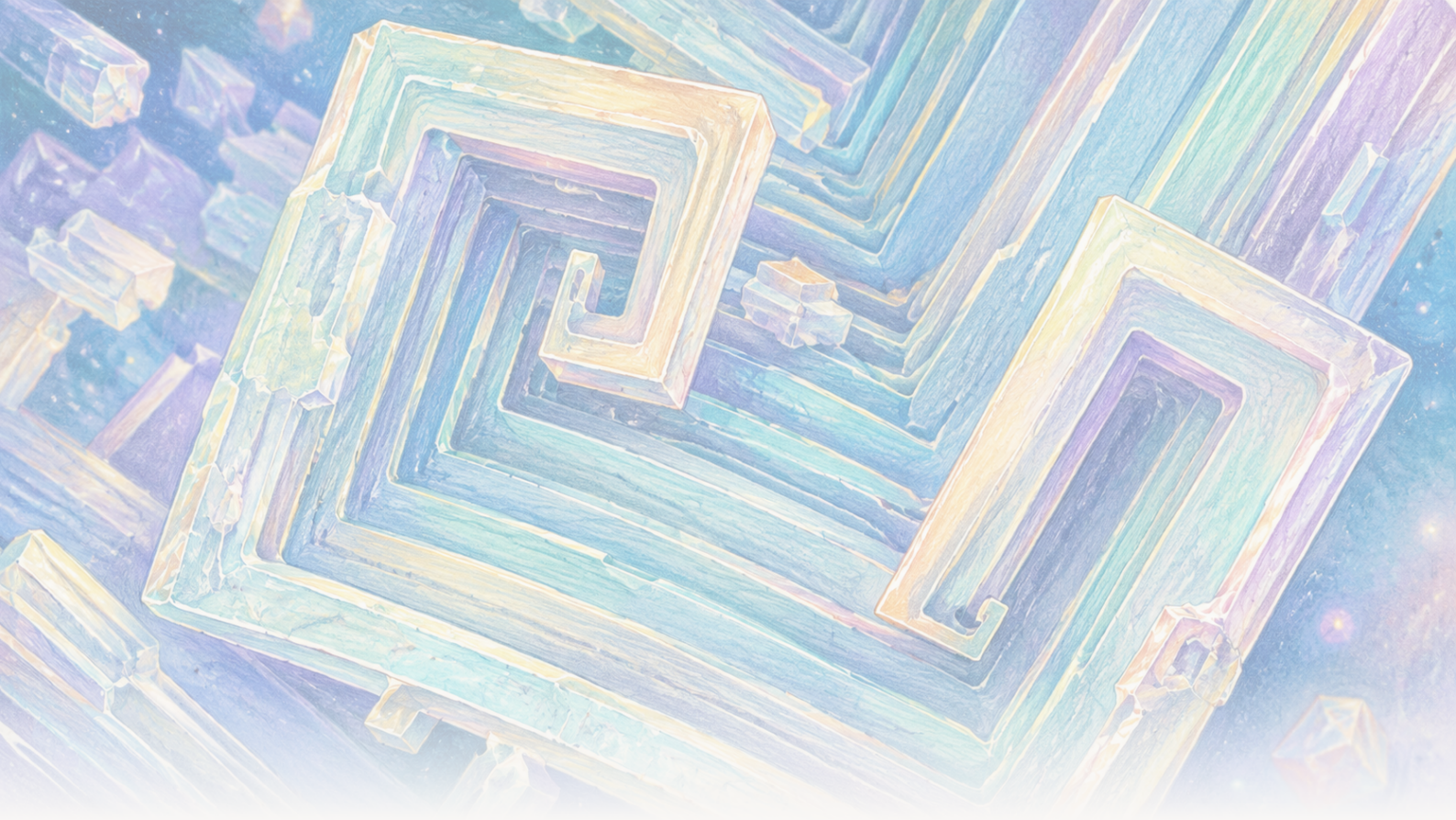


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Em órbita, o sal de cozinha formou cubos ocos. A gravidade mudou a salmoura, não o sal

