

5.

Seqüestro de Carbono

Apesar das diversas formas de uso do CO₂ mencionadas previamente, ainda produzimos uma quantidade muito grande de dióxido de carbono. Seja por esse volume ou mesmo pela dificuldade de transporte, não há como absorver toda essa produção. Uma solução de médio prazo, para evitar a liberação de grandes quantidades para a atmosfera, é armazenar esse carbono excedente. O grande desafio relacionado com a armazenagem está relacionado com os elevados volumes envolvidos. O armazenamento de carbono realizado atualmente contempla três modos que serão descritos com mais detalhes nas seções seguintes: Armazenamento Geológico, Armazenamento Oceânico e Carbonização Mineral.

5.1.

Armazenamento Geológico

Abaixo da superfície encontra-se a maior reserva de carbono do planeta, onde a grande maioria está na forma de carvão, petróleo, gás, rochas carbonadas e sedimentos altamente orgânicos. O armazenamento geológico de CO₂ tem sido um processo natural na crosta superior terrestre por centenas de milhões de anos. Dióxido de carbono proveniente de atividades biológicas, atividade vulcânica e reações químicas entre rochas e fluidos acumulam-se abaixo da superfície.

A primeira injeção forçada de CO₂ ocorreu no Texas, no início dos anos 70, como parte de projetos de recuperação avançada de petróleo e tem sido mantida nesta região em diversas localidades. Em 1996, o primeiro projeto mundial em larga escala de armazenamento geológico de CO₂ foi iniciado pela empresa norueguesa Statoil e seus parceiros no Campo de Sleipner, no Mar do Norte.

Em pouco mais de uma década, o armazenamento geológico de CO₂ cresceu de um conceito de interesse limitado para uma importante opção de mitigação das mudanças climáticas. Há diversas razões para isso. Em primeiro lugar, com o aumento de pesquisas e de demonstrações técnicas e comerciais, além de casos reais, aumentou a confiança nesta tecnologia. Em segundo lugar, o consenso

internacional da necessidade de métodos de redução de emissão de CO₂ também colaborou para o aumento do interesse no armazenamento geológico.

Existem 3 tipos principais de formações geológicas que têm sido alvo de estudos com vistas ao armazenamento de CO₂: poços de petróleo e gás, formações salinas em altas profundidades e leitos de carvão não exploráveis. Em cada caso, o armazenamento é feito através da injeção do CO₂ na forma densa (geralmente supercrítica devido às temperaturas e pressões) na formação rochosa abaixo da superfície.

As formações são rochas porosas que contém ou, no caso de reservatórios de petróleo e gás maduros, que já contiveram fluidos, como gás natural, petróleo ou salmoura, sendo locais potenciais para o armazenamento de CO₂. Estes locais podem ocorrer tanto em terra (*on-shore*) quanto no mar (*off-shore*).

Formações salinas consistem em reservatórios de água subterrânea com alta salinidade, por vezes similar ou maior que a água do mar e que, portanto, não podem ser utilizados para consumo direto. A injeção de CO₂ em aquíferos salinos deve ocorrer em profundidades superiores a 800 m, para que o CO₂ esteja em estado supercrítico. Estes reservatórios possuem enorme capacidade de armazenamento (Bachu, S.; Adams, J.J. – 2003)[39].

Camadas de carvão podem aprisionar CO₂ em seus espaços porosos, sendo o armazenamento preferencialmente realizado em camadas profundas, isto é, camadas cuja exploração convencional não é, e possivelmente não será, economicamente viável (normalmente em função da alta profundidade). Da mesma forma que em campos de petróleo, a injeção de CO₂ em camadas de carvão pode resultar na produção de hidrocarbonetos, através da técnica conhecida como ECBMR (*Enhanced Coal Bed Methane Recovery*). O CO₂ injetado na camada é preferencialmente adsorvido pela matriz do carvão, resultando na liberação do metano que ocorre naturalmente no mesmo, o qual poderá ser produzido como gás livre. A produção de metano em camadas de carvão vem sendo utilizada comercialmente nos Estados Unidos há mais de duas décadas (van Bergen, F. et al. – 2004)[40].

