

David Costa Ascenso Silva

Simulação Laboratorial de Feições Periglaciais

Dissertação de Mestrado em Geociências

Ramo Recursos Geológicos

2017

• U • C •



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA**

Simulação Laboratorial de Feições Periglaciais

David Costa Ascenso Silva

MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS – ESPECIALIZAÇÃO EM RECURSOS GEOLÓGICOS

Orientador Científico

Prof. Doutor Eduardo Ivo Cruzes do Paço Ribeiro Alves,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2017

Índice de figuras

Figura 2.1 - Polígonos na Antártida	4
Figura 2.2 - Dados relativos às temperaturas associadas à fraturação da camada ativa	5
Figura 2.3 - Círculo calibrado com 0.8 metros de diâmetro	6
Figura 2.4 - Círculos calibrados em Spitsbergen	6
Figura 2.5 - Pingos na ilha Prince Patrick, Canadá.....	7
Figura 2.6 - Esquema do crescimento e colapso de um pingo.....	7
Figura 3.1 – Fotografias de 2 diferentes tipos de feições periglaciais na superfície de Marte...	14
Figura 4.1 - Mapa da superfície de Titã.....	17
Figura 4.2 - Mapas globais da evolução da temperatura em Titã.....	18
Figura 4.3 – Rede de drenagem em Titã	19
Figura 5.1 - Instrumento para registo de empolamento de gelo.....	20
Figura 5.2 - Placa termoeletrica TECA e correspondete caixa protetora.....	21
Figura 5.3 - Software EasyLog	22
Figura 5.4 - Desmonte e arranjo da Placa TECA.....	27
Figura 5.5 - Água acumulada e posteriormente removida das amostras	28
Figura 5.6 - Sedimentos utilizados para as amostras.....	29
Figura 6.1 - Sequência da amostra "seq33C4q".....	33
Figura 6.2 - Sequência da amostra "seq22C4*".....	34
Figura 6.3 - Sequência da amostra "seq24A4*".....	35
Figura 6.4 - Sequência da amostra "seq26D1/A3".....	36
Figura 6.5 - Sequência da amostra "seq28D4/A4".....	37
Figura 6.6 - Sequência da amostra "seq21A31".....	38
Figura 6.7 - Sequência da amostra "seq32D1/A3".....	39
Figura 6.8 - Sequência da amostra "seq32D1//A3".....	40
Figura 6.9 - Sequência da amostra "seq34AC4q".....	41
Figura 6.10 - Sequência da amostra "seq1920A13".....	42
Figura 6.11 - Sequência de fotografias "seq161718C13".....	43
Figura 6.12 - Sequência de fotografias "seq181920C31".....	44
Figura 6.13 - Sequência da amostra "seq28(D4/A4)*".....	45
Figura 6.14 - Sequência de amostras "seq31".....	46
Figura 6.15 - Sequência da amostra "seq22C4".....	47
Figura 6.16 - Sequência da amostra "seq27(D1/A3)*".....	48
Figura 6.17 - Comparação de terreno poligonal natural com um artificial.....	50
Figura 6.18 - Comparação de círculos calibrados com dois resultados da modelação.....	51
Figura 6.19 - Comparação de pingos naturais com um artificial.....	52
Figura 6.20 - Comparação entre um terreno poligonal marciano e um simulado.....	52
Figura 6.21 - Comparação entre círculos calibrados em Marte e um modelado.....	53
Figura 6.22 - Comparação entre um terreno cerebral em Marte e um modelado.....	53
Figura 6.23 - Comparação entre uma rede de drenagem de Titã e uma modelada.....	54
Figura 7.1 - Uma das amostras da fase experimental da modelação	55
Figura 7.2 - Formação de terrenos poligonais e acumulação de água em excesso	56
Figura 7.3 - Esquema da formação de pingos e sua cicatriz.	56

Figura 7.4 - Esquema de possíveis movimentos dos sedimentos na amostra "seq28D4/A4" 57
Figura 7.5 - Esquema da sequência de passos para a formação da amostra "seq1920A13" 57
Figura 7.6 - Empolamento dos grãos mais finos e esquema do movimento de um grão..... 58
Figura 7.7 - Bolsas de ar retidas numa amostra..... 58
Figura 7.8 - Diagrama de fases para o metano, incluindo condições T-P na superfície de Titã.. 59

Nomenclatura das amostras

Seqx	Sequência número x
1	Sedimento <i>fino</i> ($\emptyset < 105 \mu\text{m}$) Referido no texto como 100 μm
2	Sedimento <i>médio</i> ($149 < \emptyset < 210 \mu\text{m}$) Referido no texto como 150 μm
3	Sedimento <i>grosseiro</i> ($210 < \emptyset < 297 \mu\text{m}$) Referido no texto como 200 μm
4	Mistura de sedimento <i>fino</i> com <i>grosseiro</i>
A	Saturado
B	Excesso de água
C	Húmido
D	Seco
*	Em vidro de relógio
Q	Em caixa quadrada
Exp	Programa
/	Distinção entre duas camadas
Exemplo: seq34AD4Q	Amostra da sequência 34, com duas camadas de mistura de sedimentos, uma saturada outra seca, em caixa quadrada.

Sumário

Feições periglaciais são estruturas criadas através do congelamento do solo em zonas não glaciares.

Com o intuito de comprovar as hipóteses existentes para a formação de feições periglaciais, esta modelação pretende recriar estas estruturas em condições laboratoriais controladas. Foram assim realizados mais de 60 testes, em amostras compostas maioritariamente por mistura de diferentes granulometrias de grãos de quartzo e água, sendo posteriormente sujeitas a ciclos de gelo-degelo com a ajuda de uma placa termoelétrica. Este procedimento foi fotografado no seu decorrer, permitindo a construção de várias compilações de imagens e filmes que facilitam a análise dos resultados. Desta forma averiguou-se a aparência final de cada uma das amostras, assim como a sua evolução ao longo de cada ciclo e foi possível a sua comparação com imagens de feições periglaciais reais.

Apresentam-se os resultados da modelação de terrenos poligonais, círculos calibrados, pingos, terrenos cerebrais e ainda de uma hipotética rede de drenagem. Nos três primeiros casos foi de facto possível observar feições modeladas que se comparam às reais, na Terra e em Marte; nos dois últimos, produziram-se terrenos cerebrais e redes de drenagem análogas aos de Marte e Titã. Também foram observadas outras estruturas que não têm, aparentemente, paralelo na realidade conhecida.

Palavras-chave: Feições periglaciais, geomorfologia experimental, modelação laboratorial, permafrost, geologia planetária.

Abstract

Periglacial features are structures created by soil freezing in non-glacial zones.

In order to verify the existing hypotheses for the formation of periglacial features, this modelling intends to recreate these structures under controlled laboratory conditions. More than 60 tests were carried out on samples composed mainly of a mixture of different granulometries of quartz grains and water, and subsequently subjected to freeze-thaw cycles with the help of a thermoelectric plate. This procedure was photographed, allowing the construction of several compilations of images and films that facilitate the analysis of the results. In this way the final appearance of each of the samples was verified, as well as their evolution along each cycle and it was possible to compare them with images of real periglacial features.

The results of modelling of polygonal terrains, calibrated circles, pingos and a hypothetical drainage network are presented. In the first three cases it was indeed possible to observe modelled features that match with the real ones, on Earth and on Mars; the two last ones, brain terrains and drainage nets have been produced which seem analogous to those on Mars and Titan. Other structures have also been observed which apparently have no parallel in known reality.

Keywords: Periglacial features, experimental geomorphology, laboratorial modelling, permafrost, planetary geology.

Agradecimentos

E assim chega o momento de agradecer a todas as pessoas que tiveram influência neste trabalho, seja de forma direta ou indireta. O culminar deste percurso académico dá-se aqui. A todos sem exceção dedico as próximas palavras, uma simples conversa pode mudar todo um pensamento.

Ao Professor Doutor Eduardo Ivo Cruzes do Paço Ribeiro Alves, agradeço a oportunidade que me deu para trabalhar sob a sua orientação neste tema que tanto interesse me despertou. As suas indicações, palavras de motivação, disponibilidade e atenção foram essenciais para que todo este processo fosse possível.

Ao Centro de investigação de Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra pela disponibilização de todos os aparelhos, materiais e local de trabalho necessários.

De referir a disponibilidade do Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, pela pessoa do Professor Doutor Pedro Proença e Cunha, para utilização do espaço e dos seus equipamentos.

Agradeço aos funcionários do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, Sr. Armando Silva e Sr. Miguel Brás, pela disponibilidade que sempre apresentaram e pelo trabalho realizado com o arranjo da placa termoeétrica.

Quero ainda agradecer a todos os meus amigos, na pessoa do Pedro Dias, companheiro de trabalho durante estes anos de mestrado e principalmente durante a dissertação. A toda a minha família, mãe e irmã, sem eles este percurso não seria possível. Por fim agradeço ainda à Ângela, principal ajuda e motivação durante todos estes anos.

O meu maior obrigado.

1. Introdução

Feições periglaciais são estruturas criadas através do congelamento do solo em zonas não glaciares. Estas são estruturas que despertam o interesse dos cientistas desde muito cedo tendo já sido publicados inúmeros trabalhos e sendo ainda estudadas até aos dias de hoje.

A modelação laboratorial consiste na tentativa de recriar artificialmente determinadas estruturas reais. Neste caso estas são designadas por feições periglaciais, das quais se estudaram terrenos poligonais, círculos calibrados e pingos, podendo estes ser encontrados na Terra, em Marte e em Titã, sendo este último um caso ainda em estudo. Mais concretamente na Terra, Svalbard, Antártida, Canadá e Rússia são alguns dos locais onde podem ser encontradas algumas dessas feições (Pidwirny, 2006). Em Marte também é possível observar terrenos poligonais e pingos, através de imagens fotografadas que surgem um pouco por toda a superfície marciana. Levy (2008) e Burr (2009) tratam, nos seus trabalhos, de polígonos e pingos respetivamente e foi com base em estudos como estes que esta modelação foi originada. Foi também simulado um modelo de terrenos cerebrais, que anteriormente foram interpretados por Levy (2009a). No presente trabalho é ainda colocada a hipótese de uma rede de drenagem de Titã poder ser considerada uma feição periglacial.

Estas têm em comum uma base física, a mistura de sedimentos com água sujeita a ciclos de gelo-degelo. No entanto cada uma delas requer determinadas condições necessárias para a sua formação, nomeadamente a presença de uma porção de água confinada sujeita a baixas temperaturas, ou ainda a presença de uma camada permanentemente congelada, sob a camada sujeita a ciclos de congelamento e descongelamento. Para além das feições acima referidas, ainda podem ser encontrados outros tipos de geofomas periglaciais, como listas calibradas, *hummocks* e *frostboils*.

Com esta modelação pretendem-se recriar algumas das feições anteriormente referidas, a fim de possibilitar a comparação entre as artificiais e as reais. Deste modo espera-se poder comprovar as hipóteses da sua formação, assim como observar todas as etapas desse processo.

No laboratório de sedimentologia do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, foram criadas diferentes amostras tendo em conta as porções de água e sedimentos e ainda o tipo de caixa envolvente. A maior parte das amostras era constituída por duas granulometrias distintas de grãos de quartzo juntamente com água desionizada. Estas, depois de elaboradas, foram sujeitas a ciclos de gelo e degelo através de uma placa termoelétrica até apresentarem algum tipo de feição.

A observação foi o principal método de análise dos resultados obtidos, a partir do conjunto de fotografias capturadas em cada sequência de amostras, as quais foram transformadas em ficheiros GIF animados ajudando a visualização da evolução das estruturas.

Para uma melhor compreensão deste estudo, o presente trabalho contém quatro capítulos introdutórios. Primeiramente os processos periglaciais na Terra, que refere as zonas

climáticas onde se encontram as feições, como por exemplo Svalbard e Canadá e no que estas consistem. Em segundo lugar, Marte, que reflete mais uma vez sobre as feições periglaciais nele existentes, bem como o seu contexto envolvente e histórico. Em terceiro lugar foi abordado o maior satélite de Saturno, Titã, onde foram referidos os mesmos tópicos do capítulo anterior. Por último, mostra-se a modelação laboratorial de processos periglaciais, que refere possíveis modelos anteriores, assim como o equipamento utilizado e o protocolo laboratorial.

2. Processos periglaciais na Terra

2.1. Zonas climáticas periglaciais

Os processos periglaciais estão diretamente relacionados com o *permafrost*, terreno que permanece abaixo dos 0 °C no decorrer de no mínimo dois anos (Van Everdingen, 2005). Para que o seja considerado não necessita de estar totalmente congelado. A presença de água, que é variável, atrasa o processo, logo, mesmo abaixo dos 0 °C, o solo não está congelado na sua totalidade, mas não deixa de ser considerado permafrost. “Por outras palavras, enquanto todo o solo perenemente congelado é permafrost, nem todo o permafrost é perenemente congelado” (van Everdingen, 2005). Este tipo de terreno começou a ser formado no Cenozóico tardio, há cerca de 2.5 milhões de anos, na grande baixa da temperatura média terrestre ocorrida nessa época (Morgenstern, 2007). O permafrost na Terra distribui-se predominantemente nas altas latitudes entre os 55 e os 75°. Também existem condições semelhantes nas zonas de elevada cota em certas cadeias montanhosas (p. ex. Qinghai-Xizang) e em locais glaciares que não tenham camada de gelo (p. ex. Svalbard), (Morgenstern, 2007).

Dois critérios são considerados como diagnósticos de ambientes periglaciais. Primeiro, há congelamento e descongelamento no solo. De acordo com J. Tricart, "o meio periglacial é aquele onde a influência das oscilações congelamento-descongelamento é dominante" (Tricart, 1968). Segundo, há a presença de solo permanentemente congelado. De acordo com T. L. Péwé, "o permafrost é o denominador comum do ambiente periglacial e é praticamente ubíquo na zona periglacial ativa" (Péwé, 1969). Em suma, as feições periglaciais são formadas na camada ativa, camada de solo no topo do permafrost que congela e descongela sazonalmente, localizada no, ou próxima, do mesmo.

Cada feição tem a sua combinação de características para a sua origem, desde o congelamento de bolsas de água no subsolo que ao expandir criam proeminências, “pingos” (p. ex. Devon 2008), até aos ciclos de congelamento e descongelamento da camada ativa que provoca a contração térmica da mesma e o aparecimento dos terrenos poligonais (Levy et al., 2008), descongelamento de feições já existentes, entre outros. Tendo em conta que ainda existe a hipótese de algumas destas estruturas serem calibradas ou não, o leque de possíveis formações periglaciais é bastante extenso, pelo que serão abordadas as mais relevantes e que tenham comparação possível com os modelos obtidos.

2.2. Feições (ou geoformas) periglaciais

Entende-se por feições periglaciais, fenómenos formados através de processos associados ao congelamento do solo em ambientes não glaciares. (p. ex. Van Everdingen, 2005). Estas feições podem ter variadas formas de se pronunciar, das quais as tratadas neste trabalho serão os terrenos poligonais, os círculos calibrados e os pingos. Para além destas ainda se podem considerar os *hummocks*, o *basketball terrain*, *frostboils*, listras calibradas, entre outras.

2.2.1. Terrenos poligonais

Os terrenos poligonais, figura 2.1, são das feições relacionadas com o permafrost mais características, mais visíveis e conseqüentemente mais estudadas e conhecidas (Leffingwell, 1915), apesar de também existirem em regiões áridas e quentes (Reis, 2012) e de origem tectónica (Hiesinger e Head, 2000), não abordadas neste trabalho por não terem, obviamente relação com ciclos de congelação-degelo. São formadas pela contração térmica do solo, através de ciclos sazonais de gelo-degelo da camada ativa no topo do permafrost, formando fissuras que criam formas/polígonos entre si, mais visíveis quanto mais ciclos forem sujeitos. Esta teoria foi primeiro desenvolvida por Leffingwell (1919) e dizia que durante as temperaturas frias do inverno se criavam tensões no solo resultando na contração do permafrost, que, quando exercidas, estas forças causavam a fracturação do mesmo. As fissuras criadas são cheias com água e/ou sedimentos durante o verão criando um análogo a uma cunha que exerce força nas paredes da fissura. Com as subidas de temperatura as tensões diminuem e dá-se a distensão do permafrost. O solo não consegue voltar à sua forma original devido aos materiais acumulados nas fissuras. Com o retorno do inverno o processo recomeça nos mesmos locais fissurados criando um ciclo que se estende durante décadas ou séculos até serem visíveis as feições da atualidade.

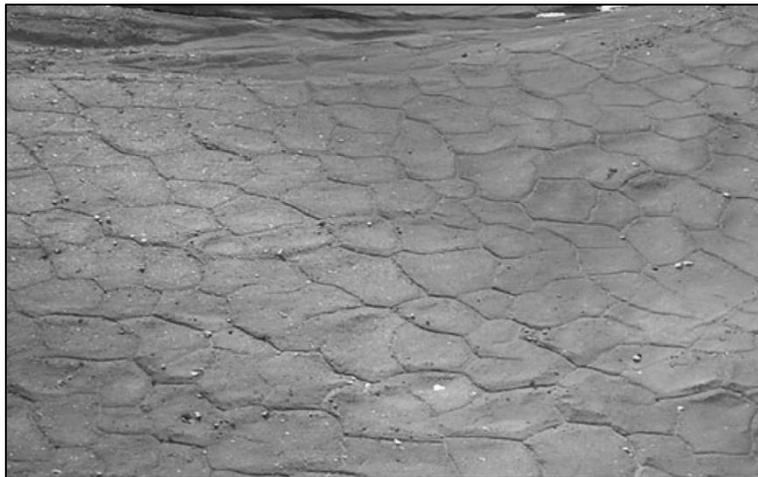


Figura 2.1 - Polígonos na Antártida (Levy et al., 2008)

Em Svalbard, na Sibéria, no Canadá (French, 2007) e noutros locais, incluindo Marte, as temperaturas são as indicadas ao aparecimento destas formações. As condições climáticas no planeta vermelho são teoricamente as ideais para a formação de terrenos poligonais, ciclos gelo – noite, degelo – dia, e algum nível de humidade no passado e, eventualmente, no presente (Carr, 1996). Estas estruturas normalmente não excedem o metro e meio de profundidade e, na Terra, variam entre alguns metros a dezenas de metros em diâmetro. O preenchimento das fissuras por água que, ao congelar, alargará as mesmas, ou sedimentos, que eventualmente cria uma organização sedimentar (van Everdingen, 2005), são, entre outras, características a estudar nesta modelação laboratorial. Estes dois tipos de fissuras são os polígonos “cunha de gelo” e “cunha de areia”, respetivamente. A principal diferença no percurso de formação das duas é a quantidade de água no solo, (French, 2007). A quantidade de água é uma das principais variáveis que influencia a formação de terrenos poligonais, atrasando o processo, através do aumento da temperatura relativa do solo criando um efeito

inibidor. Vários autores estudaram a temperatura a que se formam estas cunhas, chegando a conclusão que a temperatura média do ar deve estar compreendida no intervalo de -25 a -40 °C e a temperatura da superfície entre -15 e -20 °C (fig. 2.2).

Source	MAAT (°C)	Tair (°C)	ACR (°C/hr)	Tsurf (°C)	GCRsurf (°C/day)	Ttop (°C)	GCRtop (°C/day)	Gradient (°C/m)
Mackay, various papers, 1973–2000	-7 to -9	-29 to -34	-0.1	<-20	-0.5 to -0.9	-18 to -20	-0.1 to 0.4	-10 to -15
Allard and Kasper (1998)	-8	-25 to -43	-0.2 to -0.6	-21	-0.9 to -1.7	-15 to -20	-0.6	≥-10
Fortier and Allard (2005)	-15	-25 to -40	-0.2 to -0.9	-15 to -19	+0.1 to -1.1	-13 to -24	+0.1 to -0.3	-10.9
Christiansen (2005)	-6	>-25	n/a	-15 to -20	n/a	-15	-0.3 to -0.4	n/a

MAAT – Mean Annual Air Temperature

Tair – Air temperature at time of frost cracking

ACR – Atmospheric cooling rate of cold spell

Tsurf – Temperature at or near the surface

GCRsurf – Ground cooling rate at surface prior to frost-cracking

Ttop – Ground surface temperature at time of frost cracking

GCRtop – Ground cooling rate at top of permafrost prior to frost cracking

Sources: Fortier and Allard (2005), Christiansen (2005). Reproduced by permission of John Wiley & Sons Ltd.

Figura 2.2 - Dados relativos às temperaturas associadas à fraturação da camada ativa (French, 2007).

As dimensões destas feições são variáveis, desde alguns centímetros até dezenas de metros. Todas parecem poder ser explicadas com base na mesma teoria, com a variação das condições ambientais e das características do solo. Dentro disto ainda existe a possibilidade de estas feições serem ou não calibradas. Esta hipótese está dependente das variáveis já aqui mencionadas, mas principalmente do tipo de solo onde aparecem as formas em questão (Berg e Black 1966): em solos com pouca variedade de granulometria, mais difícil será haver uma calibração nas feições.

Sletten *et al.* (2003) dizem que os polígonos estudados na zona da Antártida têm idades entre 10^3 e 10^6 anos. Assumindo que num ano é feito um ciclo completo, gelo no inverno, degelo no verão, o número de ciclos realizados é igual à idade das feições.