Cristais de cloreto de sódio cultivados na Estação Espacial Internacional incluíram cubos ocos e escalonados, com 2 a 8 milímetros de lado. Os artigos apoiam uma explicação baseada em transporte: a sedimentação comum e o fluxo impulsionado por flutuabilidade foram fortemente suprimidos, enquanto a difusão dominou o crescimento inicial. A rede cristalina não se transformou em uma nova forma de sal, e os experimentos não estabelecem um processo industrial.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

Em órbita, o sal comum cresceu formando cubos ocos e escalonados

Os cristais pareciam pequenas obras de arquitetura: molduras quadradas encaixadas umas dentro das outras, com as faces escavadas em degraus.

Eram feitos de cloreto de sódio comum, o mesmo composto do sal de cozinha. O incomum não era o material, mas a salmoura ao redor dele.

Na Terra, um cristal que cresce dentro de um volume de líquido de escala centimétrica pode afundar, encostar em uma parede ou superfície e contribuir para diferenças de densidade que fazem a solução circular. Na Estação Espacial Internacional, a sedimentação comum e o fluxo impulsionado por flutuabilidade foram fortemente reduzidos. Alguns cristais de sal permaneceram suspensos por tempo suficiente para crescer lentamente e de forma mais simétrica, formando **cubos tipo tremonha** com arestas de 2 a 8 milímetros.

Três artigos, publicados em 2011, 2015 e 2019, descrevem esses experimentos. Em conjunto, eles oferecem uma lição clara de física de transporte: mudar a maneira como o material dissolvido chega a um cristal pode alterar sua aparência visível sem mudar sua estrutura atômica.

Eles não demonstram que o espaço produz cristais perfeitos, não estabelecem um processo industrial e não revelam um novo tipo de sal.

O que transforma um cubo em um cristal tipo tremonha

Um cristal normal de cloreto de sódio tem um arranjo atômico cúbico. Um **cristal tipo tremonha** continua sendo cúbico, mas seus cantos e arestas crescem antes do centro das faces. O resultado é uma depressão oca e escalonada em cada face, como se o cubo tentasse construir primeiro a armação e preencher as paredes depois.

Um exemplo posterior da ISS mostra bem esse padrão de crescimento, mas fornece contexto, não evidências provenientes dos três artigos sobre cloreto de sódio. A imagem e o vídeo acelerado de Donald Pettit apresentados abaixo mostram **cloreto de potássio**, um sal diferente, formando em microgravidade morfologias escalonadas tipo tremonha e em espiral.

[figure_pair pending]