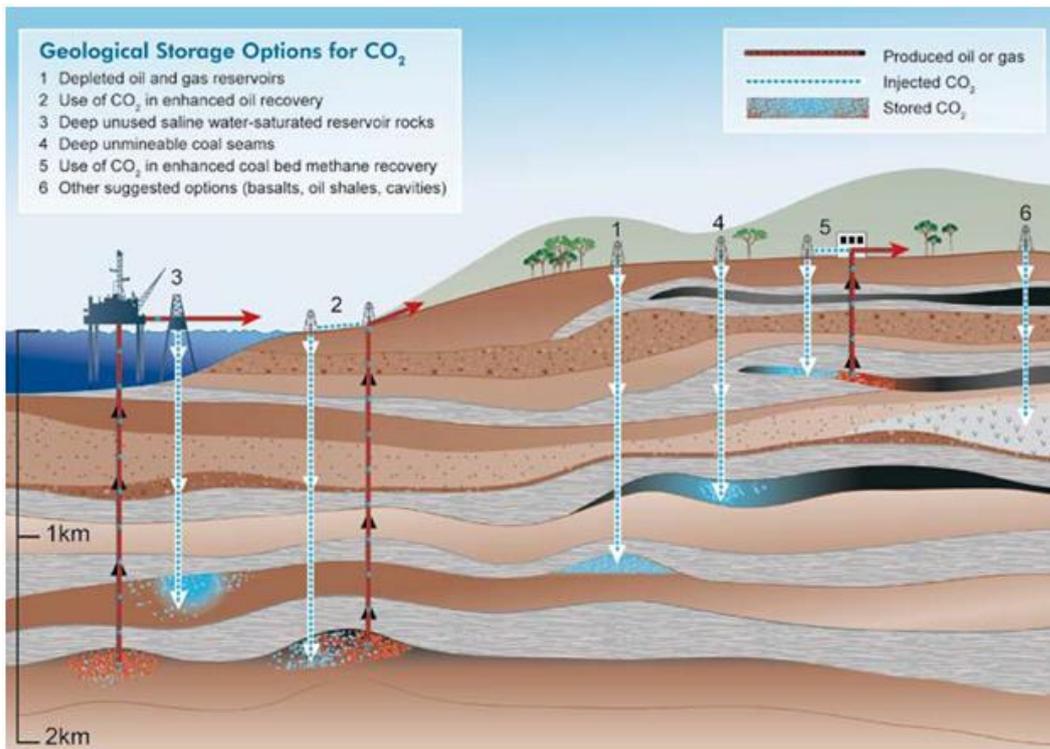


Figura 24 - Opções de armazenamento geológico de CO₂

A Figura 24 apresenta um exemplo de cada um dos métodos mencionados. Em (1) temos um reservatório esgotado de petróleo e gás; Em (2) temos o uso da injeção de CO₂ para a recuperação avançada de petróleo (item 4.5 desta dissertação); Em (3) temos o depósito em reservatórios de formação salinas; Em (4) temos o seqüestro em camadas de carvão não exploráveis; Em (5) temos o uso de CO₂ para extrair metano de veios de carvão (ECBMR); Em (6) temos outras possibilidades não estudadas (IPCC 2005) [19].

Existem 3 projetos em escala industrial (projetos na ordem de 1 MtCO₂/ano ou mais) ocorrendo atualmente: O projeto Sleipner no Mar do Norte, o Weyborn no Canadá e o In Salah na Argélia. No total, algo em torno de 3 a 4 MtCO₂ está sendo capturado e armazenado anualmente em formações geológicas. Além disso, diversos outros projetos também armazenam o CO₂ em escala menor, como pode ser visto na Tabela 2 (IPCC 2005) [19].

Tabela 2 - Projetos de Armazenamento Geológico

Nome do Projeto	País	Início das Operações (ano)	Injeção diária estimada (tCO ₂ por dia)	Total Planejado (tCO ₂)	Tipo De Reservatório
Weyburn	Canada	2000	3000-5000	20000000	EOR (Óleo)
In Salah	Algeria	2004	3000-4000	17000000	Campo de Gás
Sleipner	Norway	1996	3000	20000000	Formação Salina
K12B	Netherlands	2004	100 (1,000 Planejado para 2006+)	8000000	EGR (Gás)
Frio	U.S.A	2004	177	1600	Formação Salina
Fenn Big Valley	Canada	1998	50	200	ECBM (Carvão)
Qinshui Basin	China	2003	30	150	ECBM (Carvão)
Yubari	Japan	2004	10	200	ECBM (Carvão)
Recopol	Poland	2003	1	10	ECBM (Carvão)
Gorgon (planned)	Australia	~2009	10	0	Formação Salina desconhecida
Snøhvit (planned)	Norway	2006	2	0	Formação Salina desconhecida

A injeção de CO₂ em reservatório geológicos envolve várias tecnologias semelhantes às utilizadas para a exploração de petróleo e gás. Perfuração de poços, tecnologias de injeção, completação, simulação de reservatórios e operação de poços, além de monitoração e problemas encontrados são muitos similares. Outras práticas de injeção também provem experiência operacional bem relevante, como a injeção de líquidos e materiais descartados da exploração, como misturas de CO₂ e H₂S.

