

A situação mundial do xisto*

ARMAND FRUTUOSO PEREIRA**

SUSANA A. Q. FEICHAS***

1. Introdução; 2. Reservas mundiais de xisto; 3. Desenvolvimento a nível mundial — sumário histórico; 4. Do golfo persa ao desenvolvimento do xisto; 5. A produção do óleo de xisto; 6. Energia e meio ambiente; 7. Considerações de planejamento; 8. Outras aplicações do xisto; nota final.

1. Introdução

Dentre as alternativas potenciais de fontes de energia, as areias e os xistos betuminosos têm ultimamente recuperado importância à medida que o petróleo alcança maiores preços, além de se tornar cada vez mais escasso e mais difícil de ser obtido em termos globais. Sabe-se, contudo, que o óleo de xisto, ou de areias betuminosas, não tem sido alternativa melhor que o petróleo. O primeiro precedeu o segundo, mas perdeu sua importância ante o baixo custo do petróleo de poço que, desde sua descoberta por Edwin Drake, em 1859, passou a ser encontrado e explorado em quantidades que até recentemente não tinham criado grandes preocupações com a exploração de outros substitutos. A situação, porém, mudou radicalmente devido a fatores geológicos, políticos e econômicos. Os aspectos geológicos da crise mundial do petróleo, relacionados à escassez crescente do minério e a sua concentração em certas áreas naturalmente privilegiadas, deram origem a problemas econômicos e políticos. A crise do petróleo passou, deste modo, a ser concebida como uma questão de vulnerabilidade ou de poder internacional e a procura de fontes alternativas de energia é hoje mais que uma questão de energia; é uma questão política, uma questão de

* Este trabalho não teria sido tão facilmente realizado sem a prestativa ajuda bibliográfica do Projeto Xistoquímica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Agradece-se esta colaboração, especialmente ao Prof. Claudio Costa Neto.

** Professor da EBAP.

*** Assistente de Pesquisa do projeto.

independência e de soberania das nações, além de uma questão de sobrevivência.

O objetivo deste artigo consiste em descrever sumariamente as características das areias e xistos betuminosos, os vários processos utilizados ou utilizáveis para seu aproveitamento, assim como analisar os problemas, vantagens e desvantagens do aproveitamento desses recursos. Não se pretende aqui defender o ponto de vista de que os xistos são a solução do problema energético, mas sim apresentar informações que permitam uma melhor análise comparativa das várias alternativas de fontes de energia que possam vir a substituir o petróleo.

Torna-se, contudo, necessário fazer um breve esclarecimento introdutório sobre a terminologia técnica cujo conhecimento, mesmo que superficial, é indispensável, já que existe uma certa ambigüidade no uso dos termos: xisto, xisto betuminoso, xisto pirobetuminoso e areias betuminosas. Geólogos, em geral, fazem uma distinção científica entre cada um desses termos, se bem que os três primeiros sejam, normalmente, usados de maneira indistinta. Qualquer deles refere-se, todavia, a compostos sólidos, rochas ou areias sedimentares, onde se encontra uma percentagem variável de matéria orgânica (5% a 30%), da qual se pode extrair óleo para fins energéticos.

A diversidade dos termos resulta principalmente do fato de que nem todas essas substâncias orgânicas, donde se extrai o óleo, apresentam composição e características similares tendo, por isso, de ser submetidas a processos diferentes para se chegar ao betume. Este é, por sua vez, o termo atribuído a qualquer substância não-volátil, escura ou preta, de dureza variável, composta quase totalmente de carbono e hidrogênio, com pouco oxigênio, nitrogênio e enxofre, e que ocorre naturalmente junto com os xistos (ou areias betuminosas), podendo ser obtido por meio de solventes orgânicos como o benzeno, ou por meio da pirólise, isto é, a transformação de matéria sólida em estado gasoso e líquido por retortas de aquecimento.

Ambos os compostos desta ordem — areias e xistos — chamam-se, portanto, betuminosos, porque deles se pode extrair óleo e gás pela decomposição da matéria orgânica e pela transformação do querogênio — substância não solúvel encontrada nos xistos —, donde se obtém também betume por pirólise. O betume é extraído por solventes (no caso das areias), ou pela pirólise (no caso dos xistos) devido à existência do querogênio, que, para ser decomposto, necessita ser destilado pela pirólise. É precisamente daí que resulta o termo xisto pirobetuminoso. A diferença entre betuminoso e pirobetuminoso reside, pois, na maneira de obter o betume. O último termo aplica-se à obtenção daquela substância pela pirólise, enquanto o primeiro refere-se amplamente a qualquer tipo de xisto do qual se pode extrair betume, seja por solventes ou por pirólise.

É esta a razão por que o termo xisto pirobetuminoso raramente é usado na linguagem interdisciplinar, e tem sido substituído por xisto betuminoso, ou simplesmente xisto — termo que passaremos a usar neste trabalho. Para o caso das areias betuminosas, o termo pirobetuminoso raramente é

empregado, visto que o querogênio não é encontrado com frequência nesses compostos minerais.

Entende-se por areia betuminosa a areia ou rocha arenosa com quantidades consideráveis de betume, e por xisto betuminoso ou pirobetuminoso, a rocha sedimentar laminada, de cor escura, contendo um material orgânico semelhante ao alcatrão — querogênio —, o qual, quando aquecido a temperaturas entre 400°C e 600°C,¹ transforma-se em betume. Deste, por sua vez, extrai-se, pelo mesmo processo, óleo de xisto, podendo ser simultaneamente aproveitados gás e outros subprodutos sem que grande parte da matéria inorgânica contida no xisto seja afetada.

Sobre o querogênio, deve-se acrescentar que é a forma mais comum de carbono orgânico na terra, e segundo as comunidades científicas, existe mil vezes mais querogênio do que carvão. Contudo, por causa de variações quanto à sua origem, o querogênio pode apresentar composições diferentes, consistindo estas de aproximadamente 77-83% carbono, 5-10% hidrogênio, 10-15% oxigênio e algum nitrogênio.²

2. Reservas mundiais de xisto

É conhecimento comum entre geólogos que xistos e areias betuminosas resultam de petróleo desenvolvido há milhões de anos, espalhado por camadas rochosas ou arenosas por não ter encontrado formações impermeáveis que lhe servissem de poço. Por esta razão, é também do conhecimento geral que há reservas de xisto espalhadas por muitas regiões do globo, em profundidades relativamente pequenas, mas com características qualitativas tão divergentes que é muito difícil avaliar corretamente o valor destes recursos em termos de metros cúbicos, toneladas, ou barris de óleo.³

De um ponto de vista quantitativo, as estimativas de reservas mundiais de xisto (omita-se areia) divergem consideravelmente devido, em especial, a incertezas quanto aos aspectos qualitativos das reservas, e às tecnologias utilizadas na extração e produção. Uma tonelada de xisto produzirá quantidades variáveis de óleo (ou de gás e subprodutos) dependendo de seu teor e da tecnologia usada (aliés de outras variáveis de caráter sócio-econômico, político e ecológico).

Em função deste fato, pode-se desde já esclarecer que grande parte das avaliações quantitativas encontradas na literatura afim é irrelevante, e poderá servir unicamente para nos dar uma idéia geral, por vezes incorreta, do valor do xisto para fins energéticos.

¹ Algumas fontes referem-se a variações de temperaturas entre 450°C e 600°C; outras entre 400 e 500°C, e ainda outras entre 450 e 750°C. A razão dessas diferenças reside na tecnologia empregada e nos objetivos de produção.

² *Encyclopaedia of science and technology*, New York, McGraw Hill, 1966.

³ Um barril (bbl) equivale a 159 litros (42 galões), e um metro cúbico equivale a 6,3 barris.

Uma estimativa feita pela United States Geological Survey (Circular nº 523, 1965) atribuía aos EUA um total de óleo recuperáveis (por tecnologias existentes e a desenvolver) em torno de 350 bilhões de metros cúbicos (2,3 trilhões de barris), e ao Brasil 127 bilhões de metros cúbicos (800 bilhões de barris).

Tabela 1

Recursos conhecidos de óleo de xisto
(Bilhões de metros cúbicos)*

EUA	350,0
Brasil	127,0
URSS	18,0
Congo	16,0
Canadá	7,0
Itália	5,6
China	4,4
Suécia	0,4
Alemanha	0,3
Birmânia	0,3
Inglaterra	0,2
Tailândia	0,1
Luxemburgo	0,1
Outros	0,6
Total	530,0

* O metro cúbico é equivalente a 6,3 barris e o barril a 159 litros ou 42 galões.
Fonte: U. S. Geological Survey. *Circular n.º 523, 1965.*

No entanto, há outras avaliações bem diferentes, podendo estas divergências de dados ser manipuladas para justificar pensamentos diferentes. Uma dessas muitas estimativas calculava um volume recuperável de óleo para a formação Green River do Colorado, Utah e Wyoming (principal reserva americana)⁴ em cerca de 49,8 bilhões de metros cúbicos, ou seja,

⁴ A formação Green River é, de todas as reservas americanas, a mais importante e, muitas vezes, quando se fala de reservas americanas, as menos importantes nem são sequer levadas em consideração. Desta forma, é perfeitamente aceitável que, quando são apresentados dados sobre a formação Green River, se entenda que representam as reservas americanas.

314 bilhões de barris. O fato de não ter este cálculo levado em consideração outras reservas daquele país, isto é, as de Kentucky, Tennessee e Alaska, não é significativo, visto que tais reservas comportam volumes comparativamente insignificantes em relação à formação Green River. O importante é que essa estimativa e a anterior são demasiadamente diferentes.⁵ Uma outra, em 1957, calculava um volume de 60,5 bilhões de metros cúbicos — 960 bilhões de barris — de óleo recuperável para a formação Green River.⁶ Com relação ao Brasil, outra estimativa bastante diferente da que foi feita pela United States Geological Survey em 1965 atribuía ao Vale do Paraíba 320 milhões de metros cúbicos (dois bilhões de barris) e à parte da Formação Irati,⁷ correspondente só à região de São Mateus do Sul, 105 milhões de metros cúbicos (647 milhões de barris) tendo sido toda a Formação Irati avaliada em torno de 2,5 trilhões de barris.⁸ Isto significa que essa reserva seria capaz de suprir o consumo atual brasileiro de 900 mil barris diários por uns milhares de anos. Veja, contudo, a tabela 1 e compare os dados.

As duas principais razões destas variações são os diferentes critérios qualitativos em relação ao rendimento do xisto em litros, por toneladas, e à tecnologia. As estatísticas apresentadas na tabela 1 referem-se a xistos que prometem rendimento de óleo superior a 40 litros por tonelada, enquanto a estimativa feita por Merklein, por exemplo, refere-se a xistos com um teor entre 114 e 133 litros por tonelada.

Interessa concluir apenas o seguinte:

- a) estimativas quantitativas referentes ao óleo de xisto não têm qualquer valor prático, sem que se definam e entendam os aspectos qualitativos dos dados, e se leve em consideração que os fatores de custo/benefício de investimentos, tecnologia, energia de produção, água, poluição e outras variáveis sócio-ambientais são mais importantes do que os aspectos quantitativos das reservas nacionais ou mundiais;
- b) considere-se que recursos só são reais quando seu aproveitamento se torna viável e possível, dentro de todo um esquema multidimensional em que o fator tempo/política/concernência social é o mais importante como um todo, além do fator tecnologia.

Todo o sensacionalismo em torno da afirmação de que o Brasil tem óleo para uns milhares de anos de nada serve em termos práticos. Se bem que as reservas mundiais de xisto já tenham sido avaliadas em torno de

⁵ Merklein, H. A. Alternate fossil fuels won't add much to U.S. energy supply. *World Oil*. 70 (29): 37-32, 1972.

⁶ Hartley, F. L. & Brinegar, C. S. Oil shale and bituminous sand. *Science Monthly*. 84 (6), 1957.

⁷ A formação Irati estende-se desde o Sul de São Paulo até o Rio Grande do Sul.

⁸ Veja Xisto agora tem preço compensador. *O Globo*, Rio de Janeiro, 24.6.1977 e Xisto: nova fonte de energia para o futuro. *Planejamento e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro, 4 (44): 20-6, jan. 1977. Claudio Costa Neto, no seu artigo *De como e por que utilizar os xistos*, separata de *Ciência e Cultura*, 28(9): 1022, set. 1976, também apresenta dados semelhantes.

dez mil trilhões de toneladas, ou que as reservas conhecidas de teor superior a 40 litros/t indiquem uma capacidade mundial de produção de óleo próxima de 530 bilhões de metros cúbicos (3,3 trilhões de barris), ou seja, umas quatro vezes superior às reservas de petróleo de poço no globo, contudo pouco mais de 30 bilhões de metros cúbicos (189 bilhões de barris) ou 5% do total avaliado se considera atualmente recuperáveis.⁹

3. Desenvolvimento a nível mundial — sumário histórico

Hoje, quando se discutem fontes alternativas de energia, ignora-se muitas vezes a história e o xisto raramente é mencionado. Bem antes de o petróleo ser descoberto, o xisto já tinha sido explorado a nível comercial. A França iniciou sua exploração e retortagem em 1838; a Escócia em 1851, e a Suécia, Estônia (URSS), Manchúria (China), Austrália, África do Sul e Espanha começaram projetos de produção em escala comercial há pelo menos 40-70 anos, tendo sido durante os fins de ambas as guerras mundiais — épocas de crise — que esses desenvolvimentos atingiram seu auge na maior parte desses países.¹⁰ Presentemente, evidencia-se uma nova era no desenvolvimento do xisto, também motivada por uma crise mundial de energia.

Desde os fins do século XIX a industrialização do xisto tem sido sempre dependente da produção, custo, abundância, escassez e/ou de políticas protecionistas do petróleo, embora a comercialização de subprodutos do xisto tenha tido, em certos casos, um papel preponderante.¹¹

Usando a Escócia como exemplo, verificamos que de 1871 a 1917, a quantidade de óleo de xisto produzida passou respectivamente de 16 mil barris (2.500 metros cúbicos) para 22 milhões de barris (3,4 milhões de metros cúbicos), vindo a decrescer desde então.¹² Em 1945 eram processados 800 mil barris e, em 1960, apenas 420 mil.¹³ Consta que na França, em 1861, a produção era de aproximadamente 170 toneladas (1.200bbl/

⁹ Veja Magalhães Chaves, Flávio de. *O xisto betuminoso*. Rio de Janeiro, Petrobrás, Serarj, 1975.

¹⁰ Veja, por exemplo, Xisto: nova fonte de energia para o futuro. Op. cit., p. 8.

¹¹ Dentre tais casos destacam-se as experiências sueca e chinesa. Na Suécia, uma das principais razões que levaram a gerência da Svenska Skifferolje Aktie Sohget a encerrar suas atividades em 1961 foi a perda do mercado de enxofre, que era extraído do xisto, mas que passou a ser substituído pelo enxofre francês, de mais baixo custo, que era produzido a partir do gás de Lacq. Na China, por sua vez, grande parte do aparente sucesso da industrialização dos xistos de baixo teor de Fushun foi motivada pelo fato de estarem estas jazidas situadas sobre importantes depósitos de carvão. A exploração deste absorvia parcialmente os custos de industrialização do xisto, cuja mineração era, e continua a ser, um elemento de custo da mineração do carvão. Veja Righesso, Erno et alli, *Xisto, energia em potencial*. Assessoria de Relações Públicas da Petrobrás, 1964, p. 5-25.

¹² Gavin, M. J.; Hill, H. H. & Perdew, W. E. Present status of American oil shale development. *Chemical Age*, 29(8): 305-10, August 1921.

¹³ Righesso, Erno et alli. Op. cit.

190m³) tendo sido elevada para 4.750 (33.000bl/5.200m³) em 1864. Contudo, antes do fim dessa década, já poucas instalações estavam em operação ativa. O preço de 100 litros de óleo de xisto, que era de 65 francos em 1862, tinha baixado para 35 em 1867, em função da competição do petróleo. A I Guerra Mundial provocou um retorno à exploração do xisto, que cresceu até à II Guerra Mundial, mas que desde os fins da década de quarenta veio a decrescer consideravelmente. A última usina em operação, a de Autun, encerrou suas atividades em 1957.¹⁴ Hoje a França está de novo investindo na industrialização do xisto.

Outros exemplos demonstram igualmente a correlação entre xisto e crise, entre xisto e petróleo.

Na Suécia, por exemplo, embora no período 1935-40 já existisse pesquisa e exploração do xisto, com a II Guerra Mundial essas atividades foram intensificadas. A Companhia Sueca de Xisto foi formada em 1940 para criar uma alternativa de combustível doméstico. A indústria chegou a processar 2 milhões de toneladas do minério por ano, mas deixou de funcionar em 1966.

A produção sul-africana, situada em Ermelo, começou em 1935; chegou a atingir uma produção anual de 250 mil toneladas, mas também encerrou suas atividades em 1962.

A experiência espanhola atingiu um milhão de toneladas por ano nos fins da década de 50, mas parou em 1966.

A Austrália, por sua vez, apesar de possuir xistos com teor dos mais altos do mundo — uma média de quase 500 litros por tonelada — não conseguiu manter a indústria por motivos econômicos, e encerrou suas atividades em 1952, tendo chegado a atingir um processamento anual de 350 mil toneladas.¹⁵

Em 1966, as únicas indústrias de xisto em escala comercial no mundo eram a chinesa e a russa. Entretanto, uma revisão da literatura e dos dados de produção não nos convence de que essas experiências tenham grande importância ante critérios econômicos de países capitalistas. Os critérios de decisão não têm sido baseados em considerações econômicas e é essa a razão principal da persistência dessas indústrias nesses países. O *Pravda* admitiu, há uns 11 anos, que a indústria do xisto nunca foi lucrativa durante seu período de crescimento.¹⁶ A experiência soviética com a industrialização do xisto teve lugar em 1940, após a ocupação das nações bálticas (Látvia e Estônia), se bem que a Estônia já tivesse iniciado esse processo em 1920, quando independente. Convencido de que o país não possuía reservas suficientes de óleo combustível e de gás para as deman-

¹⁴ Id. *ibid.*

¹⁵ Prien, Charles H. *Current developments in world oil shale technology*. Rio de Janeiro, Simpósio sobre Ciência e Tecnologia do Xisto, realizado de 12 a 17 de dezembro de 1971 em Curitiba, 1971.

