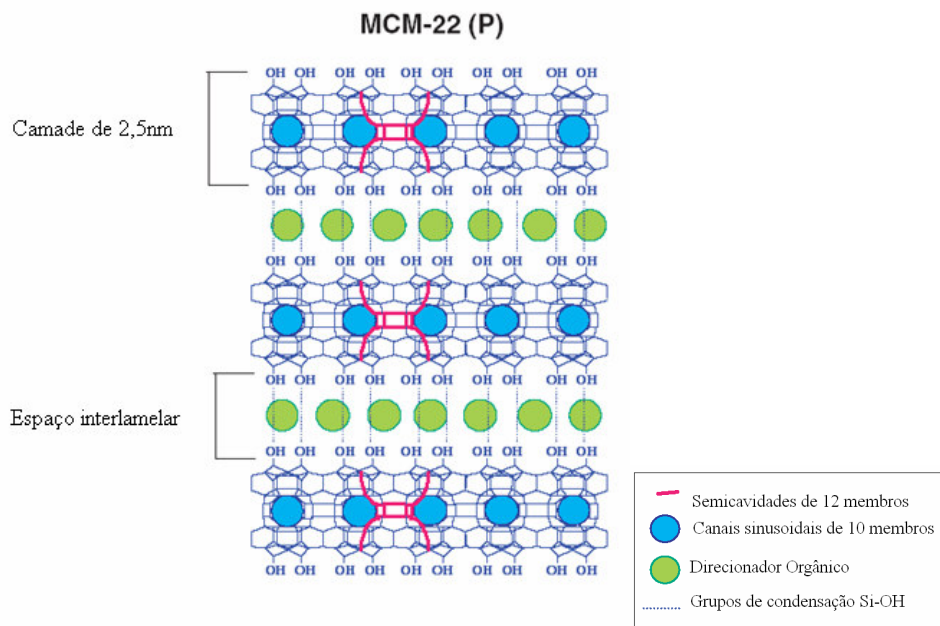


Figura 6 - Representação Estrutural esquemática da topologia MWW da zeólita MCM-22 sem calcinação ³².

Após a calcinação, a MCM-22 (Figura 7) apresenta dois sistemas de poros independentes, ambos acessíveis por aberturas formadas por anéis de dez membros (10MR). Um dos sistemas de poros é definido por canais sinusoidais de dez membros e bidirecionais. O outro consiste em supercavidades com um diâmetro interno livre de 0,71 nm (anel de 12 membros, 12MR) e uma altura interna de 1,82 nm. As supercavidades estão interconectadas através de anéis duplos de seis membros (D6R) e o acesso ocorre através de aberturas de 10MR ³³. A International Zeolite Association determinou essa estrutura como sendo MWW ³⁴.

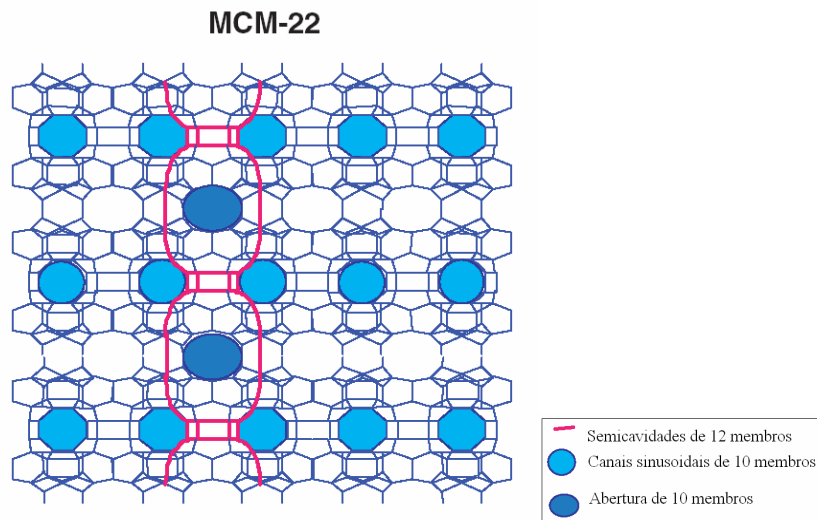


Figura 7 - Esquema da estrutura da MCM-22 calcinada ³².

