



**Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da USP**



Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas

Mineração Espacial

Autor: Fábio Alves Rodrigues

Orientador: Prof. Dr. Wildor Theodore Hennies

Novembro / 2002

TF-2002

R 618m

Apno 1431330

M 2002 E

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005492

Agradecimentos:

Quero agradecer primeiramente aos meus pais, Niaval Rodrigues e Nanci Alves Rodrigues, por terem feito de tudo para proporcionar a mim e aos meus irmãos uma educação de qualidade, e principalmente pelos pais maravilhosos que sempre foram, sempre nos ensinando a viver com amor, dignidade e respeito.

Quero agradecer também aos meus irmãos Paula e Arthur, aos meus avós paternos, Lourival e Efigênia, e maternos, Dionísio e Inês, por terem sempre me incentivado, não só nos estudos, como em todas as fases importantes da minha vida, e à minha namorada Patricia Gastaldelli, que ao longo destes cinco anos têm me apoiado e dado forças para enfrentar todos os obstáculos que surgiram no meu caminho.

Finalmente, quero agradecer ao Prof.. Dr. Wildor Theodore Hennies, por ter aceitado ser meu orientador num trabalho cujo tema é ainda bastante polêmico na comunidade mineira brasileira.

Resumo:

O aumento das atividades econômicas no espaço sideral, como construções de grandes bases espaciais (orbitais ou não) de pesquisa, industriais, ou até mesmo turísticas, farão com que, num futuro próximo, surja uma necessidade crescente por matérias primas minerais no espaço. Isto, aliado ao alto preço envolvido no lançamento de materiais a partir da Terra, fará com que a mineração espacial se torne uma das mais importantes atividades deste século. Este trabalho foi elaborado visando mostrar o que podemos esperar encontrar nestes ambientes (principalmente na Lua, em asteróides e em Marte), algumas soluções propostas para futuras atividades minerais espaciais, além da importância do envolvimento das empresas e profissionais ligados ao setor mineral na Terra, para tornar realidade a mineração espacial.

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Por quê minerar o espaço?.....	3
2.1. Recursos minerais da Lua.	4
2.2. Recursos minerais em Asteróides.....	7
2.3. Recursos minerais em Marte.....	10
3. Algumas tecnologias já propostas.	13
4. Novas oportunidades para a indústria mineral.....	16
5. Possibilidades para o desenvolvimento de pesquisas brasileiras.	20
6. Conclusões	22
7. Bibliografia	23

1. Introdução

Com o fim da guerra fria, a conquista do espaço sideral deixou de ser vista como uma forma de se provar supremacia militar e tecnológica, para ser vista como uma nova e excelente forma de se fazer dinheiro. A indústria de satélites de comunicação têm gerado US\$ 3 bilhões por ano, através da transmissão e recepção de sinais eletrônicos, de e-mail à radiodifusão televisiva. Sistemas de navegação, sensoriamento remoto e serviços meteorológicos são outros exemplos de utilização econômica de satélites. O valor estimado dos negócios relacionados a estes serviços, incluindo a produção de foguetes e satélites, somados ao lançamento destes, chega a US\$ 100 bilhões de dólares anuais.

Como resultado do tremendo crescimento em comunicações espaciais, existe um grande interesse numa futura utilização econômica mais expandida do espaço. Em 1986, uma doação multimilionária foi feita ao Departamento de Engenharia da Universidade de Wisconsin-Madison, para estudar aplicações comerciais do espaço. A doação foi para pesquisas em produção alimentícia, uso de robôs, e para estudar a viabilidade de se minerar hélio 3 na Lua. O hélio 3 é um gás que, embora não esteja presente na Terra, é sabido que é abundante no solo lunar. Este gás é visto como um componente crucial no desenvolvimento da tecnologia de fusão nuclear.

As vantagens da utilização econômica do espaço não param por aí. A produção de materiais no espaço, como cristais ultra puros, ligas especiais, semicondutores e medicamentos, são potencialmente lucrativas, provavelmente até mais que a atual revolução dos computadores e que o emergente campo da engenharia genética.

Outro uso bastante lucrativo do espaço é o turismo espacial. Empresas como a Shimitzu Corporation, uma das maiores companhias de construção do mundo, tem apostado bastante neste ramo. A Shimitzu abriu, em meados de 1995 um escritório de projetos espaciais, com vista rumo à

construção de uma base lunar que combina caráter de um centro de pesquisas científicas com o de centro de lazer. Esta seria composta de vários módulos dotados de laboratórios, observatórios astronômicos, hotéis e centros esportivos.

A maioria destes projetos tem um grande problema: o custo de transporte de materiais da Terra para o espaço gira em torno de US\$ 4.000 a US\$ 7.000/kg, sendo assim, a construção de instalações espaciais capazes de atender grandes escalas de produção dos produtos citados, ou de grandes bases lunares ou orbitais para pesquisa e/ou turismo, seria extremamente dispendiosa, se não inviável, se for realizada com materiais vindos da Terra, desta forma, torna-se necessário minerar e produzir estes materiais no próprio espaço.

2. Por quê minerar o espaço?

Como resultado do crescimento das atividades mencionadas anteriormente, pode-se imaginar um futuro mercado para materiais na baixa órbita terrestre como: metais para construção de bases e estações espaciais, voláteis para se fazer propelentes para as estações e para os transportes, materiais não processados para lastros ou blindagem contra radiação cósmica, etc.. O desenvolvimento desse futuro mercado orbital, pode rapidamente fazer com que, num futuro próximo, a necessidade por estes materiais exceda 1.000 toneladas por ano, crescendo num ritmo de dezenas ou centenas de toneladas anuais, se qualquer atividade de grande escala for iniciada.