¹⁶ Soviets Admit Shale-Oil Mistakes. *The Oil and Gas Journal*. (64):90-1, May 9, 1966.

das futuras, Stalin resolveu canalizar grandes somas de investimentos para a exploração do minério. Khrushchev, por seu turno, decidiu concentrar esforços na busca de novas reservas de petróleo, mas a industrialização do xisto continuou a crescer.¹⁷ Desde o fim da década de 60 a Rússia tem processado anualmente uma média de 20 a 26 milhões de toneladas de xisto, absorvidas principalmente na produção de gás e energia elétrica,¹⁸ o que significa um pequeno aumento desde 1960, quando o valor total da mineração girava em torno de 15 milhões de toneladas.¹⁹ As reservas soviéticas, em terceiro lugar em ordem de grandeza e precedidas pelas dos EUA e Brasil, têm capacidade potencial, segundo avaliações recentes, para produzir cerca de 15 bilhões de toneladas de óleo. Além disso, seus xistos são dos mais ricos do mundo, com um teor médio de 17-24% em comparação com 10,5% e 6,4-9,1% referentes, respectivamente, aos xistos da formação Green River, nos EUA, e Irati, no Brasil.²⁰ Nos últimos 10 anos, devido a importantes desenvolvimentos tecnológicos, como as retortas UTT, por exemplo, a indústria começou a prometer sucesso, e tudo leva a crer que se expanda substancialmente nos próximos anos, levando em consideração os preços do petróleo, além do fato de terem as autoridades soviéticas anunciado, em 1977, que seus clientes de petróleo deveriam começar a procurar outras fontes, visto que as reservas do país só conseguirão suprir a demanda existente por mais vinte anos.

A experiência mais significativa na época atual tem sido a chinesa, sobre a qual ainda pouco se sabe, especialmente no que diz respeito a tecnologias de produção.

A industrialização em escala comercial foi iniciada na Manchúria em 1923 sob a responsabilidade de South Manchuria Railway Company, simultaneamente com a exploração do carvão e de outras riquezas minerais. Em 1930, a produção parece ter atingido cerca de 330 mil barris e, durante a II Guerra Mundial, aproximadamente dois terços do consumo de combustível do Japão provinha do óleo de Fushun.²¹ Embora existam algumas dúvidas sobre o valor da produção em 1930, pelo fato de outra fonte atribuir à produção, em 1934, um valor de 15.460 barris,²² é evidente ter ocorrido um crescimento no processo. A produção em Fushun, segundo esta mesma fonte, atingiu 2 milhões de barris em 1939, e com capacidade de crescimento. Só as reservas de Fushun, em 1946, eram avaliadas

¹⁷ Sobre os fatores políticos associados ao desenvolvimento do xisto na URSS, veja Enright, R. J. Russian oil-shale industry, trough marginal, is still growing. *The Oil and Gas Journal*. (42): 92-5, Oct. 18, 1965.

¹⁸ Xisto: à espera da viabilidade comercial. *Projeto 75*. fev. 1975, p. 48-51. Ver também, Xisto agora tem preço compensador, *O Globo*, 24. jun. 77, p. 8 e Xisto: nova fonte de energia para o futuro. *O Globo*, cit.

¹⁹ Embora os dados existentes em relação à URSS variem consideravelmente, essa cifra foi confirmada por outras fontes. Veja Righesso et alii, op. cit., p. 15.

²⁰ Xisto: à espera da viabilidade comercial. op. cit., p. 15.

²¹ Righesso, Erno et alii. op. cit.

²² Egloff, Gustav. China's potential oil resources large. *The Oil and Gas Journal*, (45): 248, Dec. 28, 1946.

em 5,5 bilhões de toneladas, equivalentes a 2 bilhões e 109 milhões de barris de óleo, e as de Shensi em 5 bilhões de toneladas, equivalentes a 852 milhões de barris.²³ No início da década de 60, a produção anual do óleo de xisto do complexo de Fushun era calculada em torno de 12 milhões de barris — 33 mil diários,²⁴ e tudo leva a crer que a indústria se tenha expandido nos últimos anos. Segundo informações fidedignas a produção chinesa total de petróleo e óleo de xisto tem crescido anualmente à razão de 30%, desde 1966, tendo se registrado um total de 520 mil barris por dia de 1971.²⁵

O aparente sucesso da industrialização do xisto na China tem sido parcialmente atribuído ao fato de serem as jazidas de Fushun depositadas sobre as reservas de carvão. Pelo menos até o fim da década de 40, a exploração do carvão nesse distrito atingiu uma média aproximada de 10 milhões de toneladas por ano, desde 1938, e isto significa, evidentemente, que a mineração do carvão tem absorvido grande parte dos custos da industrialização do xisto, o qual, tendo apenas um teor de 5 a 6%, seria muito menos atrativo para exploração caso não estivesse associado a carvão ou outro mineral.²⁶

A experiência dos EUA será, neste artigo, a mais discutida devido a fatores tecnológicos. É bem menos importante, em termos de produção atual, mas muito mais elucidativa em termos globais, especialmente porque o fatores que têm afetado o desenvolvimento do xisto nesse país são muito mais amplos e dinâmicos. Os investimentos que para os órgãos do governo norte-americano e as empresas têm aplicado no estudo de problemas tecnológicos e sociais e em processos jurídicos associados com a industrialização do xisto podem ser de extrema utilidade para países em fase de decisão sobre o aproveitamento do minério.

O mais importante das experiências mundiais de desenvolvimento do xisto como fonte de energia não são de forma alguma os aspectos quantitativos referentes a reservas e produção, mas sim os elementos tecnológicos, sócio-econômicos, ecológicos e político-administrativos da questão.

4. Do golfo persa ao desenvolvimento do xisto

Tanto em décadas anteriores, como hoje, os fatores mais importantes para o desenvolvimento do xisto são: crise energética, soberania nacional e implicações, e preço do petróleo de poço.

O preço do petróleo bruto da Arábia Saudita, em 1.10.73, era de US\$3,01/bbl, e em 1.1.74, de US\$11,65/bbl, enquanto o custo de produ-

²³ Id. *ibid.*, p. 243-8.

²⁴ Righesso et alli. *op. cit.*

²⁵ Chinese refining, chemical capacity climbing. *The Oil and Gas Journal*, July 17, 1972, p. 58.

²⁶ Egloff. *op. cit.*, p. 15.

ção variava entre US\$0,50 e US\$0,18, tendo pouco aumentado desde 1974. Quando o custo do barril era de US\$11,65, a renda mensal gerada já ultrapassava US\$1,5 bilhão. Para a Índia, por exemplo, onde em 1974 e 1975 se registrou um aumento significativo no número de mortes por inanição, em consequência parcial da crise energética e seus efeitos na agricultura, o aumento de custo para a economia, causado por essa alta de preço, foi da ordem de US\$ 800 milhões.²⁷

As elites dos países do Golfo Persa e da Opep defendem seu monopólio, alegando que o baixo preço do petróleo seria um fator desestimulador de novas pesquisas e desenvolvimentos energéticos, embora, na verdade, pouca gente dentre as elites do Golfo Persa, por exemplo, tenha algum interesse em ver surgir quaisquer desenvolvimentos que possam baixar ou controlar os preços vigentes. Defendem-se também com a tese de que essa exploração se enquadra perfeitamente nas regras do jogo do capitalismo mundial, do qual eles próprios têm sido vítimas em outros produtos e no setor tecnológico, em especial.

Esta tese é correta, mas as regras do jogo, em economia política mundial, são muito vacilantes, em especial nas situações em que os lucradores do esquema formam um cartel tão pequeno quanto o dos reis do petróleo. Quem aceitará, e por quanto tempo, o determinismo do Golfo Persa e da Opep? Essa é a pergunta que se impõe.

O impacto da crise artificial do petróleo nos países em desenvolvimento, entre os quais o Brasil, ocupa, aliás, uma posição relativamente privilegiada, contribuindo para um retardamento à ascensão desses países no sistema econômico internacional.

Para que se consiga vender a US\$12,00 um produto tão necessário quanto o petróleo, cuja produção custa 60-240 vezes menos, tem de existir uma estratégia de pura exploração da parte dos vendedores, tornada possível por forças políticas neutralizantes nos esquemas de relações internacionais. Trata-se de um cartel que, em virtude de condições internacionais propícias, resolveu tirar o maior proveito da situação, enquanto essas condições continuarem a existir. Os fabulosos lucros vão-se espalhando com a compra de lotes materiais e decisórios em Nova Iorque, Londres, Zurique e Genebra, e os reis do petróleo tornam-se desse modo um alvo cada vez mais difícil de imobilizar por intermédio de possíveis represálias da comunidade internacional afetada.

É fácil concluir que o conflito do Oriente Médio traz efeitos benéficos para os exportadores de petróleo do Golfo Persa e, conseqüentemente para outros países menos importantes da Opep. É precisamente nas características internacionais do conflito daquela região que se baseiam as condições propícias para a exploração por parte dos árabes. O envolvimento das duas maiores potências mundiais no conflito, aliadas a interesses

²⁷ Ver Cooley, Frank G. The physical background. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2): 109, April 1974.

e posições estratégicas antagônicas, constitui o fator mais importante como neutralizador de represálias eficazes contra os monopolistas.

Frank Coley (presidente da Governor's Oil Shale Advisory Committee, Oil Shale Regional Planning, Meeker, Colorado, EUA) num artigo apresentado no sétimo simpósio sobre o xisto, realizado em abril de 1974, alegou que "outro embargo mundial de petróleo não estimulará o desenvolvimento do xisto. Pelo contrário, outro embargo de petróleo, na melhor das hipóteses, dará origem a uma internacionalização das reservas do Golfo Persa, e criará pelo menos algumas transferências de posse de muitas anticlinais. A internacionalização significaria uma demanda mundial para que os preços do Golfo Persa fossem reduzidos. Se eles baixassem consideravelmente, a extração do óleo de xisto poderia ficar antieconômica e até terminar, a não ser que fosse subsidiada para fins de segurança nacional."²⁸

Esta exposição, interessante pelo seu otimismo, é todavia demasiado irrealista em termos políticos. Em primeiro lugar, os árabes jamais se atreveriam a impor um embargo a nível internacional sem contar com condições políticas que os protegessem de maneira a neutralizar atos de agressão, o que significa que tal embargo não se aplicaria a todos os países e blocos. O conflito do Oriente Médio tem a virtude de manter divisões internacionais e de legitimar embargos como armas de defesa dos países árabes envolvidos no conflito. Em segundo lugar, deve-se compreender que para as elites do petróleo, detentoras de 75% das reservas mundiais conhecidas e da maior concentração de renda no mundo, embargos significam unicamente uma arma com certas características e finalidades, mas não a única que possuem. A possível chantagem e influência nos poderes decisórios de empresas e governos, que pode decorrer facilmente dessa alta concentração de renda, representa armas tão importantes quanto a capacidade de impor embargos.

Pensar numa união política mundial para resolver o problema, parece ser ainda uma ficção dentro das condições existentes. Por outro lado, a aplicação de represálias também não é realista. O antagonismo político cria condições para embargos, e este, por sua vez, desenvolve outras condições que legitimam a alta de preços do petróleo, fechando assim um círculo todo vantajoso para o Golfo Persa. O conflito do Oriente Médio é de interesse das elites petrolíferas, e o desenvolvimento de substitutos de petróleo não o é. Um vez que se chegue à conclusão de que o problema do petróleo não será facilmente resolvido por vias políticas, a procura de alternativas viáveis torna-se a solução mais adequada, devendo o xisto ser visto como uma opção cuja viabilidade já é uma realidade em determinadas condições.

A medida que se ampliam os esforços a nível mundial para produzir óleo de fontes sintéticas, como o xisto ou o carvão betuminoso, *estes substitutos potenciais passam a fazer parte integrante do sistema de formulação*

²⁸ Id. *Ibid.*, p. 111.

de preços do petróleo, tornando-o mais vulnerável e dependente de fatores de mercado. É necessário analisar cuidadosamente os efeitos deste detalhe.

Visto não ser do interesse econômico do Golfo Persa e da Opep o desenvolvimento da industrialização do xisto (ou de outros sintéticos), é de se esperar que os preços do petróleo baixem estrategicamente para níveis competitivos ou inferiores aos custos de produção do óleo de xisto, para desencorajar esse desenvolvimento. A redução dos preços atualmente prevalecente para a faixa dos US\$7-9.00, por exemplo, tenderia a afetar a análise econômica do xisto, mas hoje em dia a tomada de decisões sobre políticas de energia não pode levar em consideração unicamente critérios econômicos. Os fatores políticos da crise do petróleo devem ser observados como uma variável que torna o comportamento da industrialização do xisto (ou outras alternativas comparáveis) menos elástico em relação a mudanças estratégicas nos preços do *ouro preto*. O xisto jamais conseguirá competir com o petróleo de poço já descoberto, porque o que torna este minério caro é sua especulação e pesquisa, e não sua produção. Será um absurdo depender de estratégias monopólicas associadas a alta e baixa artificial de preços. Os custos secundários destas decisões poderão ser bem mais significativos que os custos diretos. Quanto custou a crise do petróleo ao desenvolvimento econômico do Brasil em 1974, por exemplo? Qual poderá vir a ser o preço dessa dependência energética no futuro?

É interessante notar que os únicos países que não abandonaram desenvolvimentos da industrialização do xisto foram os socialistas — países em que, devido ao papel do Estado, as decisões econômicas tendem a ser ao mesmo tempo políticas. Durante quase vinte anos, a industrialização do xisto nas províncias da Estônia e Leningrado não alcançou quaisquer lucros, sendo artigo publicado pelo *The Oil and Gas Journal*.²⁹ O erro mais evidenciado no artigo era o problema do déficit. Contudo, uma análise que vá além dos critérios de lucro levantará dúvidas sobre esse tipo de *erro*.

5. A produção do óleo de xisto

A produção consiste de várias fases, que podem variar em função da tecnologia usada, das características geológicas das reservas, e ainda dos subprodutos que se queira ou possa produzir. A fase mais importante é, todavia, a retortagem, ou seja, a parte de produção em que o xisto é transformado, por aquecimento, em vapores de óleo, gás, e outros produtos. Os vapores de óleo, por sua vez, são transformados em óleo líquido pelo processo de condensação que ocorre também nesta fase.

A retortagem é a parte do processo mais importante por duas razões básicas: primeiro, porque define outras etapas de produção, e segundo,

²⁹ O título do artigo no periódico americano *The Oil and Gas Journal*, de 9 de maio de 1966, que anunciava a notícia publicada pelo *Pravda*, era: Soviéticos admitem erros no indústria do xisto.

porque a partir do momento em que tecnologias de retortagem *in situ* passaram, nos últimos anos, a ser mais discutidas, melhoradas, e crescentemente mais viáveis, a fase de retortagem ficou sendo a chave de decisão em qualquer esquema de produção.

Há dois métodos básicos de retortagem: o *ex situ* (na superfície) e o *in situ* (no subsolo — na própria reserva).

5.1 *Etapas do método*

5.1.1 Mineração

A mineração a céu aberto e a mineração subterrânea são os dois tipos básicos que existem. Em ótimas condições de planejamento e de decisão, a utilização de um dos dois métodos depende, em primeiro lugar, das características topográficas e geológicas dos locais onde as reservas se encontram e, em segundo lugar, de considerações sócio-ambientais: acessibilidade e profundidade das reservas; permeabilidade dos solos, e fatores ecológicos determinam o tipo de mineração a utilizar.

Na mineração a céu aberto, como o termo indica, as escavações são feitas da superfície do solo para baixo, até se chegar ao fundo do depósito.

As vantagens da mineração a céu aberto são seu menor custo para depósitos de grande extensão e de baixo teor, além da possibilidade de maior aproveitamento comparativo. Este tipo de mineração pode extrair até 100% de todo o xisto aproveitável de uma jazida, enquanto a subterrânea tem um aproveitamento variável entre 60% e 80%.³⁰ Outras vantagens secundárias deste tipo de mineração são a melhor qualidade das condições de trabalho, menor risco para os operários, e menor custo de mão-de-obra, que decorre desses outros fatores.

A profundidade das jazidas e a dureza da matéria rochosa são as variáveis-chave que definem o tipo de mineração. Enquanto, por exemplo, os depósitos de xisto do Vale do Paraíba e de São Mateus do Sul (entre outros da formação Irati) encontram-se a baixa profundidade, tornando mais viável a mineração a céu aberto, as de Piceance Basin, da formação Green River, por outro lado, não são boas candidatas a este tipo de extração do minério. Com uma espessura em torno de 600 metros, estas jazidas estão cobertas, em alguns pontos, por camadas de rocha superiores a 300 metros de profundidade.

Em condições em que a viabilidade econômica da mineração a céu aberto é duvidosa, os critérios usados na mensuração dessa viabilidade são tipicamente: o teor do xisto medido em litros por tonelada de minério, e a *stripping ratio*, ou seja, a razão entre a quantidade de matéria sobreposta que se tem de escavar, e a quantidade de xisto que se pode extrair. Além

³⁰ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil shale; part 2: mining and shale oil extraction process. *Mineral Industries Bulletin*. 18(1), Jan. 1975.

disso, torna-se necessário averiguar qual o tipo de matéria sobreposta existente; que características geológicas possui; qual o custo econômico de sua escavação, e quais os impactos da remoção dessa matéria, no meio ambiente. Para se ter uma melhor idéia do significado de *stripping ratio*, exemplifique-se que, enquanto para o carvão uma razão de 1:1 é em muitos casos, aceitável, para o xisto uma razão de 1:2 só é atrativa se o teor do xisto for relativamente alto 150-250 litros/t).³¹

Além de a mineração a céu aberto não ser a mais adequada em certas condições geológicas e topográficas³² mesmo quando geológica e economicamente viável, há sempre desvantagens relacionadas com seus impactos na qualidade e conservação do meio ambiente. Perturbações na superfície são inevitáveis, e sempre negativas, mesmo que temporárias. A relativa poluição do ar sempre ocorre, e a poluição das terras e das águas, dentro de certas características geoquímicas, pode ser obstáculo prominente, embora este seja um problema característico não só da mineração a céu aberto como de qualquer exposição de xistos fraturados na superfície do solo.

