

## DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E PENSAMENTO COMPLEXO – ESTUDO DE CASO: O USO DE ARGILAS COMO CATALISADORES

Soraia P. L. de Souza e Mônica R. da C. Marques\*

Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, R. São Francisco Xavier, 524, 20550-013 Rio de Janeiro – RJ, Brasil  
Marcio C. S. de Mattos

Departamento de Química Orgânica, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CP 68545, 21945-970 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Recebido em 13/12/11; aceito em 9/4/12; publicado na web em 26/6/12

SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND COMPLEX THOUGHT – CASE STUDY: USE OF CLAYS AS CATALYZERS. Use of clays as catalyzers in heterogeneous processes has increased significantly given their low cost, safety and commercial availability. However, interconnected political, economic, social, environmental, geological, and chemical aspects should be considered for chemical processes to satisfy sustainable development concepts. This concept requires complex thinking involving different areas of knowledge in dialogue, contrasting with classical thought, which is linear and Cartesian. Thus, this paper discusses the principles of complex thought in the concept of sustainable development exemplified by use of clay as a clean technology in organic synthesis.

Keywords: clays; complexity; sustainable development.

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com a preservação do meio ambiente tem sido cada vez maior. Pode-se observar que as questões ambientais têm conquistado espaço em diferentes níveis sociais, políticos e econômicos. O homem, por séculos, se posicionou acima da natureza, como aquele que tudo pode, soberano, ou, ainda, como vítima das ações naturais. Entretanto, nas últimas décadas, esse mesmo homem vem tomando consciência de que é parte integrante do meio e que, se continuar a agir como soberano, pode, realmente, tornar-se vítima de suas próprias ações. Assim, temas ambientais, como o Desenvolvimento Sustentável, têm aparecido frequentemente em reuniões de Chefes de Estado, em congressos acadêmicos ou em discussões de diferentes setores da sociedade organizada.

Na conferência mundial realizada no Canadá, em 1986, sobre a conservação e o desenvolvimento, o conceito de Desenvolvimento Sustentável e equitativo foi apresentado como um novo paradigma que tem como princípios: integrar conservação da natureza e desenvolvimento; satisfazer as necessidades humanas fundamentais; perseguir equidade e justiça social; buscar a autodeterminação social e respeitar a diversidade cultural, além de manter a integridade ecológica.<sup>1</sup> Já o conceito de Tecnologia Limpa foi criado, em 1989, pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente como uma resposta à demanda do Desenvolvimento Sustentável e visa nomear o conjunto de medidas que tornam o processo produtivo mais racional, com uso inteligente e econômico de utilidades e matérias-primas e, principalmente, com mínimas ou, se possível, nenhuma geração de contaminantes, com a finalidade de reduzir os riscos aos seres humanos e ao meio ambiente.<sup>2</sup>

Este artigo aborda os princípios da complexidade no conceito de Desenvolvimento Sustentável exemplificado pelo uso de argilas como uma tecnologia limpa em síntese orgânica.

### O PENSAMENTO COMPLEXO

A palavra “complexo” vem do latim *plecto*, *plexi*, *complector*,

*plexus*, que significa tecido, trançado, enroscado, cingido, enlaçado, apreendido pelo pensamento.<sup>3</sup> No entanto, segundo Ardoino,<sup>3</sup> essa palavra, com o tempo, foi assumindo outros significados, tais como, complicado, impuro, imperfeito, emaranhado, embrulhado etc. o que acabou por deturpar o sentido original. Ao longo do século XX, substantivos como “complexidade” e “complexificação” surgiram em diferentes campos de conhecimento (Matemática, Química, Cibernética, Psicanálise, Antropologia...) e levaram a uma necessidade de retomada do sentido original do adjetivo complexo. Assim, “complexidade” é tecer junto, religar, rejeitar, fazer dialogar diferentes áreas e disciplinas fragmentadas pela ciência clássica.<sup>4</sup>