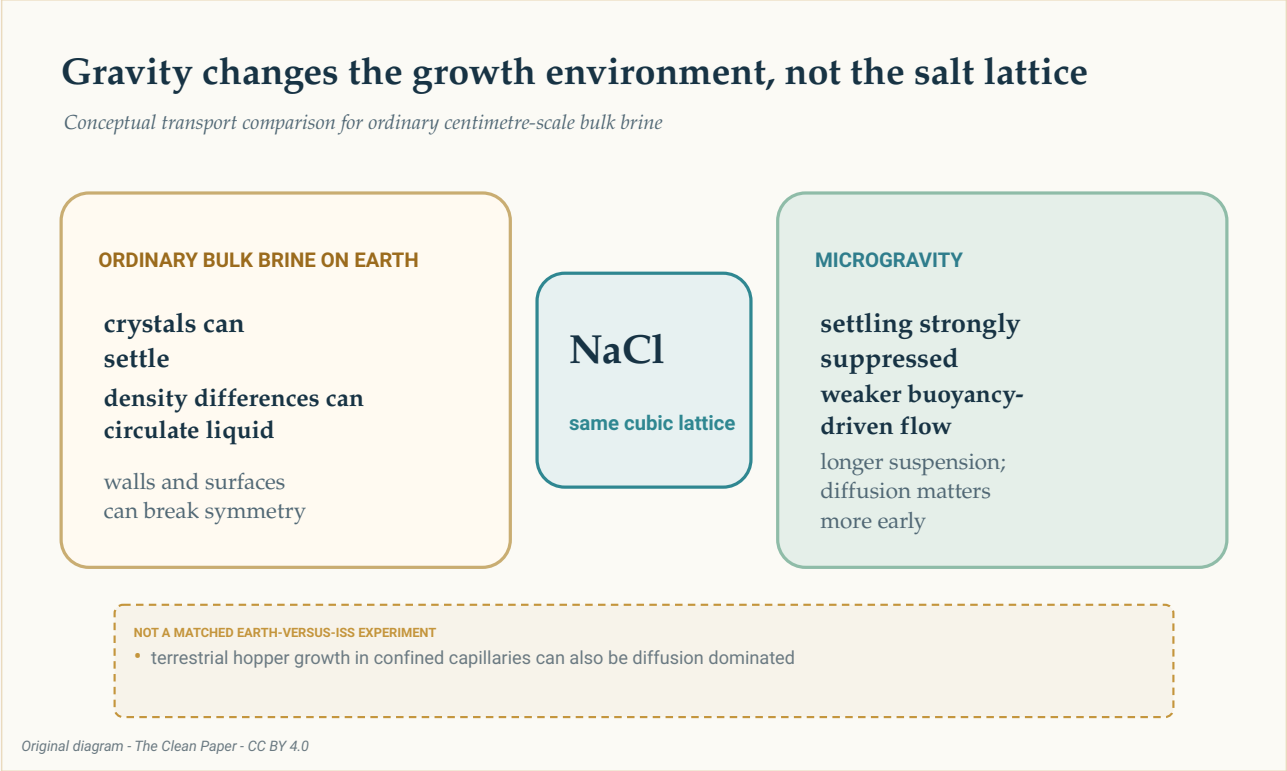
Duas micrografias eletrônicas de varredura de cristais tipo tremonha e em espiral de cloreto de potássio cultivados a bordo da ISS. Essas imagens posteriores são exemplos contextuais da morfologia, não amostras de cloreto de sódio nem medições dos estudos de 2011, 2015 ou 2019 analisados neste artigo.

[video pending]

Um vídeo acelerado posterior do crescimento de cloreto de potássio tipo tremonha dentro de um filme fino de água em microgravidade. Ele ilustra o crescimento de arestas e cantos, não os experimentos nem os dados de cloreto de sódio analisados neste artigo.

Os cristais crescem a partir de **salmoura supersaturada**: água salgada que contém mais cloreto de sódio dissolvido do que permaneceria em equilíbrio nessas condições. Os íons de sódio e cloreto precisam atravessar o líquido e se incorporar à superfície do cristal.

Há duas formas gerais de transportá-los. A **difusão** é o movimento molecular aleatório que leva material dissolvido ao longo de uma diferença de concentração, sem circulação em massa do líquido. A **convecção** é o movimento do próprio líquido. Sob gravidade comum, pequenas diferenças de temperatura ou concentração podem mudar a densidade e impulsionar circulação por flutuabilidade. Os cristais também podem **sedimentar**, ou seja, se depositar no líquido.



Uma comparação conceitual mostra a mesma rede de cloreto de sódio nos dois ambientes. Na Terra, uma salmoura comum de volume apreciável pode apresentar sedimentação, circulação por flutuabilidade e contato com superfícies; a microgravidade reduz fortemente os dois primeiros fenômenos, permite suspensão mais longa e torna a difusão mais importante no início do crescimento. Não foi um experimento pareado Terra-ISS.

The Clean Paper CC BY 4.0

O experimento ocorreu a bordo da Estação Espacial Internacional, um laboratório orbital de microgravidade. A palavra **microgravidade** não significa ausência de gravidade. O artigo de 2019 relatou uma aceleração residual de aproximadamente 1,2 milionésimo da gravidade na superfície terrestre, ou 1,2 micro-g, além de um movimento líquido cíclico e lento. O ambiente mudou o equilíbrio do transporte; não deixou a salmoura perfeitamente imóvel.

Um caminho lento até cubos de escala milimétrica

O estudo de 2019 se concentrou em cubos tipo tremonha que cresceram à medida que a água evaporava da salmoura na ISS. As arestas relatadas mediam entre **2 e 8 milímetros**. As velocidades de crescimento variaram entre **0,34 e 1,0 micrômetro por minuto** — aproximadamente **0,49 a 1,44 milímetro por dia** —, com média de **0,68 micrômetro por minuto** e desvio-padrão de 0,23.