Leonowicz e colaboradores ainda mostraram que a cela unitária da MCM-22 é constituída por 72 átomos do tipo T e composição química expressa como: $\text{Na}_x[\text{Al}_x\text{Si}_{72-x}\text{O}_{144}] \cdot n \text{H}_2\text{O}$. Foram determinados também por refinamento de Rietveld, os parâmetros de cela onde $a = 14,1145\text{Å}$ e $c = 24,8822\text{Å}$ para o material seco e calcinado ¹⁶.

2.2.2. Estruturas Isotípicas

A MCM-22 está estruturalmente relacionada à PSH-3, cuja patente é de 1984 ³⁵. Tal relação baseia-se na grande semelhança de difratogramas de raios-X destes dois materiais calcinados. De acordo com a patente, a PSH-3 é sintetizada utilizando como agente direcionador a hexametilenoimina, tendo diferentes fontes de silício e alumínio. Segundo a patente da MCM-22, esta não possui todos os componentes presentes na composição da PSH-3, além delas possuírem atividade catalítica e propriedades de adsorção diferentes ¹⁵.

O SSZ-25 é outra zeólita cujo difratograma de raios-X do material recém-preparado é similar ao MCM-22 no mesmo estágio de preparação. O SSZ-25 foi desenvolvido em 1989 e, na síntese de sua patente o direcionador orgânico

utilizado é o N,N,N,-trimetil-1-adamantanamônio ³⁶. Este mesmo direcionador é usado na síntese do ITQ-1, o isomorfo de pura sílica da MCM-22 ³⁷.

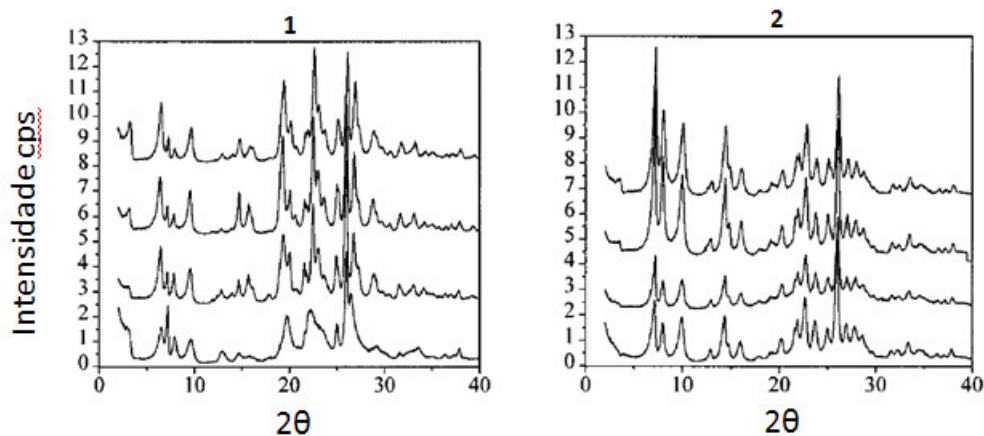


Figura 8 - Padrão de difração de raios-X (a partir da base para o topo) (1) das recém-sintetizadas MCM-22, SSZ-25 e ITQ-1: sintetizada usando TMAda⁺ sozinho e TMAda⁺ + HMI. Padrão de difração de raios-X (a partir da base para o topo) (2) dos materiais MCM-22, SSZ-25 e ITQ-1 calcinados: usando TMAda⁺ sozinho e TMAda⁺ + HMI ³⁴.