Os recursos naturais no espaço incluem ligas metálicas de ferro-níquel, silicatos, minerais hidratados, materiais betuminosos, e vários voláteis, incluindo água, amônia, dióxido de carbono, metano, entre outros. Todos estes foram identificados tanto em análises de meteoritos caídos na Terra, como em asteróides e cometas, através de espectroscopia.

Qualquer desenvolvimento industrial espacial, como grandes estações orbitais ou lunares, que requeira mais de 1.000 t de massa estrutural, ou de propelente por ano, começará a ver estes materiais como minério, no verdadeiro sentido de engenharia de minas.

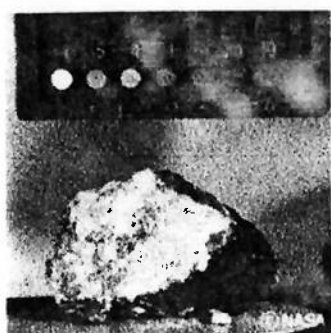
As matérias primas no espaço se dividem em dois grandes grupos: aqueles que são raros, de alto valor, e que estão se exaurindo na Terra, mas que são abundantes no espaço, e aqueles que são comuns, tanto na Terra, como no espaço, mas que são caros de se lançar a partir da Terra e vitais para a colonização espacial e para o desenvolvimento da indústria espacial.

A seguir, discutiremos com mais detalhes alguns destes recursos, na Lua, em Asteróides e, finalmente, em Marte. Ambientes estes que têm sido vistos como os primeiros alvos, no que diz respeito à ocupação humana no

espaço, e que, por este motivo, também têm sido motivo de diversos estudos por diversos centros espaciais e universidades ao redor do mundo.

2.1. Recursos minerais da Lua.

Cerca de 400 kg de rochas lunares foram trazidas à Terra pelos astronautas das 6 missões Apollo dos EUA, além disso, algumas amostras também foram trazidas pelas duas missões não tripuladas Luna 16 e 20 da URSS. Estas amostras mostraram existir cerca de 100 diferentes tipos de minerais na superfície lunar. Este valor ainda é muito baixo, comparado com os mais de 2.000 disponíveis na Terra. Entretanto, das variedades existentes nestas amostras, muitas podem ser



usadas. O Basalto, amplamente disponível na Lua, pode ser moído a frações bem finas, para se construir tijolos. Ilmenita (óxido de titânio e ferro), também é abundante, e pode ser reduzida e separada para criar titânio e ferro metálico, para produção de aço, além de oxigênio. Minerais como alumínio, magnésio, cálcio, silício e cromo, também são encontrados na Lua

(presume-se que estes existam na Lua em quantidades maiores que na Terra).

Quando atividades de mineração na Lua forem iniciadas, prevê-se a utilização destes materiais para a construção de uma base lunar de estágio inicial. Assim que uma base humana for estabelecida na Lua, esta se tornará um centro de construção de fábricas altamente equipadas, que produzirão materiais para a própria expansão da base e também da Estação Espacial Internacional (já em órbita), o que, juntamente com a criação de novas tecnologias, como novas ligas e a fabricação de materiais ultra puros através da utilização do ambiente lunar, criarão uma demanda cada vez maior por estes minerais.

Outra forma promissora de utilização dos recursos naturais lunares é a utilização do hélio 3 como fonte de energia. O hélio 3 é uma substância bastante encontrada no regolito lunar. Ele foi encontrado em amostras trazidas por todas as missões lunares em teores variando de 10 a 70 ppm em massa. Como já foi dito, o hélio 3 é um elemento importantíssimo para o desenvolvimento da tecnologia de fusão nuclear, tecnologia esta considerada ambientalmente limpa, pois seus subprodutos são praticamente livres de radiação e poluição. Este elemento é raramente encontrado na Terra no seu estado natural, mas estima-se que a Lua possua cerca de 1 milhão de toneladas de hélio 3. Isto ocorre pois a Lua não possui proteção contra os ventos solares de hidrogênio e hélio ionizados (o campo magnético e a atmosfera da Terra bloqueiam estes ventos solares) e dessa forma, durante bilhões de anos, o regolito lunar têm sido atingido por estes ventos, concentrando o hélio 3. Estima-se que exista 10 vezes mais energia no hélio 3 da Lua que em todo carvão, petróleo e gás natural existente na Terra, além disso, se fosse comercializado ao preço de 1 bilhão de dólares por tonelada, o custo energético do hélio 3 seria equivalente ao do petróleo a 7 dólares por barril (30 toneladas de hélio 3 são suficientes para suprir toda a demanda anual de energia elétrica de um país como os EUA). Sendo assim, o hélio 3 contido na Lua pode resolver os problemas de energia da Terra.

É sabido também que o polo sul da Lua possui água congelada, isto provavelmente fará com que esta região (dentre outras terras extraterrestres) se torne uma das propriedades mais valiosas no sistema solar, visto que a água no espaço será crucial para a economia espacial, pois além de fornecer água para humanos e agricultura em colônias espaciais, a água pode ser eletrolisada para liberar hidrogênio e oxigênio para serem usados como propelentes de foguetes, na indústria química, e em células de combustível para veículos e equipamentos de mineração.

O Programa Apollo provou que o homem é capaz de alcançar a Lua. Infelizmente, nenhum projeto subsequente se equivale ao grande sucesso do

Programa Apollo, no que diz respeito a conhecimentos adquiridos sobre a Lua. Entretanto, deve se levar em conta que o conhecimento sobre a Lua obtido pelo Programa Apollo é insuficiente no que diz respeito aos itens listados no quadro abaixo. Consequentemente, um segundo passo para a Lua seria necessário para nos trazer uma extensa variedade de informações, bem como para suprir a carência de conhecimento a respeito da Lua.