Nessa velocidade média, uma aresta de 8 milímetros levaria cerca de uma semana para se desenvolver. O cálculo é uma estimativa, não uma medição em vídeo acelerado de todas as etapas de um único cristal.

Os autores estimaram uma supersaturação inferior a **1,002**. A literatura terrestre usada como comparação descrevia crescimento tipo tremonha em supersaturações muito maiores, acima de 1,45, e a velocidades de 10 a 110 micrômetros por segundo durante segundos ou minutos, normalmente produzindo cubos menores que 250 micrômetros.

A comparação é informativa, mas não pareada. Os cristais da ISS e a literatura terrestre não vieram de braços simultâneos e idênticos, um na Terra e outro em órbita, executados pela mesma equipe. Diferenças de recipientes, interfaces e métodos também podem influenciar os resultados junto com a gravidade.

Portanto, o contraste mais sólido é descritivo: nessas observações da ISS, os cubos tipo tremonha cresceram lentamente, com baixa supersaturação, durante dias ou semanas, e chegaram à escala milimétrica.

A difusão dominou no início; mais tarde, o fluxo ainda era possível

O artigo de 2019 usou o **número de Péclet** para comparar o transporte pelo movimento do líquido com o transporte por difusão. Um valor abaixo de um indica que a difusão é mais importante; um valor acima de um indica que o movimento em massa pode dominar.

> **Uma razão, não um interruptor**
>
> O número de Péclet compara duas velocidades de transporte. Ele não divide o mundo entre líquido perfeitamente parado abaixo de um e convecção pura acima de um. Aqui, o valor mudou com o tamanho do cristal e com a estimativa de velocidade usada para a salmoura ao redor. Os cristais menores estavam claramente em um regime dominado por difusão; o maior cristal no recipiente grande pode ter entrado em um regime no qual o movimento lento do líquido passou a importar.

Nas gotas menores, de aproximadamente 0,8 centímetro, os valores estimados de Péclet aumentaram de cerca de **0,0004** próximo da nucleação para aproximadamente **0,03** no tamanho final medido. A

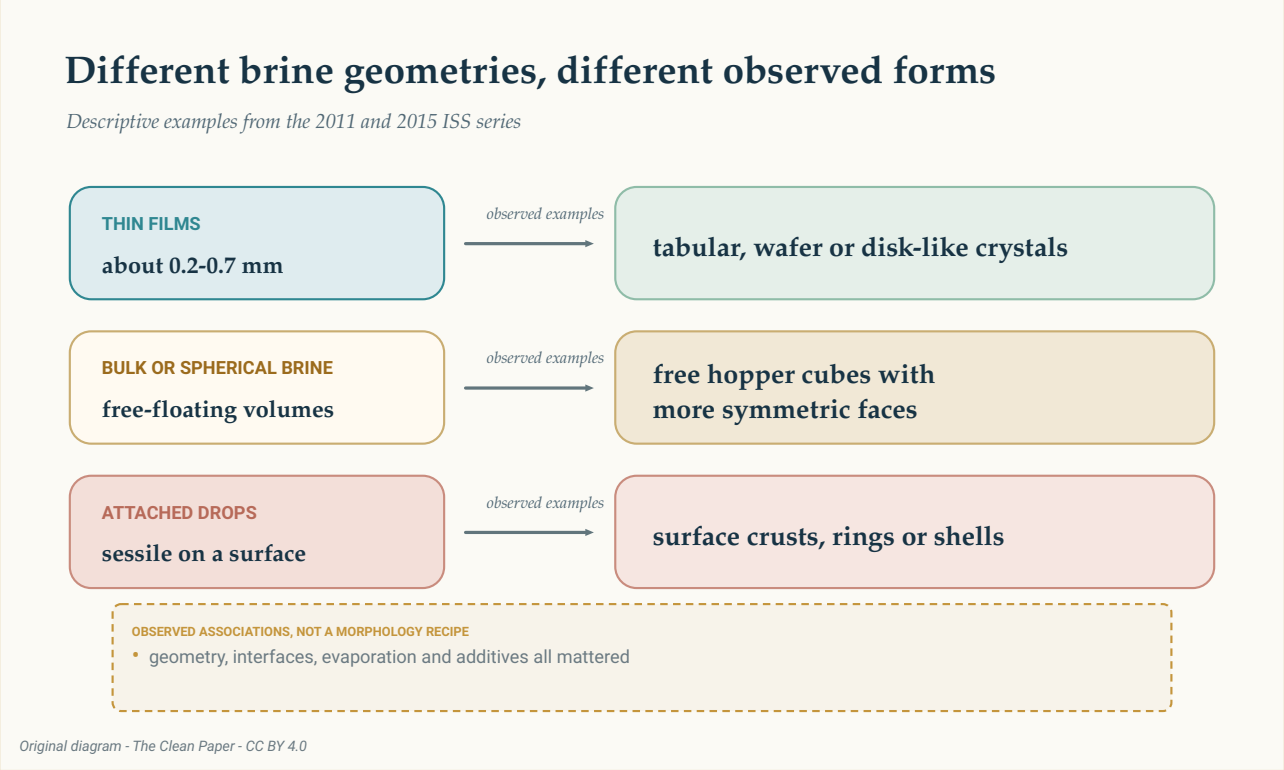
difusão continuou dominante.