2.2.2. Círculos Calibrados

Com uma aparência única, os círculos calibrados são das feições que mais intrigam os investigadores (figs. 2.3 e 2.4). Como se formam estes campos de círculos quase perfeitos? Washburn (1956) previu que existiam dois mecanismos envolvidos no aparecimento de tais formas: os movimentos do solo aquando do seu congelamento e os movimentos das rochas relativamente ao solo. Mas estes não eram claros para a compreensão do processo. Mais tarde, Kessler e Werner (2003) adicionaram um terceiro parâmetro, o empolamento das próprias rochas envolvidas no processo juntamente com ciclos de gelo-degelo (Mann, 2003). Com estes parâmetros foi possível perceber a formação de várias feições que até à data permaneciam inexplicáveis. Mais recentemente, chegou-se à conclusão que num ambiente periglacial, para a formação de círculos calibrados ocorre sob seis principais elementos: (a) sedimentos grosseiros nas proximidades da superfície; (b) a pré-existência de um círculo prévio não calibrado; (c) sedimentos finos (d) humidade no solo; (e) ciclos de gelo-degelo diários ou sazonais; (f) crioturbação e empolamento de gelo. (Washburn, 1973; Ballantyne and Matthews, 1982; Kessler et al., 2001; French, 2007; Feuillet and Mercier, 2012) *in* (Levy *et al.* 2009a).

Existem vários diâmetros de círculos diferentes e com variadas granulometrias (figs. 2.3 e 2.4). Têm maior expressão em locais gélidos, periglaciais, como Svalbard e o Canadá, por exemplo (Kessler *et al.*, 2001). Podem ocorrer em vastos campos ou isolados, geralmente apresentam um diâmetro entre 0.5 e 3 metros, apresentam os grãos finos no centro e os grosseiros nas bordaduras e à medida que o seu diâmetro aumenta a dimensão do grão aumenta simultaneamente (Van Everdingen, 2005).

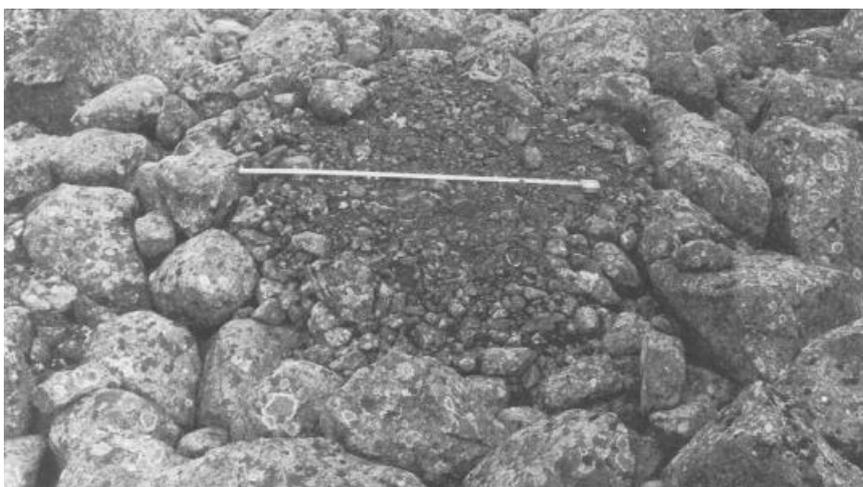


Figura 2.3 - Círculo calibrado com 0.8 metros de diâmetro. Adaptado de Ballantyne e Matthews 1982.



Figura 2.4 - Círculos calibrados em Spitsbergen (Hallet, 2013)

Ballantyne e Harris (1994) in Balme (2009) mostram que o diâmetro dos círculos calibrados é aproximadamente três ou quatro vezes maior que a profundidade da camada ativa. Esta informação pode ser muito útil para determinar a espessura de uma possível camada ativa em Marte, por exemplo, apenas observando círculos calibrados na sua superfície.

2.2.3. Pingos

Por definição um “pingo” é uma acumulação de água sob a superfície que, quando congelada, aumenta o seu volume e cria um núcleo de gelo que eleva a camada de solo criando uma elevação à semelhança de uma colina (Van Everdingen, 2005) (fig. 2.5).



Figura 2.5 - Pingos na ilha Prince Patrick, Canadá. (Pidwirny, 2006)

Estes relevos podem atingir algumas dezenas de metros de altura e centenas de diâmetro basal (Van Everdingen, 2005, Mackay, 1973). Podem ser encontrados um pouco por toda faixa latitudinal do Canadá, por exemplo, (Flemal, 1976).

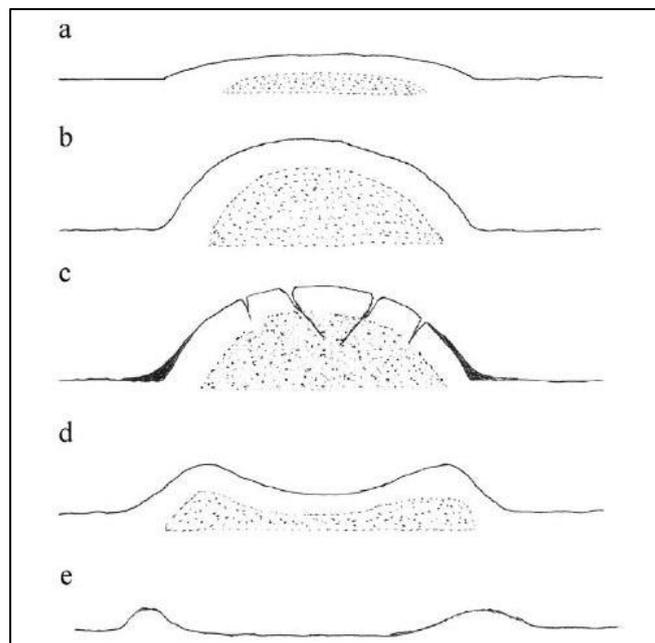


Figura 2.6 - Esquema do crescimento e colapso de um pingo: (a) princípio do crescimento (b) aumento do tamanho (c) fratura da superfície e início do colapso (d) colapso da estrutura envolvente (e) colapso total e conseqüente aparecimento da cicatriz. Escala vertical exagerada para uma melhor visualização (Devon, 2008)

Este processo pode ter dois distintos caminhos. Pode dar-se a contínua injeção de água e o seu posterior congelamento, que pode fazer com que o tamanho do mesmo aumente continuamente até atingir o limite de elasticidade e criar uma fenda que pode criar uma

cratera, ou não, proporcionando um aumento contínuo. Se se der uma interrupção do fornecimento de água, o “pingo” permanece sem alterações, caso as temperaturas subam, dá-se o descongelamento do núcleo gélido que provocará o desmoronamento da capsula antes preenchida criando também uma cratera, a cicatriz de pingo, ainda que diferente da explicada anteriormente (fig. 2.6).

Estas formações podem providenciar informações acerca do permafrost local e passado (Devon, 2008). Não existem registros de pingos nas zonas polares do hemisfério sul, apenas no Norte e com maior abundância entre as latitudes 65-76° N e entre os 36-43° N (Flemal, 1976). O tempo necessário para a formação de um pingo varia desde meros minutos até um milénio (Mackay & Black, 1973) estando dependente da quantidade de água, temperatura ambiente e litologia regional. Neste tipo de feição não existe a possibilidade de uma calibração visível pois não há movimento relativo do solo.

3. Marte

3.1. Generalidades

Durante gerações o planeta vermelho levantou inúmeras questões àqueles que o observavam. Desde os séculos XVII, Galileu, e XVIII, Cassini, Huygens e Herschel que observações como a trajetória irregular e o espectro de luz, eram os dois aspetos, por exemplo, que traziam toda a aura de mistério em torno de Marte. Desde logo que começaram os estudos ao que, naquele tempo, era visível chegando se a algumas ideias que só na “era do espaço” começaram a ser devidamente suportadas com a tecnologia e informações recolhidas através da mesma. Algumas destas ideias estavam bastante precisas, o dia marciano, os avanços e recuos das calotes polares e a inclinação do eixo de rotação idêntica à terrestre logo deveria também ter estações, são alguns exemplos. Mas também havia suspeições erradas como ser um planeta com uma grande temperatura media, quase habitável, próximo das condições terrestres e até com “marcianos”. Grande parte destas noções veio a ser desaprovada após as primeiras missões, no início da década de 60, e consequente análise de dados recolhidos.

Atualmente existem mais certezas sobre certas coisas, por exemplo, a existência de gelo seco nos calotes polares, dificuldade de suportar vida nas atuais condições, as principais características tais como a temperatura máxima, mínima e media, diâmetro, tempo de rotação e translação, etc. Estas questões são importantes, mas ainda existem muitas por responder, “É ou foi possível ter existido algum tipo de vida em Marte?”.

Exemplo disto mesmo são os canais de Schiaparelli que Lowell interpretou como sendo artificiais, construídos para levar água a todos os habitantes. Esta teoria baseou-se em observações telescópicas no século XIX, nas quais estes canais eram puras ilusões óticas que nunca mais foram vistas com a evolução da tecnologia.

A história das missões a Marte já teve início há mais de 50 anos. Foi em 1960 que se tentou inaugurar o que viria a ser um dos maiores sonhos da era espacial, com as missões “Korabl”, da parte da URSS. Todas estas falharam maioritariamente por não conseguirem atingir a órbita terrestre. Em 1964 os Estados Unidos depois de uma primeira tentativa também ela falhada, conseguiram finalmente obter resultados. A “Mariner 4” foi a primeira prova que todo o trabalho que tinha sido feito em prol do conhecimento marciano não tinha sido em vão, dando inicio a uma nova era na exploração espacial. 28 de Novembro de 1964 foi a data de lançamento desta aeronave, com o objetivo de recolher informações sobre, Mercúrio, Vénus e Marte. As primeiras 21 fotografias com alguma definição foram recolhidas a 14 de Julho de 1965, mostravam crateras de impacto parecidas com o que se conhecia da Lua. Para melhorar ainda a sua reputação, esta nave prolongou a sua estadia no espaço de 8 meses, que era o tempo de vida previsto, para 3 anos que foram utilizados para outros estudos acompanhada pela “Mariner 5” (NASA, 2017a).

Em 1971, a União Soviética tinha finalmente sucesso no avanço investigação do planeta vermelho, com a “Mars 3”. Nesta fase já os Estados Unidos tinham tido sucesso, em mais três missões, as “Mariner” 6, 7 e 9. As fotografias das 3 “Mariner” com sucesso cobriam

apenas 10 % da superfície marciana. A “9” veio complementar essas falhas recolhendo cerca de 7300 fotografias.

As sondas “Viking” foram a primeira grande missão. Lançadas em 1975, ambas tinham dois componentes, um de pouso para recolher informação pormenorizada, outra para permanecer em órbita e capturar imagens. A “Viking 1” foi a primeira a aterrar com sucesso na superfície de Marte, e, para além dos objetivos definidos, como estabelecer comunicações rádio, a sonda conduziu três experiências para procurar a possibilidade de vida em Marte, aterrando em locais estratégicos para o efeito. Estas experiências, libertação por pirólise, libertação de marcadores e troca de gases, deram resultados inconclusivos, que levantaram mais questões que respostas (NASA, 2017g). Existem opiniões divididas sobre estes resultados, desde os que acham que os resultados são suficientes para comprovar a existência de microrganismos na superfície marciana, e os que mais consensualmente dizem os resultados são maioritariamente influenciados por uma substância altamente oxidante, peróxido de ferro por exemplo.

É também necessário destacar duas outras missões, a “Mars Global Surveyor” e a “Mars Express”. A “Mars Global Surveyor” esteve um pouco mais que dez anos de missão, de setembro de 1997 a novembro de 2006, marcando o fim de um período de 20 anos de missões falhadas, iniciou o mapeamento do planeta no ano de 1999 e manteve-se na órbita polar até ao fim da sua missão. Com o objetivo de estudar a superfície, atmosfera e o interior do planeta. O registo foi realizado diariamente a todo o planeta com o objetivo de obter vários mapas diários para que sejam entre si e denotar diferenças meteorológicas. Com os dados obtidos foi possível o primeiro modelo 3D de uma calote polar (NASA, 2017d).

A missão “Mars Express” trata uma parceria entre a NASA, a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Agência Espacial Italiana (ASI), e tem explorado a superfície e atmosfera de Marte desde a sua chegada à órbita, em 2003, até aos dias de hoje. O seu principal objetivo é procurar pela existência de água abaixo da superfície. Através desta missão foi possível juntar evidências de recente atividade glacial, vulcanismo explosivo e gás metano. Foi ainda possível adquirir informação sobre crateras de impacto enterradas, depósitos em camadas e pistas de gelo subterrâneo (NASA, 2017c)

Desde 2001, com a “Mars Odyssey” e os “Mars Rover”, principalmente, que se recolhe muita informação por cada lançamento efetuado, por exemplo, o “Mars Orbiter” recolheu mais de 26 TB de dados, mais que todas as outras sondas juntas. Os “Mars Rover”, “Spirit” e “Opportunity”, foram lançados em Junho e Julho de 2003, eram dois ‘geólogos mecânicos’ que aterraram em Janeiro de 2004, em lados opostos de Marte. Ambos cobriram uma vasta área da superfície e conduziram várias experiências geológicas e atmosféricas que com provaram a existência de água líquida e possíveis condições de habitabilidade, com a descoberta de gesso que, como é conhecido, está quimicamente ligado à presença de água.

Em 2013 foram lançadas com sucesso a “MAVEN” e a “MOM”, das quais, “MOM” teve como objetivo aumentar o conhecimento das características da superfície, mineralogia e atmosfera. “MAVEN”, *Mars Atmospheric and Volatile Evolution*, teve o seu lançamento dia 18 de novembro e entrou na órbita de Marte a 21 de setembro do ano seguinte, para recolher

factos de como a atmosfera de Marte chegou ao estado atual e quão rápido se desintegrou, para ser possível ter uma ideia de como poderá ter sido no passado e do que poderia ter acontecido em tal ambiente. Ainda se encontra em curso.

Em 2016 foi lançado o mais recente equipamento orbital, em conjunto com um “lander” que acabou por se perder à chegada. Equipamentos da agência espacial europeia e da Rússia com o objetivo de estudar a atmosfera marciana, o “orbiter” tem como objetivo perceber se alguma vez foi possível haver vida em Marte, tendo calendário até 2022.

Existem projetos futuros para várias missões marcianas. “InSight” é a próxima, com lançamento agendado para 5 de Maio de 2018. Este é um projeto da NASA que prevê estudar o interior de Marte e possivelmente entender melhor a formação dos planetas telúricos, através de estudos geológicos na crosta manto e calor profundo. Um outro projeto previsto é o “Mars Rover 2020”, com lançamento previsto para 2020 e com objetivos direcionados para a geologia, clima, e preparação para exploração humana. Este último deve-se ao desejo de enviar pessoas nos anos 2030. O projeto da agência espacial europeia de saber da possibilidade de existência de vida em Marte tem um projeto planeado para arrancar também em 2020.

3.2. A geologia de Marte

Toda a informação recolhida pelos veículos espaciais com missões em Marte está a moldar o nosso conhecimento sobre o planeta vermelho. O passado geológico é um ponto de conhecimento extremamente importante para que se possa saber um pouco mais sobre a sua evolução geológica, a possível existência de uma dinâmica mais aproximada à da Terra com tectónica de placas, magnetismo e possível atmosfera mais densa, que possa ter possibilitado a existência de algum tipo de vida, que é o objetivo mais carismático envolvendo ciência extraterrestre. A “Mars Global Surveyor” encontrou áreas com magnetização crustal análoga, de certo modo, às anomalias dos fundos oceânicos terrestres, revelando um dinamismo marciano que pode disponibilizar informação acerca da estrutura interior do planeta, composição e temperaturas. (NASA, 2017b). Atualmente, Marte é considerado auto-esterilizante devido à combinação da radiação ultravioleta solar que sem filtro atmosférico satura a superfície, a seca extrema dos solos e a sua natureza oxidante ajuda na prevenção da existência de vida (NASA, 2017f). Isto não impede que no passado não tenha existido uma atmosfera mais densa que conseguisse suportar água no estado líquido na superfície. É nesta fase que possam ter estado reunidas condições para suportar vida, uma vez que a presença de água líquida é necessária à vida como a conhecemos (NASA, 2017e).

A morfologia marciana tem um aspeto muito mais acidentado em comparação com a terrestre maioritariamente devido à ausência de massas de água líquida superficial, oceanos, que suavizam as diferenças entre fossas oceânicas e picos das mais altas montanhas. É conhecido que existem zonas mais montanhosas, criadas aquando da existência de movimento de placas, zonas mais planas quando a erosão era mais possante, rede de vales criados por rios que outrora existiram, (Hynek *et al.*, 2010), e ainda os locais de crateras de impacto. Dentro destas é de obrigatório destacar o Monte Olimpo, o maior vulcão de todo o sistema solar, com

21.2 km de altitude máxima, formado devido à baixa viscosidade de magma que lhe deu constituição, ao baixo nível de erosão e à baixa gravidade, e destacar ainda a planície Hellas formada devido ao impacto de um grande meteorito, -8.2 km, (Acuña *et al.*, 1999). Sem nível do mar como referência, todas as elevações têm de ser medidas a partir do *datum* definido durante a missão “Mariner 9”, o plano no qual a pressão atmosférica é de 6.1 mbar, a do ponto triplo da água (Carr, 2006).

Tal como a Terra, Marte é diferenciado em crosta, manto e núcleo. Devido à carência de dados sísmicos, o diâmetro do núcleo não está perfeitamente definido, mas estima-se que ronde os 1400 km (Carr, 2006). Atualmente Marte não tem campo magnético logo deduz-se que este núcleo esteja no estado sólido, sendo que anomalias magnéticas na crosta mostram que no passado, este já teria sido parcialmente líquido (Acuña, 1999). Este aspeto deixa Marte desprotegido dos ventos solares que terão interferência na sustentação de uma atmosfera mais idêntica à terrestre.

De acordo com McSween (2015) todas as análises realizadas por rovers juntamente com estudos laboratoriais fornecem informações de extrema importância para o conhecimento geológico marciano. Os principais resultados obtidos mostram que a crosta de Marte é composta principalmente por rochas ígneas, basálticas com acumulações ultramáficas, rochas félsicas são raras, mas ricas em feldspatos aparecem localmente. A cristalização fracionada de magmas basálticos a diferentes profundidades e variações na quantidade de água terão produzido traquitos e havaitos tal como piroxenitos e dunitos. As rochas sedimentares provêm de calcários muito argilosos, arenitos conglomeráticos e derivados de detritos ígneos e semelhantes, com cimentos ricos em ferro. Estes aspetos têm análogos na Terra, mas tendo em consideração a diferença ambiental global marciana, mais seco, ácido e oxidado. O metamorfismo de impacto é uma componente importante, mas apenas algumas brechas foram claramente documentadas. A existência de rochas metamorfizadas ou alteradas hidrotermalmente permanecerá especulativa até que existam análises *in situ* ou remotas. O ciclo litológico durante o Noaciano e Hesperiano inicial foi semelhante ao da Terra, mas com a ausência de tectónica de placas e de massas de água, o metamorfismo de alta pressão, fusão através de subducção, deposição sedimentar, erosão rápida, etc., deixaram de ser processadas.

Segundo Carr & Head (2009), a formação da planície Hellas, com cerca de 4 mil milhões de anos, foi considerada a base do primeiro dos três grandes períodos de Marte, Noaciano, até 3.7 mil milhões de anos, Hesperiano, até aos 3 mil milhões de anos, e Amazoniano, até à atualidade. Pelo contrário, no mapa geológico de Marte do USGS (2014), as idades das formações de todas as estruturas é diferente. O impacto que criou a planície “Hellas” divide o Noaciano médio do tardio. O Pré-Noaciano apenas se caracteriza pela existência de um campo magnético. No fim do Noaciano toda a atividade de impacto, meteorização, erosão e atividade aquífera, decresceu drasticamente, mas o vulcanismo permaneceu idêntico resultando na remodelação de 30% de toda a superfície durante o Hesperiano. No Amazoniano toda esta atividade desceu a níveis mínimos, mas deu-se a formação de feições relacionadas com a presença, acumulação e movimento de gelo (Carr & Head, 2009).

3.3. O clima de Marte

As questões sobre as principais características de Marte começaram muito cedo: porque é tão vermelho? Inicialmente tinha-se como dogma que seria um planeta com uma temperatura muito acima da média terrestre, uma vez que a cor vermelha está intuitivamente ligada ao calor e a altas temperaturas. Com a informação que se foi adquirindo chegou-se a conclusão que isso não era assim tão claro. Em 1666 foi observada pela primeira vez uma calote polar (Kieffer *et al.*, 1992) o que não seria de esperar devido a tão elevadas expectativas térmicas. Em 1809 Honoré Flaugergues observou “nuvens amarelas” que vieram a ser comprovadas como tempestades de poeira tendo sido a primeira observação de atividade geológica marciana (Flaugergues, 1809). Estes dois aspetos são de extrema importância na análise do clima e atmosfera de Marte. As calotes polares são formadas por gelo de dióxido de carbono, “gelo seco”, que influenciam as temperaturas e a própria atmosfera. Em média a atmosfera é composta por 95.3% de dióxido de carbono, 2.7% de azoto, 1.6% de argon, 0.13% de oxigénio, 0.7% de monóxido de carbono, 0.003% de água e vários outros componentes em menores quantidades (Carr, 2006). Esta elevadíssima percentagem de dióxido de carbono ajuda a demonstrar que as épocas de inverno e verão influenciam em grande escala a temperatura média do planeta com o aumento e dissipação das calotes polares respetivamente em cada uma das estações. O aumento das calotes no inverno diminui a quantidade de CO₂ na atmosfera, que sublima nas calotes, diminuindo também um pouco mais a temperatura média da superfície; o contrário verifica-se no verão. Este ciclo equipara-se às estações da Terra, uma vez por ano.