Nos EUA, onde critérios ecológicos têm tido papel de importância primordial nas decisões de desenvolvimento do xisto, a maior preocupação no que diz respeito a métodos de mineração e processos de retortagem (em situações em que processos *in situ* não são viáveis) não tem sido nem as perturbações na superfície dos solos, nem sequer a poluição do ar, especialmente pelo fato de estarem as reservas principais situadas em áreas pouco povoadas, e de certos processos terem condições tecnológicas de manterem o grau de poluição do ar a níveis aceitáveis. O maior problema tem sido o da poluição da água numa região em que esse elemento representa um recurso-chave para culturas agrícolas adjacentes. Os xistos e alguns materiais associados contêm, no caso, certos sais solúveis em água que poderão ser arrastados por chuva ou neve para rios, reservatórios e terras aradas. Tanto o material minerado como o retortado pode ser isolado, mas tal medida consegue, quando muito, minimizar o problema.

A mineração subterrânea tem aplicabilidade maior em condições geológicas onde os depósitos de xisto se encontram a grandes profundidades, e rodeados por formações rochosas de grande dureza e solidez, como é o caso de grande parte da formação Green River.

Este tipo de extração pode ser efetuado de formas diferentes. No tipo de mineração subterrânea de *sala e pilar*, escavações são feitas dentro da jazida seguindo um plano pelo qual certas porções do minério servem como pilares para suportar a massa sobreposta. Tanto o tamanho das salas de mineração como o dos pilares naturais que se talham, depende de considerações físicas e geológicas do local e da altura do teto da mina. O United States Bureau of Mines estudou a aplicação deste tipo de mineração subterrânea, tendo, após longas pesquisas, chegado a conclusões gerais

³¹ Id. *ibid.*

³² Ertl, T. Mining Colorado oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 60(3): 83-92, July 1965.

referentes ao tamanho das salas e dos pilares e altura do teto.³³ Embora os estudos realizados e suas conclusões tivessem sido baseados num caso específico — a mineração piloto da Anvil Points Experimental Station —, os critérios de estudo permitem uma aplicação geral a outras minas de características geológicas não muito diferentes.³⁴ A mina piloto da Colony Development Operation — uma *joint venture* hoje formada por Shell, ARCO, e Ashland Oil para explorar os xistos de Piseance Basin no Colorado — é do tipo *sala e pilar*, e apesar de não ter sido estudada pelo Bureau of Mines, as especificações físicas da construção condizem com as conclusões a que chegou esse órgão federal norte-americano. As estipulações de segurança concluídas pelo Bureau of Mines, e particularmente pela Colony Development Operation foram: salas de 60 pés de largura, pilares de 60 pés quadrados, e uma altura de teto também de 60 pés.³⁵

A desvantagem principal desta modalidade de mineração subterrânea é a de não poder proporcionar um aproveitamento total do minério, além de o xisto utilizado não poder ser facilmente remetido para dentro da mina.

Uma outra forma de mineração subterrânea consiste em escavar um túnel por baixo dos depósitos, e fazer cair os tetos gradualmente por meio de explosões.³⁶ As vantagens comparativas deste esquema em relação ao anterior são seu maior aproveitamento, que pode ser quase total, e o fato de poder mais facilmente proporcionar depósito próprio para os materiais não aproveitados na retortagem. Estes são depositados nas cavidades da superfície formadas pelo colapso dos tetos da mina. A turbulência no solo é, contudo, uma grande desvantagem, limitando a aplicação desta modalidade a áreas desabitadas. O problema da possível poluição da água é mais fácil de resolver do que nos outros tipos mencionados, mas continua sendo uma desvantagem comum.

Em qualquer das alternativas, há sempre o problema de danos ecológicos e de custos elevados, embora em operações de grande escala o custo de mineração seja mais baixo.³⁷

É importante repetir que a comparação de métodos de mineração e processamento do xisto em geral é sempre de valor bastante limitado, pois quando falamos de alternativas, ou de vantagens (ou desvantagens), partimos primeiro do princípio de que as características de dada reserva e de seus xistos constituem a variável dominante na determinação dos métodos. Comparações têm valor prático unicamente quando as alternativas tecnológicas se aplicam aos xistos em questão.

³³ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil shale. . . op. cit.

³⁴ East Jr., J. H. & Gardner, E. D. Oil-shale mining, Rifle, Colorado, 1944-1945. *Bureau of Mines Bulletin*, 611, 1964.

³⁵ Marshall, Paul W. Colony development operation room and pillar oil shale mining. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 69(2): 171-84, April 1974.

³⁶ Allsman, P. T. A simultaneous caving and surface restoration system for oil shale mining. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 63(4): 113-26, Oct. 1968.

³⁷ Katell, S. & Wellman, P. An economic analysis of oil shale operations featuring gas combustion retorting. *U. S. Bureau of Mines Technological Progress Report 81*, 1974.

No caso das reservas brasileiras da formação Irati, devido à baixa profundidade de grande parte das jazidas, por causa da composição geológica dos xistos e da viabilidade tecnológica do processo Petrosix (*ex situ*), a Superintendência do Xisto (SIX), subsidiária da Petrobrás, no seu atual projeto de industrialização do xisto para escala comercial optou pela mineração a céu aberto da parte superior das reservas do Vale do Paraíba (cerca de 30 metros de profundidade).

5.1.2 Separação de minerais associados

Certas jazidas contêm, junto com o xisto, minerais que podem ser aproveitados para fins comerciais e/ou industriais. Como alguns deles, para serem aproveitados, não podem ser submetidos à pirólise, deve-se separá-los do xisto. É o caso, por exemplo, da *nahcolite* (2NaHCO_3), encontrada nos xistos da formação Green River, a qual tem aplicações industriais como agente de antipoluição do ar. Enquanto o *dawsonite*, ou carbonato de sódio aluminoso ($2\text{NaAl}[\text{OH}]_2\text{CO}_3$) — outro mineral associado encontrado nos xistos daquela formação —, tem de ser decomposto pelo calor, podendo desse modo ser pirolisado junto com o xisto, a *nahcolite* necessita ser separada antes da retortagem.

Em virtude das características físicas e geológicas desse minério, a própria fraturação, quando efetuada sob ótimas condições técnicas e com a utilização de peneiras, pode separar 60 a 80% da *nahcolite* sem necessidade de outros processos mais complicados. Os restantes 20 a 40% podem, por sua vez, ser separados por intermédio de técnicas de ordem química.³⁸ (Referências às propriedades e aplicações deste minério encontram-se na seção Energia e meio ambiente.)

No caso das reservas brasileiras, não consta existir qualquer outro minério associado que possa ter aplicações comerciais ou industriais.

A separação de minerais associados que não possam ser submetidos à pirólise sem perder suas propriedades, limita-se unicamente a processos de retortagem *ex situ*, visto existir pouca ou nenhuma mineração nos processos *in situ*.

5.1.3 Fraturação

Para os processos de retortagem *ex situ*, após a mineração, ou junto com esta, o xisto tem de ser fraturado em partículas cujo tamanho varia com o processo utilizado. Tipos diferentes de retortas requerem tamanhos diferentes de xisto, por motivos de produtividade. Esta fase de produção pode realizar-se ou na superfície, onde é mais fácil, mais eficiente, mas também mais poluidora, ou na mina subterrânea, com a grande vantagem, neste

³⁸ Weichman, Ben. The superior process for development of oil shale and associated minerals. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2): 28-43, April 1974.

caso, de não contribuir como agente poluidor, embora, por outro lado, implique piores condições de trabalho dentro da mina, a não ser que a fraturação seja conduzida em compartimentos vedados.

Nos processos de retortagem *in situ*, a fraturação tem uma importância operacional um tanto diferente, podendo ser realizada por agentes de craqueio para criar a permeabilidade necessária à penetração de condutores de aquecimento na jazida.

5.1.4 Processos de retortagem *ex situ*

Pelo método *ex situ*, o xisto é destilado em retortas que poderão ter características diferentes. Há muitos tipos de retortas e, portanto, muitos modelos de retortagem, sendo essas variações dependentes de tecnologia, características do xisto e do local, tais como: existência de água; tipo de energia disponível ou recomendável para uso na produção; regulamentos contra poluição; existência de minerais associados de valor comercial ou industrial; e subprodutos.

A primeira distinção a fazer entre tipos de retortas refere-se à maneira como são elas abastecidas e descarregadas. Existem dois tipos: retortas de fornada e retortas contínuas. Nas primeiras, o xisto entra na retorta todo de uma vez, e os resíduos são expulsos no fim da retortagem. Nas segundas, tanto a entrada do xisto como a saída dos resíduos ocorrem continuamente.

A segunda distinção a fazer refere-se à maneira como a retorta é aquecida. Os tipos hoje concebidos, usados ou em desenvolvimento, são basicamente cinco. Krumin e Guthrie³⁹ sugeriram os quatro primeiros tipos, e Williamson⁴⁰ acrescentou o quinto, como segue:

- Tipo I: Aquecimento indireto por radiação e combustão através das paredes da retorta.
- Tipo II: Aquecimento direto pela circulação de gases quentes resultantes da combustão parcial do carbono residual da destilação do xisto.
- Tipo III: Aquecimento direto por circulação de um condutor de calor, gás ou líquido, aquecido exteriormente.
- Tipo IV: Transferência de calor pela introdução de sólidos quentes na retorta.
- Tipo V: Outros métodos de transferência de calor, incluindo microondas, *laser*, e circulação de uma substância que liberta calor por reação química ou nuclear.

³⁹ Krumin, Peter O. Review of the Estonian oil-shale industry with a brief account of oil-shale developments in United States. *Engineering Studies*. Ohio State University, 1949 e Guthrie, Boyd. Oil from rock — the gas combustion. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 59(3): 7-18, July 1964.

⁴⁰ Williamson, D. R. Oil Shales; part 5: oil shale retorts. *Mineral Industries Bulletin*. 8(2): 16, March, 1965.

Retortas do tipo V continuam ainda por ser desenvolvidas, mas todos os outros tipos já são amplamente conhecidos. As retortas do Tipo I foram as primeiras a serem desenvolvidas e usadas, sendo elas quase todas de fornada. Só mais tarde, a partir de 1920, apareceram algumas retortas contínuas, tais como as Pumpherson⁴¹ usadas na Escócia e pelo United States Bureau of Mines em experiências realizadas de 1930, e as Bergh, que foram usadas na Suécia na década de 40.⁴² As grandes desvantagens destas retortas eram sua baixa produtividade e alto consumo de energia para aquecimento. Apesar de apresentarem algumas vantagens, tornaram-se praticamente obsoletas com a invenção das do tipo II, onde o carbono residual da destilação é gaseificado e usado como gás de circulação. Uma das grandes vantagens do tipo I era sua excelente aplicação na produção de gás. O gás produzido apresenta características semelhantes às do gás natural, e pode exceder o valor calorífero de 900 Btu por pé cúbico.⁴³ Todos os outros tipos de retortas são mais produtivos em termos de óleo, e mais econômicos em termos de energia, mas menos eficazes na produção de gás.

As retortas do tipo II, embora não fossem tão eficazes na produção de gás quanto as primeiras, tiveram, contudo, em certos casos, aplicações na produção de gás, geração de calor e de eletricidade, sem haver sequer qualquer aproveitamento dos vapores de óleo. Na Estônia existia ainda, até pouco tempo, um complexo industrial para produção de eletricidade, onde o xisto era queimado nestas retortas como combustível sólido, sem que seus vapores de óleo fossem aproveitados.⁴⁴

Uma desvantagem inicial das retortas do tipo II, quando aplicadas à produção do óleo de xisto, era que só se conseguia obter boa produtividade com xistos que tinham no resíduo orgânico suficiente carbono que mantivesse as características necessárias para poder circular como gás.⁴⁵ Tais problemas deram origem a inovações para atingir maior produtividade com essas retortas. Um desses melhoramentos foi o da *combustão segregada*, pela qual só uma pequena parcela do xisto é queimada, e o calor da combustão é transferido para o xisto numa outra parte da retorta. Vários processos modernos de retortagem deste tipo de aquecimento, tais como

⁴¹ Stewart, D. *The history, technology and economics of oil shale utilization in the United Kingdom*. U. N. Symposium Tallinn, 1968.

⁴² Gejrot, Claes. Development of the Swedish shale oil industry. *American Institute of Chemical Engineers*, New York, 61(54): 7-14, 1965.

⁴³ Matic, Dimitrije & Mijatovic, Ivan. Retorting of Yugoslav (Oleksinac) oil shale by gas combustion retort. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*. New York, American Institute of Chemical Engineers, 61(54): 15-24, 1965.

⁴⁴ Yefimov, V. M. & Pük, E. E. Processing of oil shale in gas generators. U. N. Symposium, 1968; Cieslewicz, Wadislaw J. Present trends in Estonian-Russian work on oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 62(3):141-65, 1967; Cameron, R. J. & Dailey, J. L. The international synthetic fuels picture. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 65(4): 25-40, Oct. 1970.

⁴⁵ Schmalfeld, P. The use of the Lurgi-Ruhngas process for the distillation of oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 70(3): 129-45, July 1975.

Paraho, Union A, e *gas combustion*, são baseados no princípio de *combustão segregada*.⁴⁶

Outra variação deste princípio, introduzida como melhoramento nas retortas do tipo II, foi a *carbonização a baixa temperatura* desenvolvida por Lurgi na década de 1930. Neste caso, o xisto é primeiro seco e preaquecido numa zona própria com gases em circulação e depois destilado com gases quentes também em circulação na zona de carbonização. A principal diferença deste princípio com relação ao processo inicial do tipo II, é que o carbono do resíduo da destilação não é usado para aquecimento, podendo a temperatura ser controlada e mantida a um baixo nível para evitar a fusão do xisto fraturado — problema comum das retortas do tipo II e que consistia na dificuldade da circulação de gases. Este princípio técnico era do tipo III e foi absorvido por alguns processos modernos dos tipos III e IV, embora os *carbonizadores de baixa temperatura*, desenhados por Lurgi na década de 30 tivessem sido considerados ineficientes por necessitarem de grandes quantidades de água e de gás, além de apresentarem uma série de problemas associados à recuperação dos produtos e à distribuição dos gases de circulação.⁴⁷ Os *carbonizadores de baixa temperatura*, desenhados e construídos por Lurgi em 1944, para a industrialização do xisto de Puertollano na Espanha, e em 1958 para o Zaire, incorporavam modificações para minimizar esses problemas, mas a má distribuição de gases não tinha ainda sido resolvida.⁴⁸ Veremos, em seguida, alguns dos processos *ex situ* mais conhecidos.

5.1.4.1 As retortas de fornada dos processos Schweitzer e NTU (tipo II)

O processo desenvolvido por Schweitzer em 1939 para o aproveitamento dos xistos de baixo teor de Wurtemberg, Alemanha, foi experimentado em 1940, tendo Lurgi, depois de 1942, construído a primeira usina comercial para com esse método processar mil toneladas de xisto por dia em 28 retortas. O xisto entra na retorta todo de uma vez e a destilação é realizada fazendo entrar ar de cima para baixo. Quando em contato com o resíduo do xisto quente, o ar aquece e queima o carbono de maneira que os gases quentes de combustão destilam todo o xisto em qualquer ponto da retorta.

Embora este processo seja energeticamente econômico, a lista de desvantagens desvaloriza consideravelmente esta economia de energia. Além de só poderem funcionar em ciclos fechados, como todas as retortas de fornada, os vapores de óleo são recolhidos sob forma diluída, e os gases

⁴⁶ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil-shale; part 2: mining and shale oil extraction process. *Mineral Industries Bulletin*. 18(1), Jan. 1975.

⁴⁷ Schmalfeld. P. op. cit.

⁴⁸ Thau, A. Brennstoffschwelung, *Knapp, Halle Publications*, v. 1, 1949, p. 236-48; Hubmann, O. & Lange, P. *Gasification of high-ash fuels in descending stream of gas*. International Conference on Complete Gasification of Mined Coal. Liège, Belgium, May, 1954.

de destilação não podem ser utilizados para qualquer outro fim, devido a seu baixo valor calorífero e à mistura com gases de combustão. Uma outra desvantagem é a limitação de tamanho das retortas, pois têm de ser içadas e inclinadas por uma grua para deixarem esvaziar os resíduos após cada ciclo de retortagem. O aproveitamento de óleo deste processo, relativo ao ensaio de Fischer, a que nos referiremos em seguida, é de 80 a 90%.⁴⁹

O processo NTU (Nevada, Texas & Utah Co.) foi usado na Inglaterra e na Austrália,⁵⁰ e experimentado na Califórnia em 1925 pela NTU Co. e pelo United States Bureau of Mines no período de 1925-29 e 1947-49.⁵² O NTU é idêntico ao anterior. A vantagem de economia de energia persiste, e algumas das desvantagens pertinentes ao processo Schweitzer não existem neste caso. Ao contrário das retortas anteriores, as NTU têm uma abertura por baixo para permitir a saída dos resíduos. Isto implica não haver necessidade de mover as retortas, podendo estas, portanto, ser maiores e mais eficientes. Uma destas retortas, com capacidade para 150 toneladas, foi construída pelo United States Bureau of Mines no Laramie Energy Research Center, Laramie, Wyoming,⁵³ e duas de 40 toneladas foram construídas também por esse órgão em Anvil Point Colorado.⁵⁴ O sumário técnico das operações com a retorta NTU em Laramie foi descrito por Harak e Hendrickson.⁵⁵

Uma grande vantagem das retortas NTU é poderem ser utilizadas com uma grande variedade de xistos de teor diferentes, o que não acontece com outros tipos de retorta. As retortas Pumpherson, por exemplo, produziam resultado relativamente bons com os xistos de baixo teor da Escócia, mas quando testados pelo Bureau of Mines nos xistos de teor mais rico do Colorado, os resultados foram medíocres.⁵⁶

Tanto um processo como o outro não são comercialmente viáveis.

⁴⁹ Idem.

⁵⁰ Williamson, D. R. op. cit.

⁵¹ Hamor, W. A. *American experimental oil shale distillation plants* e Mckee, R. H. *Oil shale*. New York. The chemical Catalog Co., Inc., 1925, p. 150-70.