Para pensar a complexidade, é necessário entender alguns princípios que norteiam tal pensamento:<sup>4</sup>

1. Princípio sistêmico ou organizacional – onde várias partes diferentes de áreas de conhecimentos diferentes estão ligadas e se organizam, ou seja, a partir da junção de partes plurais e heterogêneas entendemos do todo complexo.
2. Princípio hologramático – a parte está no todo, assim como o todo está na parte.
3. Princípio do ciclo retroativo – sugere a causalidade circular, isto é, a causa provoca um efeito que volta à causa, e assim por diante.
4. Princípio do ciclo recursivo – é a circularidade autoprodutiva, onde os produtos e os efeitos são, ao mesmo tempo, produtores e causadores.
5. Princípio da autoeco-organização – é o pensar autônomo consciente de sua dependência de outros para melhor conhecer.
6. Princípio dialógico – o pensamento complexo trabalha com ideias antagônicas que se complementam e não se excluem, é a separabilidade discutida com a inseparabilidade.
7. Princípio da reintegração do conhecedor ou observador em todo conhecimento – o observador é integrado à sua observação, ou seja, restaura-se o sujeito sem considerá-lo uma perturbação do sistema, mas parte do mesmo.

Desta forma, para se pensar a complexidade é necessário se despir dos paradigmas do antigo pensamento científico que separava e isolava para entender e descrever de forma linear, como se não houvesse dependência entre as diferentes áreas do conhecimento e produzir uma série inumerável de superespecialistas, completamente

\*e-mail: monicamarques@uerj.br

cegos aos problemas cada vez mais multidimensionais de um contexto complexo e planetário. Podem-se citar como exemplos os diagnósticos e as previsões que os economistas realizam e que, geralmente, estão errados, isso porque a economia se isolou de outras dimensões humanas e sociais que são inseparáveis dela.<sup>5</sup>

### O pensamento complexo no desenvolvimento sustentável

Dentro do conceito de desenvolvimento sustentável, dois tópicos têm sido considerados antagonísticos: a preservação ambiental e o desenvolvimento tecnológico capitalista. Nesse ponto, pode-se observar o princípio dialógico. É indiscutível a necessidade de se preservar o meio ambiente e o homem tem tomado cada vez mais consciência disso. Contudo, por outro lado, não se consegue conceber a possibilidade de privação dos benefícios que o desenvolvimento tecnológico capitalista tem oferecido. A partir dessa realidade, torna-se imprescindível que estes dois conceitos dialoguem para que se desenvolva o conceito de sustentabilidade, isto é, criar um desenvolvimento tecnológico ambiental ou uma preservação ambiental tecnológica.

A indústria química vem sendo considerada, pela sociedade, como uma das maiores vilãs na degradação do meio ambiente, visto que é responsável por boa parte dos casos de contaminação ou poluição ambiental, gerada para atender a necessidade de consumo desta mesma sociedade. Esta realidade leva à criação de normas ou leis, por parte dos governos, na tentativa de frear, minimizar ou até acabar com este impacto. Assim, novas tecnologias limpas precisavam ser criadas e desenvolvidas. Desta forma, para atender à essa demanda sócio-política-ambiental, a comunidade química criou o conceito de Química Verde e, a partir de seus resultados, periódicos especializados, como *Journal of Cleaner Production* (Elsevier, 1993) e *Green Chemistry* (RSC, 1999) surgiram<sup>6</sup> e logo foram seguidos por vários outros.