O espetro de temperaturas na superfície de Marte é bastante largo variando conforme o local, hora do dia, estação do ano (proximidade do Sol) e propriedades físicas do terreno (Carr, 1996). Atingindo o mínimo aos -123 °C nos polos antes do amanhecer no inverno, até aos 27 °C após o meio-dia no verão, (Kieffer *et al.*, 1977). Esta diferença de temperatura é a base teórica para o desenvolvimento da modelação a tratar neste trabalho.

Esta instabilidade atmosférica, uma pressão cerca de cem vezes inferior à terrestre, um ambiente árido global, e todas estas características extremas da superfície ajudam na criação das famosas, e há muito observadas, tempestades de Marte. A missão Viking mediu variações de velocidade dos ventos entre os 2 m/s e os 30 m/s. As tempestades normalmente ocorrem uma vez por ano e chegam a estender-se por toda a face marciana (Carr, 1996). Este é provavelmente o maior fator de erosão em todo o planeta tendo em conta que não existe água no estado líquido, pelo menos com abundância suficientemente notável, nem atividade tectónica para existirem mudanças geológicas notáveis.

3.4. Feições periglaciais observadas em Marte

São vários os autores que tratam diferentes feições periglaciais observadas em Marte através das várias missões a este planeta realizadas, Soare *et al.* (2011), Marchant e Head (2007), Levy *et al.* (2008a, 2008b, 2009), Van Gasselt (2011), Carr e Schaber (1977) e muitos

outros. As principais são os terrenos poligonais (p. ex. Levy *et al.*, 2010), os círculos calibrados (Balme *et al.* 2009) e ainda pingos (Burr *et al.*, 2009).

Levy relata-nos seus vários trabalhos, que existem terrenos poligonais um pouco por toda a superfície de Marte, como enchimento de crateras em *Utopia Planitia* (Levy *et al.* 2009a), em *Vastitas Borealis* (Levy *et al.* 2008b), entre outras localizações. Diz que estes terrenos poligonais têm muitas semelhanças com os terrestres e que os processos de formação de ambos são idênticos.

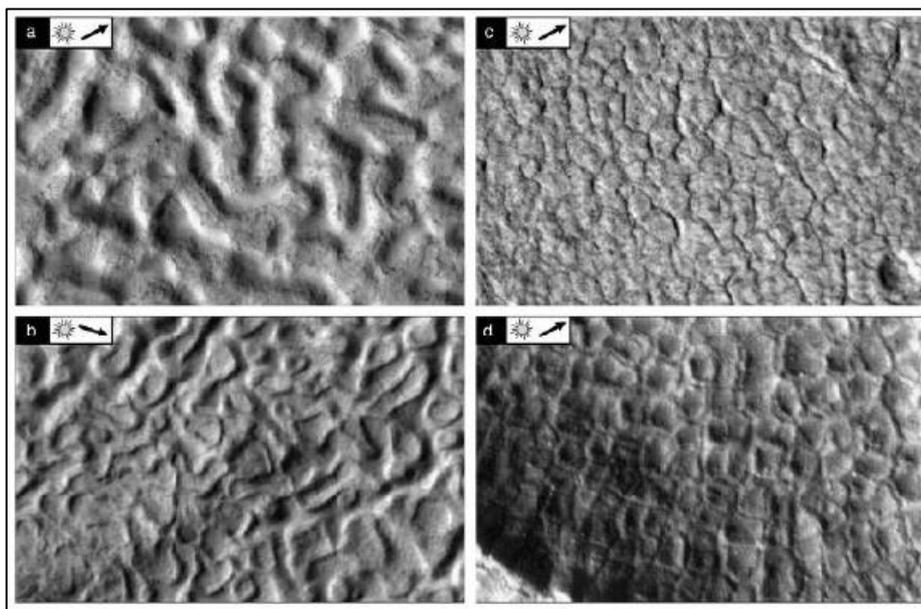


Figura 3.1 – Fotografias de 2 diferentes tipos de Feições periglaciais na superfície de Marte. Brainterrain de célula fechada (a) e célula aberta (b). Terrenos poligonais (c) e (d). Adaptado de Levy *et al.* (2009a).

Existe registo de feições, na superfície de Marte que na minha opinião são análogas a círculos calibrados. Designados de palimpsestos (Barata *et al.*, 2012), estes não surgem em grandes grupos num vasto campo, mas sim isolados. Demonstram uma organização granulométrica, sedimentos mais finos no interior e mais grosseiros no exterior, característica principal dos círculos terrestres. Por comparação de imagens de ambas feições, as semelhanças são visíveis. Poderá também ser considerada uma feição periglacial?

Os ‘brain terrains’ (terrenos cerebrais) são geofomas características de Marte, que não se encontram na Terra, figura 3.1 (a) e (b). Levy *et al.* (2009a) interpretam-nos como sendo núcleos de gelo, célula fechada, fig. 3.1(a), que ao desaparecerem provocam deslizamentos de terras e geram o terreno cerebral de célula aberta. Estas estruturas podem atingir os 4 a 5 metros de altura.

Balme *et al.* (2009) observaram círculos até 23 metros de diâmetro feitos de rochas organizadas por tamanho na zona do equador marciano. Na Terra, semelhantes formas aparecem devido a repetidos ciclos de gelo-degelo. Estes círculos calibrados remetem para uma forte hipótese de proximidade da zona em estudo a um *permafrost* ou até mesmo água/gelo num passado próximo. Isto também significaria que as temperaturas teriam sido 40 a 60 °C mais altas do que se pensava inicialmente.

Sendo análogas às terrestres, estas feições são importantes principalmente para se conseguir perceber melhor as condições que o planeta já apresentou. Por comparação, se as feições apresentam semelhanças com as terrestres, então a probabilidade de terem sido formadas sob as mesmas características é elevada. Sabendo como essas feições se formam na Terra, é possível admitir que determinadas condições existiram ou existem, no caso de uma feição desenvolvida em Marte (p. ex. Hauber *et al.* 2011).

4. Titã

4.1. Generalidades

O maior satélite de Saturno, descoberto por Huygens em 1655, é o único corpo celeste conhecido que, a par com a Terra, mostra evidências de corpos líquidos estáveis na superfície (Brown *et al.*, 2009). Desde o início do século XX Titã tem despertado um interesse especial na comunidade científica uma vez que desde muito cedo se reconhece este satélite como um corpo celeste provido de atmosfera, confirmado pela missão Pioneer 11 em 1975, que capturou as primeiras imagens próximas do satélite (Gehrels *et al.* 1980) *in* (Aharonson 2014). A principal missão a este distante corpo trata-se da Cassini-Huygens, lançada em 1997, que é uma cooperação entre a NASA e as agências espaciais europeia e italiana (NASA, 2006), comprovou principalmente a existência de atmosfera e de corpos líquidos na superfície com algumas redes dendríticas (Porco *et al.*, 2005; Elachi *et al.* 2005). Esta existência deve se à combinação de três fatores: 1.5 bares de pressão, temperaturas médias de -178 °C (95K) e o alto teor em metano da atmosfera. Isto demonstra que na superfície daquele planeta é possível coexistirem os três estados físicos uma vez que estes dados estão próximos do ponto triplo do Metano (Aharonson, 2014). Cassini-Huygens terminou a sua missão recentemente a 15 de Setembro de 2017, com o mais próximo voo da superfície, o “beijo de despedida” (NASA, 2017).

4.2. A geomorfologia de Titã

Através dos dados recolhidos pelas missões que passaram em Titã, foi possível obter alguma informação geomorfológica. São visíveis morfologias análogas às terrestres tais como montanhas, crateras de impacto dunas e outros tipos de terrenos acidentados, também associados a processos tectónicos (Aharonson, 2014). Com estes dados e com os locais de onde foram recolhidos, foi criado um mapa de morfologias (fig. 4.1). Apesar de não existir informação completa de toda a superfície, este mapa ajuda a compreender o tipo de atmosfera e superfície existe neste satélite. Os lagos encontram-se mais em zona polares e as zonas mais secas de dunas e planícies encontram-se mais próximo do equador, segundo a grelha geográfica da figura 4.1. Em termos composicionais, devido á falta de dados, apenas se sabe da existência de duas distintas unidades, uma clara e uma mais escura (Porco *et al.*, 2005). Esta distinção baseia-se nos espectros de refletância de cada uma (McCord *et al.*, 2006). Sendo o único corpo celeste conhecido que suporta corpos líquidos na superfície, é natural que processos lacustres façam parte do “ciclo hidrológico” ainda presente em Titã (Aharonson, 2014). Este “ciclo hidrológico” não se processa com água, mas sim com metano e etano, hidrocarbonetos que se mantêm em estado liquido na superfície. Isto pode criar todas as morfologias análogas às terrestres, tal como redes de drenagem, que neste trabalho serão abordadas.

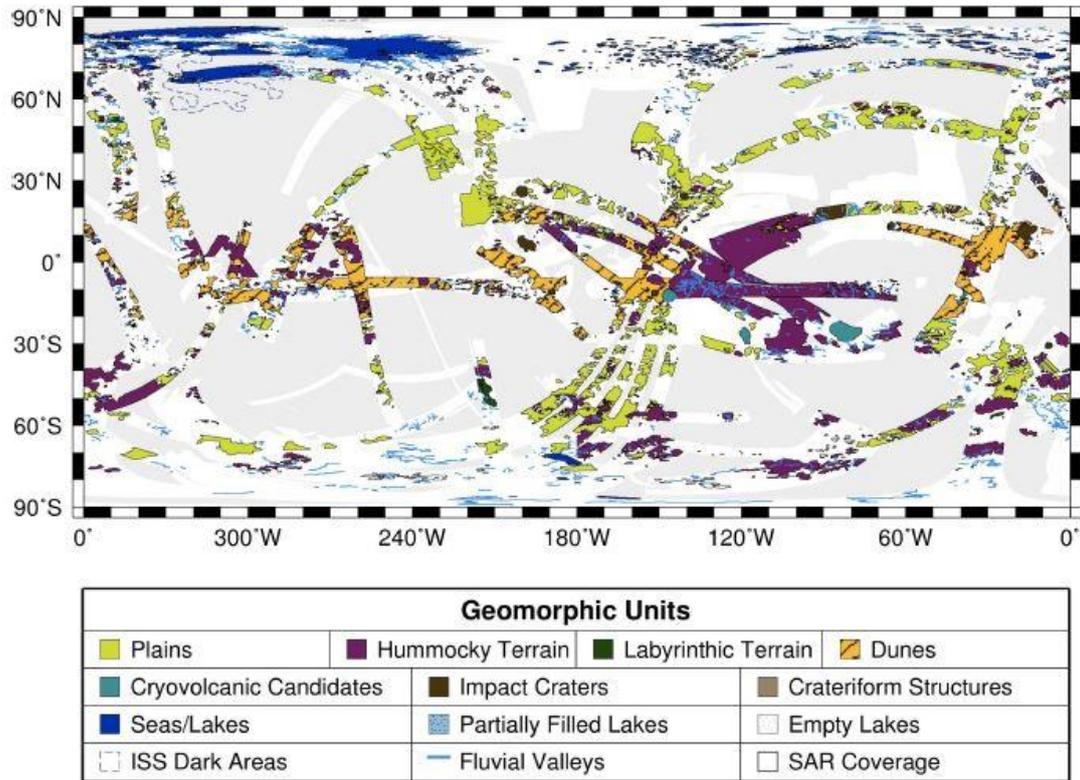


Figura 4.1 - Mapa da superfície de Titã (Aharonson, 2014) baseado em Lopes et al. 2010.

4.3. O clima de Titã

4.3.1. Generalidades

Segundo Niemann (2005) o nitrogénio predomina a composição atmosférica de Titã com mais de 98%. O metano é o segundo elemento com mais abundância, com 1,4% e o hidrogénio apenas apresenta uma percentagem de 0,2. A temperatura da superfície deste satélite é cerca de $-179\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sem grande variação zonal, nem do dia para a noite, ainda que possa atingir extremos como $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hunten, 1978). A explicação deste fenómeno não está totalmente esclarecida, mas pode estar relacionado com a retenção de calor por parte da atmosfera como do solo.

4.3.2. Variações geográfica e sazonal da temperatura

Titã demonstra uma pequena variação de temperatura em todo o planeta de apenas 5 °C, visível na figura 4.2. Estes mapas foram criados através de dados recolhidos pela missão Cassini de radiação infravermelha com um comprimento de onda específico para que essa informação seja visível através da camada da atmosfera (Jennings, 2016).

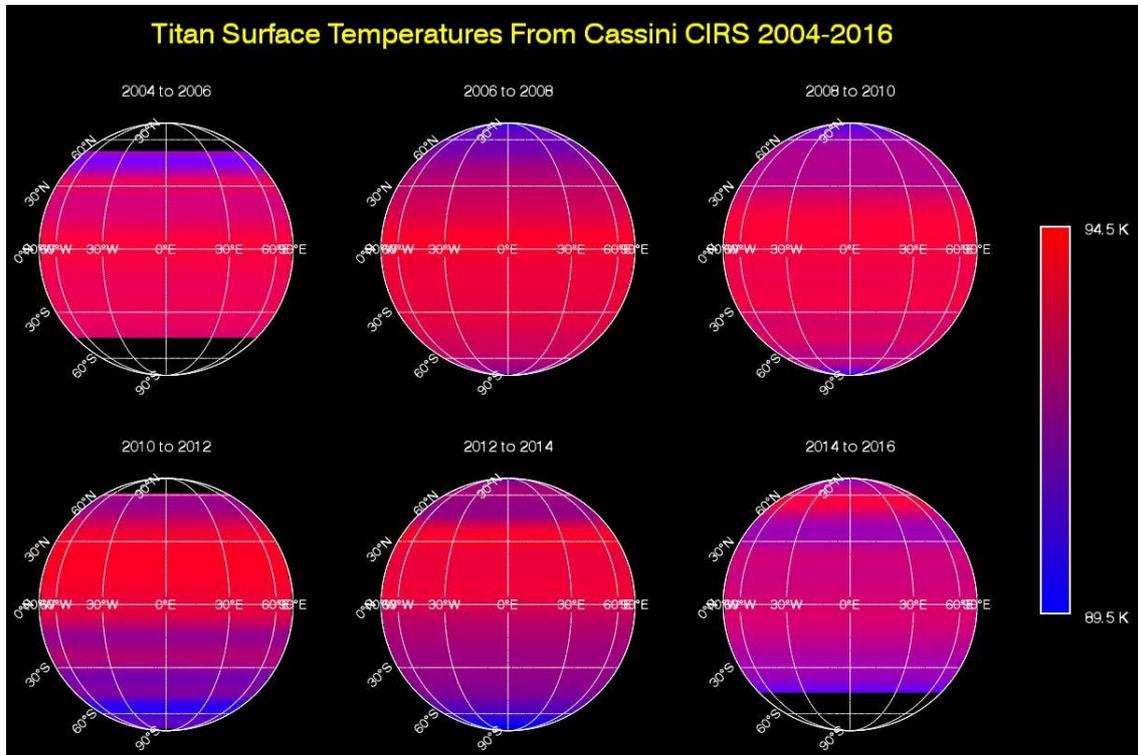


Figura 4.2 - Sequência de mapas de temperatura em intervalos de dois anos desde 2006 até 2016 (NASA 2016).

A variação temporal na distribuição das temperaturas que é visível na sequência da figura 4.2 está relacionada com o longo ano de Saturno, cujas estações duram cerca de 90 meses terrestres.

A figura 4.3, abaixo, mostra uma rede de drenagem que flui para Ligeia Mare, localizado à latitude 79° N. Note-se, na figura 4.2, que, no período observado (menos de meio ano de Saturno), a latitude de Ligeia Mare passou por temperaturas entre cerca de 90 K e cerca de 93 K.

4.4. Feições periglaciais observadas em Titã

Não se encontram descritas na bibliografia feições periglaciais em Titã. Isto deve-se, provavelmente, à baixa resolução do radar de abertura sintética que adquiriu as imagens disponíveis, sempre acima dos 150 m/pixel.

As redes de drenagem identificadas em Titã (p. ex. Lorenz *et al.* 2008) são geralmente interpretadas como geradas de forma análoga às da Terra: canais que conduzem a escorrência superficial da precipitação (neste caso de hidrocarbonetos – principalmente metano e etano) com controlo estrutural (figura 4.3). No presente trabalho levantar-se-á uma hipótese alternativa para a origem de, pelo menos, algumas dessas redes: a de serem, na verdade, feições periglaciais (*vd.* 6.3., abaixo).

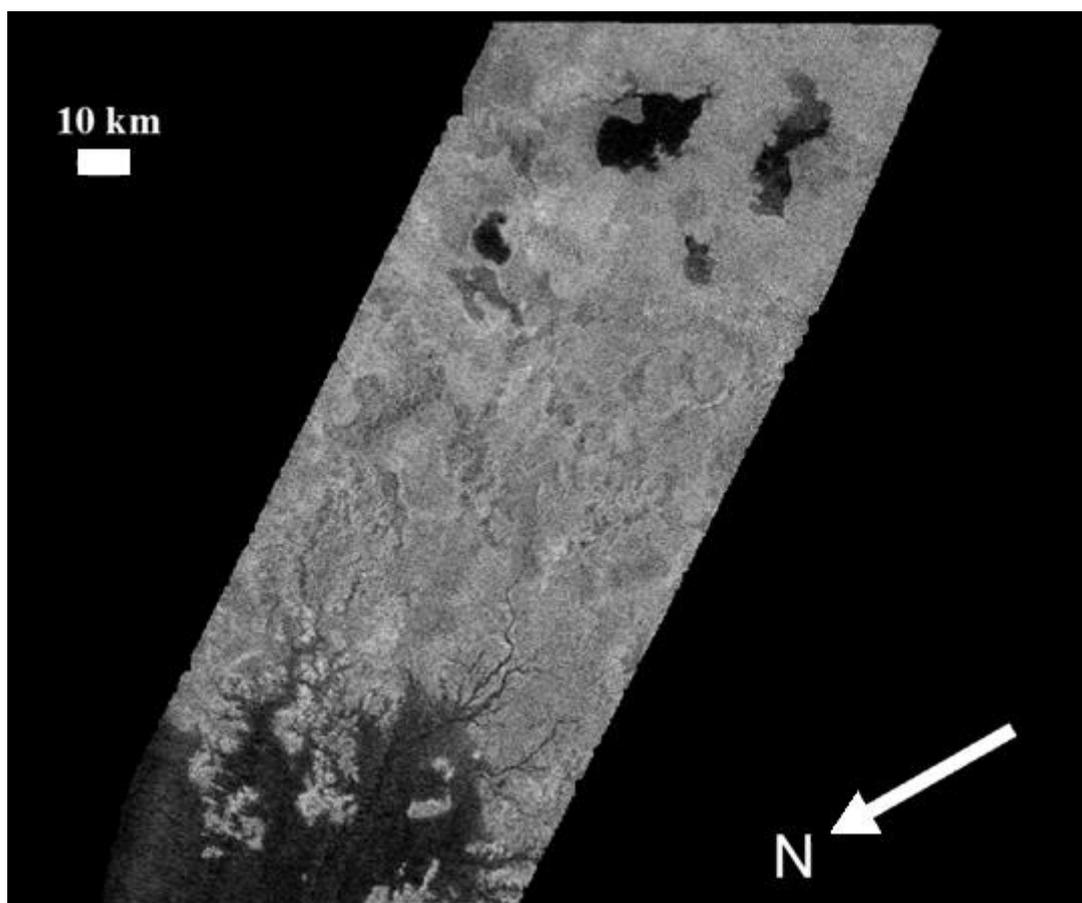


Figura 4.3 - Composição RGB das imagens T064 (R), T029 (G) e T108 (B) obtidas pelo instrumento SAR da sonda Cassini (Alves et al., 2017) onde se podem observar pelo menos três redes que drenam para Ligeia Mare, a norte.

5. Modelação laboratorial de processos periglaciais

5.1. Modelos anteriores?

Não se encontram citações na bibliografia de modelações laboratoriais com a finalidade de comprovar a formação destas feições. O trabalho que mais se pode aproximar é uma pesquisa *in situ* e laboratorial realizada por Matsuoka *et al.* (2003) (fig. 5.1). Este trabalho foi realizado com um propósito diferente e mais direcionado para o empolamento que se faz sentir em regiões do planeta e que pode afetar a vida quotidiana. Todas as comparações realizadas por autores da bibliografia são por comparações de fotografias e esquemas da Terra e de Marte. Com a realização desta modelação pretende-se que essa comparação seja feita através de fotografias tiradas a amostras criadas em laboratório em condições o mais próximas possível das ideais, teoricamente, para a formação de certas feições, comprovando assim que essas são de facto as mais indicadas, por comparação com fotografias reais.