Em cristalizadores de 2 a 3 centímetros, a estimativa subiu de aproximadamente **0,05** para um núcleo de 50 micrômetros até cerca de **4** para uma aresta de 4 milímetros. O crescimento inicial ainda era dominado por difusão, mas o movimento cíclico lento pode ter contribuído mais tarde.

Por isso, seria incorreto dizer que “a microgravidade eliminou a convecção”. A circulação comum impulsionada por flutuabilidade e a sedimentação foram muito reduzidas. A aceleração residual e um movimento mensurável permaneceram.

A forma do líquido também importou

O artigo de 2011 e o de 2015 ampliaram o quadro. Eles relataram cristalização de sal em filmes finos, camadas líquidas mais espessas, volumes de salmoura aproximadamente esféricos e gotas aderidas a uma superfície.



Três linhas resumem exemplos observados no conjunto de estudos: filmes finos com formas tabulares ou semelhantes a discos; salmoura em volume ou esférica com cubos tipo tremonha livres; e gotas aderidas com crostas, anéis ou cascas. São associações descritivas, não uma receita nem uma garantia.

The Clean Paper CC BY 4.0

No estudo de 2011, filmes finos de aproximadamente 0,2 a 0,7 milímetro de espessura produziram lâminas finas e cristais tabulares. Volumes de salmoura flutuando livremente permitiram faces laterais mais simétricas e cubos tipo tremonha.

As observações de 2015 incluíram filmes finos de 0,2 a 0,7 milímetro, camadas mais espessas de cerca de 4 a 6 milímetros e gotas hemisféricas aderidas com aproximadamente 20 a 32 milímetros de diâmetro. Entre as formas relatadas estavam tremonhas tabulares, cubos, cristais semelhantes a discos, dendritos, anéis e cascas. A adição de polietilenoglicol suprimiu o crescimento tipo tremonha em um conjunto de observações.

Os autores descreveram o trabalho de 2015 como observações feitas com suprimentos não inventariados durante o tempo livre da tripulação, não como uma investigação programática rigorosa. Os exemplos mostram que a geometria do líquido, as interfaces, a evaporação e os aditivos foram importantes. Eles não definem uma receita determinística na qual uma forma de recipiente garanta uma forma de cristal.

A rede cristalina não se transformou em uma nova forma de sal

A diferença entre **estrutura cristalina** e **morfologia** é essencial.

A estrutura é o arranjo atômico repetido. A morfologia é a forma externa visível. A difração de nêutrons do artigo de 2011 não identificou mudanças na estrutura do cloreto de sódio nem nos parâmetros da célula cristalina em relação a amostras terrestres. As amostras orbitais também continham **inclusões de salmoura**, pequenas bolsas de solução presas dentro do cristal.