O conceito da Química Verde (ou Química Limpa) é definido como o desenho, o desenvolvimento e a implementação de produtos químicos e processos capazes de reduzir ou eliminar o uso ou a geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao ambiente.<sup>2,7</sup> Existem 12 princípios que devem ser perseguidos quando se pretende implementar a Química Verde em qualquer nível de atuação da Química.<sup>2,7,8</sup>

Aqui fica evidenciado o princípio do ciclo recursivo, pois a Química é ao mesmo tempo o produto e o produtor, ou seja, os problemas são gerados e solucionados pela Química. Observa-se, também, o ciclo retroativo, ou seja, a sociedade levanta os problemas gerados pela indústria química, que produz para a sociedade. Em resposta à preocupação social o governo cria diversas normas e leis, que levam a comunidade química a buscar soluções. Estas soluções geram novos problemas que serão questionados pela sociedade fechando o ciclo.

Um exemplo destes ciclos retroativo e recursivo é o interesse crescente na catálise heterogênea, mais especificamente no uso de argilas em síntese orgânica, em que se podem observar, também, outros princípios do pensamento complexo.

### O USO DE ARGILAS COMO CATALISADOR E O PENSAMENTO COMPLEXO

Com a segunda crise mundial do petróleo, iniciada em 1973, e para minimizar o problema de geração de resíduo em reações que necessitem de catálise ácida, um número cada vez maior de pesquisadores têm desenvolvido catalisadores em fase sólida ou heterogêneos.<sup>9</sup> Aqui, observa-se o princípio do ciclo recursivo, pois a geração do resíduo é um problema da Química e a própria Química deve resolver.

No Brasil, em função do baixo custo e da disponibilidade comercial, vários estudos têm sido desenvolvidos visando propor o uso de argilas brasileiras como uma alternativa mais promissora em

relação aos catalisadores importados.<sup>10</sup> Quer seja no estado natural (sem nenhum tratamento prévio) ou nas suas várias formas modificadas, as argilas podem ser empregadas como catalisadores em uma variedade extraordinária de reações e processos químicos.<sup>11</sup> Assim, passa-se a esclarecer melhor o que é argila e quais os tratamentos dados a estas argilas para maximizar suas propriedades físicas e químicas, tornado ainda mais clara a evidência do princípio sistêmico no estudo deste objeto.

Argilas são estruturalmente aluminossilicatos em camadas alternadas de sílica tetraédrica e alumina octaédrica.<sup>12</sup> Algumas mudanças na estrutura da argila, como a intercalação e a pilarização vêm sendo propostas para maximizar algumas de suas propriedades (acidez e atividade catalítica).<sup>13</sup> As argilas intercaladas são aquelas que sofreram um processo de intercalação, ou seja, a troca de cátions originalmente presentes na região interlamelar por outras espécies catiônicas.<sup>14</sup> Já as argilas pilarizadas sofreram um processo de pilarização, que consiste em trocar os cátions interlamelares por outras espécies e, em seguida, submetê-las à calcinação, para que sejam retirados o solvente e a água de hidratação.<sup>14,15</sup> Na calcinação, os cátions trocados se portam como pilares (daí o nome “pilarizada”) e os grupos funcionais formados na parte externa dos pilares ou ligação pilar-lamela conferem à estrutura um maior caráter ácido.<sup>16</sup> Na fase da troca iônica, forma-se a argila intercalada onde a acidez de Brønsted se acentua em relação à argila original. Todavia, na fase da calcinação ocorre a desidroxilação dos íons intercalantes, formando, por exemplo, os pilares de  $Al_2O_3$  com liberação de prótons. Durante a etapa de calcinação, a acidez de Brønsted praticamente desaparece e há um aumento da acidez de Lewis.<sup>17</sup> A substituição de catalisadores ácidos homogêneos por argilas apresenta grandes vantagens, pois se tem um ganho na seletividade e no rendimento do produto, o que leva a uma facilidade no tratamento e disposição final do resíduo (Resolução CONAMA n° 001 de 1986<sup>18</sup>), já que a argila é usada em pequena quantidade (catalisador) e tem a possibilidade de ser reaproveitada.<sup>19</sup>