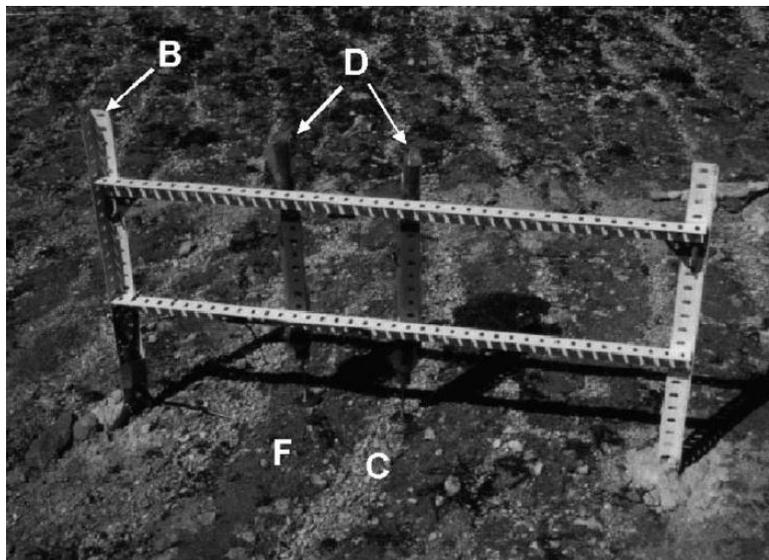


Figura 5.1 - Instrumento para registo de empolamento de gelo em listras calibradas, em Valletta nos Alpes Suíços. (B) armação (C) listra grosseira (D) dilatómetros (F) listra fina (Matsuoka et al., 2003).

5.2. O modelo CITEUC

5.2.1. Equipamento

A modelação laboratorial foi realizada na placa termoeétrica TECA AHP-1200CPV, figura 5.2. Este equipamento opera através do efeito de Peltier (p. ex. Di Salvo, 1999) para arrefecer e efeito de Joule para aquecer a placa. Para um arrefecimento mais eficaz, utiliza uma ventoinha que força a ida de ar para a base da placa e depois é expelido pelas laterais fazendo assim uma circulação do ar para que este não sature e para que a placa tenha um melhor desempenho.



Figura 5.2 - Fotografia da placa termoeletrica TECA e correspondete caixa protetora

A utilização deste equipamento pode ser feita manualmente, inserindo as temperaturas desejadas utilizando os botões da própria placa ou criando um programa informático para criar, regular e monitorizar todo o processo. O *software EasyLog*, que é fornecido pelo fabricante, foi o utilizado (TECA, 2017) – fig. 5.3.

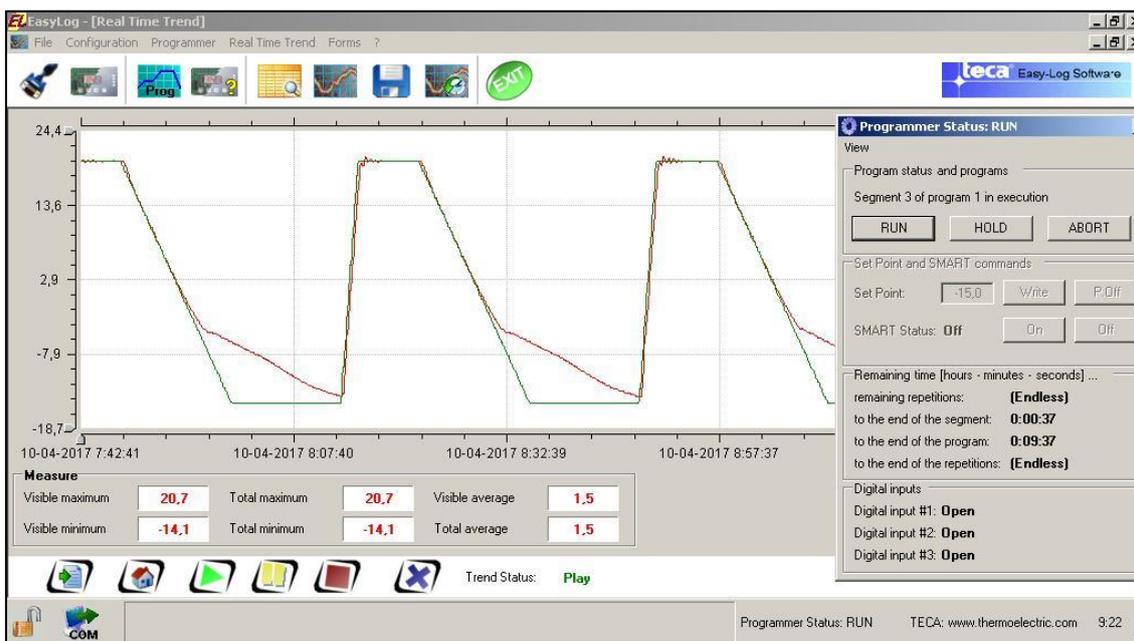


Figura 5.3 - Software EasyLog durante o processo de um programa com visualização do gráfico hora/temperatura em tempo real: linha verde – gráfico do programa; linha vermelha – temperatura medida.

Os programas criados contêm a informação para que sejam realizados os ciclos de gelo-degelo, controlada pelo operador que realiza os programas de acordo com as temperaturas máximas e mínimas pretendidas, bem como o tempo que a placa permanece em cada uma delas (fig. 5.4). Com estes ajustes é possível obter vários tipos de ciclos diferentes o que por exemplo pode ser a crucial diferença entre ter um congelamento completo das amostras ou não. Para uma utilização automática, depois dos estudos de qual o melhor programa para realização de determinada modelação, este é carregado para o software interno da placa, para depois de ser acionado. O “exp4” visível na figura 5.4 foi o que se concluiu de maior eficácia. O primeiro segmento, fase de congelamento, não necessita ter um declive mais acentuado uma vez que nos testes iniciais, chegou-se à conclusão que esta traduz a velocidade a que a placa desce a sua temperatura. As fases gelo e degelo foram calculada, também numa fase inicial de experimentações, concluindo que as apresentadas neste programa são as mais propícias a um ciclo completo. Por fim, o declive do segmento da fase de descongelamento é bastante acentuado porque a placa tem a capacidade de aumentar a temperatura mais repentinamente comparando com o contrário.

É ainda possível ser obtido um registo gráfico do processo no EasyLog. Para a ligação do equipamento ao computador, é necessário um adaptador RS-232 (placa) para USB (PC).

Surgiu a necessidade de ser feita uma caixa protetora para que temperatura ambiente da sala não intervisse com a dos ciclos, tentando criar um microclima. Esta caixa tem as medidas da placa, 20×40 cm e 8 cm de altura, é fabricada em polistireno expandido, com o topo em vidro para que se possa ver e fotografar o processo e ter registo das fases de formação intermédias das feições em processo. Para evitar um pouco a condensação na placa e no vidro foram acrescentados sacos de sílica-gel, sem os quais o vidro embaciaria e a captura

de imagem seria impossível. Após vários testes, com varias máquinas fotográficas, chegou -se à conclusão que esta captura deveria ser realizada através da aplicação "TimerCamera", para Android (suc1982, 2017) (fig. 5.5).

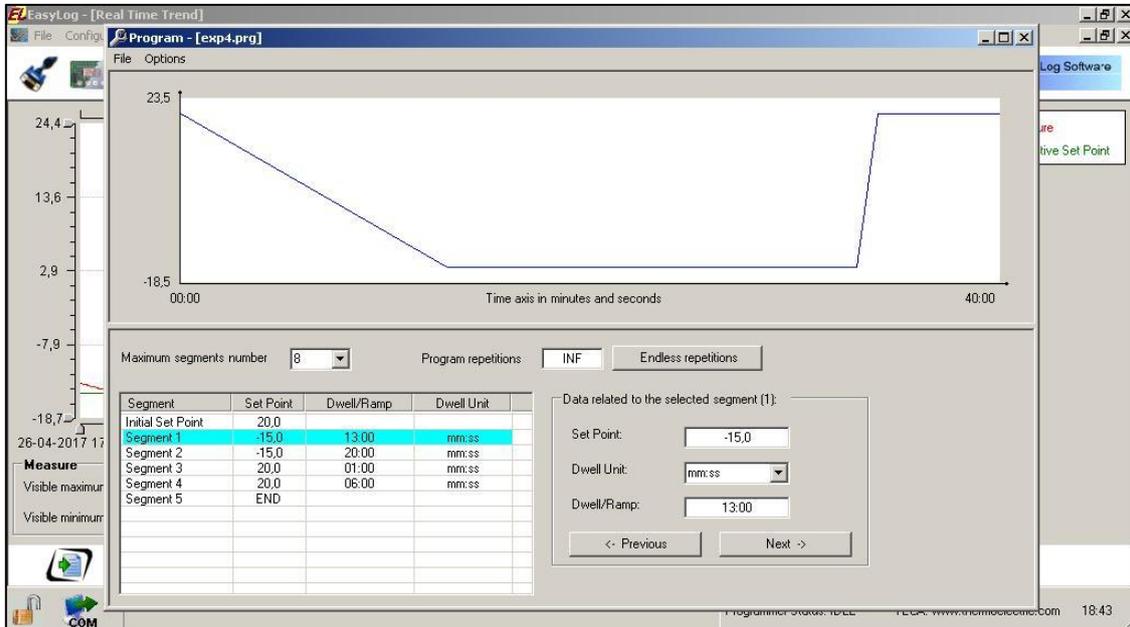


Figura 5.4 - Janela de criação e visualização dos programas no software EasyLog.



Figura 5.5 - Software "TimerCamera"

Esta aplicação funciona como um temporizador que aciona a câmara do telemóvel em intervalos de tempo determinados para que o processo seja fotografado nas fases pretendidas, maioritariamente na fase “frio” e na “quente”. O telemóvel fica suspenso por cima da caixa através de um acessório próprio fixo a um tripé. Para que se possa ter uma sequência fotográfica de 24 horas foi necessário utilizar um candeeiro, que não aquecesse para não interferir no microclima dentro da caixa, para que a luminosidade fosse o mais constante possível durante todo o dia e noite (fig. 5.6).

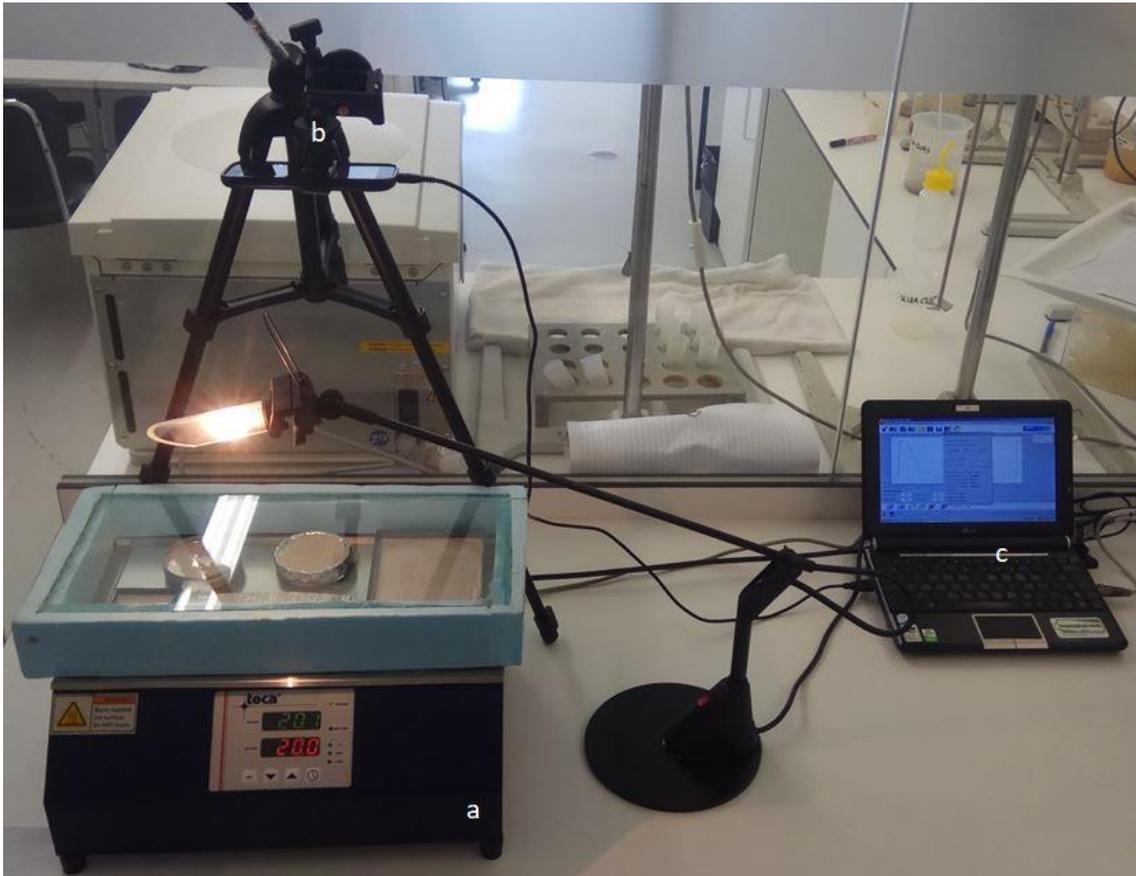


Figura 5.6 - Dispositivo laboratorial: (a) Placa termoeletrica TECA; (b) equipamento Android com software TimerCamera; (c) computador com software EasyLog.

As imagens capturadas foram posteriormente processadas na aplicação FIJI-ImageJ (Schindelin *et al.*, 2012), que permite principalmente a conversão da sequência de fotografias em Gif's animados, para uma mais fácil observação da evolução da estrutura periglacial, o recorte dos mesmo para isolar as amostras com os melhores resultados e ainda na redução do tamanho informático das imagens que ajuda ao armazenamento uma vez que, mesmo assim, cerca de 9000 fotografias ocupam uma respeitável quantidade de espaço, 8 GB.

5.2.2. Condições laboratoriais



Figura 5.7 - Equipamento do laboratório de sedimentologia utilizado: à esquerda - Forno; à direita - Agitador e respetivos crivos.

O trabalho de laboratório desta modelação foi previsto inicialmente ser realizado no CITEUC mas devido à falta do forno e agitador, figura 5.7, todo o equipamento necessário foi transferido para o laboratório de Sedimentologia do DCTUC. Aqui, para um melhor aproveitamento do espaço, para evitar influências da deslocação de ar noutros trabalhos a decorrer e para controlar o ruído causado pela placa termoelétrica, esta foi colocada numa divisão anexa ao laboratório. Com a utilização do ar condicionado do edifício, foi possível manter a temperatura da sala sempre a rondar os 23 °C (+1 °C), para tentar minimizar a diferença de temperatura do ambiente com a necessária para a realização da modelação, que apesar desta atingir -15 °C, ter uma diferença na temperatura ambiente de 10 °C é uma melhoria significativa. Este ar condicionado não controla a temperatura, apenas liberta ar fresco que reduz a temperatura da sala. Também não era controlado o nível de humidade por falta de mecanismos para tal. Na bancada só era colocada a placa, o computador e o tripé para o registo fotográfico, uma vez que a placa necessita de espaço lateral para que se dê uma

melhor circulação de ar. Tudo isto traz um aproveitamento muito superior que no fim se traduz em mais ciclos por dia. Uma vez que a quantidade de sedimentos disponível era limitada, estes tinham de ser reutilizados. Após a sequência, cada amostra era seca num forno a 40 °C. Sem esta extração de água, não seria possível separar a mistura de granulometrias. Esta separação foi feita através de um crivo de 150 µm, colocado num agitador para um melhor desempenho do processo. Este equipamento e todo o material necessário para a realização deste processo pertencem ao laboratório de sedimentologia (fig. 5.7).

5.2.3. Alguns problemas iniciais

Uma vez que esta modelação foi a primeira utilização da placa termoelétrica, teve de ser feito um estudo de como esta funciona, quais os seus limites, como criar e correr um programa, etc. O primeiro obstáculo, foi atingir temperaturas negativas para além dos -5 °C, temperaturas necessárias para congelar qualquer coisa para além da água que condensa, ação que a placa não conseguia realizar inicialmente. Foi concluído que a razão para que isto acontecesse era a influência da temperatura ambiente da sala onde a placa se encontrava. Enquanto a placa forçava o decréscimo de temperatura na superfície, o ar quente da sala evitava esse mesmo efeito. A solução foi construir uma caixa protetora de modo a criar um microambiente sem influência do exterior capaz de atingir temperaturas muito mais baixas e assim congelar as amostras que fossem colocadas no seu interior.

A modelação laboratorial teve um atraso de mais de três meses devido a uma avaria na placa termoelétrica, que pode ter sido causada pelo transporte da mesma. Esta avaria fazia com a placa não aquecesse: quando este processo era requerido, a placa reiniciava constantemente.

O equipamento teve de ser completamente desmontado, primeiro para se descobrir de onde era proveniente o problema e depois para o arranjo do mesmo. A reparação foi realizada com a ajuda dos fabricantes da TECA que disponibilizaram o esquema eletrónico da máquina (fig. 5.8 c) e enumeraram ainda possíveis avarias que poderiam estar a causar o problema. Chegou-se a conclusão que se devia a um relé que se teria queimado no circuito “quente” (fig. 5.8 a). Tendo na sua constituição quatro relés, estes foram trocados entre si para se descobrir qual dos quatro estava a causar o mau funcionamento. Em cada troca a placa era testada, quando o problema passou a ser no arrefecimento, o relé que foi alterado nessa troca era o queimado e teria de ser substituído por um novo.

Todo este processo demorou cerca de 4 meses, entre a procura do problema, o diálogo com os fabricantes e o arranjo final. Após este arranjo, foi de notar a maior fluidez da placa quando eram solicitadas variações de temperatura. Antes as laterais de saída de ar aqueciam até temperaturas elevadas, o que deixou de acontecer, ajudando a atingir temperaturas mais baixas que anteriormente.

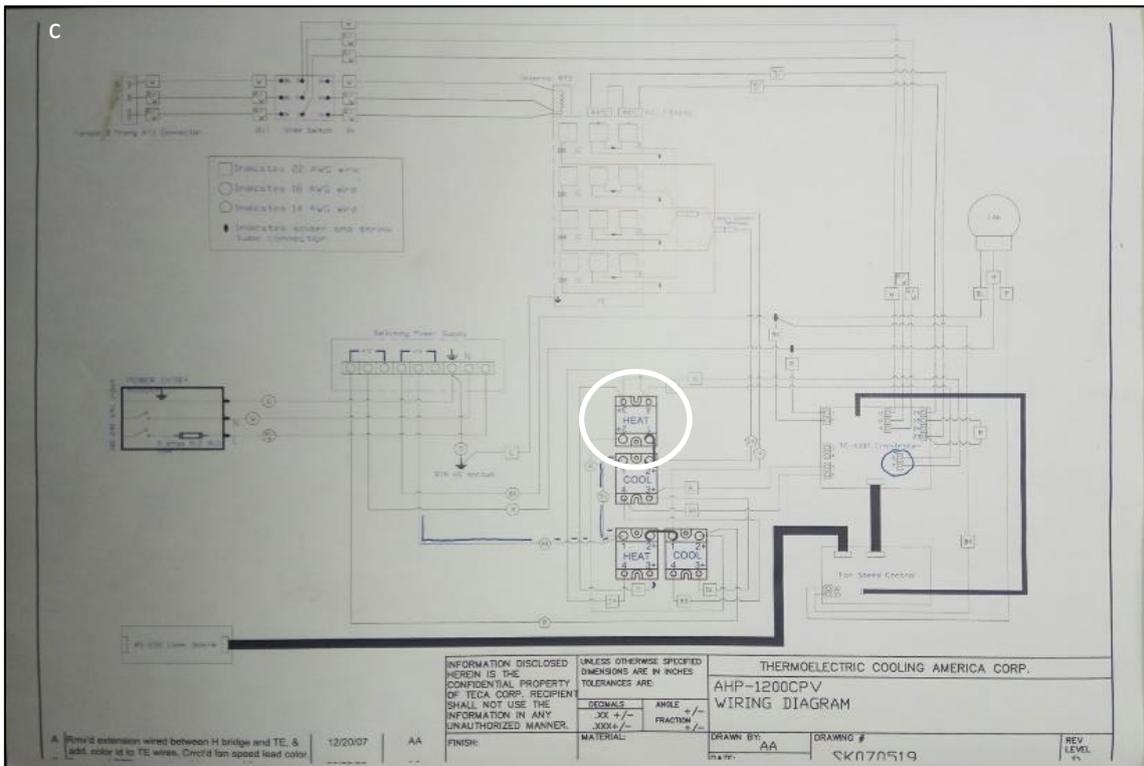
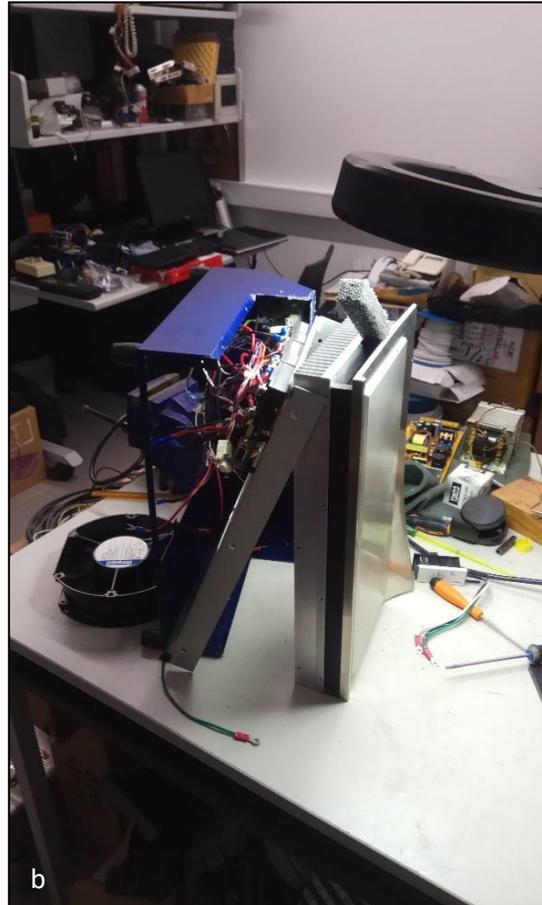


Figura 5.4 - Processo de desmonte e arranjo da Placa TECA (a) parte inferior da placa (b) parte traseira da placa (c) Esquema eletrônico (quadrado) relé que provocou a avaria (círculo) esquema de um dos dois relé do circuito “quente”.