1. No Programa Apollo, a coleta de dados estava limitada às áreas próximas ao equador e aos locais de pouso. Por esta razão, não foram obtidos dados de observações diretas no que diz respeito à composição mineral e abundância de elementos em toda a Lua.
2. Não foi produzido um mapa topográfico completo confiável o suficiente para definir-se pontos de pouso seguros de naves não tripuladas.
3. Não temos dados suficientes sobre a distribuição granulométrica, e espessura do regolito, ou sobre a estrutura interna da Lua.
4. Nenhum dado foi obtido sobre monitoramento do ambiente espacial (radiação, partículas finas) no período ativo do Sol.

Sem os dados acima, algumas questões permanecem sem respostas científicas, entre elas:

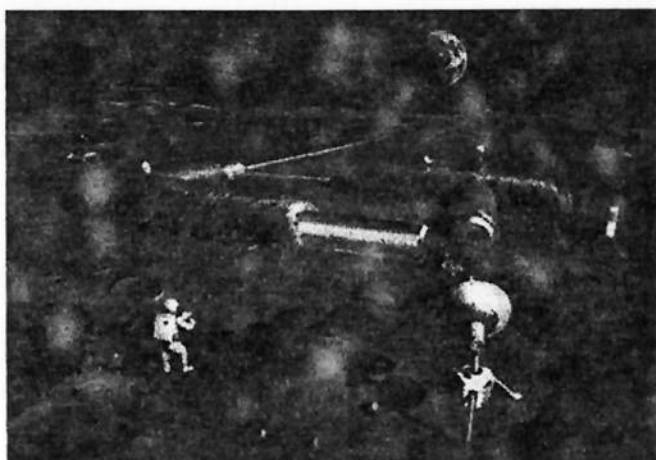
- A origem da Lua;
- Se ela possui um núcleo metálico;
- Se elementos e minerais da Lua são concentrados suficientemente para formar depósitos minerais.

Para tentar responder a algumas destas questões, a NASDA (agência espacial japonesa), juntamente com a ISAS (Institute of Space and Astronautical Science - Japão), pretende lançar em 2005 um satélite orbital lunar, chamado SELENE (Selenological and Engineering Explorer), que coletará dados para avaliar a possibilidade de exploração e exploração da Lua. Ele também focará o desenvolvimento de tecnologias básicas para estas

atividades, bem como o desenvolvimento da ciência lunar (estudo da origem e evolução da Lua). Este satélite será capaz de fazer o levantamento topográfico da superfície da Lua, bem como analisar sua composição, e realizar medidas do campo gravitacional lunar.

Pretende-se ainda continuar as pesquisas através de um sistema de exploração lunar não tripulado, com o objetivo de investigar a possibilidade de várias atividades de desenvolvimento espacial na superfície lunar.

No dia 20 de maio de 2002, a BBC publicou uma reportagem em seu site na Internet, na qual dizia que a China tem planos de realizar uma missão tripulada à Lua em 2010. Segundo o oficial espacial chinês Ouyang Ziyuan, o objetivo chinês, em longo prazo, é de construir uma base na Lua e minerar suas riquezas para o benefício da humanidade.



2.2. Recursos minerais em Asteróides.

Alguns pesquisadores, como meteoriticistas, astrônomos e cosmoquímicos entendem que a maioria dos meteoritos são pedaços de asteróides, e que alguns asteróides próximos à Terra (APTs) são mais fáceis de alcançar, e necessitar-se-ia de muito menos energia para retornar materiais à baixa órbita terrestre a partir de um deles que da nossa Lua, devido à sua gravidade bem mais baixa e ao fato de alguns terem órbitas semelhantes às da Terra.

Como a maioria dos meteoritos são fragmentos de asteróides, estes podem ser classificados, de forma simplificada, da mesma maneira que os meteoritos, conforme a **Tabela 2.2.1**.

Tabela 2.2.1

Classificação simplificada de meteoritos e asteróides.

Rochosos	Condritos	Ordinários	Composição: Minerais silicáticos fases refratárias e material metálico (Fe-Ni).
		Carbonáceos	
	Acondritos	Composição: Heterogênea, em muitos casos semelhantes à dos basaltos terrestres.	
Ferro-pétreos	Composição: Mistura de materiais silicáticos e material metálico (Fe-Ni).		
Metálicos	Composição: Mineral metálico (Fe-Ni).		

Sendo os asteróides metálicos extremamente ricos em ferro e níquel, estes têm sido vistos como possível fonte de extração destes metais para a construção de bases e estações espaciais, além de equipamentos e transportes. Alguns destes asteróides, estudados através de imagens de radar feitas a partir da Terra, parecem ter sua superfície formada por regolitos de pó de metal, o que torna uma futura lavra nestes corpos relativamente fácil através de escavação eletromagnética por mineradores robotizados. Isto é possível, pois a baixa gravidade destes corpos podem reduzir em 2.000 vezes, em relação à Terra, o peso dos materiais contidos neles.

Na Terra, a disponibilidade de metais depende do seu clarke, ou de quão abundante eles são na crosta continental. A **Tabela 2.2.2** mostra o clarke de alguns metais e os seus teores aproximados em seus respectivos depósitos minerais terrestres.

Entretanto, o núcleo da Terra vai sempre “se apoderar” da quase totalidade do ouro, rênio, e platinóides existentes em nosso planeta. Estes possuem clarke bem abaixo de outros metais, sendo, portanto bastante raros e valiosos, mas são abundantes no núcleo da Terra. O estudo de meteoritos de ferro nos mostra que os primeiros minerais a se solidificarem

no núcleo de alguns asteróides são extraordinariamente ricos em platinóides e ouro, chegando a teores entre 100 e 200 ppm em alguns casos. Na Terra são economicamente lavrados depósitos contendo 1 ppm, sendo que pequenos veios com 30 ppm de metais preciosos são excepcionais.