Espera-se que o armazenamento em reservas de hidrocarbonetos ou formações salinas geralmente ocorra a profundidades abaixo de 800 m, onde as condições de pressão e temperatura resultarão no CO₂ líquido ou supercrítico. Nessas condições, a massa específica do CO₂ fica entre 50 e 80 % da massa específica da água, o que é próximo da densidade de alguns petróleos, resultando numa força de empuxo positiva, que tende a levar o CO₂ para cima. Conseqüentemente, a selagem destas reservas é de suma importância para garantir que o CO₂ permaneça no reservatório.

5.1.1

O campo de Snøhvit

O campo de Snøhvit é composto por 3 campos – Snøhvit, Albatross e Askeladd. Esses campos se encontram no Mar de Barents, a cerca de 140 km noroeste de Hammerfest, no norte da Noruega. Esses campos foram descobertos em 1984 entre 250 e 345 m de profundidade e estão localizados em 7 áreas de licenciamento. Snøhvit é operado pela Statoil em prol das empresas Petoro, TotalFinaElf, Gaz de France, Norsk Hydro, Amerada Hess, RWE Dea e Svenska Petroleum Exploration. Todos os campos trabalham primariamente produzindo gás natural com pequenas quantidades de condensado. A reserva no poço é em torno de 193 bilhões de metros cúbicos de gás natural e 113 milhões de barris de condensado. A Figura 25 demonstra uma representação dos campos (Statoil, 2010)[41].

Snøhvit é o primeiro campo na área a ser produzido totalmente submerso, sem uma plataforma atuando acima do campo. A unidade de produção submarina abastecerá uma base no continente na costa noroeste de Melkøya, perto do porto de Hammerfest, através de um gasoduto de 68 cm de diâmetro interno e 160 km de comprimento. Além de duas linhas, um umbilical e um duto separado para o transporte de CO₂ foram planejadas para 2005 e já se encontram em operação.