⁵² Gavin, M. J. & Desmond, J. S. Construction and operation of bureau of mines experimental oil-shale plant 1925-27. *U. S. Bureau of Mines Bulletin*, n. 315, 1930; Well, W. E. & Ruark, J. R. Pilot-plant batch retorting of Colorado oil shale. *U. S. Bureau of Mines Report. Inv. 4874*, May 1952, p. 19; Guthrie, Boyd. Oil from rock; the gas combustion. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 59(3): 7-18, July 1964.

⁵³ Harak, A. E. et alii. Preliminary design and operation of a 150 ton. oil shale retort. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 65(4):41-56, Oct. 1970.

⁵⁴ Ruark, J. R. et alii. Gas combustion retorting of oil shale under anvil points lease agreement; Stage II. *U. S. Bureau of Mines Report. Inv. 754*, 1971.

⁵⁵ Harak, A. E. Some results from the operation of a 150 ton. oil shale retort. *U. S. Bureau of Mines Technological Progress Report 30*, 1971; Hendrickson, Thomas A. Oil shale processing methods. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2): 45-69, April 1974.

⁵⁶ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil shale; part 2: mining shale oil extraction process. *Mineral Industries Bulletin*. 18(1), Jan. 1975.

5.1.4.2 Outros processos do tipo II com retortas contínuas *gas combustion*

O desenvolvimento deste processo pelo United States Bureau of Mines foi um produto das experiências feitas por esse órgão desde a década de 1920. As pesquisas foram, porém, intensificadas após a instituição do Ato de Combustíveis Líquidos Sintéticos em 1944. Foram destinados US\$87 milhões ao programa especificado pelo Ato, o qual seria conduzido pelo Bureau of Mines.⁵⁷ Várias retortas foram estudadas, tendo-se chegado à conclusão de que as mais eficientes, em termos de energia de aquecimento, eram as de combustão interna — tipo II — porque todo o calor necessário para a retortagem podia ser gerado a partir do carbono residual da destilação do xisto. Com o uso de retortas contínuas deste tipo, a eficiência térmica era considerada ótima. A partir destas conclusões, o Bureau of Mines desenvolveu uma retorta de combustão gasosa (*gas combustion*) baseada no princípio de *combustão segregada*, e com as características de circulação contracorrente de gás de aquecimento e descida controlada do xisto na retorta — características essas que vieram a ser incorporadas a outros processos, inclusive o Petrosix brasileiro.

A retorta consiste basicamente de dois trocadores de calor com uma câmara de combustão intermediária em um só recipiente. No trocador superior, o xisto, que vai lentamente descendo, é aquecido até as temperaturas necessárias por uma contracorrente de gás. Devido à contracorrente do gás, este é, por sua vez, esfriado quando entra em contato com o xisto descendente, e os vapores de óleo são condensados em uma nuvem de óleo. Na área de combustão, o gás é aquecido a um nível térmico tão alto que a temperatura do trocador de calor inferior transfere calor do xisto quente para o gás que entra frio de reciclado. Circula bastante gás até o fundo da retorta para esfriar o xisto, de modo que pode ser trabalhado por um equipamento comum de transporte. A utilização de transferência de calor que se evidencia neste processo é de alta eficiência térmica.⁵⁸

Uma grande vantagem do processo é que os xistos frios são usados para esfriar os gases quentes, evitando-se o consumo de água, e uma desvantagem inerente às retortas de combustão interna, mesmo incluindo o princípio de *combustão*, é o fato de não poderem as cargas de xisto incluir pedaços muito pequenos ou pó, pois afetam a circulação de gases quentes. Isto implica que essas partículas de xisto sejam transformadas em pedaços maiores por métodos de compressão, ou colocadas num outro tipo de retorta auxiliar capaz de processar xistos de vários tamanhos, como é o caso das retortas da Union Oil ou Tosco II. Para um complexo de 50 mil barris por dia, o Bureau of Mines avaliou que a existência complementar de

⁵⁷ Matzick, Arthur et alii. Development of the Bureau of Mines gas combustion oil-shale retorting process. *Bureau of Mines Bulletin*, U. S. Department of the Interior. n. 635, 1966, p. 1-3.

⁵⁸ Guimarães, Archimedes Pereira. Extração — Secagem — Retortagem — Refinação. 2a. parte. *Betumes*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1968, p. 83-112.

equipamentos industriais para comprimir 4% do xisto em pedaços maiores, tornando desse modo todo o xisto aproveitável, aumentaria o custo de capital em torno de US\$1,7 milhão.⁵⁹ O aproveitamento de óleo do processo *gas combustion* em relação ao ensaio de Fischer é de cerca de 82 a 87%. O ensaio de Fischer é um processo de retortagem em miniatura, desenvolvido pela United States Bureau of Mines, pelo qual se podem comparar aproveitamentos de vários processos e teores de vários xistos. Tornou-se amplamente conhecido como unidade de referência, e por isso é usado com frequência neste trabalho para comparar determinadas características de processos diferentes. Acrescente-se de novo, porém, que os valores comparativos de aproveitamento dos vários processos não podem ser analisados independentemente das características próprias dos xistos e de outras variáveis de produção. Uma retorta poderá, por exemplo, ser desenhada de maneira que, para obter um certo tipo de gás, o aproveitamento do óleo tenha de ser sacrificado, ou vice-versa. Os detalhes qualitativos e técnicos do ensaio de Fischer foram descritos por Stanfield & Frost, Hubbard, Goodfellow & Atwood, e Hendrickson.⁶⁰

A Union Oil Co., desde os fins da década de quarenta, desenvolveu três espécies de retorta. A *A*, do tipo II, a *B*, do tipo III; e a *SGR*, também do tipo III, ou seja, de aquecimento externo. Todas três são retortas de circulação contracorrente como a de *gas combustion*, mas o xisto entra pela base da retorta, e não por cima. A vantagem desta característica não existente em outros processos conhecidos é a de criar maior movimentação do xisto na retorta, fazendo que pedaços pequenos possam ser processados sem causar problemas de circulação de gases de aquecimento. Este problema acentua-se em retortas de combustão interna em que o xisto entra por cima e mantém uma posição fixa no transporte gravitacional durante todo o processo. Quando pequenas partículas entram nessas retortas, ocorrem bloqueamentos na circulação dos gases.

O processo das retortas *A* também não necessita de água; o aproveitamento de óleo relativo ao ensaio de Fischer é de 84%; a eficiência térmica é tão alta como a do processo *gas combustion*, e as vantagens inerentes ao sistema de transporte do xisto são consideráveis em todos os sentidos, exceto no que se refere à manutenção de equipamento. A bomba que faz subir o xisto poderá envolver custo de manutenção.⁶¹

⁵⁹ Katell, S. & Wellman, P. An economic analysis of oil shale operations featuring gas construction retorting. *U. S. Bureau of Mines Technological Progress; Report n. 81*, 1974.

⁶⁰ Stafield, K. E. & Frost, I. C. Methods of assaying oil shale by a modified Fisher retort. *U. S. Bureau of Mines. Inv. 4477* (Revision, R. I. 3977), 1949; Hubbard, A. B. Automated Fisher retorts for assaying oil shale and bituminous materials. *U. S. Bureau of Mines Report. Inv. 6676*, 1965; Goodfellow, Lawrence & Atwood, Mark T. Fischer assay of oil shale procedures of the oil shale corporation, *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 69(2): 205-20, April 1974; Hendrickson, Thomas A. Oil shale processing methods. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 69(2): 45-69, April 1974.

⁶¹ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil shale; part 2: mining and shale oil extraction processes. *op. cit.*

O processo Paraho, que foi desenvolvido por Development Engineering Incorporated (associado da Paraho Development Corporation), é bastante semelhante ao de *gas combustion*, embora apresente certas diferenças no sistema de abastecimento e descarga, e na distribuição de gás de combustão. O xisto entra na retorta pela parte superior, passando por um distribuidor rotativo, e entra em contato com gases quentes de combustão. O óleo e o gás são recolhidos por tubos situados quase no topo da retorta, e o carbono residual do xisto destilado, ao passar junto dos queimadores, incendeia-se, produzindo o calor necessário para a pirólise do xisto que segue descendo na retorta. Os resíduos são por fim expulsos, passando por uma grande osciladora. Estas características são também comuns no processo Petrosix, se bem que, neste, o aquecimento do xisto é um pouco diferente.

As vantagens e desvantagens do processo Paraho são idênticas às de outros de combustão interna, embora o sistema de abastecimento e descarga concorra para uma maior eficiência do processo. O aproveitamento de óleo, neste caso, excede 90% do ensaio de Fischer.⁶²

Em agosto de 1973, a Paraho Development Corporation começou um programa de pesquisa e desenvolvimento de 30 meses em Anvil Points, perto de Rifle, Colorado. Os primeiros testes foram iniciados em abril de 1974, com uma retorta de 1,5 metros de diâmetro e 20 metros de altura, tendo a produção de óleo começado em maio do mesmo ano. Em julho de 1974 uma nova retorta de 3,5 metros por 25 metros entrou em testes,⁶³ e ainda antes do fim desse ano já se tinham registrado operações contínuas superiores a duas semanas, com um processamento de até 400 toneladas diárias.⁶⁴

Esse processo não necessita de água. A Paraho Development Corporation anunciou, em 1974, que, numa usina comercial, o gás da retorta seria queimado numa estação de geradores de energia elétrica. Os estudos da empresa determinaram, então, que apenas um terço dessa energia seria utilizado na produção e os dois terços restantes poderiam ser vendidos.

Para uma instalação de 100 mil barris por dia, um total de 200 megawatts diários podia ser gerado a partir do excesso da combustão de gases da retorta.⁶⁵ Numa etapa final da demonstração do processo Paraho em Anvil Points (presentemente ainda não alcançada), a retorta será alterada de maneira que o gás de circulação contracorrente seja aquecido externamente e injetado na retorta.⁶⁶ Se esta alteração experimental for adotada, o processo Paraho será quase totalmente idêntico ao Petrosix.

⁶² Piper, E. M. *Current status of oil shale*. Paper presented to joint meeting of ASME and AICHE. Golden, Colorado, Nov. 19, 1974.

⁶³ Pforzheimer, M. Paraho — new prospects for oil shale. *Chemical Engineering Progress*. 70(9) Sep., 1974.

⁶⁴ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil shale; part 2: mining... op. cit.

⁶⁵ Piper, E. M. op. cit.

⁶⁶ Hendrickson, Thomas A. op. cit.

O processo Pintsch foi utilizado na URSS desde a década de 1930 para aplicações na produção de gás e óleo. Trata-se de uma retorta de baixa temperatura com um mecanismo rotativo de descarga e com uma capacidade de processar xistos fraturados com diâmetros entre 25 e 125mm. Os produtos são óleo e gás de baixo valor calorífero (110 Btu por pé cúbico), o qual chegou inclusive a ser usado para aquecer os fornos de Tunnel, também conhecidos por retortas Tunnell, ou IM — invenção sueca (tipo III) de Carlsson e Zeidler.⁶⁷ Estas últimas, embora ultrapassadas, conseguem produzir gás de alto valor calorífero (900 Btu por pé cúbico). O desenvolvimento das retortas UTT do tipo IV tem, nos últimos anos, tornado as Pintsch e as Tunnel praticamente obsoletas.

5.1.4.3 Processos de aquecimento direto por circulação de fluidos externamente aquecidos — tipo III

Royster: este modelo, hoje com pouca ou nenhuma importância industrial por ser uma retorta de fornada, é semelhante ao NTU, com a diferença de ser o gás aquecido fora da retorta e ter um aproveitamento maior. Após 1944(quando o Bureau of Mines experimentou várias retortas, as Royster foram também experimentadas, tendo ajudado esse órgão federal norte-americano a concluir que retortas contínuas eram essenciais a qualquer processo de industrialização do xisto.⁶⁸

Union B: o processo da retorta *B* é termicamente diferente do da *A* (tipo II), mas a construção de ambas é semelhante. No processo *B* o aquecimento é levado ao xisto por intermédio de uma corrente de gás reciclado e externamente aquecido. As vantagens do sistema *Union B*, e de outros do tipo III são seu melhor controle de temperatura e a resultante maior produtividade de óleo, podendo atingir um aproveitamento em torno de 100%, relativo ao ensaio de Fischer.⁶⁹ O fato de poder o processo funcionar a baixas temperaturas controláveis evita a fusão do xisto fraturado, o que constitui uma das maiores vantagens do tipo III apesar de pequenas partículas não poderem ser processadas. No caso específico do processo *Union B*, o fato da retorta ser abastecida de baixo para cima contribui ainda mais para a eficiência do sistema. Além disso, existem as vantagens de o gás produzido não sair da retorta diluído com nitrogênio. O dióxido de carbono, em quantidades relativamente pequenas, é a única substância que sai diluída com o gás. Sob condições ótimas, o gás produzido excede o utilizado no aquecimento do xisto, e pode ser vendido ou usado para outros

⁶⁷ Gejrot, Claes. Development of the Swedish shale oil industry. *American Institute of Chemical Engineers*, New York, 61(54): 7-14, 1965.

⁶⁸ Guimarães, Archimedes Pereira, op. cit.

⁶⁹ Hartley, F. L. *Oil shale: another source of oil for the United States*. Paper presented to Oil Daily's Third Annual Synthetic Energy Forum. New York, Jun. 10, 1974.

fins industriais.⁷⁰ Em contrapartida, processos do tipo III, incluindo o Union B, apresentam uma eficiência térmica inferior aos processos de combustão interna (tipo II). Tem havido uma série de especulações sobre a intenção da Union Oil Co. de construir um processo de combinações de A e B, mas até 1977 ainda nada de concreto parece ter sido desenvolvido.

Union SGR (recirculação de vapor-gás): Este processo é essencialmente o mesmo de B mas com equipamento auxiliar para recuperar energia do carbono residual através de gaseificação. Desde outubro de 1973, a Union Oil Co. pôs em operação uma retorta SGR de 3 toneladas diárias de capacidade no centro de pesquisas de Brea, Califórnia, e outra de 1.500 toneladas diárias foi projetada para ser construída no Colorado em 1975, a fim de servir de laboratório para um complexo comercial de 50 mil barris por dia, que, segundo a empresa, poderá estar em operação por volta de 1980.⁷¹

O equipamento auxiliar utilizado neste processo consiste de um gerador de gás, um gaseificador, um aquecedor de gás e equipamento especial de ligações e transporte.

O xisto, depois de destilado, passa todo o topo da retorta (o movimento do xisto na retorta ocorre de baixo para cima) para um vaso de gaseificação em que o carbono residual reage com oxigênio e com vapor para produzir gás composto de hidrogênio e monóxido de carbono. O aquecimento necessário para manter esta reação é gerado pela combustão parcial de carbono residual com oxigênio para formar o monóxido de carbono. O aproveitamento é de 100%, relativo ao ensaio de Fischer, e a eficiência térmica é relativamente alta para um processo do tipo III. A necessidade de água para esfriar o xisto no gaseificador é, contudo, talvez a sua maior desvantagem. Mesmo em áreas onde possa existir água em abundância, o que geralmente não é o caso, a necessidade desse recurso na retortagem nunca deixa de ser uma desvantagem.

Petrosix: Este processo, desenvolvido pela Superintendência da Industrialização do Xisto (SIX), da Petrobrás, e utilizado na usina protótipo de São Mateus do Sul, Paraná, empregando uma retorta com capacidade de 2.200 toneladas diárias, apresenta características dos processos *gas combustion* e Paraho, embora suas características de aquecimento sejam do tipo III. Foi desenhado a partir das condições geológicas locais; serve para produzir óleo com um aproveitamento de 100% relativo ao ensaio de Fischer, gás de boa qualidade, e enxofre para aplicações industriais; processa partículas de xisto com dimensões de até 15 centímetros, e apresenta certas características tecnológicas funcionais em relação às propriedades geológicas dos

⁷⁰ Sladek, Thomas, A. op. cit.

⁷¹ Hartley, F. L. op. cit.; Hartley, F. L. & Hopkins, J. M. *Joint statement before the Colorado Interim Legislative Committee on oil shale, coal and related minerals. Colorado. Grand function, July 23, 1974.*

xistos locais, que o colocam como um dos processos atualmente mais bem desenhados.⁷²

O xisto entra na retorta através de um distribuidor rotativo e desce lentamente atravessando zonas de secagem, aquecimento, retortagem e esfriamento, sendo por fim expulso através de uma grade oscilante e depositado numa represa construída especialmente com o objetivo de evitar poluição e de estudar formas apropriadas de rejeitar o xisto gasto sem criar ocorrências de combustão natural. O aquecimento provém de uma corrente de gás reciclado que é aquecido numa fornalha separada, desenhada para usar ou óleo de xisto ou gás do processo como combustível. Ultimamente, testes têm sido realizados com a intenção de vir a utilizar o carbono residual como combustível para o aquecedor de gás reciclado. O gás preaquecido é injetado nas camadas de xisto, quando atravessam a zona de retortagem. A temperatura pode ser controlada. Uma segunda corrente reciclada e não-aquecida é, por sua vez, injetada na zona inferior para ascender através do xisto e recolher calor. Os vapores de óleo sobem para a parte superior, esfriando à medida que entram em contato com as camadas de xisto mais frias.⁷³

O custo da usina protótipo de São Mateus foi de US\$36 milhões; produz atualmente cerca de mil barris de óleo, 500 metros cúbicos e gás combustível e 17 toneladas de enxofre por dia. O projeto para uma usina de escala comercial, iniciado em julho de 1977, levará mais uns três anos para ser concluído. Terá um porte aproximado de 50 mil barris diários, um investimento de capital da ordem de US\$1,5 a 2 bilhões e empregará em torno de 3 mil pessoas de vários níveis profissionais.

Embora processos de retortagem *in situ* possam talvez vir a ser aplicados, segundo Homero Moreira, Superintendente da SIX, existem ainda grandes incertezas quanto à viabilidade técnica desses processos em relação às condições locais.

5.1.4.4 Processos que utilizam a transferência de calor pela introdução de sólidos quentes na retorta — tipo IV

Tosco II: Este processo usa um sistema de circulação de bolas de cerâmica aquecidas. É um aperfeiçoamento do processo Aspeco, inventado pelo sueco Olof Aspegren, cujos direitos de patente foram comprados pela Oil Shale Corporation (Tosco), em 1952. Os desenvolvimentos iniciais foram conduzidos pelo Denver Research Institute, que construiu uma usina piloto com capacidade para processar 24 toneladas por dia em Denver, Colorado,

⁷² Sladek, Thomas A. op. cit.; Bruni, C. E. *Brazilian oil shale development*. Eight World Petroleum Congress, Moscow, 1971; Hendrickson, Thomas A. op. cit.; Pricn, Charles H. *Current developments in world oil shale technology*. Rio de Janeiro. Simpósio sobre Ciência e Tecnologia do Xisto realizado de 12 a 17 de dezembro de 1971 em Curitiba, Paraná, 1971.