Podemos observar o princípio sistêmico quando, para desenvolver uma tecnologia limpa para síntese de produtos orgânicos catalisada por argilas, várias áreas de conhecimento se juntam para construir o conhecimento e na justificativa da importância de se desenvolver tal projeto. Para sintetizar e caracterizar as argilas pilarizadas, por exemplo, são necessários conhecimentos de Geologia e Química para a interpretação das análises de composição e formação dos cristais da argila. Para interpretar e analisar os produtos sintetizados e o impacto social, econômico e ambiental são necessários conhecimentos analíticos, físico-químicos, econômicos, das organizações sociais, entre outros. As vantagens políticas, econômicas e ambientais estão na possibilidade de se desenvolver um processo de fácil manipulação, que gere menos resíduo, com menor impacto no ambiente e mais seguro, a reutilização do catalisador (argila). Além dos ganhos apontados acima, existem outras vantagens no ponto de vista ambiental, social e econômico para o uso industrial de argilas:

- disponibilidade no mercado nacional – As argilas brasileiras têm sido usadas em diversos processos e têm se mostrado tão ou mais eficientes que as argilas comerciais importadas.<sup>10,20</sup> Com isso, o capital é retido no país, movimenta-se o mercado nacional, diminuem-se custos com transporte e impostos e o Brasil torna-se mais independente em relação à aquisição desse tipo de suporte no mercado externo;
- fácil manipulação – Como a argila é um catalisador sólido, para retirá-la do meio reacional basta uma filtração, o que diminui os gastos com solventes no isolamento do produto e, conseqüentemente, a quantidade de rejeito a ser tratado;
- não é tóxica – A argila é inócua, o que facilita o descarte, se necessário, e minimiza os problemas com saúde ocupacional;
- facilita o licenciamento de operação – Como o uso da argila como catalisador diminui a quantidade de resíduo gerado, a quantidade de

impactos negativos a serem mitigados ou compensados também é menor, o que se reflete no EIA-RIMA (Resolução CONAMA 237/97<sup>21</sup>).

Assim, temos várias questões que são tratadas por diferentes áreas do conhecimento para justificar, estudar e entender o objeto (Figura 1). A partir dessa discussão, o uso de argilas brasileiras naturais ou modificadas como catalisadores torna-se uma alternativa bem atraente para indústrias de várias áreas (alimentícia, pesticidas, química fina, fármacos, etc) para diminuir o custo do processo, manter as divisas disponíveis no mercado interno e diminuir o impacto ambiental negativo, o que está de acordo com o objetivo do Desenvolvimento Sustentável.

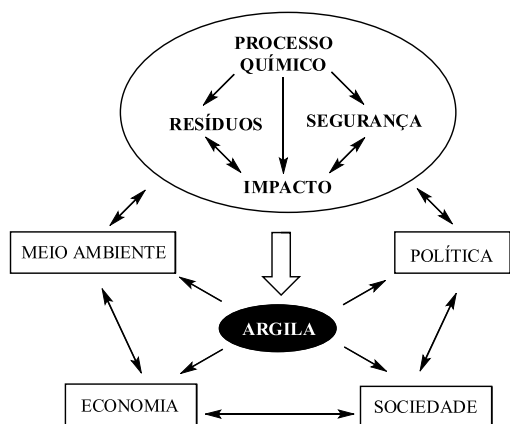


Figura 1. Questões que devem ser levantadas para o uso de argilas em um processo químico

Entretanto, neste ponto, podemos ver o princípio da retroação, pois este novo processo químico irá gerar outros impactos ambientais que afetam a sociedade. Esta, por sua vez, irá novamente exigir solução das autoridades, que criam e executam leis de controle. Essas leis exigirão modificações nos processos de produção. Os novos processos serão desenvolvidos pela academia visando a viabilidade econômica e o enquadramento às novas leis e, assim, serão utilizados pela indústria. A indústria então gerará outros problemas sócio-ambientais, voltando ao início e fechando o ciclo retroativo (Figura 2).