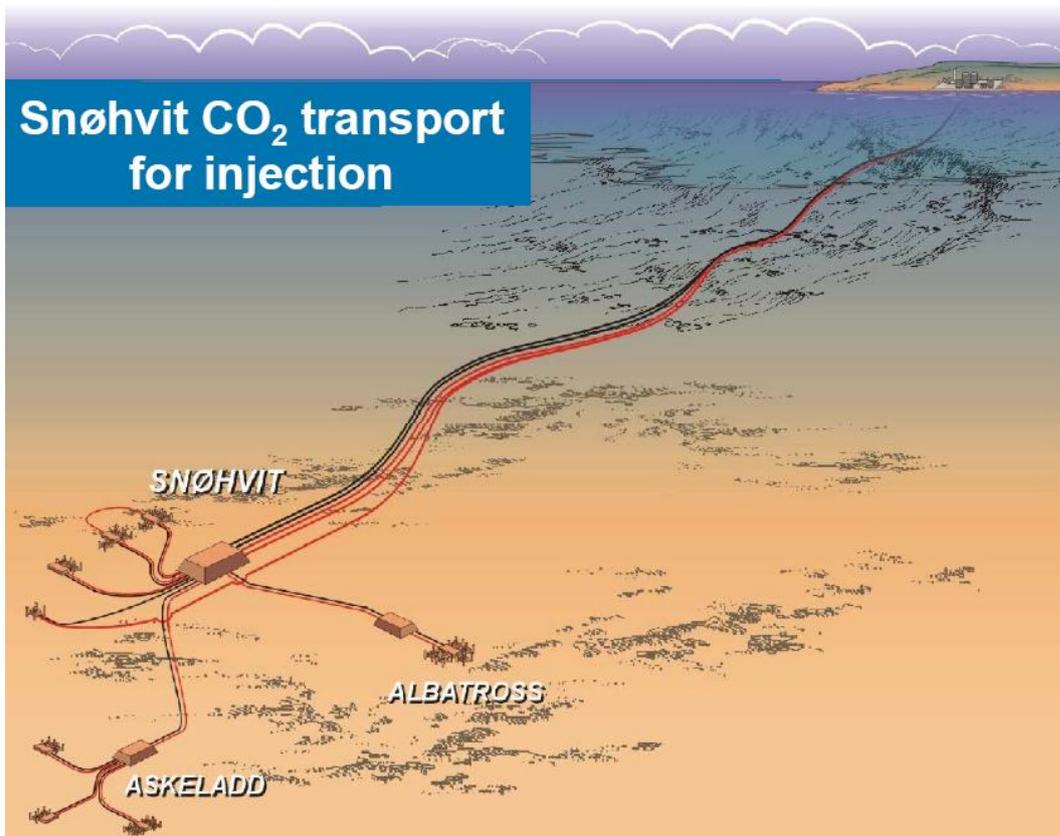


Figura 25 - Representação do Campo de Snøvit

Na tarde de 22 de abril de 2008, iniciou-se com sucesso o programa de CCS no campo de Snøhvit. Ao invés de emitir o CO₂ proveniente do poço diretamente no ar, o CO₂ é separado na base terrestre e reinjetado na terra e armazenado em uma formação salina abaixo do campo de gás explorado. Operando a toda capacidade, cerca de 700 mil toneladas de CO₂ são armazenadas por ano, um equivalente a emissão de 280 mil carros, de acordo com a Statoil[41].

Essa operação é de alta complexidade, pois o fluido é inicialmente bombeado como líquido no sistema, mas se torna bifásico ao longo do duto, voltando a ser tornar líquido no ponto final do processo.

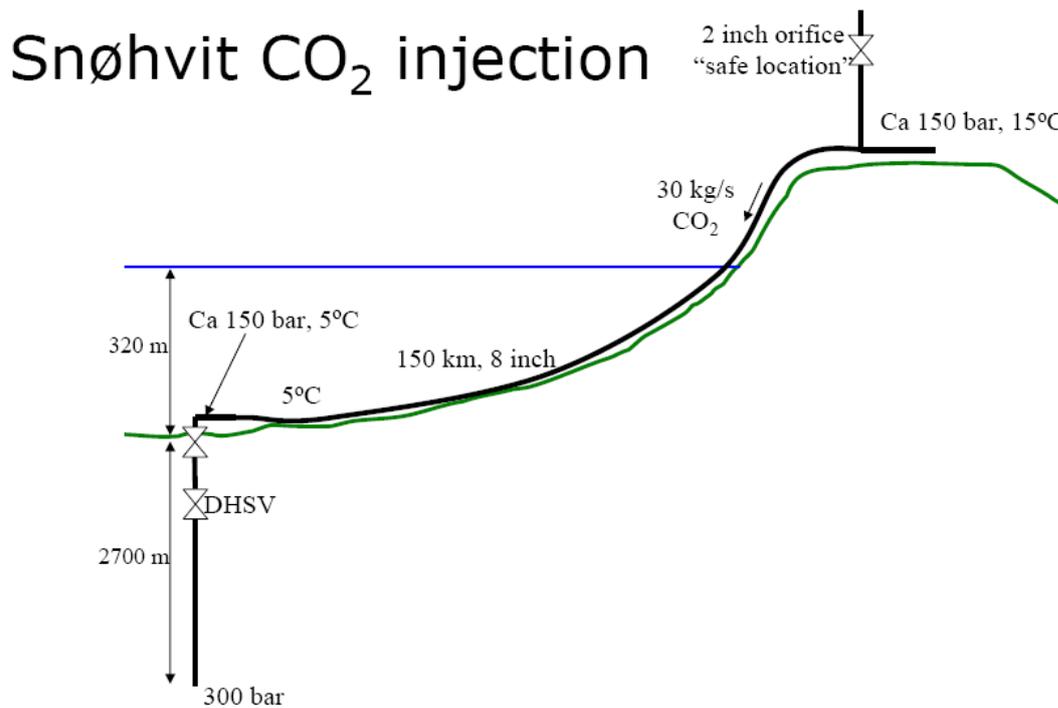


Figura 26 - Esquema simplificado do CSS de Snøvit

5.2.