⁷³ Hendrickson, Thomas A. op. cit.

em 1957.⁷⁴ Em 1964, Tosco, Standard Oil Company de Ohio (Sohio) e Cleveland-Cliffs Iron Company formaram a Colony Development Operation para demonstrar o processo Tosco III na exploração e retortagem dos xistos de Piseance Basin, Colorado. Em 1969, a Atlantic Richfield Co. (Arco) juntou-se à Colony Development Operation e, entre 1970 e 1972, as operações envolveram o uso de uma retorta de mil toneladas por dia. Em 1974, a organização ficou formada unicamente pela Shell, Ashland Oil e Arco, tendo nessa época conseguido um contrato de arrendamento com o governo federal com o objetivo de partir para a industrialização comercial do minério. Nos últimos meses de 1974, a Colony Development Operation anunciou que a construção seria adiada por motivo de incertezas na economia doméstica e na situação energética internacional.⁷⁵ Contudo, o plano continua em vigência e a mina e as estradas de acesso já foram construídas.

Neste processo, as bolas de cerâmica, com alto conteúdo de alumina e 1,25cm de diâmetro são aquecidas numa fornalha à temperatura de 648°C com gás resultante da pirólise. As bolas quentes e o xisto, preaquecido a 260°C com gases da fornalha das bolas, entram no cilindro rotativo de retortagem em quantidades proporcionais a duas toneladas de bolas quentes por uma tonelada de xisto. As bolas são finalmente separadas do xisto pirolisado por meio de uma peneira cilíndrica rotativa com pequenos orifícios.⁷⁶ O aproveitamento de óleo é de cerca de 100%; a recuperação total de C₄ e de hidrocarbonos mais pesados varia em torno de 108%; também em relação ao ensaio de Fischer. A maior parte do gás produzido é, contudo, consumida na fornalha de aquecimento das bolas, e pouco poderia ser vendido.⁷⁷

Uma grande vantagem deste processo é a de poder processar pequenas partículas de xisto — desvantagem em todos os processos do tipo II e III, com as exceções parciais dos processos da Union Oil — mas esta característica pode ser vista também como desvantagem, pelo fato de todo o xisto ter de ser fragmentado em pequenas partículas antes de entrar no cilindro cilindro da pirólise. Partículas de xisto de tamanho grande não seriam pirolisadas eficientemente com as pequenas bolas quentes. A complexidade do processo pode representar um problema de manutenção. Além do processo ser termicamente menos eficiente que os do tipo II, há ainda certos detalhes que não têm sido devidamente expostos. O custo de manutenção e substituição de bolas é um exemplo.

⁷⁴ Hendrickson, Thomas A. op. cit.; Nevans, T. D. et alii. *Retorting Colorado oil shale by the Aspeco process*. Preprints of Society of Petroleum Engineers of AIME. Meeting of March 3-4, 1958.

⁷⁵ Spence, H. M. *Testimony before the State of Colorado*. Interim Committee on Oil Shale, Coal and Related Minerals. Denver, Oct. 8, 1974.

⁷⁶ Hall, R. N. & Yardoumian, L. H. *The economics of commercial shale oil production by the Tosco II process*. 61st. Annual Meeting of American Institute of Chemical Engineers, 1968.

⁷⁷ Sladek, Thomas A. op. cit.

Para contraste, outras vantagens deverão ser mencionadas: a condensação dos vapores de óleo torna-se mais fácil porque estes não se diluem com produtos de combustão; o gás residual tem alto valor calorífico e, por não haver combustão, o óleo não sofre qualquer degradação. Os defensores do processo alegam que a presença de partículas pequenas de xisto é uma ajuda para o processo e não um problema.⁷⁸

Lurgi-Ruhrgas. Neste caso, o xisto, também em pequenas partículas, é pirolisado pela introdução de pequenas partículas de sólidos aquecidos, que entram em contato com o xisto através de um misturador. De preferência, estes sólidos são os restos do próprio xisto depois de processado, mas, no caso de xistos de alto teor que se transformam em resíduos finos após a retortagem, outros sólidos, como grãos de areia, terão de ser usados. Quando o processo foi testado com xistos da formação Green River, a areia teve de ser misturada com o xisto gasto, devido a esse problema. Os sólidos usados como veículos de aquecimento dependem do tipo de material processado. A destilação de carvão usaria carvão devolatilizado como sólido de aquecimento; a destilação de areias betuminosas usaria areia residual.⁷⁹

A maior vantagem do processo é, de novo, sua produtividade. O aproveitamento de óleo é superior a 100%, relativo ao ensaio de Fischer, e, por não haver qualquer combustão na retorta, o gás produzido é também de alto valor calorífico. Tanto este como os vapores de óleo não são diluídos com gases de combustão, o que, por sua vez, dispensa parcialmente a necessidade de esfriamento. A água é usada quase unicamente para regar o resíduo e evitar a poluição do ar. A quantidade requerida pelo processo é mínima, em torno de 10% do peso total do resíduo. Estes e outros detalhes técnicos do processo foram descritos por Schmalfeld e Rammler.⁸⁰

Tal como no processo anterior, os custos de fraturação do xisto em pequenas partículas parecem, à primeira vista, constituir uma desvantagem, mas todo o xisto pode desta forma ser aproveitado, ao contrário do que acontece com quase todos os processos dos tipos II e III. Como a quantidade de xisto naturalmente fraturado em partículas de até um centímetro pode atingir 10 a 20% do material minerado,⁸¹ torna-se mais difícil decidir

⁷⁸ Tosco closes in on oil shale mining. *Engineering and Mining Journal*. (168):6-64, 1967.

⁷⁹ Rammler, R. *One process, three feeds for synthetic crude*. American Institute of Mining, Metal, Petroleum, Engineers Annual Meeting, Denver, Colorado, Sep. 1970, p. 63-66 e *The production of synthetic crude oil from oil shale sand by application of Lurgi-Ruhrgas process*. *Canadian Journal Chemical Engineering*, v. 48, Oct. 1970, p. 552-60.

⁸⁰ Schmalfeld, B. *The use of the Lurgi-Ruhrgas process for the distillation of oil shale*. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3):129-45, July 1975; Rammler, R. *One process, three feeds for synthetic crude*. American Institute of Mining, Metal, Petroleum Engineers Annual Meeting, Denver, Colorado, Sep. 1970, p. 63-66 e *The Production of synthetic crude oil from oil shale sand by application of Lurgi-Ruhrgas process*. *Canadian Journal Chemical Engineering*. v. 48, Oct. 1970, p. 552-60.

⁸¹ Schmalfeld, B. *op. cit.*

se esta característica de Tosco II e de Lurgi-Ruhrigas é vantagem ou desvantagem. Trata-se basicamente de avaliar o custo e o benefício econômico do uso de um destes processos *versus* o uso de duas retortas de tipo diferente para processar xistos de tamanhos variados. Em relação a Tosco II, Lurgi-Ruhrigas apresenta a vantagem de ser menos complexo, mas o misturador pode apresentar problemas mecânicos devido ao uso contínuo.

Os problemas mais sérios deste processo associam-se ao movimento de pó dentro do sistema. A acumulação de pó inflamável nas linhas de transporte do sistema pode causar entupimento e possibilidades de incêndio. Além disso, o pó tende a ser arrastado com o óleo, o que implica um acréscimo de custos operacionais associados com o reprocessamento do produto,⁸² Schmalfeld, um defensor do Lurgi-Ruhrigas, alegava em 1975 que este processo era “superior a todos os outros”,⁸³ mas alguns dos problemas levantados por Sladek⁸⁴ referentes a custos, pó e poluição do ar não foram devidamente debatidos. Referindo-se ao processo Lurgi-Ruhrigas, dizia Schmalfeld que “a custos correntes de petróleo bruto, uma planta comercial de destilação de xisto pode funcionar economicamente quando o xisto contém mais de 5% de óleo, e quando os custos de mineração são razoáveis. A economia pode ser melhorada quando o resíduo da destilação pode ser utilizado na produção de tijolos e cimento.”⁸⁵ Este último detalhe só é correto em situações geológicas onde o xisto esteja associado com calcário. Quanto a custos, as projeções do autor são praticamente irrelevantes em termos práticos.

UTT — Por último, este processo, desenvolvido pelo Instituto de Energia Kzhzhizhanovsói, na URSS, merece considerável atenção não só devido a certas características técnicas, como também por causa de seu impacto na industrialização do xisto naquele país. Começou sendo experimentado há uns quinze anos, e já se encontra em funcionamento em escala comercial pelo menos em Kivilyli. O seu esquema básico é em certos aspectos semelhante aos de Tosco II e Lurgi-Ruhrigas, mas apresenta significantes alterações. Ao contrário desses dois processos, o material sólido empregado é, neste caso, a cinza do xisto gasto, que se obtém pela combustão do xisto residual retornado.⁸⁶

No fim da década de 60, uma retorta de 500 toneladas por dia já tinha sido construída e usada com relativo sucesso.⁸⁷

⁸² Sladek, A. op. cit., e Schmalfeld, B. op. cit.

⁸³ Schmalfeld, B. op. cit.

⁸⁴ Sladek, Thomas. op. cit.

⁸⁵ Schmalfeld, B. op. cit.

⁸⁶ Prien, Charles. op. cit.

⁸⁷ Ulanen, Y. S. *Retorting shale fines in a process with a solid heat carrier. Proceedings of the First United Nations Symposium on the Development and Utilization of Oil Shale Resources.* Tallim, 1970.

Uma característica interessante deste processo é a flexibilidade de seu funcionamento ou a altas temperaturas (650 a 750°C) para a maximização da produção de gás, ou a temperaturas baixas (470 a 520°C) para o máximo aproveitamento de produtos líquidos.⁸⁸ O gás combustível produzido pode atingir um valor calorífero de 1.100 Btu por pé cúbico (10 mil Kcal. por metro cúbico), e ser utilizado tanto para consumo direto como para gerar eletricidade.

O processo pode, portanto, adaptar-se com extrema flexibilidade a alterações na demanda. A capacidade de cada retorta pode ultrapassar 2 mil toneladas diárias.⁸⁹

Os soviéticos consideram estas retortas um desenvolvimento tecnológico da maior importância na industrialização do xisto para fins energéticos. As retortas Pintsch, além de serem excessivamente caras têm uma capacidade de tonelage bem inferior.⁹⁰ Estudos feitos na URSS sobre as retortas UTT têm defendido que sua instalação em quantidades ótimas reduziria à metade os custos de qualquer usina existente.⁹¹ Contudo, segundo estudos sobre condições necessárias para uma otimização de viabilidade econômica, qualquer processo de retortagem deve, tanto quanto possível, prestar-se a retortas únicas de alta tonelage e não a uma multiplicidade de retortas de baixa tonelage.⁹² Se Guthrie estiver correto com relação a situações variadas, o processo UTT poderia, então, ser ainda mais eficiente.

O otimismo que este modelo de retortagem tem gerado provém principalmente da sua contribuição econômica para a industrialização do xisto, a qual parece ter sido a razão da queda dos déficits que vinham ocorrendo durante as épocas de crescimento da indústria, após a II Guerra Mundial.⁹³

5.1.5 Sumário sobre a retortagem *ex situ*

Além da diferença entre retortas de fornada e retortas contínuas, existem cinco tipos de processos que se distinguem pelo método de aquecimento, embora o tipo V, que diz respeito a métodos mais avançados e ainda não desenvolvidos ou aperfeiçoados, não fosse sequer mencionado por essa razão.

Pode-se concluir que cada tipo tem vantagens e desvantagens especiais que nem sempre podem ser controladas por motivos intrínsecos às caracte-

⁸⁸ Doilov, S. K. e Mil'k, A. A. *Obtaining lower unsaturated hydrocarbons by means of oxidizing pyrolysis of vapor gas mixture during thermal decomposition of oil-shale mining and processing of oil shale*. Oil Shale Institute, Leningrad, 1965.

⁸⁹ Prien, Charles A. *op. cit.*

⁹⁰ Halling, A. O. & Efimov, V. M. *Semi-coking of oil shale in gas generator with horizontal-transverse flow of gaseous heat exchanger*. Trans. Scientific Research Institute on Mining and Processing of Oil Shale, Leningrad, 1965.

⁹¹ Cieslewicz, Wladislaw J. Present trends in Estonian-Russian work on oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 62(3):141-165, 1967.

⁹² Guthrie, Boyd. Oil from rock — the gas combustion. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 59(3):7-18, Jul. 1964.

⁹³ Soviets admit shale-oil mistakes. *The Oil and Gas Journal*. (64):90-1, May 9, 1966.

terísticas geológicas dos xistos. As retortas do tipo I, apesar de não serem viáveis para fins comerciais, representam, em alguns casos, ótima aplicação na produção de gás. As retortas do tipo II e seus respectivos processos são termicamente os mais eficientes e mecanicamente mais simples, mas seu aproveitamento é, todavia, inferior ao dos tipos III e IV, além de não poderem processar pequenas partículas de xisto ou pós. Este problema já não é tão acentuado nos processos do tipo III, mas persiste, de qualquer forma. Neste caso, o aproveitamento de gás e óleo é ótimo, mas a eficiência térmica é um pouco sacrificada. Por último, os processos do tipo IV são potencialmente os mais produtivos sob condições geológicas apropriadas, mas também são mais complexos e termicamente menos eficientes que os dos tipos II e III. Tais processos podem utilizar todo o xisto desde que este seja fraturado em partículas minúsculas, o que por sua vez contribui para um aumento de custos de produção. Em contraste, a utilização simultânea de tipos de retortas diferentes para processar partículas de xisto com tamanhos diferentes pode ser uma alternativa, mas tem de ser levado em consideração o fato de que a utilização de várias retortas num dado complexo também conduz a acréscimos de custos. Guthrie⁹⁴ sugeriu que para poder ser economicamente viável qualquer processo de retortagem deve:

- a) ser contínuo;
- b) ser capaz de uma alta eficiência de recuperação de óleo;
- c) ser capaz de alto grau de processamento;
- d) ser termicamente auto-suficiente (que toda a energia necessária à produção provenha ou da combustão do resíduo carbonáceo ou de gases provenientes da destilação do xisto;
- e) exigir um baixo capital de investimento;
- f) ser mecanicamente simples, facilmente operável, e manter baixos custos operacionais;
- g) prestar-se a retortas únicas de alta tonelagem, e não a uma multiplicidade de retortas de baixa tonelagem;
- h) requerer pouca ou nenhuma água;
- i) ser capaz de processar com alta eficiência partículas de xisto de tamanhos variáveis.

As prescrições de Guthrie são lógicas e teoricamente válidas, mas não podem ser tomadas como regras, porque viabilidade econômica é uma questão muito relativa. Nenhum dos processos mencionados de retortagem *ex situ* satisfaz as condições que, segundo Guthrie, são essenciais à viabilidade econômica. Alguns deles, no entanto, poderão ser perfeitamente viáveis dentro de determinada amplitude de preços do petróleo, por exemplo.

⁹⁴ Guthrie, Boyd. *Technological development in retorting Colorado oil shale*. U.S.G.S. Bureau of Mines, 1945, e *Oil from rock the gas combustion*. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 59(3):7-18, Jul. 1964.

Vários tipos e processos de retortagem *ex situ* foram descritos mais para fins informativos que comparativos, dado que a comparação de processos tem relevância limitada por motivos já mencionados. A comparação torna-se difícil não só por causa do papel de fatores específicos do local, como também pelo fato de se encontrar a maioria dos processos mais competitivos ainda em fase de desenvolvimento tecnológico.

Visto que a viabilidade econômica da industrialização do xisto depende, pelo menos parcialmente, dos preços de substitutos, e principalmente do preço do petróleo bruto, torna-se desse modo importante que uma das principais variáveis de comparação seja o custo de produção de óleo de xisto (e de subprodutos) em cada processo, quando aplicado às mesmas condições. Contudo, isto é praticamente impossível. Em primeiro lugar, é quase totalmente improvável um estudo que aplique diferentes processos a um dado local e, devido a esta improbabilidade, a única alternativa consiste, portanto, em ajustar os custos determinados em dado local às condições diferentes noutro local, o que não ocorre facilmente, pois algumas das variáveis de local não são de fácil mensuração ou de comportamento previsível. Em segundo lugar, grande parte das avaliações dos custos atribuídos aos processos existentes é muito pouco elucidativa e, em certos casos, até estrategicamente irrealista para fins de promoção dos processos. Em suma, o que existe sobre avaliações de custos dos processos de retortagem é bastante precário. O fato de grande parte deles se encontrar ainda em desenvolvimento contribui para agravar esse problema. Vejamos algumas estimativas de custos.

Em junho de 1971, a Oil Shale Corporation anunciou que os custos avaliados para a produção de óleo de xisto pelo processo Tosco II era de US\$1,95/bbl, e US\$3,95/bbl para o óleo beneficiado, referente a uma usina de 66 mil toneladas diárias, 53 mil barris por dia e de um xisto com teor de 137 litros/t, incluindo a produção de enxofre, amônia e coque. Segundo a mesma empresa, o custo incluía todos os encargos de proteção ao meio ambiente, recuperação de produtos complementares do óleo, inflação até 1974 e depreciação de 15 anos, numa base de *straight line*.⁹⁵ Já se vê, por este exemplo, a quantidade de variáveis que poderão afetar o custo de qualquer processo. A inclusão ou exclusão dessas variáveis alterará evidentemente os resultados das estimativas.

Em 1974, o United States Bureau of Mines publicou um trabalho em que o custo atribuído ao processo *gas combustion* era de cerca de US\$6/bbl.⁹⁶ Qual a razão da diferença tão significativa entre os custos dos dois processos, quando, afinal, ambos têm sido considerados competitivos? Que significa essa diferença?

⁹⁵ Koolsbergen, H. *Annual stockholders meeting*. New York, The Oil Shale Corporation, Jun. 1971.