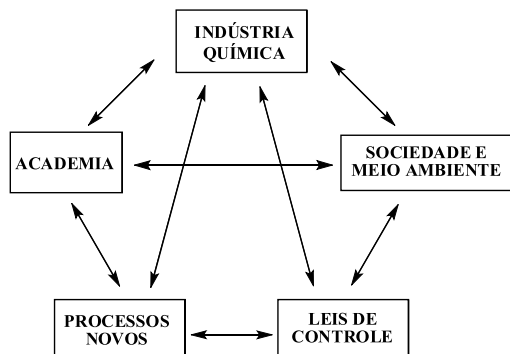


Figura 2. Princípio da retroação aplicado à indústria química

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca do Desenvolvimento Sustentável requer o diálogo entre diferentes áreas do conhecimento para que conceitos, considerados tão antagônicos como o Desenvolvimento Tecnológico Capitalista e a Preservação Ambiental, possam coexistir na construção de novas tecnologias que os atendam.

O uso de argilas em catálise heterogênea é um exemplo de como o desenvolvimento de novas tecnologias é um tema bastante híbrido,

isto é, existem questões políticas, econômicas, sociais, geológicas e químicas que estão ligadas a tal estudo. Portanto, há a necessidade de se avaliar as partes e o todo para que se diminua a probabilidade de que a tomada de decisão gere maiores problemas ambientais, ou melhor, decisões que resolvam antigos problemas e gerem novos problemas. Assim, embora o uso de as argilas como catalisadores atenda a muitos quesitos da tecnologia limpa, precisamos saber se atendem ao desenvolvimento sustentável. Para tal, se faz necessário uma discussão multi- e transdisciplinar com um pensamento complexo que reintegra o observador à observação, no qual cada indivíduo é responsável pelo conhecimento que está sendo construído e deve-se estar constantemente atento à repercussão das partes no todo e do todo nas partes. Dessa forma, a pesquisa envolvendo o uso de argilas como catalisadores nas indústrias brasileiras ainda está começando, uma vez que questões como o impacto que pode gerar no aumento da extração de argila, impactos sociais (relações de trabalho), econômicos (abertura desse mercado), ambientais (remediação de solo), dentre outros, precisam ser discutidos e previstos. Essas discussões não são simples nem triviais, pois o estudo de cada impacto pode gerar material suficiente para novas pesquisas em diferentes áreas de conhecimento.