Existe ainda um borossilicato, o ERB-1 (1988), cujo difratograma de raio-X é similar ao da MCM-22 e demais estruturas já citadas. No entanto, em sua síntese usa-se piperidina como agente direcionador ³⁷.

Embora os difratogramas de raios-X indiquem que apresentam estruturas extremamente similares, há diferenças entre estas zeólitas devido aos agentes orgânicos usados, que tendo diâmetros diferentes podem gerar diferenças estruturais.

Quando estes materiais são submetidos à calcinação, eliminando-se o direcionador, ocorrem pequenas mudanças no perfil de seus difratogramas, tornando-se similares ao difratograma de outra zeólita, a MCM-49 (**Figura 9**), quando recém-sintetizada ³⁸.

A MCM-49 foi desenvolvida por pesquisadores da Mobil em 1993. Em sua síntese emprega-se a hexametilenoimina como direcionador. Sua estrutura tridimensional é obtida sem que o material necessite passar por um processo de calcinação para a retirada do agente orgânico de dentro de seus canais. A MCM-49 é o primeiro exemplo no qual uma zeólita pode ser obtida por síntese direta. De acordo com os pesquisadores da Mobil, o único fator que determinaria a

obtenção de uma zeólita ou outra, MCM-22 ou MCM-49, seria a razão molar HMI/Na que deve ser menor que dois para produzir a MCM-49. Ainda, segundo a referência, o enriquecimento da ligação T1-O1-T1 é responsável pela pequena diferença entre as duas zeólitas ³⁸.

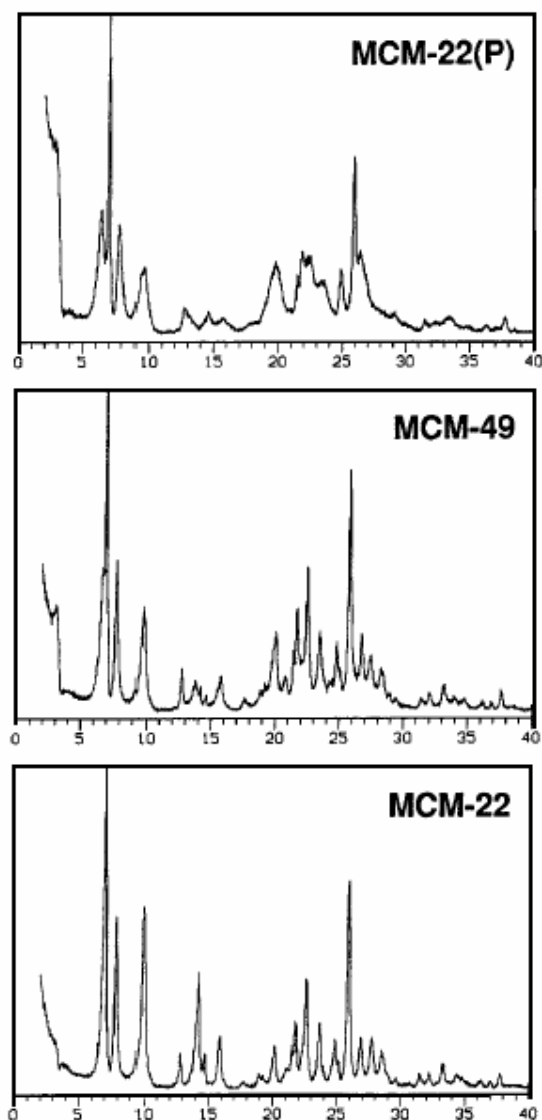


Figura 9 - Típico padrão de difração de raios-X da zeólita MCM-22(P) não calcinada, MCM-49 calcinada e MCM-22 calcinada ³⁹.