Figura 5.5 - Demonstração da quantidade de água acumulada e posteriormente removida das amostras. (a) amostras antes de remoção da água em excesso (b) amostras após remoção da água em excesso (c) quantidade de água removida das amostras, 40 ml.

Durante a modelação foi de notar a elevada condensação que levava a um aumento da quantidade nas amostras e em seu redor que adulterou os resultados. Este foi o principal problema para que algumas amostras não evoluíssem como esperado. A solução ideal para este problema era agregar à placa e respetiva caixa protetora um desumidificador, controlador de humidade, que não foi possível obter. Este aspeto é perfeitamente visível ao longo das sequências, as amostras vão ficando cada vez mais húmidas, chegando em alguns casos a ultrapassar o ponto máximo de saturação ficando com excesso de água. Chegaram a ser retirados de uma vez 40 ml de água excedente ao nível de saturação máximo dos sedimentos em cada amostra com a ajuda de uma seringa (fig. 5.9 c).

5.2.4. As variáveis testadas

A modelação foi realizada através da simulação do ambiente e características do solo, nos quais se formam as feições periglaciais em discussão, em amostras de sedimentos de quartzo proveniente da moagem de quartzo leitoso de origem pegmatítica. Para isto foram tidos em consideração vários aspetos essenciais, os quais após leitura de outros autores (p. ex.

Levy, 2008 e French, 1980), se provaram os mais indicados para que se desse o aparecimento de feições periglaciais. Sendo estes:

- Granulometria
- Saturação
- Quantidade de cada uma das granulometrias nas amostras
- Temperaturas a atingir
- Tempo em cada uma das temperaturas
- Diferentes recipientes
- Quantidade de ciclos

A alteração de apenas um destes parâmetros pode modelar diferentes feições, possibilitando inúmeras combinações. Isto pode ser evitado pelo facto de alguns destes aspetos, não serem utilizados em determinadas feições. Por exemplo, os polígonos formar-se-ão em qualquer caixa de Petri, desde que estejam presentes as condições necessárias para tal.

A granulometria é um aspeto que principalmente irá diferenciar feições calibradas ou não calibradas. Se numa amostra apenas for colocada uma granulometria, é impossível ser notada qualquer manobra de calibração uma vez que todos os grãos são idênticos. O que não acontece com a mistura de duas granulometrias numa amostra, principalmente se a diferença de tamanho entre ambas for considerável. Para este trabalho foram disponibilizados três tamanhos de grãos de quartzo com modas, 40, 150 e 400 μm (fig. 5.6). Destes apenas foram utilizados os dois com maior diferença entre si mesmo para num caso de diferenciação esta ser mais facilmente visível.



Figura 5.6 - Sedimentos utilizados para as amostras. 100, 150 e 200 μm respetivamente.

A saturação é de todos o mais importante. Se a amostra está seca não há qualquer formação de feições, se está acima do nível máximo de saturação, as amostras não desenvolvem as feições pretendidas. Uma pequena diferença neste parâmetro e toda a modelação pode ir num caminho que não o desejado. A condensação do vapor de água do ar na amostra é um problema com o qual não houve a possibilidade de lidar. As amostras que dependem do nível de saturação para formarem feições, estão sempre sujeitas a que isso não aconteça. É também possível que este seja o parâmetro diferenciador de feições como as calibradas e não calibradas, o tamanho dos polígonos ou a espessura das fissuras. Este é ainda o parâmetro de mais difícil medição, uma vez que depende da quantidade de água e da quantidade de sedimento da amostra. Nesta modelação apenas houve a possibilidade da saturação ser medida de uma forma subjetiva, uma vez que o material necessário para tal não se encontrava disponível. Deste modo apenas foram tidos em consideração três níveis de saturação: seco e saturado, cujo grau de saturação é nulo e máximo respetivamente, sendo estes de mais fácil observação, e ainda o húmido como nível intermédio, abrangendo todos os graus de saturação restantes.

Havendo mistura de granulometrias, é necessária a medição da quantidade de cada uma das envolvidas. Este aspeto pode influenciar na formação de feições, por exemplo, se a quantidade de grãos mais grosseiros for muito superior à de finos, ou vice-versa, não é tão facilmente visível uma possível calibragem. Tendo em conta o material e a quantidade de sedimentos disponíveis, a amostragem foi realizada tendo em conta o peso de cada porção granulométrica sem recorrer ao seu volume. Foi considerada uma mistura perfeita quando uma amostra continha duas porções iguais.

Com a possibilidade de fazer ciclos “à medida”, as temperaturas e o tempo em cada uma, são aspetos que podem ser moldáveis consoante o que é pretendido. O principal objetivo é simular a realidade, assim as temperaturas têm de ser conjugadas com a realidade e com os limites da placa termoelétrica. O tempo em cada uma das temperaturas foi determinado, através de testes iniciais, sendo o necessário para que haja um congelamento e/ou descongelamento completo, ou não, ou otimizar a quantidade de ciclos por dia. Assim foram feitos diferentes programas para diferentes finalidades.

Foram testados vários de recipientes, caixas de Petri de vidro, plástico e alumínio, vidros de relógios de vidro, caixas de metal quadradas e retangulares e ainda papel de alumínio. Destes os mais relevantes, utilizados e com melhores resultados foram as caixas de Petri de vidro e alumínio, as caixas de metal e os vidros de relógio. Isto serviu para ver o comportamento das amostras em diferentes superfícies e em diferentes recipientes com distintos valores de condutividade térmica, sendo o com melhor valor a superfície de alumínio e o pior o de plástico, como esperado (PROTOLAB, 2017). Quando utilizadas as caixas o processo era simples, colocar a amostra diretamente na caixa e de seguida na placa, mas quando se trata do vidro de relógio este tem de ser introduzido dentro de uma caixa de Petri cheia de água para que toda a superfície arredondada do vidro esteja em “contacto com o frio”.

Não havendo informação da quantidade de ciclos que seriam necessários fazer para que se desse a formação de qualquer feição, a placa sempre foi colocada sem limite de ciclos.

Uma vez que a máquina fotográfica estava constantemente a fotografar ambas as fases dos ciclos, gelo-degelo, a monitorização da evolução de cada amostra era fácil, a cada duas fotografias, um ciclo. Assim pode-se dizer em que ciclo se deu o início da formação e em qual esta estaria completa. Assumindo que cada ciclo simula um ano, gelo-inverno, degelo-verão, se uma amostra necessita de 50 ciclos para ter manifestações de algum tipo de forma, também seriam necessários 50 anos para que essa mesma formação se manifestasse, aproximadamente. Se se assumir que em Marte este ciclo é diário, gelo-noite, degelo-dia, 50 ciclos equivalem a 50 dias (de salientar a baixa pressão atmosférica marciana e as diferenças de gravidade podem influenciar todo o processo em Marte).

5.2.5. Protocolo laboratorial

Este trabalho destina-se a modelar feições periglaciais, em laboratório, para posterior comparação com as reais e assim determinar todos os aspetos relativos à sua formação.

Materiais:

- Sedimentos de três granulometrias diferentes, com modas de 40, 150 e 400 μm , provenientes da moagem de quartzo leitoso de origem pegmatítica
- Água desionizada

Equipamento:

- Placa termoelétrica TECA AHP-1200CPV
- Equipamento *Android*, com aplicação “TimerCamera”
- Computador com o *software EasyLog*
- Recipientes para amostras (caixas de Petri, de vidro, alumínio e plástico)
- Caixa protetora
- Sacos de sílica gel
- Forno para secagem das amostras
- Crivos, para a divisão das granulometrias quando misturadas
- Agitador, para a melhor utilização dos crivos

Segurança:

- Uma vez que se está a trabalhar com quartzo puro é necessário um cuidado acrescido para que não seja inalado o pó proveniente dos sedimentos, principalmente dos mais finos, potenciais causadores de doenças respiratórias. Solucionável com uma máscara.

Procedimento:

1. Elaboração das amostras: mistura de sedimentos, se for o caso, junção de água desionizada de acordo com o pretendido
2. Colocar o resultado na caixa em que se pretende modelar a amostra
3. Juntar três/quatro amostras na placa, para um melhor aproveitamento da mesma
4. Colocar os sacos de sílica e a caixa protetora

5. Iniciar o programa (linha de comandos previamente elaborado consoante o que se pretende obter), no *software EasyLog*
6. Iniciar a sequência fotográfica na aplicação “TimerCamera”, tentando que esteja sincronizada com o programa
7. Após o processo, as amostras são retiradas e colocadas no forno para secagem
8. Quando secas, o material de cada uma é posto num crivo de 150 μ m com uma base opaca e estes num agitador para a separação das diferentes granulometrias.

Com isto recomeça-se o processo adaptando a mistura, quantidade de água desionizada e o programa a utilizar para o que se pretende obter.

6. Resultados

Com a modelação realizada foi possível obter resultados que podem ajudar a comprovar como são formadas as feições periglaciais. Foram obtidos análogos de feições terrestres, marcianas e possivelmente de Titã. De seguida encontram-se algumas das seqüências de fotografias de amostras obtidas que demonstram os resultados obtidos.

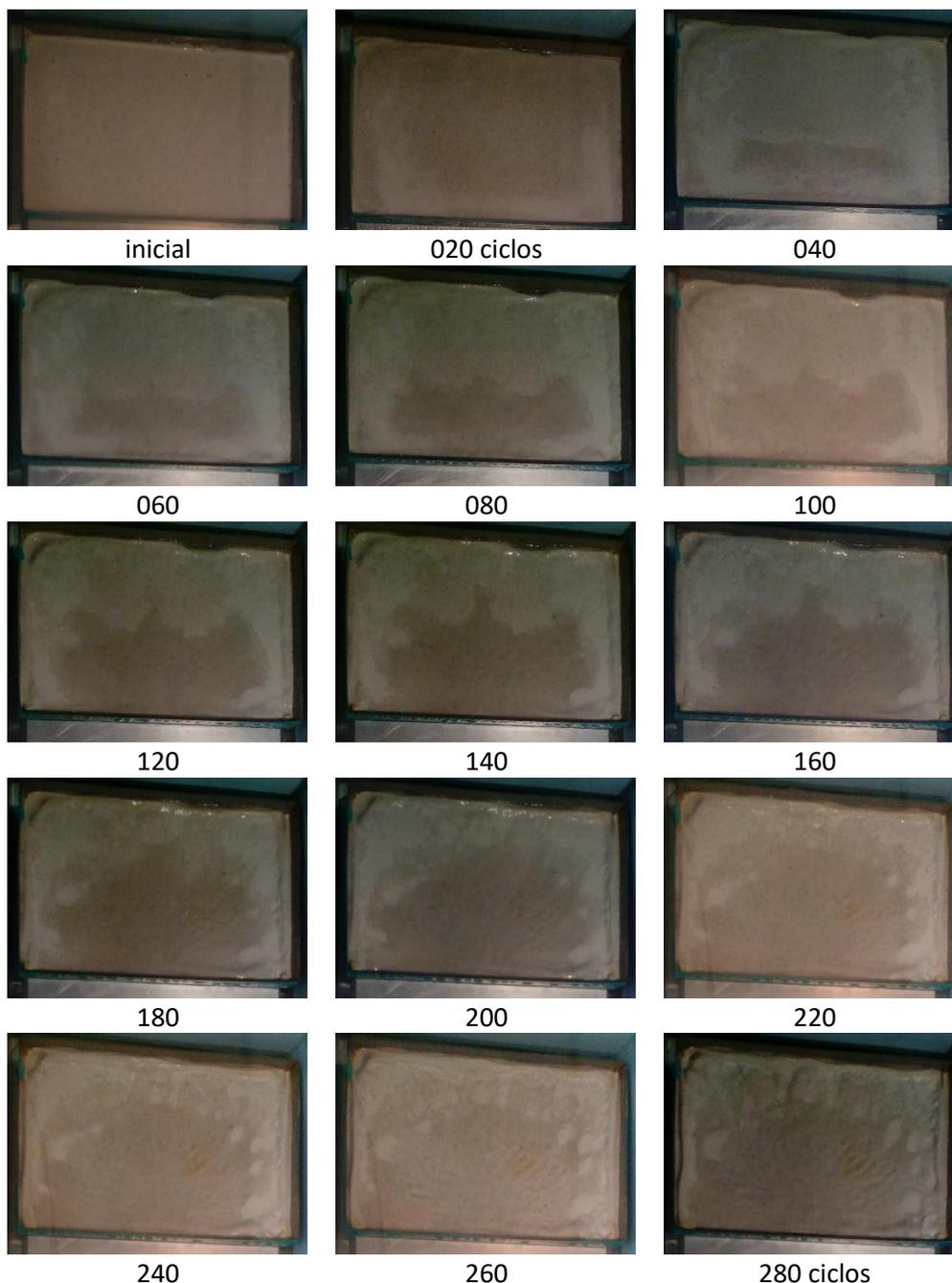


Figura 6.1 - Sequência de fotografias da amostra "seq33C4q" em intervalos de 20 ciclos.

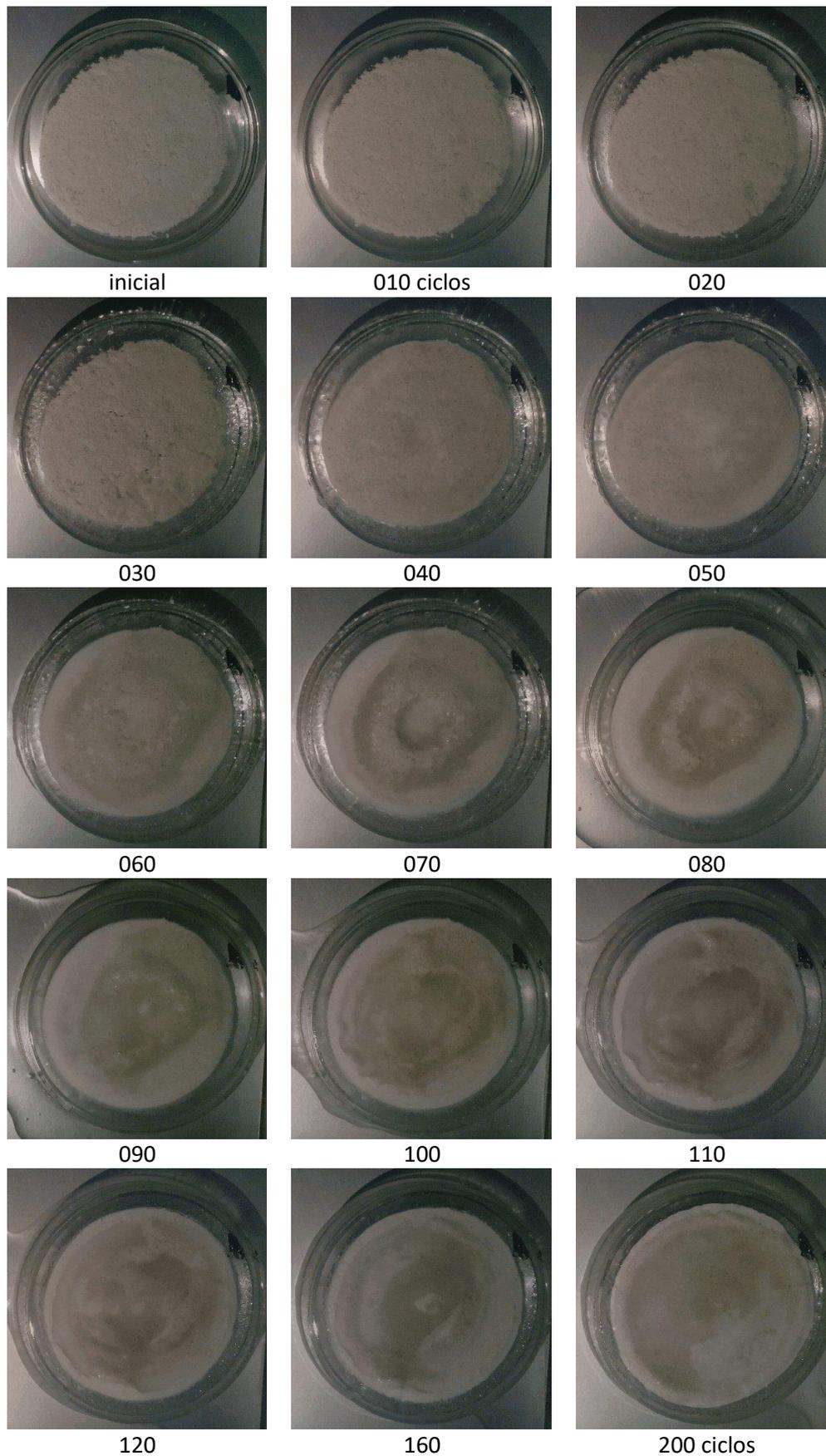


Figura 6.2 - Sequência de fotografias da amostra "seq22C4*" em intervalos de 10 ciclos, excluindo as duas últimas, 160 e 200 respectivamente.

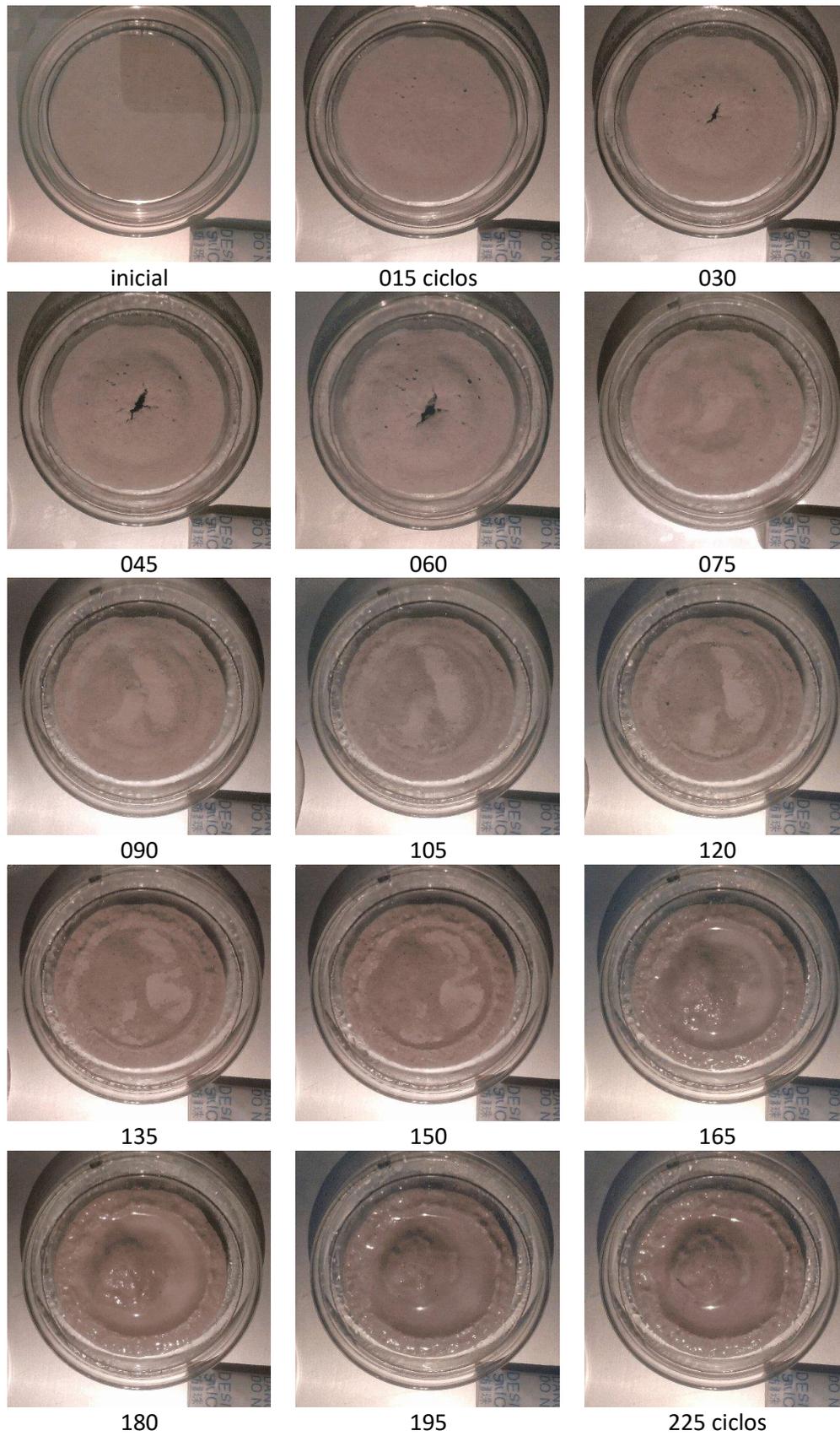


Figura 6.3 - Sequência de fotografias da amostra "seq24A4*" em intervalos de 25 ciclos exceto a última, 225 ciclos.