Armazenamento Oceânico

O aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera devido às emissões antropogênicas resultaram numa absorção pelos oceanos a uma taxa de 7 GtCO₂ por ano (ou 2 GtC). Nos últimos 200 anos os oceanos têm absorvido cerca de 500 Gt de CO₂ dos 1300 Gt emitidos pelo homem na atmosfera (IPCC 2005)[19]. O CO₂ antropogênico reside primariamente a baixas profundidades, o que tem reduzido o pH da água na superfície do oceano em cerca de 0,1 sem alterar o pH em altas profundidades.

De acordo com modelos e análises de observações oceânicas verifica-se que o CO₂ injetado no fundo do mar permanecerá isolado da atmosfera por vários séculos. A fração de CO₂ mantida tende a aumentar de acordo com a profundidade. Há conceitos adicionais de retenção de CO₂, como formação de hidratos e lagos de CO₂ no fundo do mar (Nakajima, Y. et al. - 2005)[42].

A injeção de algumas giga-toneladas de CO₂ resultaria numa mudança mensurável na química marítima na área injetada, enquanto a injeção de centenas

de giga-toneladas de CO₂ iriam eventualmente produzir mudanças mensuráveis em todo o volume oceânico (IPCC 2005)[19].

Experimentos demonstram que a adição de CO₂ pode ser nociva para organismos marítimos. Efeitos de altos níveis de CO₂ foram estudados em escalas de meses em organismos que vivem perto da superfície do oceano. Os fenômenos observados incluem redução nas taxas de calcificação, reprodução, crescimento, circulação de oxigênio na corrente sanguínea, mobilidade e um aumento da mortalidade no tempo. Em alguns organismos esse efeito é visto na adição de pequenas quantidades de CO₂. Mortalidade imediata é esperada perto dos pontos de injeção ou dos lagos de CO₂. Efeitos crônicos podem se estabelecer no caso de exposição prolongada, como a que resultaria longe do ponto de injeção, entretanto não há estudo do efeito da exposição de CO₂ em organismos que vivem em altas profundidades (Haugan, P.M. – 1997)[43].

Os efeitos do dióxido de carbono nos organismos marítimos gerarão conseqüências no ecossistema, entretanto, nenhum estudo controlado de ecossistema experimental foi feito em altas profundidades. Portanto, apenas uma estimativa preliminar dos potenciais efeitos pode ser dada. Não se sabe como as espécies e os ecossistemas se adaptariam para se manterem em altos níveis de CO₂.

Para a liberação na coluna d'água e no solo oceânico, a captura e a compressão (ou liquefação) do CO₂ devem ser os custos dominantes do projeto. Os custos com transporte (dutos e navios) devem ser os segundos maiores custos, ligados diretamente a distância do local de injeção. Os custos com monitoração devem ser muito pequenos em comparação.

Outra forma de seqüestro marítimo é a dissolução de minerais carbonatos que, se considerado prático, pode resultar no carbono guardado no oceano se manter por 10.000 anos, reduzindo as mudanças de pH no oceano e na pressão parcial de CO₂, e pode evitar a necessidade de separação prévia de CO₂. Grandes quantidades de calcário e outros materiais seriam requeridos neste caso.

Diversos tratados globais e regionais na lei do mar e ambiente marítimo podem ser relevantes na liberação intencional de CO₂ nos oceanos, mas o status

legal de armazenamento marítimo de carbono ainda não foi estudado. A Figura 27 apresenta os métodos de seqüestro de carbono marítimos apresentados aqui (IPCC 2005)[19].