Portanto, a aparência grande e simétrica não demonstra que o material era mais puro ou livre de defeitos. Nenhum dos artigos do conjunto relata maior pureza química, melhor desempenho mecânico ou adequação a um dispositivo específico.

A gravidade agiu de forma indireta. Ela alterou sedimentação, circulação do líquido, orientação e contato com superfícies. Não modificou a força das ligações do cloreto de sódio nem criou uma nova fase atômica.

O que esses experimentos podem — e não podem — nos ensinar

Os artigos apoiam uma explicação baseada em transporte: ao reduzir fortemente a sedimentação comum e o fluxo impulsionado por flutuabilidade, alguns cristais puderam permanecer suspensos e crescer lentamente sob condições mais simétricas. Os tamanhos, as velocidades e as formas medidos são observações diretas; a supersaturação, a história de crescimento e os números de Péclet incluem estimativas; a comparação com a Terra se baseia em parte em outros experimentos publicados.

Não há um único denominador comum para todo o conjunto. Ele combina cristais individuais, cristalizadores e exemplos selecionados de três artigos. Somá-los em um total daria a impressão de um

experimento uniforme que não existiu.

Os estudos também não fornecem as evidências necessárias para sustentar uma alegação de fabricação. Eles não medem vazão, custo de produção, uso de energia, rendimento, confiabilidade nem desempenho útil do material. A série de 2015 foi exploratória. As comparações terrestres não eram controles pareados. E algo ser grande ou visualmente impressionante não significa que seja melhor para uma aplicação.

Depósitos naturais de sal podem conter cubos tipo tremonha de centímetros, às vezes suspensos em lama encharcada de salmoura. O artigo de 2019 propõe uma possível analogia com crescimento lento e dominado por difusão. É uma comparação interessante, não uma demonstração de que as tremonhas naturais e orbitais compartilham um único mecanismo.

Em resumo

Cristais de sal cultivados a partir de salmoura em evaporação na Estação Espacial Internacional incluíram cubos ocos e escalonados tipo tremonha com 2 a 8 milímetros. Os artigos apoiam uma explicação baseada em transporte: a microgravidade reduziu fortemente a sedimentação comum e o fluxo impulsionado por flutuabilidade, permitindo crescimento lento e suspensão prolongada enquanto a difusão dominava no início. A geometria do líquido, as interfaces, a evaporação e os aditivos também afetaram a morfologia. A difração de nêutrons não mostrou uma nova estrutura do cloreto de sódio, e inclusões de salmoura permaneceram. O trabalho é um estudo de caso delimitado em ciência dos materiais, não uma demonstração de que o espaço produz cristais perfeitos ou viabiliza um processo industrial.

Leitura crítica

O que os artigos mostram: cubos tipo tremonha de cloreto de sódio em escala milimétrica e outras morfologias cresceram em várias geometrias de salmoura na ISS. Os cubos tipo tremonha do estudo de 2019 cresceram lentamente, com baixa supersaturação estimada e difusão dominante no início.

O que é interpretado: a forte redução da sedimentação e do fluxo impulsionado por flutuabilidade permitiu suspensão mais longa e crescimento mais simétrico. O movimento lento do líquido pode ter importado em fases tardias no cristalizador maior.

O que eles não mostram: uma nova forma atômica de sal, cristais mais puros ou livres de defeitos, um teste pareado Terra-ISS, uma vantagem universal da microgravidade ou uma rota comercial de fabricação.

Principais limitações: três estudos distintos com geometrias e exemplos selecionados diferentes; comparações terrestres entre estudos; grandezas de transporte estimadas; partes exploratórias e não programáticas do conjunto; e ausência de economia de processo ou testes de desempenho.

Quanta confiança um leitor geral deve ter? Alta confiança de que as morfologias orbitais relatadas e o crescimento lento são reais. Confiança moderada na explicação por transporte como a melhor interpretação do conjunto de observações. Confiança muito baixa em qualquer alegação que transforme esses experimentos com sal em uma promessa geral sobre fabricação espacial.

Fontes

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026