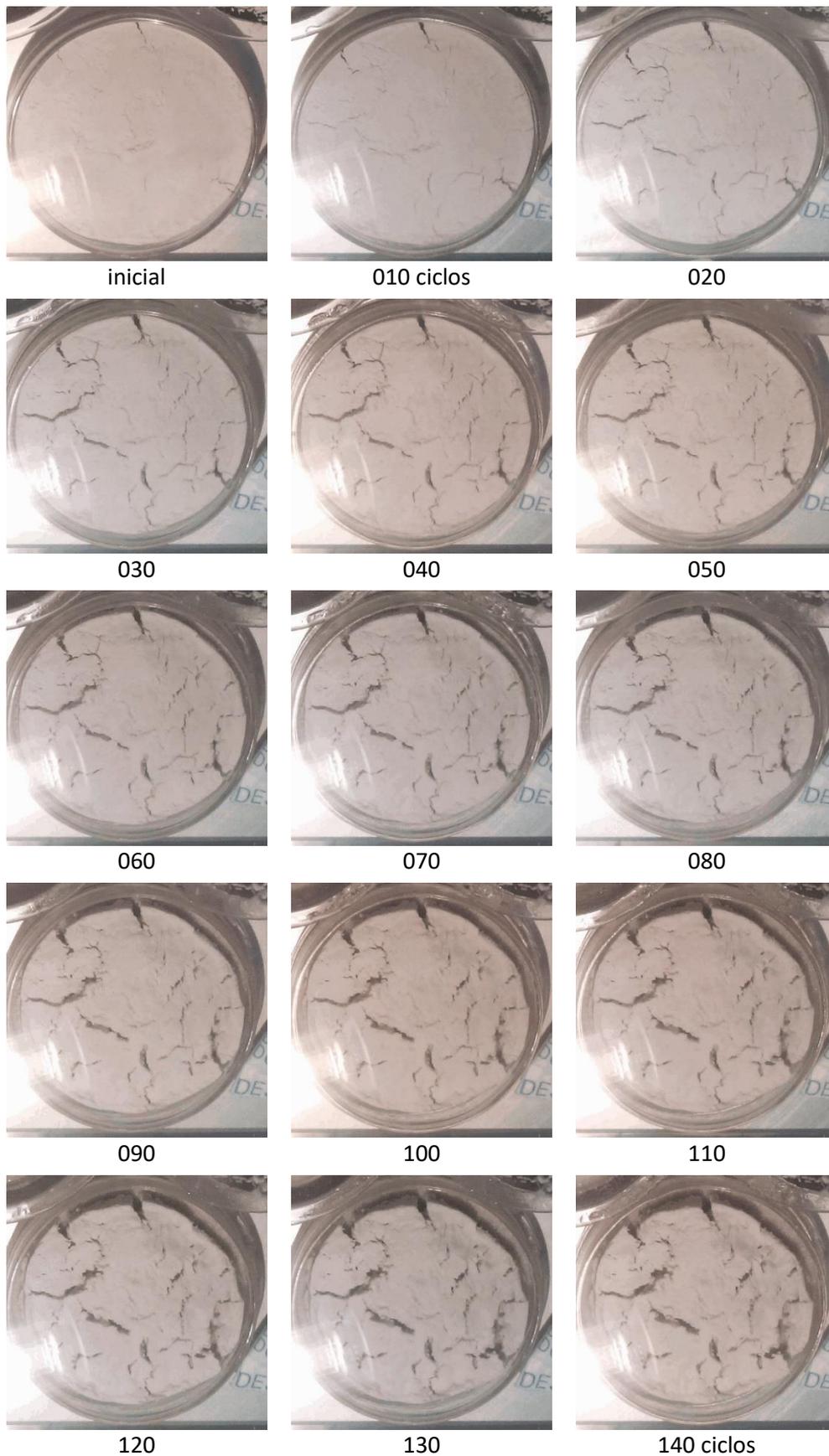


Figura 6.4 - Sequência de fotografias da amostra "seq26D1/A3" em intervalos de 10 ciclos.

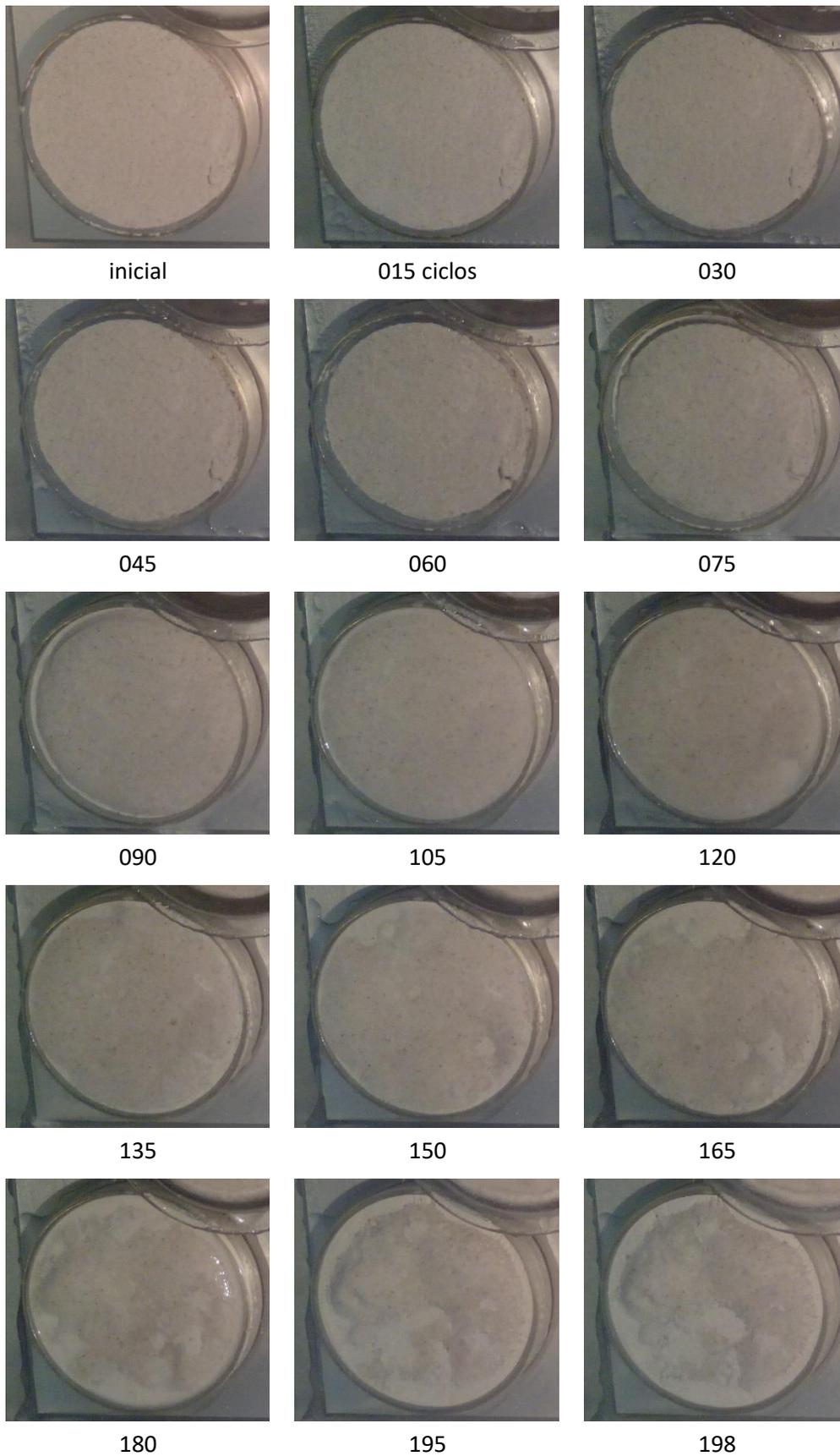


Figura 6.5 - Sequência de fotografias da amostra "seq28D4/A4" em intervalos de 15 ciclos, exceto a ultima, 198 ciclos.

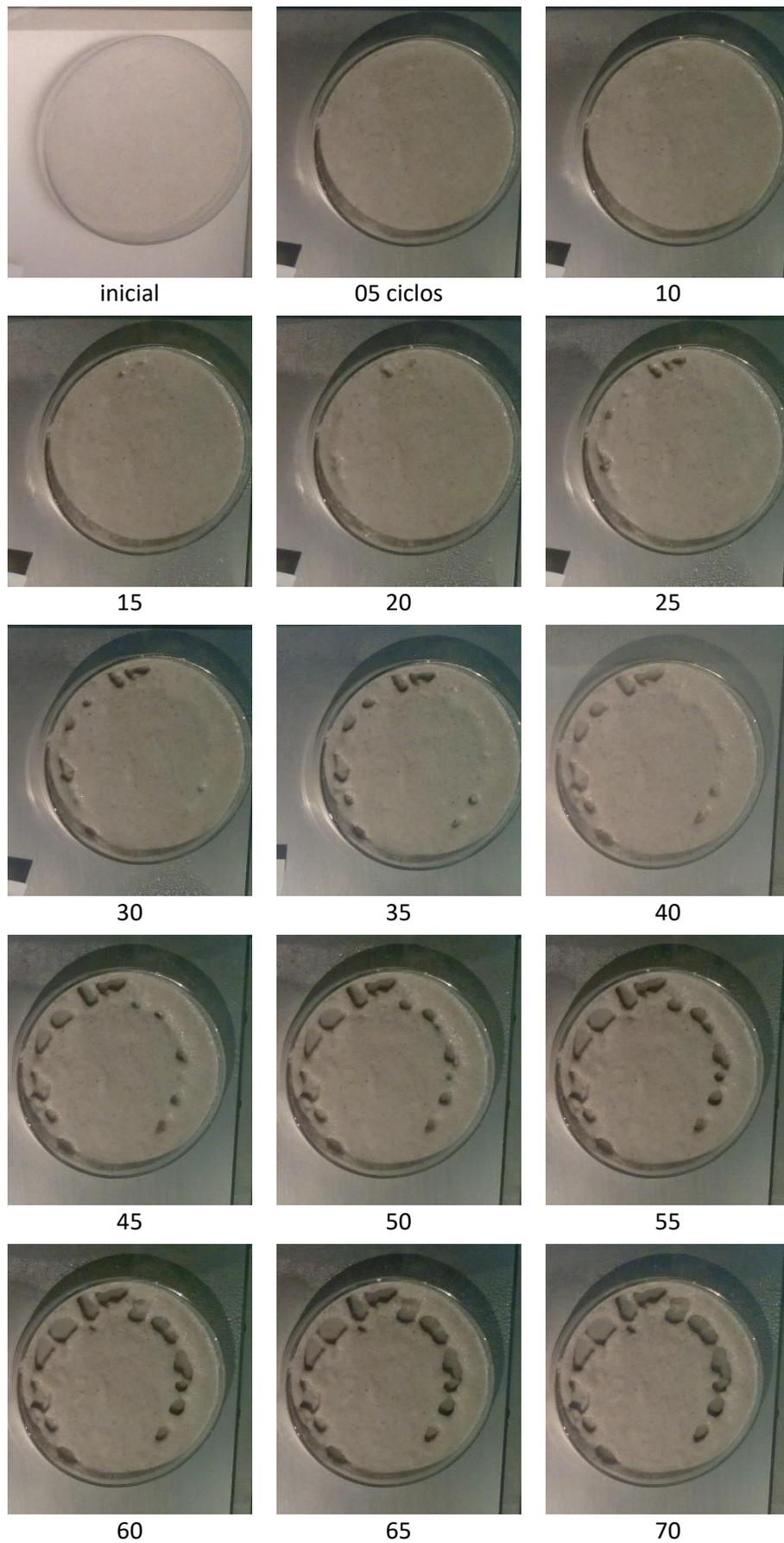


Figura 6.6 - Sequência de fotografias da amostra "seq21A31" em intervalos de 5 ciclos.

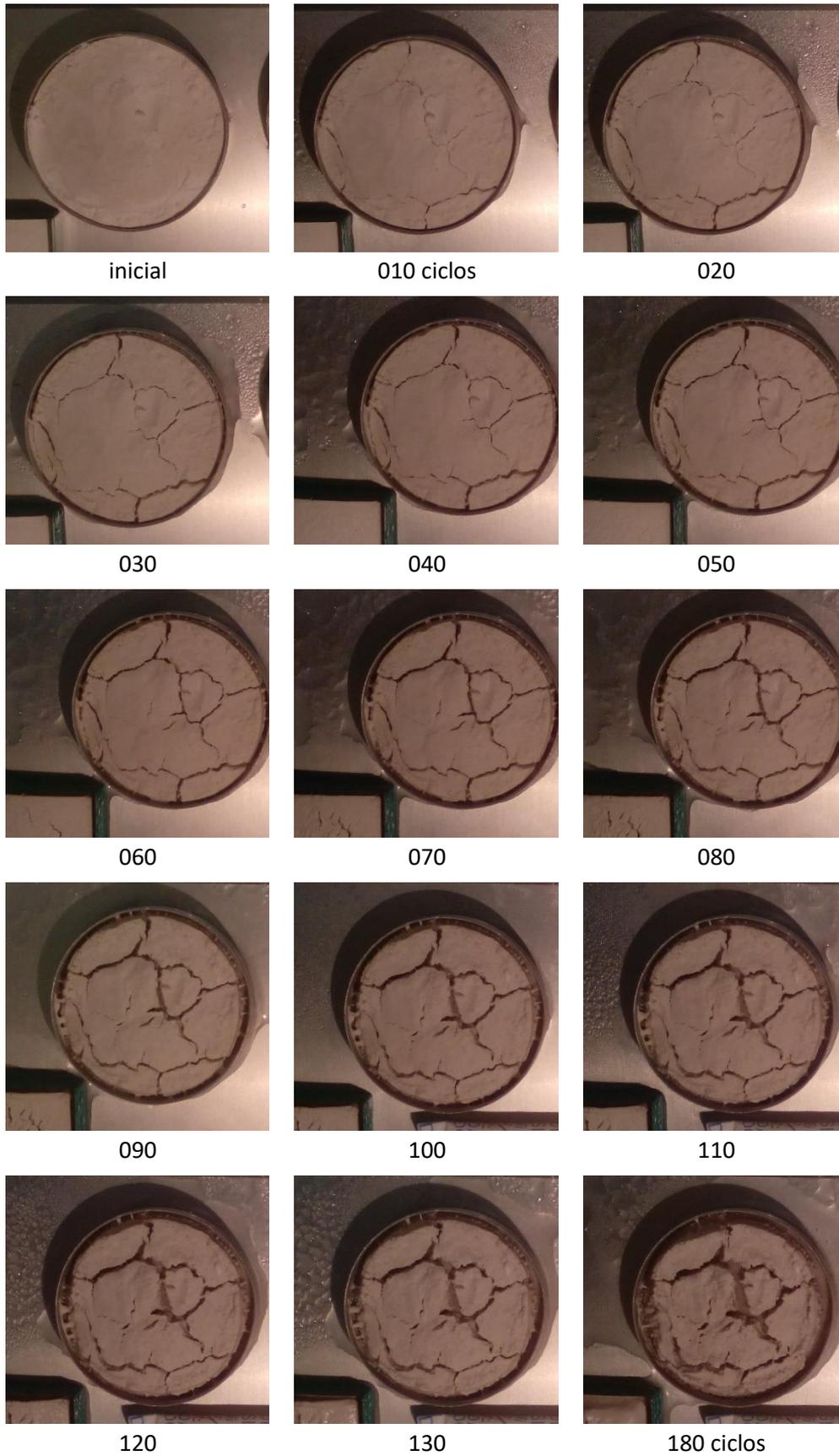


Figura 6.7 - Sequência de fotografias da amostra "seq32D1/A3" em intervalos de 10 ciclos, exceto a última, 180 ciclos.

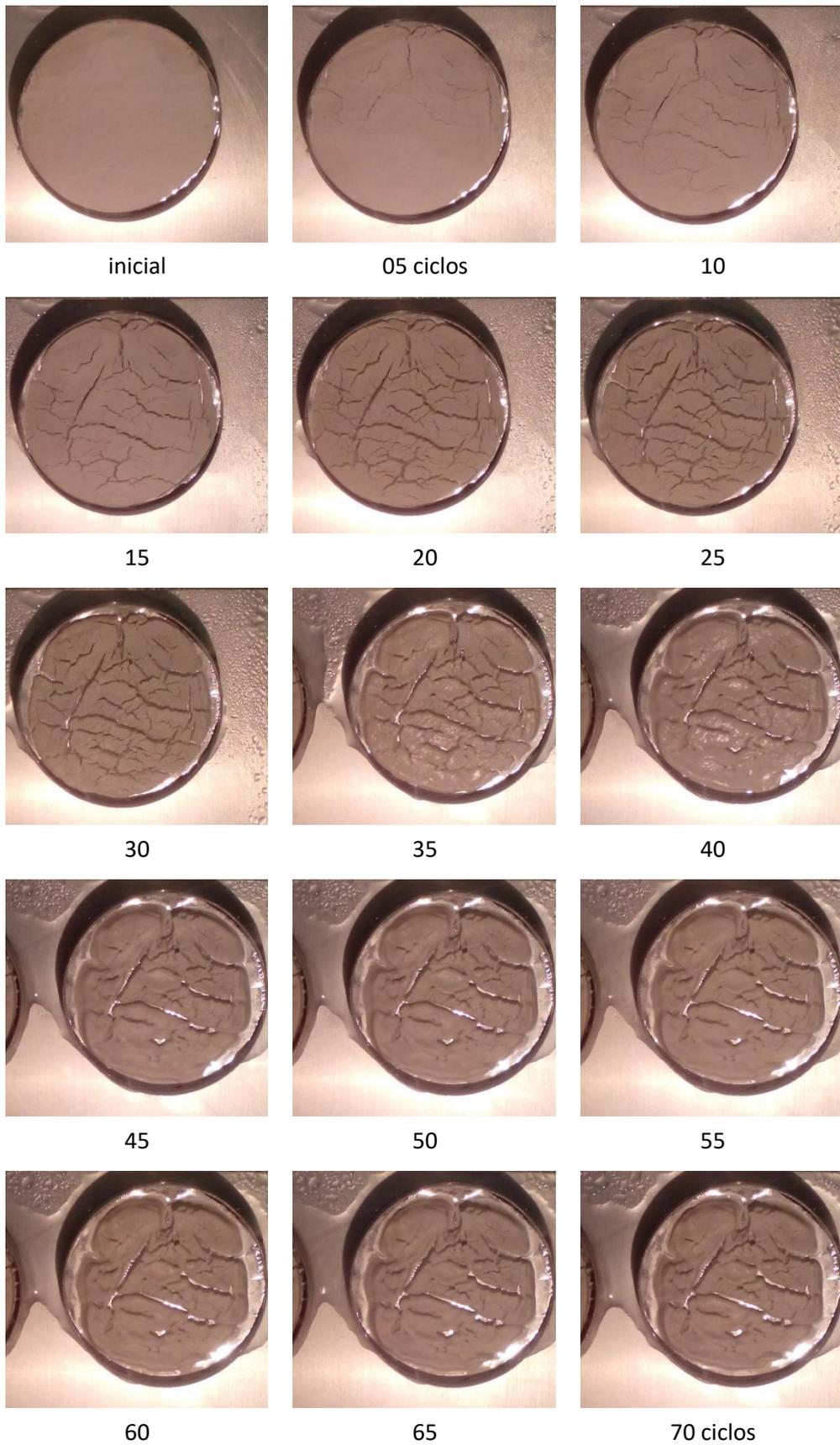


Figura 6.8 - Sequência de fotografias da amostra "seq32D1//A3" em intervalos de 5 ciclos.