Tabela 2.2.2

Clarke e teores aproximados de alguns metais em seus respectivos depósitos minerais terrestres.

Metal	Clarke (ppm)	Teores aproximados nos depósitos minerais (%)	
		Mínimo	Médio
Alumínio	82.300	17	22
Ferro	56.300	20	40
Titânio	5.650	3	7
Manganês	1.000	7	20
Zircônio	165	-	0,5
Vanádio	120	0,12	0,2
Cromo	102	7	30
Níquel	84	0,25	1,1
Zinco	70	1,5	4,5
Cobre	60	0,35	1,0
Cobalto	25	0,1	0,3
Nióbio	20	0,34	0,6
Chumbo	14	1,5	3,5
Tório	9	0,01	0,05
Urânio	3	0,005	0,13
Estanho	2,3	0,1	0,4
Arsênio	1,8	-	-
Tungstênio	1,2	0,1	0,4
Antimônio	0,2	0,5	1,2
Ouro	0,004	1 (ppm)	6 (ppm)

Como exemplo, um asteróide metálico de 1 km de diâmetro, contendo 185 ppm de platinóides, rênio, germânio e ouro, possuiria cerca de 780.000 t de metais preciosos. No mercado de preços atuais, estes metais valeriam mais de US\$ 10 trilhões. Importar estas quantias de metais por um período

de 50 anos, causaria enormes quedas no valor de mercado destes metais. Desta forma, o desenvolvimento da mineração de asteróides resultará, para a população terrestre, em uma nova revolução metalúrgica, visto que metais como a platina, o paládio, e do irídio tornar-se-ão abundantes e relativamente baratos.

Asteróides condritos ordinários, que nunca se fundiram extensivamente ou formaram um núcleo, possuem uma grande abundância em metais preciosos disseminados em partículas ricas em Fe-Ni, sendo também possíveis fontes destes metais. Embora a concentração de metais preciosos neste tipo de asteróides não sejam tão grandes quanto nos metálicos, muitos deles também poderiam ser facilmente minerados por escavação eletromagnética.

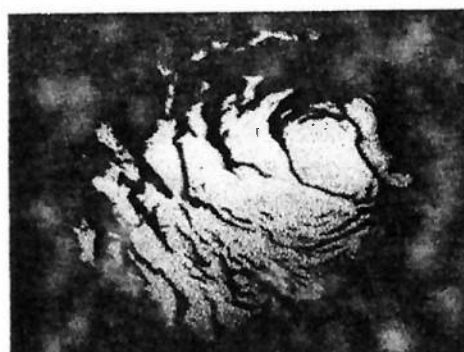
Os asteróides podem também ser uma fonte valiosa de água no espaço em longo prazo, como é o caso dos asteróides condritos carbonáceos, nos quais a água contida em minerais hidratados, faz parte de 1 a 20 % de suas massas.

2.3. Recursos minerais em Marte.



mostrou que as calotas polares de Marte são formadas por “gelo seco” e água congelada (nos polos marcianos a temperatura varia entre -110 e -120 °C, enquanto que no

Durante a corrida espacial, entre 1965 e 1972 as sondas soviéticas Marte 2 e 3 e a americana Mariner 4, 6, 7 e 9 já haviam coletado diversos dados sobre o planeta, como temperatura e composição atmosférica, além de mapear quase todo o planeta. A Mariner 9 também



equador ela está em torno de -15 e -35 °C).

Além disso, em junho e julho de 1976, as sondas Viking I e II, respectivamente, chegaram a pousar em solo marciano, coletar amostras e realizar análises físicas, químicas e bioquímicas nas mesmas. Um resultado importante destas análises foi a de que o solo marciano não é tão poeirento quanto se imaginava, contendo grandes quantidades de água congelada, o que lhe confere um estado pastoso.

Vinte e um anos depois, em 4 de Julho de 1997, a sonda Mars Pathfinder pousou na superfície do Planeta Vermelho, dando início a uma série de 10 missões não tripuladas que serão realizadas até 2005. A Mars Pathfinder carregava consigo o robô Sojourney. Embora o principal objetivo da missão fosse a de testar tecnologias de pouso de robôs instrumentados em marte, o Sojourney chegou a coletar e transmitir alguns dados sobre análises químicas de rochas e solo marcianos e dados sobre diversos fatores climáticos. Uma das descobertas importantes desta missão é de que Marte, provavelmente, já foi quente e úmido, com a existência de água no estado líquido e de uma atmosfera mais densa.

Dentre estas missões está também a 2001 Mars Odyssey, que chegou à órbita marciana no dia 24 de outubro de 2001. A missão da Odyssey, hoje em operação, é coletar imagens que serão usadas para determinar a composição mineralógica do solo marciano, estudar processos geológicos de pequena escala e as características de possíveis locais de pouso, pois atualmente, sabe-se que a superfície de marte é constituída de rochas, solo e material congelado, mas pouco se sabe sobre a composição destes materiais. Além disso, através da medida da quantidade de hidrogênio no solo de Marte, será possível determinar a quantidade de água disponível para futuras explorações.