⁹⁶ Chaves, Flávio de Magalhães. *O xisto betuminoso*. Rio de Janeiro, Petrobrás, Serarj, p. 7-41, 1975.

Custos referentes à produção de óleo de xisto pelo processo UTT na URSS foram apresentados por Valjotaga⁹⁷ na Conferência de Tallinn, em 1968. Os dados referiam-se a uma seqüência de produção que envolvia a retortagem, a baixa temperatura de partículas de xisto de 20 a 80 milímetros, a combustão de partículas inferiores a 20 milímetros para a produção de energia elétrica, e a produção complementar de produtos químicos. Neste sistema de produção, o custo avaliado do óleo produzido era de US\$2,70 a 2,85/bbl. Note-se que estas estimativas, apesar de estarem em linha com as referentes a Tosco II, não são, todavia, muito elucidativas, pois nada sabemos sobre as diferenças dos custos de mão-de-obra, de antipoluição, etc.

Com relação ao caso brasileiro, as estimativas feitas atualmente pela Petrobrás (SIX) e referentes à aplicação do processo Petrosix a nível industrial são bem mais elevadas que as incluídas num documento enviado às autoridades federais pela Tenenge (Técnica Nacional de Engenharia S/A.), uma associada da Occidental Petroleum Corporation e da Projex dos EUA. Enquanto as estimativas desta empresa para a produção de óleo a partir dos xistos de Irati, utilizando métodos *ex situ* (sem referência a nenhum, em particular), eram de US\$3,67/bbl e US\$5/bbl para o óleo beneficiado,⁹⁸ as da Petrobrás (SIX) eram muito mais elevadas. Embora tivéssemos conseguido acesso ao documento em que essas informações são especificadas,⁹⁹ foi-nos, contudo, pedido informalmente que não publicássemos tais dados, devido a seu caráter *confidencial*. Pode-se acrescentar, de qualquer forma, que as razões dessa grande diferença só podem ser produto de métodos diferentes de avaliação, e não efeito de significantes diferenças tecnológicas entre os processos desenvolvidos pela SIX e pela Tenenge ou suas empresas associadas. Os cálculos da Tenenge incluíam como variáveis os "custos financeiros, a uma taxa anual de 12%, supondo a capitalização de parcelas anuais do investimento durante o período de construção da usina, calculada em 3 anos, com amortização durante o período subsequente de 17 anos em parcelas anuais e iguais". Segundo a mesma fonte, "admitindo que a recuperação das inversões em ativo fixo viesse a ser realizada de modo uniforme durante a vida do projeto — 20 anos — com a adoção de um critério mais simples de depreciação e na ausência de custos financeiros, o preço do barril de óleo produzido seri a US\$2,43 (bruto), US\$3,20 (beneficiado) pelos processos convencionais hoje conhecidos e de US\$1,43 (bruto) e US\$2,27 pelo processo *in situ* de Garrett, agora proposto". A título de nota, convém aqui lembrar que a Tenenge é associada da empresa americana Occidental Petroleum Corporation, a qual possui as patentes desse processo.

⁹⁷ Valjotaga, J. *Increase of economic efficiency of retorting Estonian oil shale*. Proceedings of the First United Nations Symposium on the Development and Utilization of Oil Shale Resources. Tallinn, 1970.

⁹⁸ Rocha, Antonio Maurício da. Tenenge lidera empresa para exploração do xisto. *Petróleo*. São Paulo, 13(164):4-8, fev. 1975.

⁹⁹ Petrobrás. *Estimativa de custo para usina industrial*. Curitiba, SIX, Superintendência da Industrialização do Xisto, nov. 17, 1975.

Seria praticamente inútil continuar esta análise de custos, em face da subjetividade e irrelevância que se fazem notar na maior parte das avaliações de custos existentes.¹⁰⁰

5.2 O Método *in situ*

Esta modalidade, embora seja hoje a mais estudada devido a suas vantagens, não é nova. Já durante a II Guerra Mundial tinha sido desenvolvida e usada comercialmente na Alemanha¹⁰¹ e na Suécia.¹⁰²

Quando se fala de métodos de produção de óleo de xisto por intermédio do processo *in situ*, o foco principal de discussão é a retortagem, visto o método eliminar total ou parcialmente todas as fases de produção que antecedem a retortagem nos processos *ex situ*.

A retortagem *in situ* inclui processos que não requerem qualquer mineração e processos que envolvem alguma mineração. Esta, quando existente, tem sua razão de ser em função de dois fatores: escolha de tecnologia e características das reservas de xisto. Dentre os processos que não envolvam qualquer mineração, salientam-se os que têm sido desenvolvidos pela Equity Oil, Sinclair Oil, e pelo United States Bureau of Mines. Os processos Garrett, hoje pertencentes à Occidental Petroleum e o Rise (Rubble In Situ Extraction) incluem alguma mineração como técnica de assistência à retortagem.

O método *in situ* conta com as grandes vantagens de: a) exigir nenhuma ou pouca mineração, reduzindo ou eliminando os custos; b) ser menos poluidor; c) produzir danos mínimos na superfície dos solos; d) não precisar praticamente de água; e f) resolver ou minimizar o problema de depósito do xisto gasto.

Apesar de todas estas vantagens, acontece, porém, que os processos *in situ* não são igualmente aplicáveis em todos os casos, especialmente por causa das variações no grau de permeabilidade das reservas e nas formações rochosas adjacentes. Muitos dos fracassos de alguns testes *in situ* têm sido causados pelo fato do xisto não ser uma rocha porosa nem ser fa-

¹⁰⁰ Apesar dos problemas apontados quanto a estimativas de custos, alguns autores apresentam informações interessantes. Harry Perry (Costs of liquid fuels from oil shale. *Preprints Division Fuel, Chemistry, American Chemical Society*. Washington D.C., 14(3), 1970, faz um levantamento de custos digno de leitura e análise, embora suas conclusões sejam bem diferentes de algumas estimativas já mencionadas. Uma outra divergência é apresentada por Katell; Stone & Welman (Katell, S.; Wellman, P. & Stone, Reid. Oil shale — a clean energy source. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):1-20, Apr. 1974). Sladek, em concordância com alguns outros estudiosos da questão, menciona custos referentes a condições norte-americanas, em torno de US\$7-12.00 (Sladek, Thomas A. op. cit.).

¹⁰¹ Williamson, D. R. op. cit.

¹⁰² Gejrot, Claes. op. cit.

¹⁰³ Ridley, Richard D. *In-situ processing of oil shale. Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):21-4, Apr. 1974.

cilmente encontrada em formações permeáveis.¹⁰³ Para que a retortagem *in situ* seja otimamente eficiente, é necessário que exista um alto grau de permeabilidade no depósito, o que raramente acontece. Por isto, os processos *in situ* devem, em primeiro lugar, ser divididos em duas categorias: uma que usa a permeabilidade natural; outra que cria permeabilidade artificial em condições em que a permeabilidade necessária para a retortagem naturalmente não existe. Os processos que envolvem alguma mineração pertencem à categoria que cria permeabilidade artificial.

5.2.1 Processos que usam permeabilidade natural

Certas áreas dos depósitos de xisto da formação Green River, por exemplo, que contêm depósitos de minerais de soda solúveis em água, tais como o carbonato de sódio aluminoso e o bicarbonato de soda são, por esta razão, naturalmente permeáveis e ideais para a retortagem *in situ*, uma vez que a água seja extraída da formação por intermédio de bombas.

Em 1961, a Equity Oil Company desenvolveu um processo para a exploração de óleo de jazidas naturalmente permeáveis, pelo qual gás natural quente ou metano sintético é introduzido no depósito. Após a pirólise, o óleo, o gás produzido e o gás natural já esfriado são recolhidos e separados na superfície. O gás é reaquecido na superfície e injetado nos depósitos de novo, dando continuidade ao sistema.¹⁰⁴ O processo foi testado em Piceance Basin em 1965.¹⁰⁵ O óleo obtido era de alta qualidade, mas a viabilidade econômica era muito baixa. A recuperação do gás de aquecimento era difícil, e os custos eram demasiado altos. Acabou por ser suspenso por motivos econômicos. Processos para a permeabilidade natural são raros, precisamente porque essa permeabilidade também é rara.

5.2.2 A criação de permeabilidade artificial e seus processos

A permeabilidade artificial pode ser criada por fraturação e mineração parcial complementar. No primeiro caso, as técnicas mais conhecidas são o uso de ar e água a alta pressão, explosivos tradicionais, produtos químicos, corrente elétrica ou explosivos nucleares.

A desvantagem principal da fraturação é seu alto custo em termos de energia empregada, além dos danos que poderão ser produzidos nas camadas do solo e subsolo.

Testes concluídos pela Sinclair Oil Company em Piceance Basin, 1954, empregaram técnicas de fraturação. Após alguns estudos, concluiu-se que o xisto poderia ser mais bem fraturado por meio de injeção de ar a alta

¹⁰⁴ Sladek, Thomas A. op. cit.

¹⁰⁵ Hill, G. R. & Dougan, P. The characteristics of a low-temperature in-situ shale oil. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 62(3):75-90, Jul. 1967.

pressão. Os resultados não foram satisfatórios.¹⁰⁶ Outras experiências foram efetuadas pela Sinclair em 1965, tendo sido realizado e publicado um estudo de viabilidade econômica, o qual concluiu que este processo também não era recomendável para fins comerciais.¹⁰⁷ No início da década de 60, o United States Bureau of Mines iniciou suas pesquisas sobre retortagem *in situ*.¹⁰⁸ Retortas de fornada com capacidade de 10 a 150 toneladas foram usadas no Laramie Research Center para simular condições de retortagem *in situ*. Os resultados de aproveitamento para partículas de xisto de tamanho até 4 pés cúbicos foi de 55%, relativo ao ensaio de Fischer, comparado com o resultado típico de 62% para partículas menores processadas na mesma retorta.¹⁰⁹ Concluiu-se também que o método de permeabilidade artificial por fraturação através de técnicas convencionais apresenta a desvantagem comum de não poder controlar o tamanho das partículas de xisto, dando origem a um baixo aproveitamento de óleo.

O Bureau of Mines realizou outros testes usando cargas elétricas,¹¹⁰ dinamite¹¹¹ e água¹¹² como agentes de fraturação. Os resultados foram, contudo, relativamente deficientes para uma viabilidade econômica desejável.

O método de fraturação através de explosivos nucleares foi estudado no início da década de 60 pelo Bureau of Mines em associação com a Atomic Energy Commission. As técnicas foram descritas e analisadas por Lekas e Carpenter.¹¹³

As duas maiores vantagens no emprego de explosivos nucleares são as seguintes: a energia nuclear é altamente concentrada e, ao contrário da dinamite, precisa de uma pequena fração de espaço para produzir efeitos de grande porte. Seriam necessários aproximadamente 227 milhões de quilogramas de TNT para produzir o efeito de uma carga nuclear de 250 quilotons.¹¹⁴ Os fatores de desvantagem comparativa para o TNT são seu alto custo, volume e custos associados com os meios de introduzi-lo na jazida.

A segunda vantagem de explosivos nucleares é seu baixo custo econômico, desde que possam ser comprados. Em 1966, por exemplo, enquanto

¹⁰⁶ Grant, B. F. Retorting shale underground — problems and possibilities. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 59(3):39-46, Jul. 1964.

¹⁰⁷ Barnes, A. L. & Ellington, R. J. A look at in-situ oil shale retorting methods based on limited heat transfer contact surfaces. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 63(4):83-108, Oct. 1968.

¹⁰⁸ Carpenter, Harry C. & Sohns, Harold W. Development of technology for in-situ oil shale processes. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):143-69, Apr. 1974.

¹⁰⁹ Sladek, Thomas A. op. cit.

¹¹⁰ Sarapuu, E. Underground electrocarbonization of oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 60(3):198-205, Jul. 1965.

¹¹¹ Miller, J. S. & Nicholls, H. R. Methods and evaluation of explosive fracturing in oil shale. *U. S. Bureau of Mines; Report Inv. 7729*, 1973.

¹¹² Campbell, W. G. et alii. Evaluation of oil shale fracturing. Experiments near Rock Springs, Wyo. *U. S. Bureau of Mines; Report Inv. 7397*, 1970.

¹¹³ Lekas, M. A. & Carpenter, H. C. Fracturing oil shale with nuclear explosives for in-situ retorting. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 60(3):7-30, Jul. 1965.

¹¹⁴ Sladek, Thomas A. op. cit.

a Atomic Energy Commission cobrava US\$ 350 mil por uma carga de 10 quilotons, uma carga de 2 mil quilotons custava apenas US\$600 mil.¹¹⁵ O uso de grandes retortas poderia reduzir consideravelmente os custos de produção, mas o tamanho das retortas no método *in situ* depende diretamente das condições geológicas das reservas e não precisamente de critérios técnico-econômicos.

As desvantagens do uso de explosivos nucleares são ainda mais importantes que suas vantagens. A libertação de isótopos radioativos e suas implicações na vida do planeta representam um problema ainda sem solução. Os efeitos de explosões no subsolo, nas áreas vizinhas, e nos indivíduos que se encontram nas proximidades constituem um outro problema. Até se conseguir soluções tecnológicas, o uso de explosivos nucleares não é viável; e mesmo se forem encontradas, outros aspectos globais relacionados com sobrevivência humana no sistema ecológico e político deverão ser considerados. Deve-se acrescentar, por último, que o uso de explosivos nucleares, apesar de ser inviável dentro do atual estado das artes, só pode ser considerado como alternativa em países onde já existe uma infraestrutura industrial de energia nuclear desenvolvida para outros fins que não apenas a industrialização do xisto, visto não possuir esta condições de demanda que justifiquem o desenvolvimento desse tipo de energia.

O método de criação de permeabilidade artificial pela mineração parcial e complementar como técnica de facilitação da retortagem é, presentemente, o mais viável. As técnicas consistem em minerar uma pequena porção no fundo da reserva de xisto para que o teto da mina desmorone por meio de uma explosão relativamente pequena e controlada.¹¹⁶ Após o colapso dos tetos da jazida e sua resultante permeabilidade, o túnel de acesso é fechado, os instrumentos de produção são inseridos, e o xisto é retortado. Os processos Garrett e RISE são os mais conhecidos.

A Garrett Research and Development Company é subsidiária da Occidental Petroleum Corporation e começou suas pesquisas em 1968. Realizou experiências a partir de 1972 numa propriedade privada de 4 mil acres, perto de Grand Junction, Colorado. Os detalhes do projeto e da tecnologia do processo foram descritos por Ridley e Chew.¹¹⁷ O processo consiste de três etapas básicas: a) mineração parcial de 15 a 25% do xisto; b) explosão controlada por meio de perfurações verticais e desmoronamento do

¹¹⁵ Lekas, M. A. Economics of producing shale oil, the nuclear in-situ retorting method. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 61(3):91-114, Jul. 1966; Sladek, Thomas A. op. cit.

¹¹⁶ Sladek, Thomas A. op. cit.

¹¹⁷ Ridley, Richard D. *Speech given at the Tri Stage Energy Conference*, Denver Colorado, Jan. 31 to Feb. 1, 1974; In-situ processing of oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):21-4, Apr. 1974; ———. *Testimony on H. R. 9663, Shale Oil Development Corporation Act, oil shale resource, and occidental in-situ oil shale process*. Presented to House of Representatives, Subcommittee on Science and Astronautics. Washington, D.C., May 14, 1974, e Ridley, Richard & Clew, R. T. *In-situ oil shale process development*. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3):123-8, Jul. 1975.

teto da jazida; e c) retortagem, usando ar e combustão subterrânea de modo semelhante ao processo NTU. Cerca de 1.200 barris de óleo foram produzidos na retorta piloto, que tinha dimensões de 10 por 22 metros, englobando 3-4 mil toneladas de pedras de xisto. O gás produzido contém de 2 a 4% de monóxido de carbono, algum hidrogênio, hidrocarbonos leves e matéria inerte. O aproveitamento do processo atingiu 60%, em relação ao ensaio de Fischer.¹¹⁸ Em 1974, a Garrett e a Occidental Petroleum iniciaram desenvolvimentos operacionais para industrialização em escala comercial, tendo decidido construir uma retorta subterrânea de 75 por 30 metros.¹¹⁹

O processo Rise, desenvolvido pelo Lawrence Livermore Laboratory, é muito semelhante ao Garrett; destina-se à exploração de xistos do Colorado com mais ou menos o mesmo teor — 76 litros/t; tem aplicações e vantagens semelhantes ao anterior; usa o mesmo sistema de aquecimento, envolve uma mineração de 20%, a qual pode ser retortada na superfície ou rejeitada e, por apresentar modificações técnicas planejadas, torna-se o competidor direto do processo Garrett, embora esteja ainda menos desenvolvido.

A principal diferença entre os dois é que o Rise envolve a técnica de mineração contínua em contraste com a mineração única de Garrett. Os defensores do processo Rise argumentam que seu competidor é eficiente em jazidas estreitas, de profundidade variável, mas que não é eficientemente aplicável a reservas de grande largura. Defendem os mesmos que o aproveitamento do óleo pelo processo Rise é de 60%, relativo ao ensaio Fischer, e que os custos por barril são da ordem de US\$6-9.00.¹²⁰ As comparações de custos realizadas por Lewis e Rothman¹²¹ não apresentam dados referentes ao processo Garrett, nem sequer o discutiram nesses termos. Os detalhes mais completos do processo e das experiências realizadas foram apresentados e discutidos por Lewis & Rothman; Rothman & Edey; Kennedy & Niemeyer.¹²²

5.2.3 Sumário sobre a retortagem *in situ*

As vantagens destes processos, especialmente no que diz respeito a questões de caráter ecológico, intensificarão as pesquisas sobre seus problemas e

¹¹⁸ Ridley, Richard D. In-situ processing of oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):21-4, Apr. 1974; Ridley, Richard D. & Chew, R. J. op. cit.

¹¹⁹ Ridley, Richard D. & Chew, R. T. op. cit.

¹²⁰ Rothman, Albert J. Research and development on rubble in-situ extraction of oil shale (RISE) at Lawrence Livermore Laboratory. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3):159-78, Jul. 1975.

¹²¹ Lewis, A. E. & Rothman, A. J. *Rubble in-situ extraction (RISE): a proposed program for recovery of oil from oil shale*. UCRL 51768, Mar. 5, 1975.