2.2.3. Derivados da Zeólita MCM-22

A zeólita MCM-22 possui um precursor zeolítico laminar que se torna um candidato atrativo para a expansão (separação das lâminas) e pilarização (processo no qual são colocados “pilares” entre as lâminas, mantendo-as separadas), podendo ter características muito interessantes como lâminas microporosas além de atividade tipo zeolítica, unindo esta às suas propriedades como adsorvente mesoporoso. Partindo desta característica, pesquisadores da Mobil, pilarizaram o precursor laminar da MCM-22 e obtiveram a estrutura MCM-36 (Figura 10) ⁴⁰, na qual as cavidades de $18 \times 7 \text{ \AA}$ não estão fechadas, mas sim separadas em duas metades por pilares. Este material conta com uma grande área superficial e um grande acesso às cavidades, mantendo o sistema de poros de 10MR ³³. A MCM-36 é um material cristalino isomorfo em relação a MCM-22. Para que ocorra a pilarização (Figura 11), o espaço interlamelar da MCM-22 é preenchido com cloreto de cetiltrimetilamônio (CTA⁺) e tetrapropilamônio (TPA⁺) seguindo a pilarização com sílica derivada da hidrólise do tetraetilortossilicato (TEOS). A pilarização concede ao material, que já apresenta características microporosas, propriedades mesoporosas ⁴⁰.

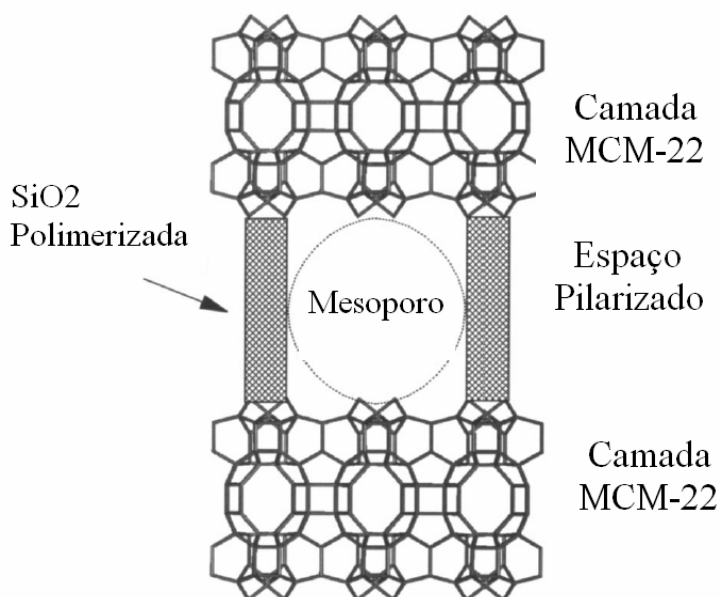


Figura 10 - Representação esquemática da estrutura da MCM-36 ⁴⁰.

A MCM-36 apresenta uma área externa muito maior do que a MCM-22, porém, há uma diminuição no número de sítios ácidos e os poros formados não têm uma uniformidade no tamanho. Visando preparar um material com área específica também elevada, porém com poros de dimensões homogêneas, Corma e colaboradores desenvolveram o ITQ-2, que é formado também por lâminas do MCM-22 organizadas num arranjo tipo “castelo de cartas”, que é termicamente mais estável e apresenta uma superfície externa bem definida e homogênea com uma área total de aproximadamente $841\text{m}^2/\text{g}$ ⁴¹.