Em maio-julho de 2003, serão lançados dois robôs de reconhecimento a Marte, iniciando a missão Mars Exploration Rover. Estes robôs pousarão

em regiões diferentes do planeta, e cada uma carregará equipamentos sofisticados que ajudarão a procurar evidências da existência de água no estado líquido no passado de Marte. Os cientistas serão capazes de comandar o veículo para examinar amostras de rocha e solo de interesse, determinando sua composição e textura em escalas microscópicas. A missão durará 90 dias marcianos e cada robô será capaz de andar em um único dia marciano, o mesmo que o robô Sojourney em todo seu tempo de operação (de 4 de julho à 27 de setembro de 97).

O Brasil também está dando sua contribuição à missão Marte. O brasileiro Paulo de Souza Júnior, formado pela Universidade Federal do Espírito Santo, está na equipe que vai acompanhar a missão Mars Exploration Rover. Ele ajudou a desenvolver um dos equipamentos que serão usados pelos robôs para identificar minerais em busca da evidência de existência de água líquida no passado do planeta.

Como podemos ver, geologicamente, ainda pouco se sabe a respeito de Marte, mas a existência de água congelada no solo marciano é um fator importante, que pesa a favor da criação de uma futura base humana em Marte, a qual necessitará de materiais minerados e produzidos no próprio planeta.

3. Algumas tecnologias já propostas.

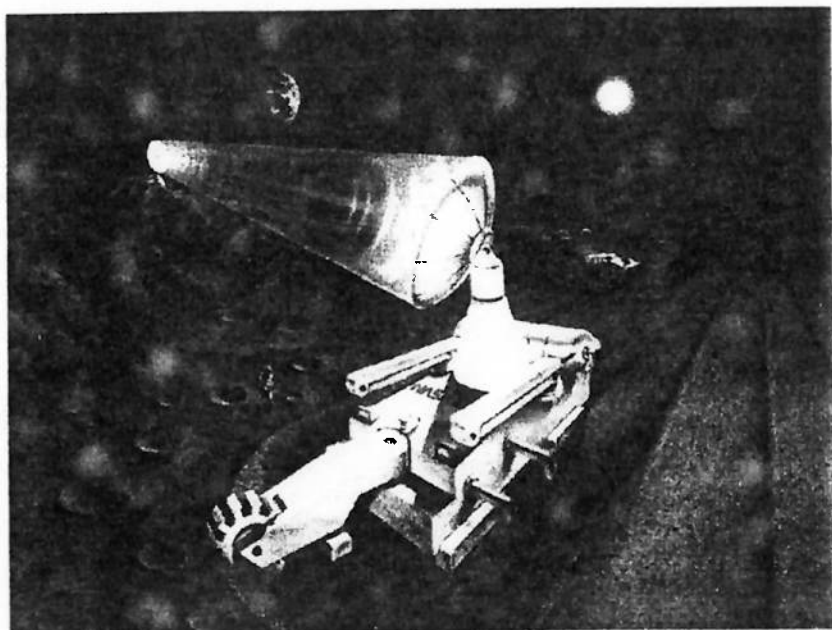
Em maio de 1989, foi realizada uma conferência em Colorado, EUA, sobre os custos de transportes de materiais para o espaço e a viabilidade de se minerar ambientes extraterrestres. Durante esta conferência, Egons Podnieks, cientista do Bureau of Mines, sendo portanto conhecedor da indústria mineral, disse acreditar ser possível planejar a mineração da Lua e de outros corpos no espaço, utilizando a tecnologia atualmente disponível e criando planos simples e práticos, em oposição aos cenários exóticos e futuristas.

Uma proposta de Podnieks, é que a construção de uma mina subterrânea num ambiente espacial, pode ser melhor que uma mina a céu aberto. Podnieks sugere que faz mais sentido ter mineiros trabalhando em ambientes que podem ser pressurizados e necessitar de pouco uso de roupas espaciais volumosas, exceto quando deixarem a área de mineração.

Podnieks tem razão, no que diz respeito à que planos simples e práticos podem ser criados para se minerar o espaço. O que ele não previa é que, estas minas, em sua grande maioria, pudessem ter as suas lavras conduzidas somente máquinas automatizadas, comandados por controle remoto, por mineiros num centro de controle não necessariamente próximo, ou auto comandados, através de sensores e inteligência artificial.

Isto torna a proposta de uma mina a céu aberto bastante viável, visto que máquinas automatizadas não necessitam de uma atmosfera artificial para trabalharem.

A Universidade de Wiscosin têm estudado seriamente a utilização de um equipamento para realizar a lavra de voláteis, principalmente o hélio-3, no regolito lunar. Este equipamento, de funcionamento bastante semelhante à nossa conhecida escavadora de roda de alcatruzes, é chamado de Mark-II, e funcionará em parte a base de energia solar (em 1/3 de dia lunar – 14 dias



terrestres) e em parte por células de energia a base de hidrogênio, extraído da água contida no regolito minerado pelo próprio equipamento (nos outros 2/3) através de eletrólise realizada por células fotovoltaicas.

O regolito, após ter sido escavado pelo

equipamento, seria então levado a uma estação central, onde passaria por um radiador / condensador, no qual seriam extraídos materiais para suprimento humano, como H_2O , N_2 , CO_2 , CH_4 e CO , e o restante passaria por uma etapa de separação isotópica, onde seria extraído o hélio-4 (que pode ser usado em criogenia), e, finalmente, o hélio-3.

Um grupo de alunos da Colorado School of Mines, orientados pelos professores Bob Knecht e Barbara McKinney, ganhou o concurso de projeto da faculdade, em maio de 2000, desenvolvendo um equipamento para se minerar regolito, desta vez marciano, com o intuito de se extrair água do mesmo, com a finalidade de usá-la tanto em sua forma líquida, como para propelente de foguetes. Como bases de projeto, o equipamento deveria ter menos de 20 kg, ser capaz de escavar o regolito numa profundidade máxima de 12 cm, e operar continuamente, e de forma semi-autônoma, 8 horas por dia, durante uma pequena missão de exploração de 500 dias. Informações sobre este projeto chegaram a ser publicadas em diversos jornais locais de Colorado, como *The Plaindealer* e *The Pueblo Chieftain*.