¹²² Lewis, A. E. & Rothman, A. J. op. cit.; Rothman, Albert J. op. cit.; e Edey, Anthony; Kennedy, B. A. & Niemeyer, K. E. *A study of costs of producing in-situ retorts in Oil Shale by Conventional Mining Methods*. Report to LLL by Golder Associates, UCRL 13610, Oct. 1974.

desvantagens. Um destes problemas consiste na dificuldade existente, sob certas condições geológicas, de evitar que os gases usados e produzidos na retortagem escapem para a superfície, criando problemas de poluição. O menor aproveitamento de óleo, conseguido por este método, em comparação com o *ex situ*, não apresenta necessariamente uma desvantagem, quando se consideram outros fatores associados com a quantidade de reservas, e a relativa importância do xisto como fonte de energia. Além disso, a maior produtividade na retortagem de processos *ex situ* é, em certos casos, insignificante em virtude da mineração. O elevado consumo de energia nos processos *in situ*, em comparação com os de retortagem na superfície, é visto como outro problema que se reflete nos custos, mas, em contrapartida, a ausência ou redução de custos de mineração é fator compensador, podendo o método *in situ* tornar-se mais econômico que o *ex situ*, em condições geológicas apropriadas. Os processos que criam permeabilidade artificial por intermédio de fraturação são geralmente menos eficientes que os que usam mineração parcial complementar. Quanto à questão de custos, é, de novo, irrelevante fazer grandes comentários sobre especulações publicadas. Não se conseguiu quaisquer informações sobre o custo por barril, no processo Garrett, quando aplicado a determinado local, exceto as informações encaminhadas pela Tenenge às autoridades federais brasileiras, as quais colocaram o preço do barril de óleo de xisto da formação Irati em US\$1.98 (bruto) e US\$3.32 (beneficiado). (Veja item 5.1.5 deste artigo). Nesse documento enviado às entidades federais pela Tenenge, foi dada preferência ao método de retortagem *in situ*. Uma das conclusões finais desse documento foi que “dos 127 milhões de metros cúbicos de xisto, valor estimado das reservas brasileiras, somente serão recuperáveis pelos processos de tratamento *ex situ* 8 bilhões de metros cúbicos, isto é, 6,3%.”¹²³

5.3 Refinação

Algumas das características físico-químicas do óleo de xisto bruto e do gás produzidos por nove processos de retortagem *ex situ* e três *in situ* estão anotadas na tabela 2, publicada em Sladek¹²⁴ e baseadas nas referências citadas junto com o quadro.

Sladek conclui o seguinte: “Se bem que as propriedades variam bastante no quadro de dados do Quadro 2, algumas generalizações podem ser feitas para retortas de tipos específicos, especialmente em relação a propriedades de gases de retortagem. O gás duma retorta de combustão interna (tipo II — *gas combustion*, Paraho, Union A) tem um baixo valor calorífico (cerca de 100 Btu por pé cúbico) devido à diluição com nitrogênio e com dióxido de carbono. O gás duma retorta de combustão por gases em

¹²³ Rocha, Antonio Maurício da. Tenenge lidera empresa para exploração do xisto. *Petróleo*. São Paulo, 13(164):4-8, fev. 1975.

¹²⁴ Sladek, Thomas A. Recent trends in oil shale; part 3: shale oil refining and some oil shale problems. *Mineral Industries Bulletin*. 18(2):21, Mar. 1975.

Tabela 2

Propriedades do óleo e gás provenientes dos vários tipos de retortas

Tipos de retorta	Ensaio de Fischer	1501 NTU	81/dia Gas Combustion	1501/dia Gas Combustion	Union Oil A	Union Oil B	Union Oil SGR	Petrosix (xisto do Irati)	Lurgi- Fuhrgas	Tosco II	Equity in situ	USBM in situ	Sinclair in situ
Propriedades do óleo													
Densidade (°API)	20,7	25,2	20,1	21,2	20,7		21,5	19,6		21,2	41,2	28,4	30,6
Densidade específica (60°F/60°F)	0,830	0,803	0,833	0,827	0,830		0,825	0,836		0,827	0,820	0,885	0,873
Ponto de fluidez (°F)	75	70	90	85	90		70	25		90	0	10	35
Ponto de fluidez (°C)	23,8	21	32,2	29,4	32		21,7	-4		27	-18	-12,2	9,4
Viscosidade (Centistokes)	23,72	15,45	28,79	18,55	23,63		—	20,76		22	—	5,84	—
Viscosidade (SUS)	113/100°F	79/100°F	127/130°F	91,7/130°F	113/122°F		—	100,7/100°F		108/100°F	—	45/100°F	—
% de carbono/peso	85,23	84,58	—	—	—		—	—		85,1	85,3	84,88	—
% de hidrogênio/peso	11,38	11,76	—	—	—		—	—		11,6	13,4	12,02	—
% de nitrogênio/peso	1,80	1,77	2,16	2,11	1,90		1,80	0,88		1,9	0,53	1,69	1,14
% de oxigênio/peso	—	—	—	—	—		—	—		0,8	0,55	0,81	0,49
% de enxofre/peso	0,98	0,76	0,66	0,68	0,81		0,70	1,06		0,9	0,49	0,60	1,28
% de cinza	—	0,01	0,06	—	0,04		—	—		—	—	0,01	—
C													
r	7,49	7,19	—	—	—		—	—		7,34	6,37	7,06	—
H													
Ensaio de Fischer	26,7	25,4	27,2	25,2	27,9		—	—	27-33	—	—	—	—
Feed (gpt) recupera- ção de óleo (% do Fischer)	100	82,2	97	86,2	84,4	91	100	100	100	100	61	—	—
Destilação ASTM													
Ponto inicial de fervura °F	192	365	360	363	285					1.200	190	241	235

Tipos de retorta	Ensaio de Fischer	150t NTU	8t/dia Gas Combustion	150t/dia Gas Combustion	Union Oil A	Union Oil B	Union Oil SGR	Petrosix (xisto do Irati)	Lurgi-Ruhrgas	Tosco II	Equity in shale	USSM in shale	Sinclair in shale
acima 10%	336	493	505	497	509					275	290	383	417
20%	430	580	596	588	578					410	330	422	453
30%	518	—	680	665	622					620	395	498	508
40%	—	—	758	742	686					—	425	537	637
50%	655	670	837	807	688					775	480	575	666
60%	685	—	900	864	701					850	490	625	593
70%	705	—	—	915	—					920	538	665	632
80%	—	—	—	980	—					—	—	—	—
90%	—	—	—	1.066	—					—	588	—	678
Ponto final	—	692	—	—	—					—	800	673	—
Propriedades do gás													
Composição (volume % seco)													
O ₂	—	3,20	0,2	0,2	2,2	—			—	—	—	—	—
N ₂	—	69,41	58,5	62,2	56,9	—			7,7	—	—	—	—
CO	5,5	1,40	4,8	2,6	4,6	7,28			2,7	2,88			
CO ₂	36,5	23,55	27,0	25,2	30,3	16,48			25,0	14,33			
H ₂	18,7	0,05	5,0	4,3	2,2	18,20			18,5	33,85			
H ₂ S	3,7	—	—	—	0,1	0,96			1,95	2,50			
Hidrocarbonetos	35,6	2,39	4,5	5,5	3,7	57,09			46,1	46,13			
Total	100,0	100,45	100,0	100,0	100,0	100,01			101,98	99,59	100		
Água (volume %)	—	—	12	17	12,4	2,2			—	1,05			
Valor de aquecimento (BTU/acq)	758	80	91	118	80,8	800			750	755	1.032		

Fonte: Stadek, Thomas A. Recent trends in oil shale — part 3; Shale oil refining and some oil shale problems. Mineral Industries Bulletin, 18(2):6, Mar. 1975

Tabela 3

Variável	A Impacto no projeto	B Ação a empreender	C Impacto na comunidade	D Ação a empreender	E Variável afetada pelo projeto	F Ação a empreender	Importância das variáveis			
							Fases de desenvolvimento			
							Fase piloto		Produção comercial	
							OX	Gás	OX	Gás
Custos operacionais	MI	SI			M		xxx	xxx	xxx	xxx
Capital de investimento	MI	SI			P		xxx	xx	xxx	xxx
Existência de recursos materiais	MI	SI			N		xxx	x	xxx	xx
Existência de água	DOF	SI			N		xxx	xxx	DOF	DOF
Tecnologia de produção	MI	SI			P		xxx	xxx	xx	xx
Tecnologia de proteção ao meio ambiente	MI	MI			P		xxx	xxx	xx	xx
Comercialização de produtos	MI	SI			P		xxx	xxx	xxx	xxx
Mão-de-obra	MI	MI			M		xxx	x	xx	xx
Migração	SI	MI			DOF		xx	x	x	x
Habitação	PI	MI			M		xx	x	x	x
Serviços públicos	PI	MI			M		xx	x	x	x
Qualidade de vida	PI	MI			DOF		xx	x	x	x
Custo de vida	PI	MI			DOF		xx	x	x	x
Especulação imobiliária	PI	MI			DOF		xx	x	x	x
Energia de produção	MI	DOF			N		xxx	xxx	xxx	xx
Alternativas de energia	MI	SI			N		xxx	xxx	x	x
Preços do petróleo	DOF	SI			DOF		xxx	x	xxx	xx

SI — Sem impacto
 PI — Pouco impacto
 MI — Muito impacto

DOF — Depende de
 outros fatores
 N — Nada

P — Pouco
 M — Muito
 OX — Óleo de xisto

x — Sem importância
 xx — Alguma importância
 xxx — Muita importância

circulação aquecidos externamente (tipo III — Union B, SGR, Petrosix) tem um valor calorífico muito mais alto (cerca de 700-800 Btu por pé cúbico). Isto é igualmente correto para o ensaio de Fischer, Tosco II, e Lurgi-Ruhrigas. Os gases obtidos destes processos não são diluídos com o nitrogênio do ar de combustão e a diluição com dióxido de carbono é inferior, porque as temperaturas operacionais são mais baixas que as temperaturas em que a decomposição de carbonatos ocorre. O gás produzido pelo processo *in situ* da Equity parece ser de qualidade anômala, mas deve ser mencionado que o meio de transferência de calor neste processo é o gás natural, e que nenhuma combustão ocorre na jazida.¹²⁵

Generalizações, por tipo de retorta, sobre as propriedades do óleo, são mais difíceis, visto que muitas informações estão faltando na tabela 2. Com as exceções dos óleos obtidos por processos *in situ* e pelo *ex situ* Petrosix, pode-se afirmar, contudo, que os óleos de xisto são pesados, líquidos, viscosos, com pontos de fluidez a temperaturas altas, quantidades moderadas de enxofre, e valores altos de nitrogênio. . . Os óleos especificados no Quadro 2 com exceção do Petrosix e dos provenientes de processos *in situ* têm pontos de fluidez superiores a 21°C. Ponto de fluidez é a mais baixa temperatura em que o óleo flui. Para simples comparação, um bom petróleo tem um pouco de fluidez inferior a 4,5°C.¹²⁶

As propriedades dos óleos de xisto acima descritas por Sladek, com as notáveis exceções dos óleos dos processos Petrosix e *in situ*, apresentam problemas para o transporte do óleo bruto para centros de refinação. O transporte economicamente mais viável, por meio de oleodutos, torna-se um problema devido à solidificação do óleo a temperaturas inferiores a 21-32°C. Isto significa que os óleos com tais propriedades (o que não é o caso do brasileiro, pelo menos quando produzido pelo processo Petrosix) terão de ser melhorados no local de retortagem antes de poderem ser transportados para centros de refinação já existentes, visto que em situações onde já existam refinarias de petróleo, por exemplo, poderá não ser viável transferi-las para os sítios de retortagem.

5.4 Subprodutos

Além do óleo combustível, o xisto pode ser utilizado para produzir gás, eletricidade, enxofre, amônia, coque, cimento, tijolos, e até alumínio. Esses subprodutos, contudo, dependem das propriedades do xisto e da tecnologia usada. Cimento e tijolos, por exemplo, podem ser produzidos a partir das cinzas de xisto que contenham quantidades consideráveis de pedra calcárea, mas isso implica também a necessidade de usar um processo de retortagem que opere com pequenas partículas de xisto.

¹²⁵ Sladek, Thomas A. op. cit.

¹²⁶ Schmalfeld, B. op. cit.

A produção de alumínio, por sua vez, depende da existência de carbonato de sódio aluminoso (*dawsonite*), $\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$, e de triidrato de alumínio (*nordstrandite*), $\text{Al}(\text{OH})_3$, que, ao que consta, não são encontrados na formação Irati mas existem, por exemplo, nos xistos da formação Green River, nos EUA, em quantidades estimadas em torno de 6,5 bilhões de toneladas.¹²⁷ Os métodos analíticos usados para determinar a existência desses minerais associados e os processos de seu aproveitamento foram descritos detalhadamente por vários autores.¹²⁸

Desde o início da década passada, o Laramie Energy Research Center tem feito pesquisas sobre o aproveitamento do minério tendo conseguido chegar a conclusões sobre um processo viável.¹²⁹ O processo Bayer, com patente estabelecida em 1894, tem aplicação, mas, segundo a literatura afim, é deficiente em certos aspectos com relação ao xisto. Existem ainda outros processos em desenvolvimento, tais como o da Superior Oil Company e da Pechiney — empresa francesa produtora de alumínio.¹³⁰

Em breve sumário, qualquer desses processos envolve a pirólise desses minerais associados ao xisto, pela qual são decompostos, pelo calor, em várias substâncias, entre elas: um tipo de óxido aluminoso (Al_2O_3) e carbonato de sódio (Na_2CO_3).¹³¹

As principais diferenças entre os processos existentes concentram-se nas fases de dissolução dos carbonatos e na separação do triidrato de alumínio. A reação desejada ocorre a temperaturas por volta de 370°C, e o aquecimento acima de 670°C pode tornar insolúvel grande parte do alumínio recuperável.¹³² Tanto o óxido de alumínio como o carbonato de sódio

¹²⁷ Smith, John Ward & Young, Neil B. Dawsonite: its geochemistry, thermal behavior and extraction from Green River oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3):69-94, Jul. 1975.

¹²⁸ Smith, John Ward & Young, Neil B. op. cit.; Haas, Frank & Atwood, Mark To Recovery of alumina from dawsonitic oil shales. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3):95-108, Jul. 1975; Keighin, C. William. Resource appraisal of oil shale in the Green River formation; Piceance Creek Basin, Colorado. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3):57-68, Jul. 1975; Weichman, Ben. The superior process for development of oil shale and associated minerals. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):25-43, Apr. 1974; Robb, W. A. & Smith, J. W. Mineral profile of the Green River formation oil shales at Colorado Crechole. Denver, Colorado, Rocky Mountain Association Geologists, 1974, p. 91-100; Zen, E. & Hammarstrom, J. G. Quantitative determination of dawsonite in Green River shale by powder — samplex — ray diffraction; effect of grinding. *Journal Research*. U. S. Geological Survey, 3(1):21-30, 1975; Huggins, C. W. et alii. Evaluation of methods for determining nahcolite and dawsonite in oil shale. U. S. Bureau of Mines, Report Inv. 7781, 1973, p. 21.

¹²⁹ Smith, J. W. & Johnson, D. R. *Thermal analysis of natural fuels*. Symposium on Thermal Analysis, 2nd Proceedings, Toronto Section, Chemical Institute of Canadá, 1967, p. 96-116.

¹³⁰ Xisto agora tem preço compensador. *O Globo*, Rio de Janeiro, 24.6.1977.

¹³¹ Smith, J. W. & Johnson, D. R. op. cit.

¹³² Weichman, Ben. The superior process for development of oil shale and associated minerals. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):25-43, Apr. 1974.

acompanham o xisto utilizado até à descarga da retorta, donde poderão depois ser levados para uma solução de lixívia cáustica leve, formada por água da mina, ou água salgada, com hidróxido de sódio, se este for necessário,¹³³ ou um ácido ou base.¹³⁴ Segundo Weichman, o óxido de alumínio dissolve-se na lixívia cáustica leve em íon de alumínio que é, por sua vez, exposto a um processo de decantação de contracorrente em três ou quatro estágios. O licor saturado é purificado e vazado através de um filtro para remover as partículas de xisto. A carbonação, entretanto, ocorre, precipitando o triidrato de alumínio ($Al_2 [OH]_6$), que é separado da solução por meio de filtração. Para Smith & Young¹³⁵ o processo é tecnicamente viável, mas pode ser mais complicado, e até antieconômico, por causa da problemática da baixa solubilidade do carbonato de sódio aluminoso mesmo quando usados ácidos. Concluem os autores que as técnicas de produção deverão ser estabelecidas em função das características particulares do xisto em questão.

6. Energia e meio ambiente

À medida que fontes de energia exploradas se tornam cada vez mais escassas e mais caras de conseguir, surge a crescente necessidade de perguntar: quanta energia, e de que espécie, é necessária para produzir quanta energia, e de que tipo? Qual o custo dessa energia utilizada na produção? Quais as prioridades de uso dessa energia para que se evitem custos secundários decorrentes?

Nas condições em que vivemos, já não é suficiente utilizar certo tipo de energia na produção de outro, unicamente segundo critério de custo ou de saldo energético.¹³⁶ A preocupação com o máximo aproveitamento e benefício no uso desse recurso torna indispensável analisar os impactos futuros do emprego de certo tipo de energia na produção de outro. A própria análise de custos deverá levar em consideração esses efeitos que, por sua vez, poderão refletir-se em custos futuros relacionados, por exemplo, a readaptações e reajustamentos nas infra-estruturas industriais e de consumo em geral.

O uso de grandes quantidades de energia elétrica na produção de óleo de xisto, como no caso do processo sueco Ljungstrom e outros mais recentes, ao invés de um outro tipo de energia menos necessária, ou gerada pelo próprio processo de retortagem, é uma questão que merece a devida atenção. Este problema aponta para uma notável vantagem de alguns processos *ex situ* sobre processos *in situ* que dependem de maiores quantidades de energia externa para a produção. Até mesmo os mais sofisticados processos *in situ*,

¹³³ Id. *ibid.*

¹³⁴ Smith, John Ward & Young, Neil B. *op. cit.*

¹³⁵ Id. *ibid.*

¹³⁶ Sobre este assunto, veja, por exemplo, Clark, C. E. & Varisco, D. C. Net energy and oil shale. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 70(3):3-20, Jul. 1975.

hoje existentes, como Garrett ou Rise, consomem uma quantidade substancial de eletricidade na compressão de gás e na perquirição dos produtos líquidos. Apesar destes processos empregarem o princípio de combustão subterrânea, o consumo de energia elétrica chega a ser superior a 50% da energia total necessária para a produção.¹³⁷ Se bem que a própria retortagem possa ser preparada para produzir energia elétrica, este detalhe deve ser, todavia, analisado sob critérios comparativos de usos de energia.