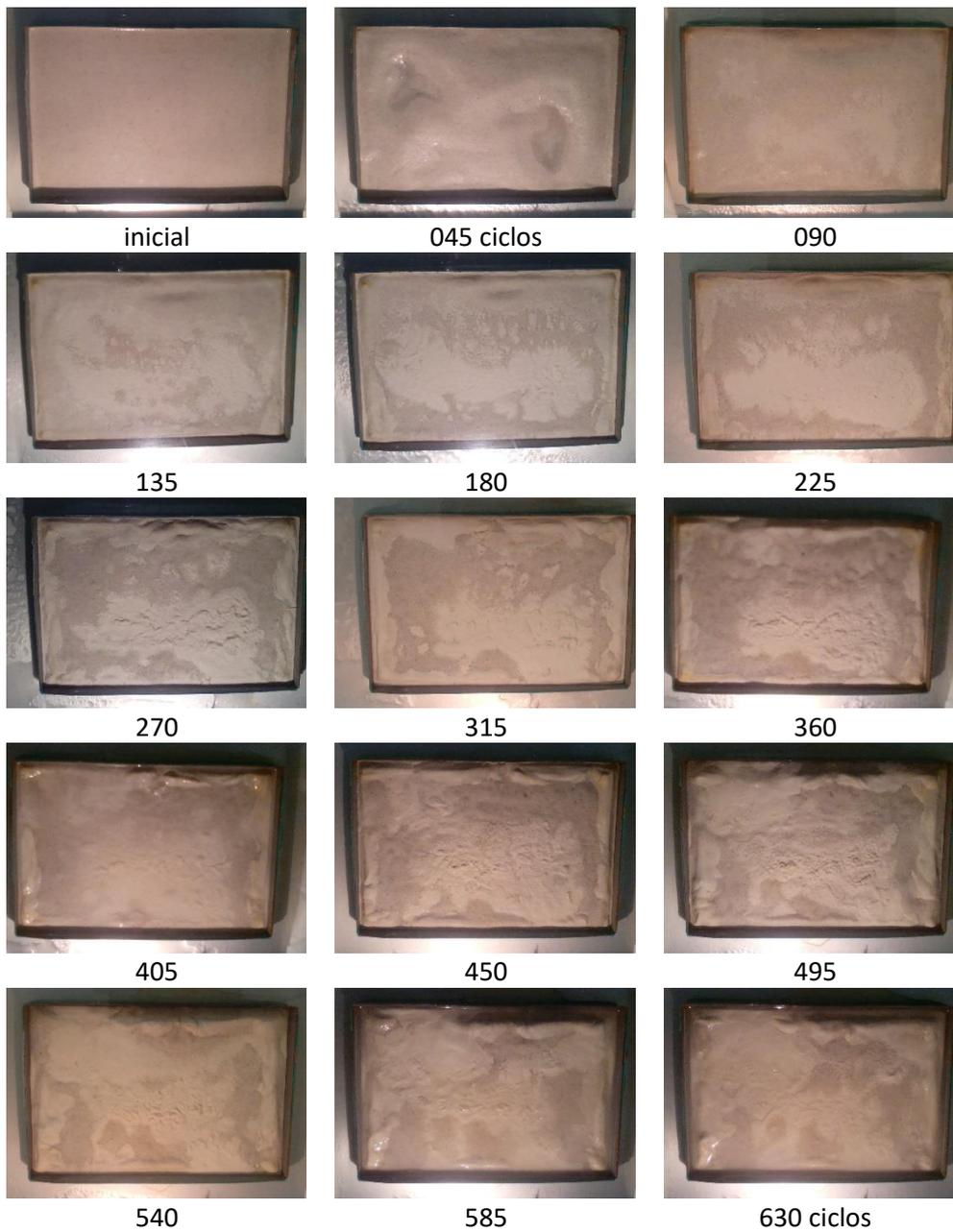


Figura 6.9 - Sequência de fotografias da amostra "seq34AC4q" em intervalos de 45 ciclos.

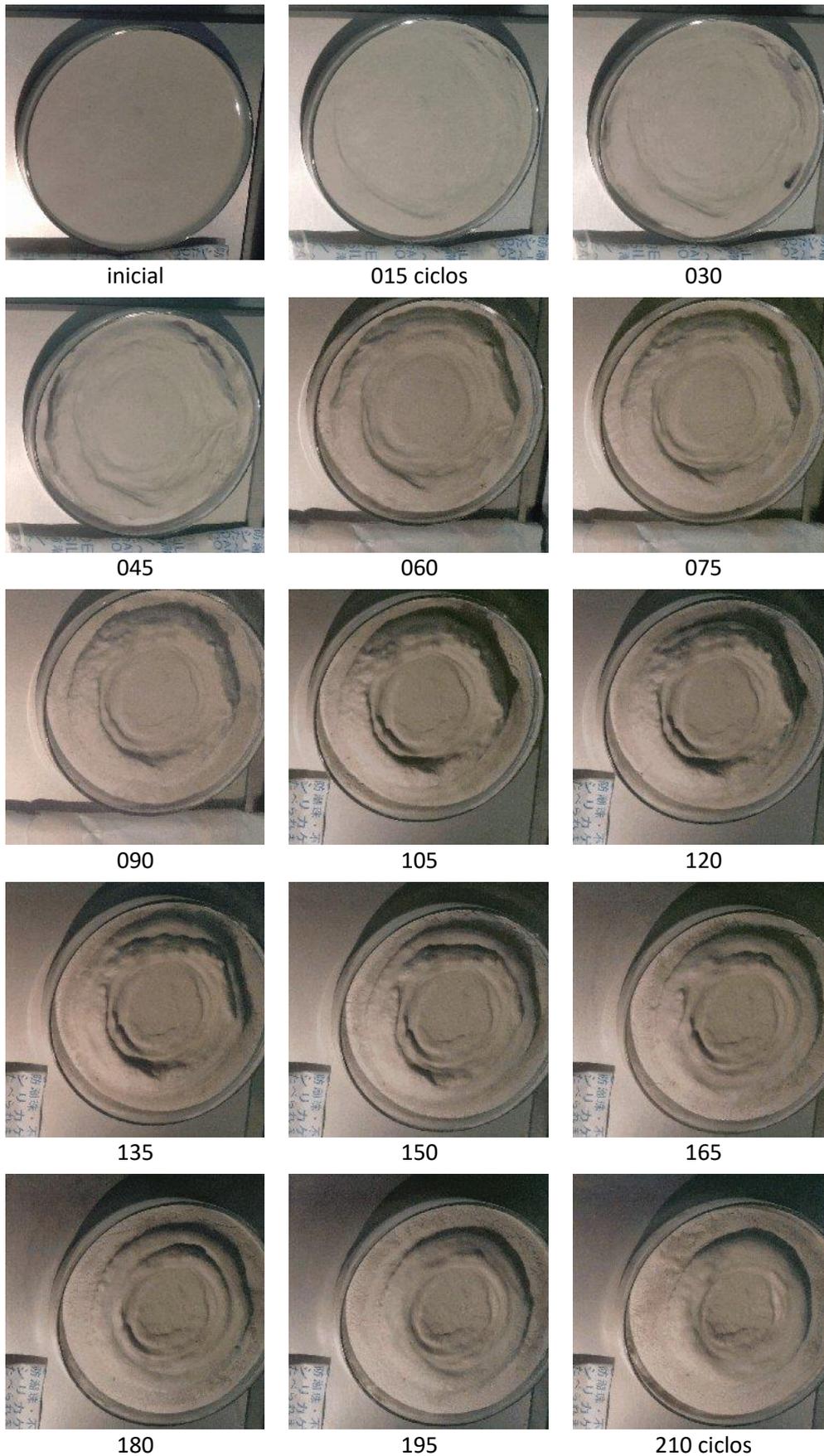


Figura 6.10 - Sequência de fotografias da amostra "seq1920A13" em intervalos de 15 ciclos.

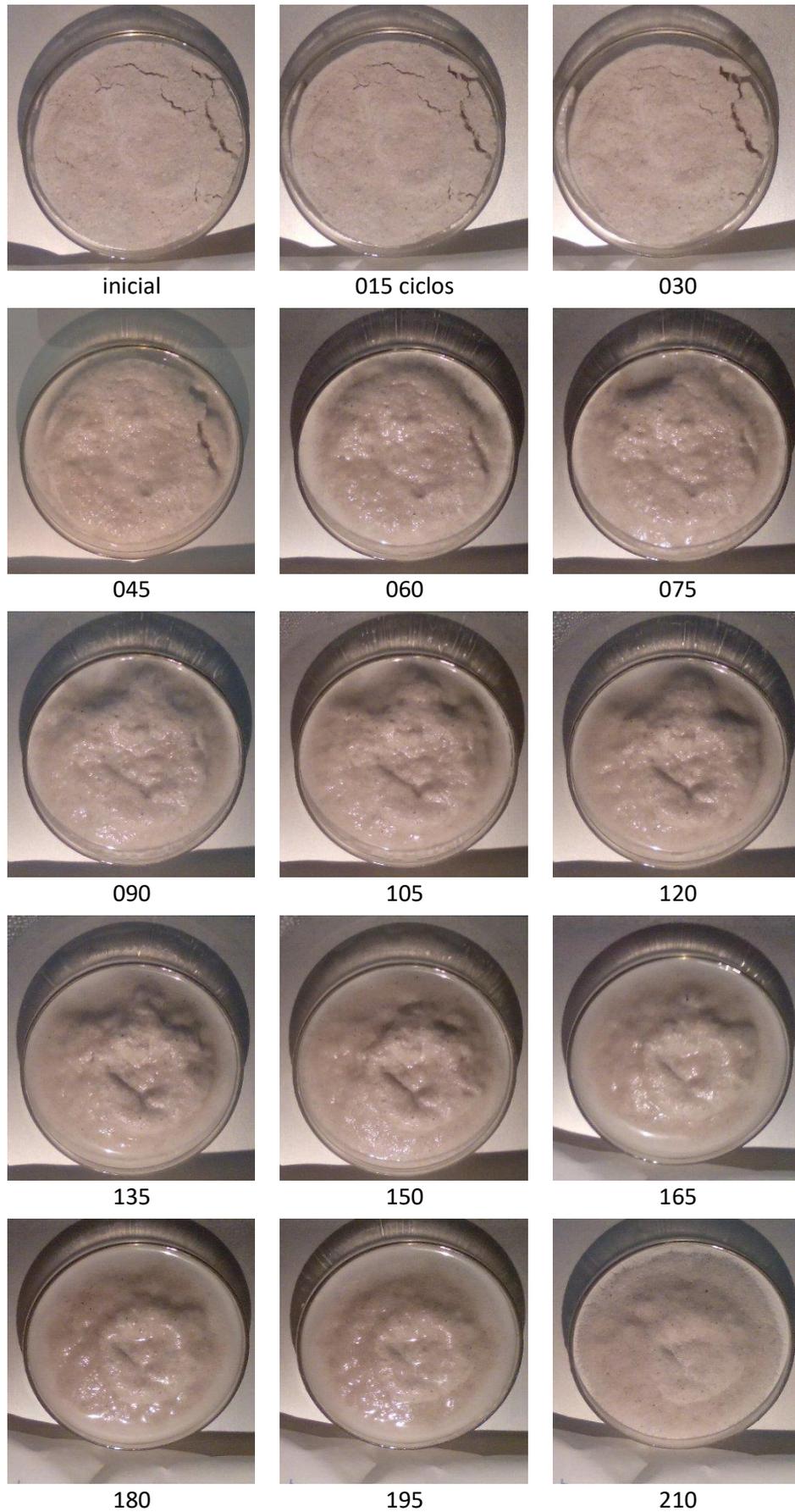


Figura 6.11 - Sequência de fotografias da amostra "seq161718C13" em intervalos de 15 ciclos.

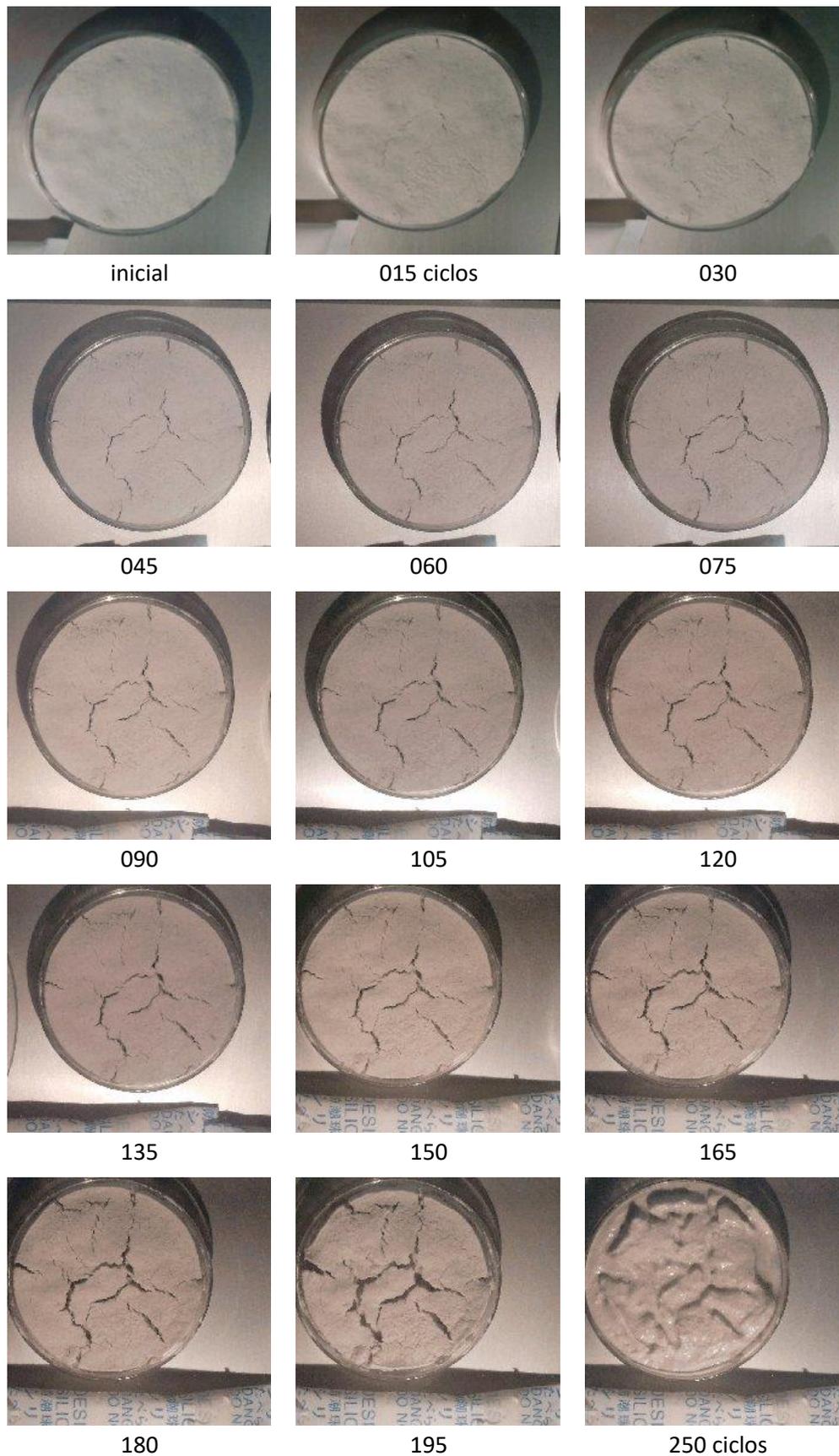


Figura 6.12 - Sequência de fotografias da amostra "seq181920C31" em intervalos de 15 ciclos, excluindo a ultima, 250 ciclos.

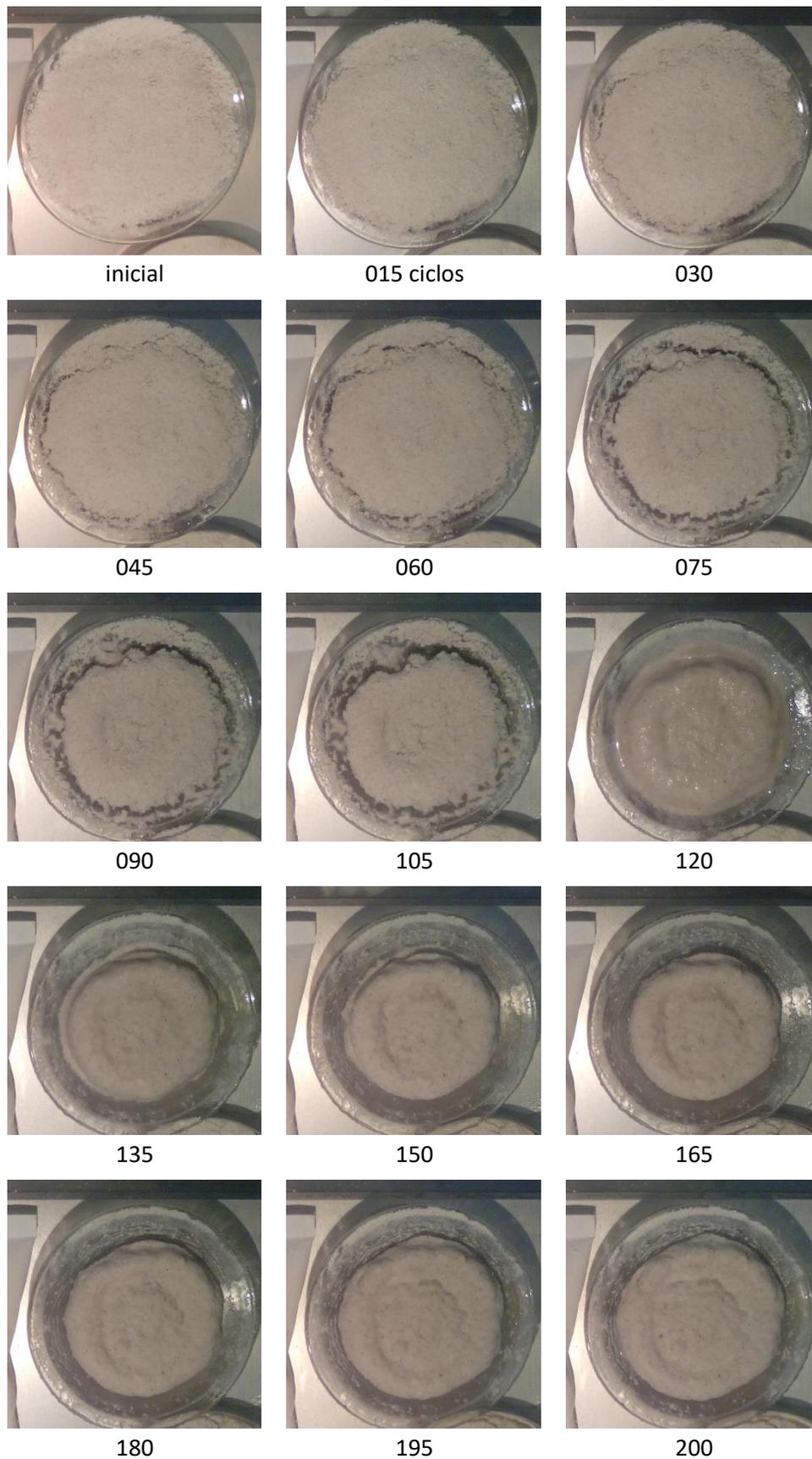


Figura 6.13 - Sequência de fotografias da amostra "seq28(D4/A4)*" em intervalos de 15 ciclos, excluindo a última, 200 ciclos.



inicial



030 ciclos



060



090



120



150



180



210



240



270

Figura 6.14 - Conjunto de fotografias consecutivas da sequência de amostras "seq31" em intervalos de 30 ciclos.

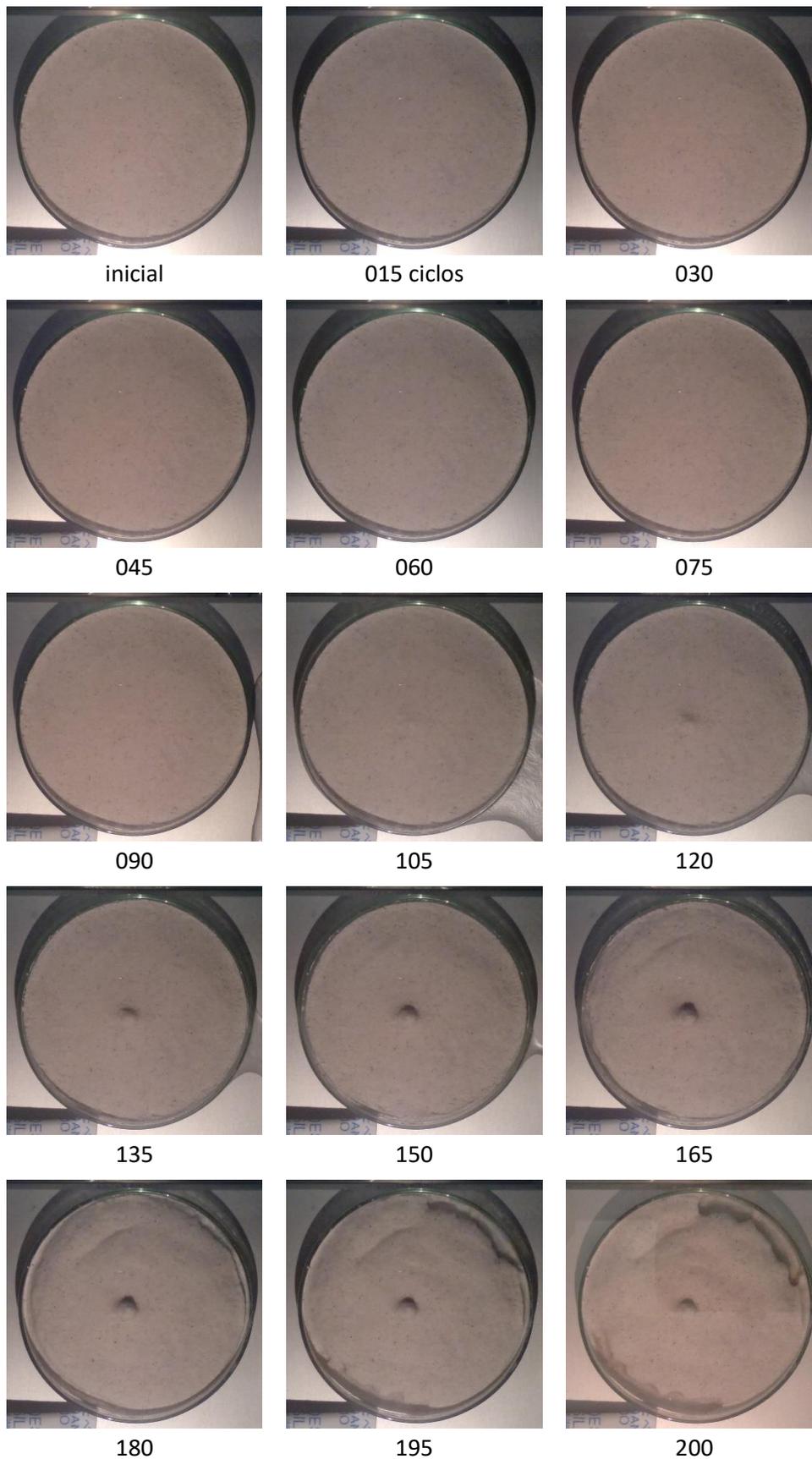


Figura 6.15 - Sequência de fotografias da amostra "seq22C4" em intervalos de 15 ciclos.