O equipamento desenvolvido, batizado de Knetch, é muito semelhante às nossas Draglines, e seu desenvolvimento foi baseado em informações sobre o ambiente marciano publicados pela NASA. Este equipamento possui

uma carenagem capaz de proteger os componentes mecânicos e eletrônicos das variações de temperatura de mais de 100° C e também da atmosfera altamente tempestuosa de Marte, que pode facilmente cobrir a máquina com areia. Ela também possui uma lança delgada, de 6 m de comprimento e seção triangular tubular, a qual possui baixa resistência aos ventos e suporta a caçamba (20 cm x 20 cm x 30 cm = 12 l) e os cabos, além de proteger as polias da areia carregada com as tempestades de vento.

O subsistema mecânico é composto de dois motores (diminuindo o nº de partes móveis), dois tambores para enrolar os cabos, e um sistema duplo de embreagem. A caçamba possui um desenho único, que torna a máquina altamente eficiente, carregando mais regolito que o necessário para atender as necessidades impostas.

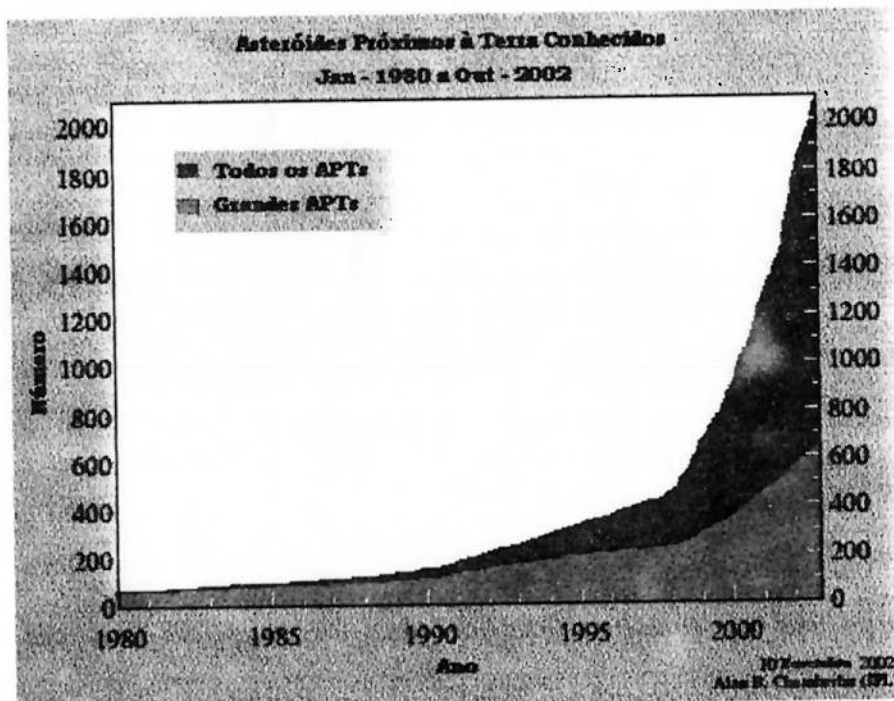
O computador que seria utilizado para controlar a máquina, projetado pela Stanford University, é bastante compacto (do tamanho de uma caixa de fósforos) e leve, e será protegido contra a atmosfera e as possíveis radiações encontradas em Marte.

Depois de encher a caçamba, o equipamento descarrega o material num sistema de classificação, capaz de separar materiais finos (menores que 1 mm) do regolito. Este sistema é composto de uma caixa onde o material é depositado, uma grelha para classificação inicial e um trommel (de 30 cm de diâmetro). O sistema é capaz de operar durante os 500 dias com problemas mínimos de entupimento, e é bastante confiável, visto que o trommel é auto-limpante. O passante neste trommel é depositado numa caixa onde o reator que fará a separação da água pode utilizá-lo quando precisar.

Estas são apenas duas propostas de máquinas que podem vir a ser utilizadas para se minerar ambientes extraterrenos. Estudos como estes têm sido realizados por diversas universidades e centros de pesquisa ao redor do mundo, e estes mostram que soluções simples podem ser encontradas, com base até mesmo em equipamentos usados na Terra.

4. Novas oportunidades para a indústria mineral.

Quatro fatores têm trazido a mineração espacial mais próximo do alcance da indústria. Primeiro, astrônomos profissionais e amadores já descobriram mais de 2000 asteróides próximos à Terra (APTs) sendo mais de 600 deles com mais de 1 km de diâmetro, plotaram suas órbitas, estimaram seus tamanhos e, em alguns deles, determinaram suas composições.



A descoberta de novos APTs têm crescido exponencialmente a cada ano (conforme o gráfico acima), e estima-se que existam mais de 2.000 APTs, com mais de 1 km de diâmetro.

Segundo, o monopólio de lançamentos espaciais, antes nas mãos das superpotências da Guerra Fria, têm sido quebrado pela competição entre agências espaciais na Europa, no Japão, e na Rússia, e por serviços de lançamento privados, reduzindo o custo de acesso ao espaço.

Terceiro, avanços tecnológicos e a transferência de tecnologias militares após a Guerra Fria, levaram a avanços em materiais, computadores, robótica, e propulsão espacial.

Finalmente, a administração eficiente de projetos espaciais federais nos EUA têm reduzido os custos de missões no sistema solar. No final de

1997, missões robotizadas já custavam $\frac{1}{4}$ do que custavam no início dos anos 90, tornando possível a realização de missões antes impraticáveis.