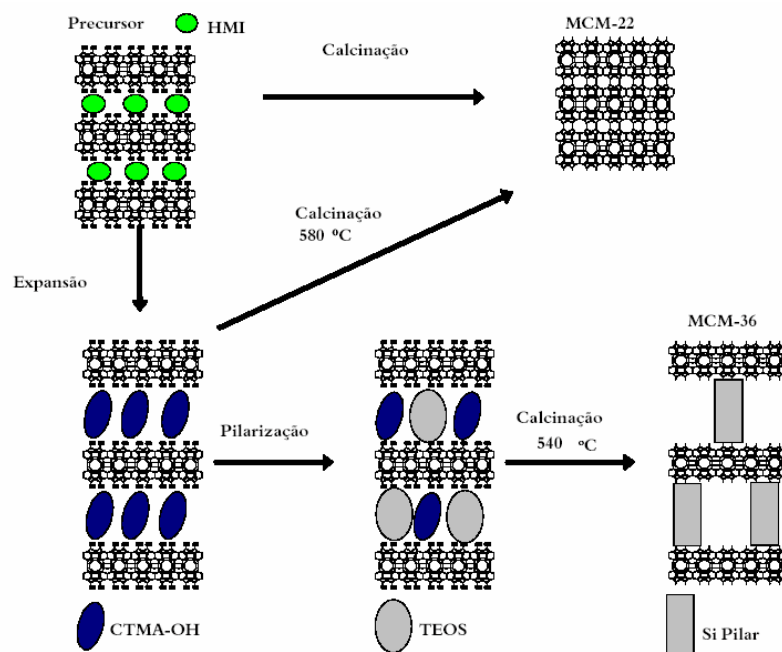


Figura 11 - Esquema do processo de pilarização do precursor, formando MCM-36 ³³.

O ITQ-2 é formado a partir do intumescimento da MCM-22 recém-preparada com cloreto de cetiltrimetilamônio (Figura 12). Em seguida, as lâminas

são separadas por ultrassom, o material passa por um tratamento ácido e em seguida é submetido à calcinação para a retirada do material orgânico ⁴¹.

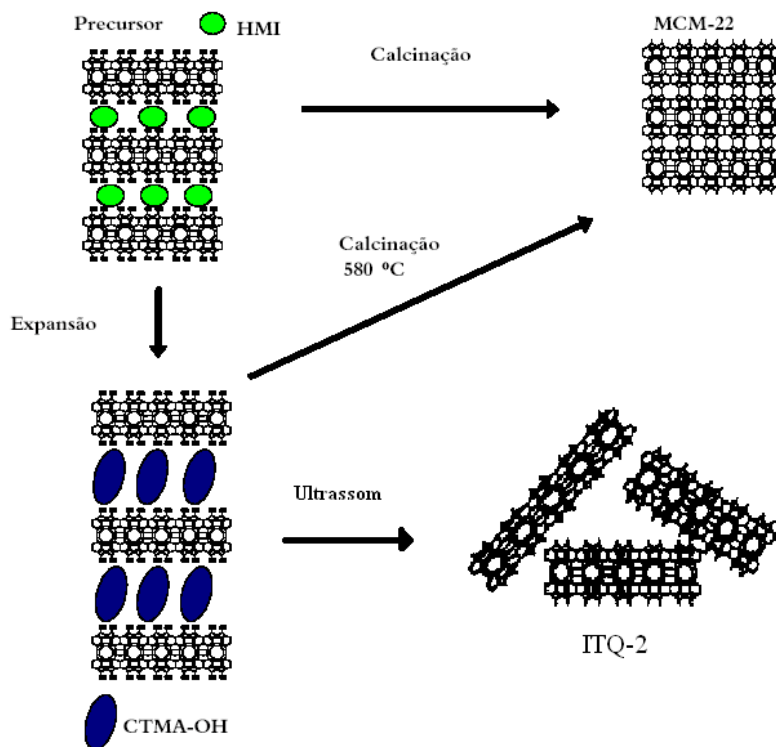


Figura 12 - Esquema do processo quando o precursor intumescido é submetido ao ultrassom, formando o ITQ-2 ^{32, 33}.