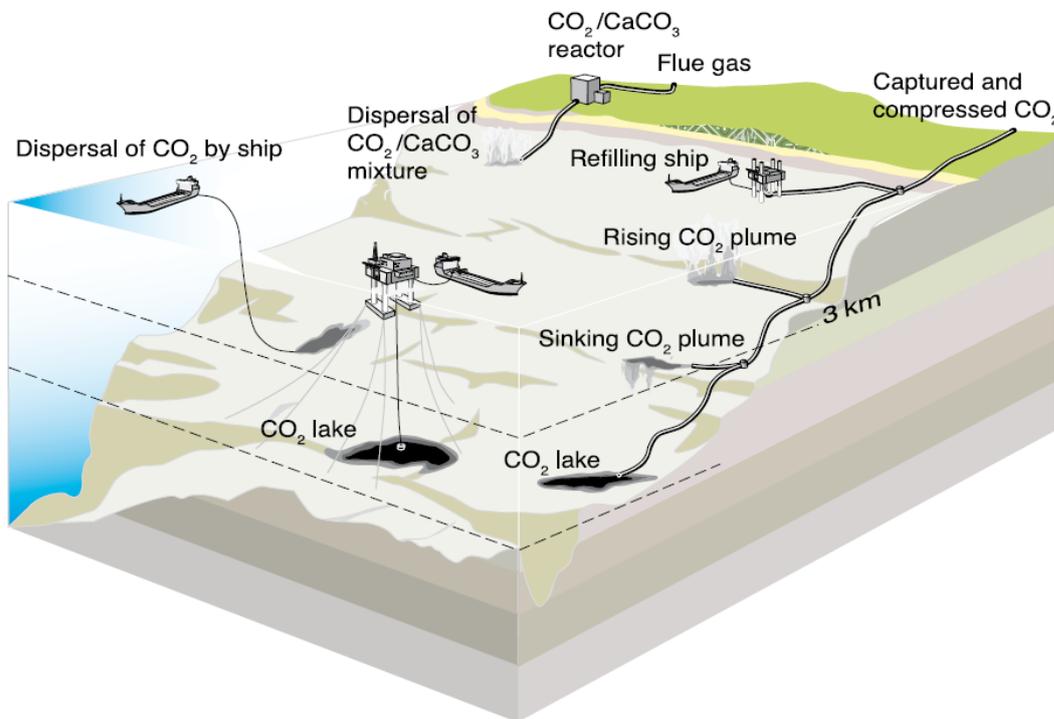


Figura 27 - Estratégias de Armazenamento Oceânico de CO₂

Não existem publicações específicas sobre a seleção de locais para a injeção intencional de CO₂ para armazenamento marítimo; logo, só poderão ser discutidos fatores gerais relacionados ao ambiente. Além das considerações ambientais, outros fatores como custos, segurança e questões de fronteiras deverão ser estudados.

5.3.

Carbonização Mineral

Carbonização Mineral refere-se a fixação do dióxido de carbono utilizando óxidos alcalinos e alcalinos terrosos, como óxido de magnésio (MgO) e óxido de cálcio (CaO), que são presentes em rochas sílicas como Serpentinó e Olivina. Reações químicas entre esses materiais e o CO₂ produzem compostos como o Carbonato de magnésio (MgCO₃) e o Carbonato de cálcio (CaCO₃, conhecido comumente como Calcário). A quantidade de óxidos metálicos nas rochas sílicas

que podem ser encontradas na crosta terrestre excede a quantidade necessária para absorver o CO₂ produzido pela queima de todo combustível fóssil em reserva no mundo, como visto no relatório do IPCC 2005[19]. Esses óxidos também estão presentes em menores quantidades no lixo industrial, como a escória e cinzas provenientes do processo de fabricação de aço inoxidável. Carbonização mineral produz sílica e carbonatos estáveis por grande período de tempo e, portanto, podem ser despejados em áreas como minas de silício ou reutilizados em locais de construção. Esses usos, entretanto, serão muitos menores que a quantidade produzida neste processo.

Após a carbonização, o CO₂ não seria liberado na atmosfera. Sendo assim, não haveria a necessidade de monitoramento dos locais de despejo e os riscos associados são muito pequenos. Os potenciais de armazenamento são difíceis de estimar, pois este processo ainda está em fase de desenvolvimento. Ele seria limitado a fração das reservas de sílica que podem ser exploradas, devido a fatores ambientais como volume do produto a ser despejado e pela limitações legais e sociais no local de armazenamento.

O processo de carbonização mineral ocorre naturalmente, no que é conhecido como Meteorização (ou “*Weathering*”). Na natureza, esse processo ocorre lentamente; portanto ele deve ser acelerado consideravelmente para que seja um método viável de captura de CO₂ antropogênico. As pesquisas no campo de carbonização mineral estão portanto direcionadas para encontrar caminhos para conseguir reações rápidas para fins industriais e tornar a reação mais eficiente em termos de energia consumida.