Entretanto, enquanto cientistas, geólogos e engenheiros de minas não se aventurarem pelo espaço para realizar pesquisas e explorações minerais abrangentes, qualquer comentário sobre os recursos a serem encontrados no espaço serão em grande parte apenas teóricos.

Um princípio bastante conhecido em desenvolvimento de projetos minerais é o de que planejamentos de mineração não são feitos enquanto o recurso não for bem definido através de exploração mineral e os métodos de tratamento não forem testados.

Apesar dos seus menores tamanhos, é certamente menos prático realizar-se uma pesquisa de campo na Lua, em asteróides ou em Marte, do que seria na Terra, devido ao grande custo envolvido. Sendo assim, é necessário desenvolver e testar tecnologias confiáveis para pesquisa mineral a distância, como será feito pela projeto SELENE da NASDÁ, comentado neste texto, de forma que se possa prever a localização destes depósitos, fazendo com que a procura por estes seja direcionada aos locais mais promissores.

A extração de materiais é um problema ainda maior que encontrar minerais. Minerar recursos no vácuo do espaço coloca cientistas e engenheiros frente a obstáculos não encontrados na Terra. Por exemplo, para se transformar os minérios em materiais úteis, a água, juntamente com outros elementos é necessária na maioria dos processos de tratamento conhecidos, além de também ser usada para o resfriamento e lubrificação de perfuratrizes e outros equipamentos. Entretanto, no espaço uma fonte direta de água pode não estar facilmente disponível. Outros obstáculos que podem ser citados são a baixa gravidade, a falta de oxigênio, a escassez de energia, as oscilações entre baixas e altas temperaturas, entre outros.

Como podemos ver, ainda existem muitos obstáculos a serem transpostos, antes da mineração espacial tornar-se uma realidade. A carência de pesquisas nesta área é especialmente alarmante quando consideramos a agenda de longo prazo da NASA, que consiste numa missão tripulada a Marte e numa base lunar.

A NASA e outras agências espaciais espalhadas pelo mundo, não têm experiência suficiente para planejar ou conduzir uma mineração na Lua, em asteróides ou em Marte. Até hoje nenhuma exploração mineral organizada foi realizada nestes corpos, ou seja, têm-se planejado minerar algo que ainda não foi especificamente localizado ou identificado. No caso da Lua, os alvos têm sido rochas (não minerais puros) e regolito lunar, nenhum dos dois é homogêneo. Além disso, o conhecimento e a experiência de especialistas em exploração mineral, lavra e tratamento não têm sido utilizados.

Sendo assim, a participação da indústria mineral, nas missões espaciais tripuladas, como beneficiárias de uma provável revolução na tecnologia mineral, é imprescindível. Os problemas da mineração e do tratamento de minérios no espaço necessitam da atenção dos que têm experiência na indústria mineral. Planos de mineração espacial racionais somente serão possíveis se a indústria mineral participar destes planos. Deve-se começar a levar as disciplinas de exploração mineral, caracterização de corpos minerais, projeto de equipamentos, planejamento de lavra e tratamento de minérios, para a comunidade de desenvolvimento espacial.

O dinheiro eventualmente gasto com a mineração espacial, poderá ajudar a resolver problemas de mineração na Terra. O programa lunar da década de 70 produziu uma grande variedade de novos produtos para a humanidade. Pode-se afirmar que este programa fez com que se desenvolvessem muito mais produtos para uso terrestre, que para uso nas próprias missões.

Felizmente, algumas instituições de pesquisa relacionadas à indústria mineral têm começado a se mobilizar no sentido de realizar eventos para discutir a mineração espacial. É o caso da Colorado School of Mines (CSM), que, desde 1999, tem realizado o Space Resources Roundtable, evento este que ocorre anualmente, onde são apresentados diversos trabalhos a respeito do uso de recursos energéticos e minerais no espaço.

Futuros programas espaciais podem beneficiar diretamente a mineração terrestre. Muitas propostas para a mineração espacial contêm métodos de mineração altamente automatizados. Se máquinas altamente automatizados forem desenvolvidas, seus impactos na mineração terrestre serão enormes. Novos métodos de lavra e tratamento precisam ser pesquisados, e o espaço deve ser o local para desenvolvê-los.

5. Possibilidades para o desenvolvimento de pesquisas brasileiras.

O Brasil, após a criação da Agência Espacial Brasileira (AEB) em 1994, têm crescido bastante no que diz respeito à tecnologia espacial. Hoje somos capazes de produzir satélites, foguetes e bases de lançamento de qualidade, e com preço competitivo. O presidente da AEB Múcio Dias, diz que o país pretende ocupar este mercado da mesma forma que a Embraer fez com o setor aeronáutico.

Além disso, somos o único país da América Latina a participar do projeto da Estação Espacial Internacional (EEI). Em 14 de Outubro de 1997 os governos do Brasil e dos Estados Unidos (representados pela AEB e pela NASA) assinaram um acordo através do qual o Brasil se compromete a fornecer algumas partes para a EEI e em consequência, passou a ter direitos de utilização de seus recursos.

Para o Brasil, a participação no projeto da EEI representa de um lado a demonstração da capacidade brasileira em construir um dos maiores e mais complexos veículos colocados em órbita. Por outro lado fornece a possibilidade fazer pesquisas no espaço, no chamado ambiente de microgravidade, que permite efetuar pesquisas nos mais diversos campos de aplicação. Poderão ser criados novos produtos, ajudar no processo de desenvolvimento de remédios, criar novas ligas e materiais com propriedades bem melhores do que os existentes bem como estabelecer novos processos para o processamento de materiais em terra com base nos estudos efetuados na EEI.