O impacto da industrialização do xisto no meio ambiente é igualmente importante. É precisamente esta questão que tem, nos últimos anos, paralisado parcialmente o desenvolvimento industrial do minério nos EUA. Nesta questão os processos *in situ* ganham extrema vantagem, embora ainda haja, presentemente, problemas associados com a dificuldade de evitar a fuga de gases venenosos das retortas subterrâneas para a superfície. Potencialmente, o método *in situ* é, contudo, menos poluidor, por minimizar o transporte do minério, a poluição térmica¹³⁸ e a poluição do ar e da água.

Os xistos que contêm *nahcolite* (2NaHCO_3) — mineral associado —, como é o caso de grande parte das reservas da formação Green River, apresentam a vantagem dessa substância poder ser utilizada, depois de separada, na neutralização de produtos poluidores do ar. Experiências piloto realizadas nos EUA pela Air Preheater Co., Inc. para o Department of Health, Education and Welfare, demonstraram que a *nahcolite*, quando transformada em pó e usada como agente de absorção no fluxo de gases produzidos na retortagem, absorve quase 100% de dióxido de enxofre a um grau de eficiência sempre superior a 90%. O agente de absorção do SO_2 é basicamente o sulfato de sódio¹³⁹ — Na_2SO_4 ($2\text{NaHCO}_3 + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$).

O uso da *nahcolite* na absorção do óxido de nitrogênio já envolve um processo quimicamente mais complexo; sua eficácia é relativamente inferior, e mais dependente de custos. Embora esta aplicação da *nahcolite* continue sendo pesquisada, já foram conseguidos resultados em que até 66% de NO_2 foram absorvidos ($3\text{NO}_2 + 2\text{NaHCO}_3 \rightarrow 2\text{NaNO}_3 + \text{NO} + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$).¹⁴⁰

No caso do Brasil e da usina-protótipo de São Mateus do Sul, Paraná, onde não existem ainda grandes restrições quanto à poluição do ar e da água (salvo alguns casos a nível municipal e estadual), todos os critérios

¹³⁷ Cha, Chang Yul & Garrett, Donald E. Energy efficiency of the Garrett *in situ* oil shale process. In: Gary, James. Proceedings of the 8th oil shale symposium. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3), Jul. 1975.

¹³⁸ Sobre poluição térmica, veja, por exemplo, Tyler, A. Lamont. Excess heat generation in retorting oil shale in air. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 70(3): 207-20, Jul. 1975, e Kaskirsky, Vladimír & Koval, Aleksander. The thermo-oxidizing pyrolysis. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 70(3):109-22, Jul. 1975.

¹³⁹ Weichman, Ben. The superior process for development of oil shale and associated minerals. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):25-43, Apr. 1974.

¹⁴⁰ Weichman, Ben. *Energy and environmental impact from the development of oil shale and associated minerals*; (S.1.). The Superior Oil Company, 1972.

de poluição com relação a essa usina têm dependido da Petrobrás (SIX). Segundo o atual Superintendente da Industrialização do Xisto, Homero Moreira, estudos de poluição foram incorporados ao projeto-protótipo desde seu início, há quinze anos, por um grupo de estudos criado para esse fim. A emissão de SO₂ é atualmente de 0,2 partes por milhão, mais baixa até que em alguns casos de usinas piloto nos EUA. A Petrobrás (SIX) está inclusive contemplando a possibilidade de elevar esse baixo grau de emissão para 0,5, por motivo de custos. Para evitar a poluição da água, foi construída uma represa onde se depositam os dejetos do processo, embora ela não tenha sido instalada como solução permanente. A razão principal de sua construção deve-se não só à solução temporária da poluição, como também ao estudo do problema de combustão natural dos produtos gastos.

Os impactos socio-institucionais da industrialização do xisto são ainda um outro aspecto que necessita ser estudado para que se tomem providências apropriadas e, desse modo, evitem-se desgastes sociais nas comunidades industrializadas pelo xisto. Com relação a isto, não se pode igualmente afirmar que a Petrobrás (SIX) tenha demonstrado, até agora, o devido empenho no assunto. É sempre discutível se uma empresa pública deveria ser responsável ou não por esse tipo de problema.

O projeto de industrialização do xisto em escala comercial já foi iniciado e, segundo as previsões oficiais, será concluído dentro de três anos. Com uma capacidade de produção de 66 mil toneladas e 50 mil barris diários, aproximadamente 3 mil pessoas serão empregadas na operação. Dessas 3 mil pessoas, talvez bem mais de dois terços consistirão de mão-de-obra não-especializada e, dentro das condições sócio-econômicas brasileiras, tal força de trabalho receberá salários que permitem um baixo poder de compra. Durante a fase de construção, mais mão-de-obra será empregada.

São Mateus do Sul é um município com 8 mil habitantes, grande parte de descendência polonesa, e que, até à chegada da Petrobrás, compunham uma economia basicamente terciária e agrícola. A mão-de-obra desempregada e subempregada é baixa, e isso possivelmente provocará uma migração de indivíduos de baixo poder aquisitivo. Com a execução do projeto, a comunidade sofrerá alterações que se refletirão na qualidade de vida. A demanda de serviços públicos tais como transporte, educação e saneamento irá surgir de repente. Um considerável número de habitações necessitará ser construído e, se não for construído a tempo, e sob critérios econômicos coerentes com a capacidade financeira da mão-de-obra imigrante, um processo de construção de favelas irá inevitavelmente ocorrer. A demanda de serviços e produtos em geral subirá consideravelmente, contribuindo, por sua vez, para um aumento flagrante do custo de vida.

Nos últimos anos, a população local proprietária de terras tem visto unicamente vantagens no projeto. O valor desses terrenos tem aumentado assustadoramente, e a Petrobrás (SIX) tem contribuído para melhoramentos locais. Uma estrada foi construída; a rede telefônica existente foi instalada pela Petrobrás (SIX), e empregos, ainda que em baixo número,

foram criados. Não há dúvida de que a empresa estatal tem contribuído, até agora, para a valorização da comunidade. Acontece, porém, que nem a Petrobrás (SIX), nem o governo municipal com baixa capacidade financeira, nem outras organizações, públicas ou particulares, até à data, se preocuparam em iniciar quaisquer estudos dos impactos do projeto na comunidade.

Gilmore e Duff¹⁴¹ fizeram levantamentos sobre alguns dos impactos na região do Colorado sujeita à industrialização comercial, tomando por base os planos de produção da Colony Development Operation anunciados em 1973. Se tais planos se concretizarem, dizem os autores acima citados, "por volta de 1987, oito plantas industriais poderão estar funcionando no Colorado, com uma capacidade conjunta de 850 mil barris por dia, e plantas adicionais poderão ser acrescentadas em Utah e Wyoming. Cada projeto de mineração e processamento de 50 mil/60 mil barris diários envolve uma tarefa de construção que demora de dois a três anos e uma quantidade de mão-de-obra de 900 pessoas." Gilmore e Duff fizeram as seguintes previsões para a região do Colorado sujeita à industrialização do xisto:¹⁴²

"Tendo em vista 1987, prevemos uma população da região formada pelos três municípios de Garfield, Mesa e Rio Blanco em torno de 147 mil pessoas sem o desenvolvimento do xisto. Trata-se de uma economia regional basicamente próspera, presentemente bem diversificada, com um crescimento confortável para os próximos anos, a não ser que aconteça um colapso no turismo e recreação. O desenvolvimento do xisto da região, se ocorrer, acrescentará 160 mil pessoas à região das três localidades. Este aumento cobre a população mantida diretamente pela construção e operação, emprego básico, mais o emprego associado correspondente a serviços locais. As adicionais 160 mil pessoas fariam aumentar a população total, em 1987, para cerca de 310 mil. Esta taxa de crescimento (de 10-20% que, aliás, poderá tornar-se bastante moderada) dobra a taxa prevista (5%) sem xisto, e triplica a taxa de crescimento populacional atual; a taxa de crescimento na parte ocidental do município de Garfield ou em Rio Blanco poderá atingir 25-30%."¹⁴³

"Calculamos que esta população adicional associada ao desenvolvimento do xisto tornaria necessárias 20 mil unidades de habitação permanente e provavelmente outras 10 mil ou 11 mil casas móveis durante este período, se habitações permanentes existissem quando fossem necessárias.¹⁴⁴ Se não existisse habitação quando os trabalhadores migrantes chegassem com suas famílias, a proporção de casas móveis seria muito maior. O suprimento das necessidades habitacionais envolveria a construção de cerca de 5

¹⁴¹ Gilmore, John S. & Duff, Mary K. Impact of oil shale: boom or boon. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 69(2):119-23, Apr. 1974.

¹⁴² Id. *ibid.*

¹⁴³ Costa Neto, Cláudio. De como e por que utilizar os xistos. *Separata da Revista Ciência e Cultura*. 28(9):1024, set. 1976.

¹⁴⁴ Id. *ibid.*

mil casas por ano durante parte do período de 14 anos. A demanda de serviços públicos cresceria rapidamente com esta migração. Por exemplo, esta nova população incluiria uma soma de crianças em idade escolar avaliada em torno de 44 mil que requeririam um total de 1.500 salas de aula adicionais.”

É desnecessário dizer que estas previsões de Gilmore e Duff são baseadas numa realidade sócio-econômica bem diferente da do Brasil paranaense, mas a dinâmica geral do problema é idêntica. Poder-se-ia concluir, sem grande margem de erro, que, se os órgãos governamentais ou empresas públicas, orientadas por parâmetros governamentais, não entrarem em cena e montarem infra-estruturas apropriadas, tais como a construção antecipada de habitações coerentes com a capacidade financeira da mão-de-obra imigrante, São Mateus do Sul, com toda sua especulação imobiliária, verá sua qualidade de vida piorada. Favelas e outros problemas surgirão. É evidente que a própria natureza incerta da industrialização do xisto torna difícil fazer investimentos antecipados para enfrentar efeitos ainda mais incertos que a própria industrialização do xisto em escala comercial. Contudo, existe grande necessidade de ação neste campo, e acredita-se que compete à própria Petrobrás (SIX) iniciar estudos adequados ou motivar outras organizações a fazê-los.

7. Considerações de planejamento

Um projeto com tão grande impacto como o do desenvolvimento e industrialização do xisto não deve ser elaborado unicamente sob orientações tecnológicas e econômicas, pois ele não só depende de variáveis incertas, isto é, preço e abundância do petróleo, leis, participação política comunitária, etc., como também afeta outras variáveis importantes, como comunidade, custo e qualidade de vida, qualidade do meio ambiente, crescimento econômico, etc.

A tabela 3 reflete uma tentativa de focalizar as variáveis que afetam e/ou são afetadas por um projeto de desenvolvimento e industrialização do xisto para produção principal de óleo em dada comunidade e em escala comercial.

As colunas A, C, E e G foram atribuídos valores baseados num conhecimento geral do tema, e sem qualquer pesquisa especial. As colunas B, D e F ficaram em branco, esperando que possam vir a ser preenchidas por algum leitor/entidade interessada na elaboração de um projeto deste tipo. As colunas A e C referem-se ao impacto de cada variável no projeto, e a coluna E à maneira como cada variável é afetada pelo projeto.

Um dos maiores problemas de desenvolvimento de uma fórmula de máxima independência energética é o isolamento de esforços. A falta de coordenação entre os vários projetos de exploração de diversas fontes de energia é unicamente um aspecto do problema. Seria do interesse público nacional que as decisões referentes à escolha de fontes de energia e seus respectivos

programas fossem tomadas em função de uma análise global e comparativa de custo/benefício sócio-econômico e político.

Contudo, acontece, de um modo geral, que organizações criadas para desenvolver certo tipo de energia tendem a concentrar-se nos seus programas independentemente de esforços empreendidos por outras organizações em outros tipos de energia. A tendência comum dessas organizações é a de tentarem institucionalizar-se por si mesmas e procurarem a sobrevivência não tanto em função de necessidades e interesses nacionais, mas sim em função de interesses próprios. Existe por isso, uma necessidade urgente de se criarem grupos de trabalho destinados a: a) realizar estudos comparativos referentes às aplicações dos desenvolvimentos de diferentes fontes de energia e b) prestar serviços de assessoria aos órgãos de planejamento nacional, para que se evitem disfunções e possíveis duplicações de esforços e de gastos desnecessários na procura de uma fórmula de máxima independência energética.

8. Outras aplicações do xisto; nota final

Cabe finalmente salientar que além de todo o valor do xisto como fonte potencial de energia, ele tem outras aplicações não menos importantes. Existem hoje no Brasil centros de pesquisa estudando a utilização do xisto como fonte de matéria-prima para a indústria de transformação. Segundo o professor Cláudio Costa Neto, "o Projeto Xistoquímica do Instituto de Química da Universidade do Rio de Janeiro reconheceu essa situação em 1967, quando instalou — com o auxílio do Programa de FUNTEC do BNDE — com o propósito de desenvolver um programa de estudos fundamentais sobre a química dos xistos brasileiros necessários ao desenvolvimento de uma *xistoquímica* que fosse capaz de transformar o xisto em medicamentos, fibras para vestuário, etc.; para essas aplicações, um suprimento permanente de matéria-prima estaria garantido por um período extremamente longo de tempo, também porque permitiria ativar a utilização de pequenas jazidas de xistos no País, sem capacidade de suportar demanda para fins de combustível."

O Projeto Xistoquímica não é o único a se interessar por tal utilização do minério. O Instituto de Física da Universidade de São Paulo tem também, por meio de alguns pesquisadores isolados e projetos, manifestado interesse em aplicações não-energéticas do xisto. Claudio Costa Neto defende inclusive, que a xistoquímica é uma aplicação mais válida do que sua transformação em óleo, gás, subprodutos e elementos altamente poluentes. Em suas palavras:

"Energia é uma das necessidades primárias do homem, e as sociedades modernas são cada vez mais ávidas de energia; é necessário, portanto, que se possa dispor de fontes produtoras de energia capazes de suprir essa demanda.

“Conquanto esses sejam os objetivos ideais, reconhecemos também a realidade de que as sociedades humanas atuais, altamente competitivas e possessivas, não hesitam em gastar, até à exaustão se necessário, tudo o que se lhes apresentar e na velocidade que lhes permita alcançar seus objetivos, geralmente imediatistas. É o caso do petróleo — que é muito mais desperdiçado que utilizado —, será o da energia nuclear — com todos os problemas colaterais que traz, como o do lixo atômico por exemplo. O xisto (óleo de xisto) tem resistido até agora à velocidade do chamado *progresso* por questões de preço. É de preocupar ainda na utilização do xisto como fonte de energia, que a baixa eficiência no aproveitamento comum de energia pelas sociedades humanas (tanto a eficiência dos motores como o de sua utilização) pode desperdiçar talvez mais de 90% do combustível usado.

“O Projeto Xistochímica definiu um objetivo: o de utilizar o xisto no benefício das necessidades fundamentais materiais da sociedade, em remédios, habitação, vestuário etc. Balizada (a sua utilização) pelas proposições axiomáticas mencionadas, sempre frisando que a utilização de um bem material deve ser feita de modo a adequá-la às necessidades básicas da sociedade que dele se cerca, ao mesmo tempo que é preciso um esforço consciente dessa mesma sociedade de se adaptar às condições materiais de que dispõe. E ainda lembrar que qualquer utilização deve ser de forma a respeitar e preservar o equilíbrio natural das coisas.

“Os xistos podem suprir material para atender às necessidades: de vestuário, como fibras artificiais e corantes; de habitação, utilizando prensados de xisto, agregados cerâmicos, adesivos e vernizes; de medicamentos; de alimentação, pela humificação da matéria orgânica dos xistos e produção de fertilizantes nitrogenados; de um *papel de xisto* — a possibilidade de se preparar um material do xisto que viesse a substituir a celulose natural nas suas aplicações como elementos de preservação da cultura e de comunicação entre os homens (o papel) seria altamente gratificante, principalmente quando se antevê um alívio à pressão para os desmatamentos e desenvolvimento de monoculturas para produção de celulose; de alumínio; de enxofre.

“Por outro lado, pensamos que os xistos contêm a chave da origem e da evolução química dos seres vivos sobre a terra e que de seu estudo talvez possamos compreender por que somos, o que somos.”

Como nota final, torna-se necessário relembrar que o desenvolvimento e industrialização do xisto pode ter várias aplicações, como foi visto; tem importância política quando usado como fonte de energia; faz hoje parte do sistema de preços do Golfo Persa e da Opep como um todo; nas condições presentes é, em alguns casos, economicamente viável, embora essa viabilidade deva não só considerar fatores econômicos como também os políticos, ecológicos e os sociais. Acima de tudo, o xisto precisa ser visto como uma fonte de energia entre outras, e não como um recurso independente.

Summary

The objective of this article consists of describing the characteristics of the bituminous shale and sand and the several processes already used or now under experimentation for their use as energetic source, analyzing the problems, advantages and disadvantages of the use of these resources.

According to the authors, the search for alternative energetic sources is today not only a question of survival but much more a political question, of independence and sovereignty of the nations. Their intention, in this article, is not to attribute to shale the power to solve the energetic problem but to present informations which allow a better comparative analysis of the several alternatives of energy sources that could substitute petroleum.

A última palavra sobre os assuntos mais importantes na área econômica, em artigos assinados por especialistas nacionais e estrangeiros, V. encontra nas páginas da

**REVISTA
BRASILEIRA
DE ECONOMIA**

Reserve já a sua assinatura anual (4 números) por apenas Cr\$ 120,00, através de cheque pagável no RJ, em nome da FGV/ou envio de vale postal.

Mande nome e endereço à Editora da Fundação Getúlio Vargas — Praia de Botafogo, 186 CP. 9.052 — Rio de Janeiro — RJ.

**revista
brasileira
de economia**

FGV