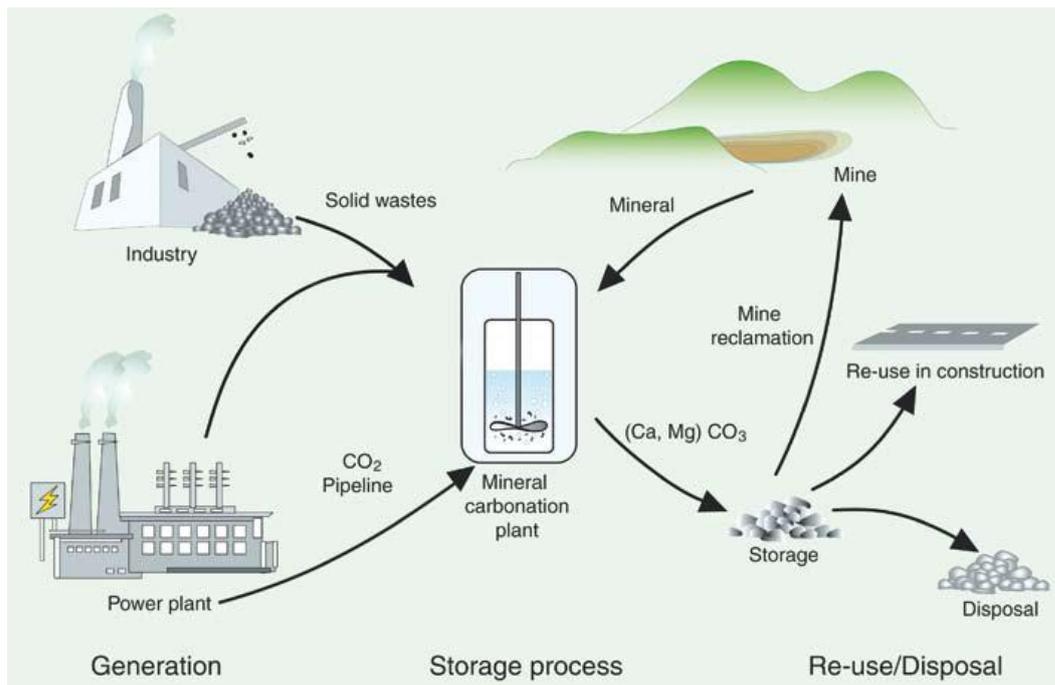


Figura 28 - Processo de Carbonização Mineral

O processo comercial requereria a mineração, a usinagem dos minerais e o seu transporte para uma planta de processamento, que receberia uma quantidade concentrada de CO_2 de uma usina de geração de energia com captura como ilustrado na Figura 26 IPCC 2005[19]. O processo de carbonização também exigiria em torno de 30 a 50% da energia gerada na usina com captura de CO_2 . Considerando a energia adicional necessária para a captura do dióxido de carbono, um sistema de CCS com carbonização Mineral necessitaria de 60 a 180% mais energia por kWh que uma usina de geração de energia sem captura ou carbonização. Essas demandas de energia aumentam o custo por tonelada de CO_2 armazenado significativamente para o sistema proposto.

O melhor caso estudado até agora é a “carbonização molhada” (ou “*Wet Carbonation*”) de sílica, como mencionado por (Baclocchi, R. et al. - 2010)[44]. O custo estimado deste processo é aproximadamente entre 50 e 100 dólares por tonelada de CO_2 mineralizado (além dos custos de captura e transporte de CO_2). O processo de carbonização iria requerer entre 1,6 a 3,7 toneladas de sílica para cada tonelada de CO_2 , e iria produzir entre 2,6 e 4,7 toneladas de material a ser despejado por tonelada de CO_2 armazenado como carbonato. Isso seria, portanto, uma grande operação, com impactos ambientais similares à operações de larga

escala de minas de superfície. Serpentinó também contém normalmente Crisótilo, uma forma natural de asbesto. Sua presença demandaria grande monitoração durante as operação de extração. Entretanto, os produtos da Carbonização Mineral não possuem nenhuma quantidade do produto, já que é a primeira substância a ser convertida em carbonato, por ser a mais reativa.

Uma grande quantidade de questões ainda deve ser esclarecida antes que estimativas mais precisas do potencial de armazenamento de CO₂ por carbonização mineral possam ser fornecidas. Entre elas se encontram a capacidade técnica de utilizar as técnicas mencionadas e a quantificação da energia necessária, assim como as reservas da matéria prima que podem ser exploradas, tanto no sentido técnico como econômico. O impacto ambiental também pode limitar o potencial desta técnica.