O Projeto Microgravidade, do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), coordenado pela AEB, que objetiva viabilizar a realização de experimentos científicos e tecnológicos nacionais em ambiente de microgravidade, terá seu primeiro foguete, o VS-30 V06, lançado entre os dia

29 de novembro e 2 de dezembro deste ano, do Centro de Lançamento de Alcântara. A carga do foguete brasileiro compõe-se de oito equipamentos científicos, desenvolvidos por universidades e instituições brasileiras que integram o Programa de Microgravidade, os quais realizarão experiências das mais diversas áreas do conhecimento.

Nas próximas etapas do projeto microgravidade poderão ser utilizados, entre outros meios, além de foguetes de sondagem, o ônibus espacial e a Estação Espacial Internacional, utilizando a cota alocada ao Brasil como membro participante.

Cabe a nós, estudantes e pesquisadores ligados à indústria mineral, utilizar projetos como o Projeto Microgravidade do PNAE a favor do desenvolvimento novas pesquisas técnico científicas para o aprimoramento e desenvolvimento de processos de tratamento de minérios, tanto para utilização em futuras bases espaciais, como aqui na Terra.

6. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o de chamar a atenção da comunidade mineira brasileira, para uma atividade que, embora em poucas décadas será uma realidade, ainda é vista pela maioria dos profissionais e pesquisadores relacionados à indústria mineral brasileira, de forma preconceituosa, como algo que não merece a nossa atenção.

A mineração espacial tornar-se-á uma das mais importantes atividades do Século XXI, sendo vital para o desenvolvimento de toda a indústria e colonização espacial. Vários países estão olhando para o espaço sideral e encontrando formas de se extrair benefícios econômicos e científicos deste novo ambiente.

O ser humano vai viver no espaço, é apenas uma questão de tempo, e como nas outras fronteiras conquistadas na história da humanidade, a mineração vai tomar a dianteira.

O Brasil não pode fechar os olhos para esta nova realidade que está por vir. Devemos nos preocupar e ficar atentos para que, no futuro, tenhamos capacidade de trazer para o nosso país os benefícios da mineração e exploração espacial.

7. Bibliografia

- ✧ Cordani, U. G. "O Planeta Terra e suas Origens". In: Teixeira, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 1-26.
- ✧ Herrmann, J. **Astronomia**. São Paulo: Círculo do Livro, 1977, 313p.
- ✧ Herkenhoff, E. C. "Why Oppose NASA's moon mining plans". **Mining Engineering**, p. 1038 e 1040, Agosto 1991.
- ✧ Gertsch, R. E.; Maryniak, G. E. "Space Mining: Boondoggle or the next gold rush". **Mining Engineering**, p. 1039 e 1041, agosto 1991.
- ✧ Sonter, M. J. "**The technical and economic feasibility of mining the Near-Earth Asteroids**". / Apresentado ao 49º Congresso da International Astronomic Federation, Melbourne, Austrália, 1998, não publicado.
- ✧ Pine, D. "101 uses for na asteroid: Na untapped mother lode floats aimlessly in space". **Omni**, Vol. 13, 12ª edição, p. 18, setembro de 1991.
- ✧ Wiebusch, B. "Oxygen for human use produced whith extraterrestrial resources". **Design News**, Vol. 55, 4ª edição, p. 32, janeiro de 2000.
- ✧ Kargel, J. S. "Digging for Gold". **Astronomy**, Vol. 25, 12ª edição, p. 48, dezembro de 1997.
- ✧ Hartmann, W. K. "The Shape of Kleopatra". **Science**, Vol. 288, 5467ª edição, p. 820, maio de 2000.
- ✧ Salisbury, J. W. "Natural Resources of the Moon". **Nature**, Vol. 195, nº 4840, p. 423, agosto de 1962.
- ✧ Schmitt, H. H. "Interlune-Intermars Business Initiative: Returning to Deep Space", **Journal of Aerospace Engineering**, Abril de 1997.
- ✧ Booth, M.; Saxe, K. T. "**The Future of Space Mining**". Case publicado pela American University. EUA. Disponível em <www.american.edu/ted/spacemin.htm>.
- ✧ Gross, J.; Tyler, P.; Bazin, A.; Crowe, K.; Pounds, B.; Marlatt, W. "**Knecht: The Mars Mining Solution**". 2000. 14 p. Projeto de graduação. Colorado School of Mines, Colorado, EUA, maio de 2000.
- ✧ AEB (Agência Espacial Brasileira). Brasil. **Informações sobre os projetos espaciais brasileiros**. Disponível em: <www.agespacial.gov.br>.

- ↳ NASDA (National Space Development Agency of Japan). Japão. **Informações sobre diversas missões e projetos espaciais, passadas e futuras, ao redor do mundo.** Disponível em: <spaceboy.nasda.go.jp>.
- ↳ NASDA. Japão. **Informações sobre o projeto SELENE.** Disponível em <moon.nasda.go.jp>.
- ↳ CNSA (Chinese National Space Agency). China. **Informações sobre a Agência Espacial Chinesa.** Disponível em: <www.cnsa.gov.cn>.
- ↳ BBC News. Londres. **Conceituado jornal inglês.** Disponível em <news.bbc.co.uk>.
- ↳ Wiscosin University. Wiscosin, EUA. **Pesquisas relacionadas à mineração espacial.** Disponível em <silver.neep.wisc.edu/~neep602/>.
- ↳ Space Resources Roundtable. Colorado, EUA. **Informações sobre o evento anual da Colorado School of Mines.** Disponível em <www.mines.edu>.