## REFERÊNCIAS

1. Montibeller-Filho, G.; *O Mito do Desenvolvimento Sustentável: Meio Ambiente e Custos Sociais no Moderno Sistema Produtor de Mercadorias*, Ed. da UFSC: Florianópolis, 2001, p. 29-56.
2. da Silva, F. M.; de Lacerda, P. S. B.; Jones Jr., J.; *Quim. Nova* **2005**, *28*, 103.
3. Ardoino, J. Em *A Religião dos Saberes: o Desafio do Século XXI*; Morin, E., coord.; Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2001, p. 548-567.
4. Morin, E. Em *Inteligência da Complexidade*; Morin, E.; Le Moigne, J.-L., eds.; Peirópolis: São Paulo, 2000, p. 199-213.
5. Morin, E. Em *Educação e Complexidade: os Sete Saberes e Outros Ensaios*; Almeida, M. C.; Carvalho, E. A., org.; Cortez: São Paulo, 4ª ed., 2007, p. 13-27.
6. Sanseverino, A. M.; *Quim. Nova* **2000**, *23*, 102.
7. Lenardão, E. J.; Freitag, R. A.; Dabdoub, M. J.; Batista, A. C. F.; Silveira, C. C.; *Quim. Nova* **2003**, *26*, 123.
8. Anastas, P. T.; *Appl. Catal.*, **A** **2002**, *221*, 1.
9. Mizuno, N.; Misono, M.; *Chem. Rev.* **1998**, *98*, 199; Okuharu, T.; *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 3641; Centi, G.; Perathoner, S.; *Microporous Mesoporous Mater.* **2008**, *107*, 3.
10. Alguns exemplos: Teixeira-Neto, E.; Teixeira-Neto, A. A.; *Quim. Nova* **2009**, *32*, 809; Corrêa, K. S. M.; de Mattos, M. C. S.; de Aguiar, M. R. M. P.; *Monatsh. Chem.* **2009**, *140*, 519; Corrêa, K. S. M.; Bernini, R. B.; de Mattos, M. C. S.; de Aguiar, M. R. M. P.; Guarino, A. W. S.; *J. Braz. Chem. Soc.* **2007**, *18*, 1509; Villegas, R. A. S.; Espírito Santo Jr., J. L.; de Mattos, M. C. S.; Sanseverino, A. M.; de Aguiar, M. R. M. P.; Guarino, A. W. S.; *Synth. Commun.* **2005**, *35*, 1627; Villegas, R. A. S.; de Mattos, M. C. S.; de Aguiar, M. R. M. P.; Guarino, A. W. S.; Barbosa, L. M.; Assumpção, L. C. F. N.; *J. Braz. Chem. Soc.* **2004**, *15*, 150; Pergher, S. B. C.; Sprung, R.; *Quim. Nova* **2005**, *28*, 777.
11. Nagendrappa, G.; *Appl. Clay Sci.* **2011**, *53*, 106; Varma, R. S.; *Tetrahedron* **2002**, *58*, 1235; Dasgupta, S.; Török, B.; *Org. Prep. Proced. Int.* **2008**, *40*, 1; Vaccari, A.; *Appl. Clay Sci.* **1999**, *14*, 161.
12. Gomes, F. G.; *Argilas – o que são e Para que Servem*, Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 1988; Santos, P. S.; *Ciência e Tecnologia de Argilas*, 2ª ed., Edgard Blücher: São Paulo, 1989, vol. 1.
13. Coelho, A. C. V.; Santos, P. S.; Santos, H. S.; *Quim. Nova* **2007**, *30*, 1282.
14. Schoonheydt, R. A.; Pinnavaia, T.; Lagaly, G.; Gangas, N.; *Pure Appl. Chem.* **1999**, *71*, 2367.

15. Luna, F. J.; Schuchardt, U.; *Quim. Nova* **1999**, *22*, 104.
16. Guerra, D. L.; Lemos, V. P.; Angélica, R. S. ; Airoidi, C.; *Cerâmica* **2006**, *52*, 200.
17. Guerra, D. L.; Lemos, V. P.; Fernandes, E. F.; Angélica, R. S.; da Costa, M. L.; *Eclét. Quím.* **2005**, *30*, 27.
18. Brasil; Conselho Nacional do Meio Ambiente; Resolução CONAMA N° 001, de 23/1/ 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental. *Resoluções CONAMA*, p. 636, disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=23>, acessada em Dezembro 2011.
19. Yin, W.-P.; Shi, M.; *Tetrahedron* **2005**, *61*, 10861.
20. Villegas, R. A. S.; Espirito Santo Jr., J. L.; de Mattos, M. C. S.; de Aguiar, M. R. M. P.; Guarino, A. W. S.; *J. Braz. Chem. Soc.* **2005**, *16*, 565; Villegas, R. A. S.; Espirito Santo Jr., J. L.; de Mattos, M. C. S.; de Aguiar, M. R. M. P.; Guarino, A. W. S.; *Catal. Commun.* **2007**, *8*, 97; Leite, S. Q. M.; Dieguez, L. C.; San Gil, R. A. S.; de Menezes, S; M. C.; *Quim. Nova* **2000**, *23*, 149.
21. Brasil, Conselho Nacional do Meio Ambiente; Resolução CONAMA n° 237, de 19/12/1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. *Resoluções CONAMA*, p. 644. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=237>, acessada em Dezembro 2011.