2.2.4. Síntese da MCM-22

Na literatura existente, a maior parte encontrada envolvendo esta zeólita apresenta estudos de suas propriedades catalíticas e de sua estrutura. Poucos são os artigos que estudam os aspectos de sua preparação. Praticamente todos eles relatam a necessidade do uso do sistema sob agitação para a síntese, isto é, o tratamento hidrotérmico ao qual as misturas reacionais são submetidas, é realizado em um reator e em uma estufa que permitam a agitação durante todo o período de sua duração.

O tempo de tratamento hidrotérmico utilizado varia de 3 ⁴² a 12 ⁴³ dias, sendo mais usual de 7 a 9 dias ^{44, 45, 46, 47, 48}, para materiais preparados sob

agitação e de 28⁴⁴ a 230¹⁵ dias para materiais preparados em sistema estático. Guray e colaboradores⁴⁹ relataram a síntese da MCM-22, usando sistema estático, em apenas 10 dias de tratamento hidrotérmico, além de utilizarem diferentes fontes de sílica a fim de se obter a melhor opção para a síntese.

As condições de síntese encontradas na literatura apresentam uma grande variação na razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, desde 25⁵⁰ até 100⁴³, sendo que a maioria, assim como todos os difratogramas apresentados tratam-se de exemplos de amostras preparadas sob uma razão de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 25 a 30. Recentemente, Kumar e colaboradores⁵¹ relataram a síntese da MCM-22 com diferentes razões sílica/alumina, onde a razão Si/Al foi variada desde 27 até 76.

Uma unanimidade em todos os artigos é a escolha pela hexametilenimina como agente direcionador orgânico. Na literatura, a razão HMI/ SiO_2 varia de 0,35¹⁵ a 0,90⁵².

A razão molar OH/ SiO_2 e Na/ SiO_2 apresenta uma variação desde 0,05⁵³ até 0,78⁵⁴ enquanto que a razão $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ varia de 19,4¹⁵ a 45^{15, 53}. Todas essas concentrações se encontram interligadas, ou seja, uma variação em uma delas implica na variação da outra. Essas variações também dependem das fontes de silício e alumínio utilizadas. Ao utilizar boro no lugar do alumínio há exemplo de síntese com razão $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ de 6,1 e 12,3¹⁵.

A síntese da MCM-22 também pode ser feita com adição de sementes⁵⁰. Neste caso, as sementes foram preparadas com um tratamento hidrotérmico mais curto, e por isso é um material menos cristalino. Nestas sínteses foi observada uma redução no tempo para a cristalização da MCM-22. O uso das sementes parece promover um maior controle no período de crescimento⁵⁰.

A síntese da MCM-22 é dificultada uma vez que é necessário o uso de agitação durante o tratamento hidrotérmico e também pela grande sensibilidade do sistema, o que acaba permitindo a ocorrência de outras fases como contaminantes. Dentre os contaminantes mais comuns estão a ferrierita e a ZSM-5⁴⁴.

2.2.5. Aplicações Catalíticas

A MCM-22 pode ser utilizada numa ampla variedade de processos de conversões químicas. A patente menciona 16 exemplos de processos de conversões químicas catalisados especificamente por esta zeólita, ou pela

combinação dela com outras substâncias catalicamente ativas. Bons exemplos destas reações são a alquilação do benzeno com cadeias longas de hidrocarbonetos, como por exemplo o C_{14} para obter aromáticos de cadeia alquil longa, os quais podem ser depois sulfonados para obtenção de detergentes sintéticos. Outras aplicações são a alquilação com olefinas gasosas como etileno para obter etilbenzeno, que é o intermediário do monômero do estireno, a alquilação do fenol com olefinas ou alcoóis e de isoparafinas com olefinas ¹⁵.

Também se pode usar esta zeólita em reações de isomerização de hidrocarbonetos de cadeia curta como 1-buteno e 1-penteno para a obtenção do isobuteno e isopenteno, produtos de partida para obtenção do MTBE (metil-t-butil-éter) ou TMA (t-amil-metil-éter) ⁵², utilizados para incrementar a octanagem da gasolina ⁵³.