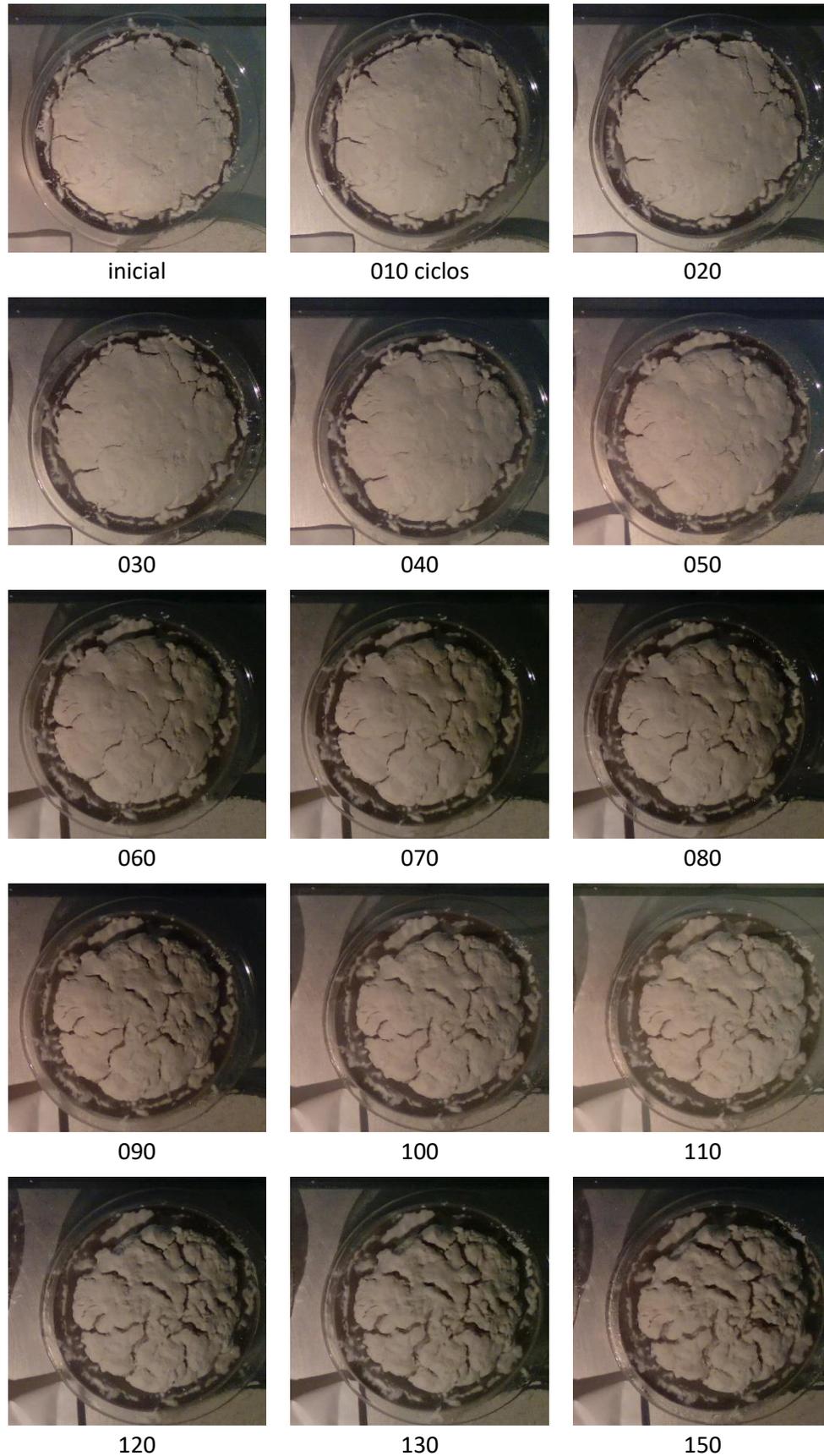


Figura 6.16 - Sequência de fotografias da amostra "seq27(D1/A3)*" em intervalos de 10 ciclos, excluindo a última, 150 ciclos.

Com estas imagens é perceptível que nem sempre se obtiveram os melhores resultados. Por muito próximo que as amostras estivessem da realidade, os fatores que nesta modelação foram incontrolláveis, principalmente a humidade no ar e posterior acumulação da água nas amostras, tornaram muito difícil obter duas amostras iguais, muito menos os resultados perfeitos. Esta influência é determinante pois trata-se de um fator crucial para o desenvolvimento de uma feição. A placa ao providenciar o efeito “frio” de baixo para cima faz com que um dos principais fatores de movimento para o aparecimento de feições, o empolamento do gelo, seja feito também nesse mesmo sentido. Isto faz ainda com que as amostras congelem de baixo para cima o que poderá ser um problema se for necessário que o congelamento se dê no sentido contrário. O efeito de fronteira foi também um fator incontrollável. Uma vez que se trata de uma modelação, esta tem de decorrer num recipiente e este recipiente terá sempre bordaduras que interferiram na modelação em alguns dos casos, visível na figura 6.10 e 6.13. Nesta os sedimentos provenientes das bordaduras contraíram, efeito causado pelo congelamento dos mesmos, em direção ao centro da caixa de Petri criando uma falsa feição, idêntica aos círculos. Ainda existem outros casos, os quais não têm explicação aparente, figura 6.15. Neste último, apenas ocorreram mudanças quando a caixa de Petri adjacente quebrou (devido ao choque térmico proveniente das mudanças bruscas de temperatura), libertando água. Esta, ao envolver a amostra “seq22C4”, facilitou o seu congelamento e por conseguinte, deu origem à contração dos seus sedimentos, resultando na saliência que é visível no centro da amostra. O exemplo da figura 6.4 mostra a submersão dos sedimentos grosseiros em relação aos mais finos, efeito contrário ao que seria de esperar (Kessler e Werner, 2003). A melhor explicação é, possivelmente, a suspensão dos sedimentos mais finos, devido à tensão superficial da água. Exemplo de sequências que não correram como esperado é a da figura 6.14. A principal razão aparenta ser a quantidade de água que se vai acumulando em redor das amostras, que nas fotografias é perfeitamente visível e suportado pela figura 5.9.

Foi criada uma pasta online para que se possa aceder a todos os resultados obtidos que uma vez que são muitos e extensos, seria impossível colocar neste documento. Esta pasta contém todas as fotografias das modelações que foram tiradas em sequência e os Gif's animados que foram produzidos para uma melhor observação da evolução da feição. Antes da sequência 16, tanto não foram obtidos resultados relevantes como também não houve registo fotográfico uma vez que se tratava de uma fase de aprendizagem a manusear o equipamento e todo o *software* a ele envolvido.

<https://mega.nz/#F!4fQ13lha!TA3TAHSBN96X6Y124vjVCg>

6.1. Modelação de feições periglaciais terrestres

6.1.1. Terrenos poligonais



Figura 6.17 - Comparação de terreno poligonal natural (Antártida), à esquerda (Reis, 2012), com um artificial, à direita.

São as feições mais facilmente encontradas na bibliografia devido à sua vasta extensão nas regiões propícias à sua formação (p. ex. Leffingwell, 1919; French, 2007). Chegou-se à conclusão que esta abundância, relativamente às outras feições em estudo, é proporcionada pelas baixas exigências climáticas e sedimentares para a sua formação. Dos parâmetros testados os relevantes são a saturação, a necessidade de duas camadas de sedimentos distintas, uma saturada, a de baixo e uma seca, a do topo e serem realizados ciclos contínuos de gelo-degelo, não completos para que a camada inferior se mantenha congelada, simulando o permafrost. Assim simulam-se na perfeição a camada ativa, o permafrost e todas as condições necessárias para o aparecimento de terrenos poligonais. Verificou-se que se forem reunidas estas condições, mesmo alterando todos os outros parâmetros, tipo de caixa, diferentes granulometrias ou a quantidade de cada sedimento, a formação de polígonos é sempre atingida. Quando comparadas fotografias reais com as recolhidas no laboratório, são claras as semelhanças (fig. 6.17).

Com a comparação das figuras 6.3, 6.6, 6.7, 6.12, 6.17, são notáveis as diferenças entre as feições modeladas, por exemplo, polígonos de diferentes dimensões, pode revelar distintos ciclos, verticalidade na mudança de temperaturas ou, mais provavelmente a existência de humidade no ar no interior da caixa, que nesta modelação não houve meios para ser controlada. Em algumas amostras apenas se formaram as fissuras, mas não os polígonos completos. Não existe razão aparente para que isto aconteça, mas pode ser explicado através do excesso de sedimentos finos. Uma vez que estes, sendo mais pequenos, têm menos espaços vazios entre eles, ficam mais compactos e assim dificultam a progressão das fissuras para formar polígonos completos.

O aumento de humidade dentro da caixa influencia em grande escala a quantidade de água na amostra. Com o avançar dos ciclos, esta acumulação de água nas amostras vai

aumentando e quando atinge o ponto máximo de saturação as feições começam a colapsar, a suavizar a superfície e a criar uma camada extra apenas de água em excesso. O estrago pela acumulação de água é perfeitamente visível na amostra "seq181920C31", na fase final da sequência, figura 6.12 aos 250 ciclos.

6.1.2. Círculos Calibrados



Figura 6.18 - Comparação de terreno círculos calibrados, à esquerda (Van Vliet-Lanoë, 2014), com dois diferentes resultados da modelação, ao centro "seq24C4*" e à direita "seq21A31".

Uma vez que ainda não existe uma explicação específica para o aparecimento de círculos calibrados, torna-se difícil criar as condições ideais para tal, uma vez que não se sabem quais são. As duas amostras da figura 6.18, são dois diferentes resultados que se acharam plausíveis de explicar o aparecimento de tais geofomas periglaciais. A imagem do centro encaixa nas características detalhadas no capítulo 2.2.2 do presente trabalho, duas granulometrias diferentes misturadas, nível de saturação intermédio para que se dê o movimento dos grãos e uma organização circular com os finos no interior e os mais grosseiros no exterior. É de salientar que a amostra "seq21C4*" foi modelada num vidro de relógio o que pode ter influenciado no movimento dos grãos como ilustra o esquema da figura 7.6. A segunda amostra trata uma outra hipótese plausível. Assumindo os sedimentos como as rochas soltas, móveis e a base da caixa de Petri como o solo, a aparência assemelha-se à da fotografia à esquerda da figura 6.18. Esta amostra foi realizada de uma forma menos controlada, não houve medição da quantidade de cada granulometria, nem da quantidade de água a adicionar.

6.1.3. Pingos

Tal como nos terrenos poligonais, a correspondência entre esta amostra e respetiva feição é fácil de averiguar. Uma saliência provocada pelo aumento de volume da água presa no seu núcleo aquando do congelamento da mesma. Na amostra "seq24A4*" da figura 6.3, é perceptível toda a evolução do primeiro pingo (ciclo 30), a sua cicatriz (ciclo 60), o desmoronamento do mesmo (ciclo 75) e o crescimento de um novo (ciclo 150), visível na figura 6.19, à direita. Uma vez que se apresenta de outro ângulo, é possível observar o gelo no interior do pingo artificial, no centro da fotografia.



Figura 6.19 - Comparação de Pingos naturais (Canadá), à esquerda (COMET, 2017), com um artificial, à direita.

Esta amostra foi realizada com uma mistura da mesma quantidade, peso, de finos e grosseiros, num vidro de relógio, onde a água destilada foi colocada em primeiro lugar em relação à mistura para que se criasse o mais idêntico a uma bolha de água, no interior da amostra, possível. Assim quando amostra atinge as temperaturas mais baixas do programa a decorrer, eram notáveis as diferenças de tamanho da mesma.

6.2. Modelação de feições periglaciais marcianas

Sendo as feições vistas até agora comuns na Terra e em Marte, é natural que qualquer uma delas, quando modelada, encaixe em ambos os casos. Tal como demonstram as figuras 6.20 e 6.21, as semelhanças são visíveis. Tal como já foi referido, estas conclusões podem ajudar a esclarecer dúvidas que existam sobre o passado e o presente do planeta vermelho.



Figura 6.20 - Comparação entre um terreno poligonal marciano (Reis, 2012), à esquerda, com um simulado, à direita.

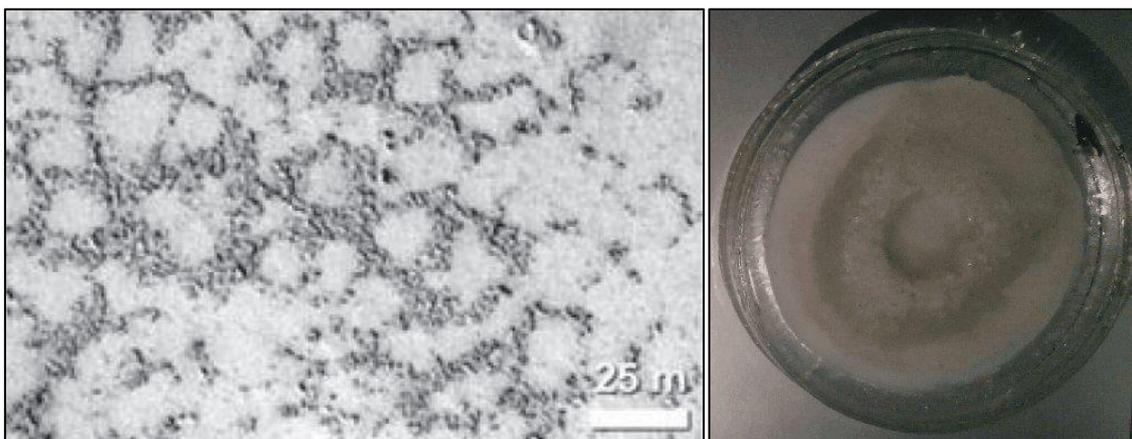


Figura 6.21 - Comparação entre uma fotografia de satélite de círculos calibrados em Marte (Hauber, 2011), à esquerda, com um círculo calibrado modelado, à direita.



Figura 6.222 - Comparação entre uma fotografia de satélite de terreno cerebral em Marte (Levy et al., 2009), à esquerda, com um possível terreno cerebral modelado, à direita.

Os terrenos cerebrais são ainda uma feição que permanece atualmente pouco estudadas devido, provavelmente, à escassez de dados que suportem qualquer teoria. Não se encontra bibliografia referente a nenhuma pesquisa *in situ*, através de um “Mars rover”, ou qualquer tipo de trabalho além de análise fotográfica sobre este tipo de feição. Esta feição periglacial pode vir a ser um importante meio de comparação com outras geoformas. Na figura 6.22 pode-se averiguar que a amostra modelada tem grandes semelhanças com a fotografia marciana. Isto poderá revelar que ciclos de gelo-degelo podem ser uma componente necessária para o desenvolvimento desta feição.

6.3. Modelação de feições periglaciais em Titã

Poderão algumas das redes de drenagem identificadas ser, na verdade, feições periglaciais? As semelhanças são intrigantes quando comparadas as duas fotografias. Em Titã existem as principais características para que isto possa ser possível, diferenças de temperaturas cíclicas, que apesar de pequenas, com a conjunção da pressão atmosférica, coloca o ambiente muito próximo do ponto triplo do metano que facilita a realização de ciclos de congelamento e descongelamento.

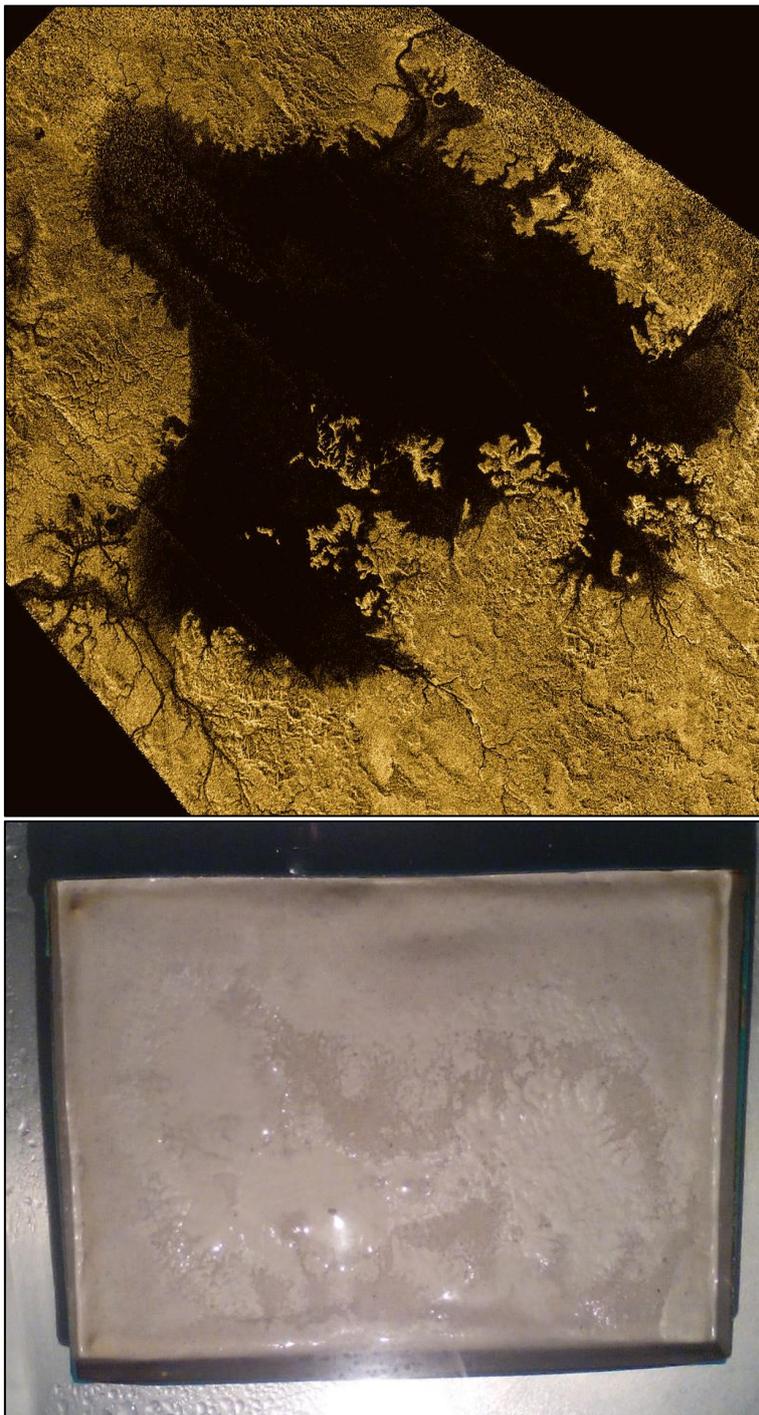


Figura 6.233 - Comparação entre uma fotografia de uma rede de drenagem de Titã, (NASA, 2013), e uma fotografia de uma amostra.

7. Conclusões

Com a análise dos resultados obtidos de todas as modelações realizadas, foi possível chegar a importantes conclusões. Todas as feições estudadas têm determinadas características necessárias para a sua formação. Para a formação de terrenos poligonais essas características passam pela divisão de duas camadas, uma saturada e uma seca e um ciclo que evite que a de baixo descongele na totalidade. As granulometrias não são um parâmetro importante e isso ficou provado com as modelações “seq26D1/A3”, figura 6.4, “seq32D1/A3”, figura 6.7, “seq32D1//A3”, figura 6.8, “seq181920C31”, figura 6.12, “seq27(D1/A3)*”, figura 6.16, “seq12C13”, figura 7.1, entre outras. Todo este conjunto de modelações mostra que os terrenos poligonais são uma feição com relativa facilidade de formação. A figura 7.1 mostra uma amostra ainda da sequencias experimentais e de aprendizagem com terrenos poligonais formados. O esquema da figura 7.2 ilustra os passos pelos quais as feições criadas, de um modo geral, passaram. Numa fase inicial existe contração da camada superior e posterior rutura da mesma. De seguida com as fases “degelo”, as fendas aumentam a sua expressão devido à água do permafrost simulado, que descongela e migra entre as mesmas, que ao voltar a congelar exercem pressão nas paredes das fendas e obriga ao aumento do tamanho. Aqui os terrenos poligonais estarão formados ou pelo menos vários conjuntos de fendas. A partir daqui a água começa a acumular na amostra e fará com que as estruturas suavizem a sua morfologia. Este problema é aplicável em todas as feições modeladas.



Figura 7.1 - Fotografia de uma das amostras da fase experimental da modelação que formou os primeiros terrenos poligonais do trabalho.

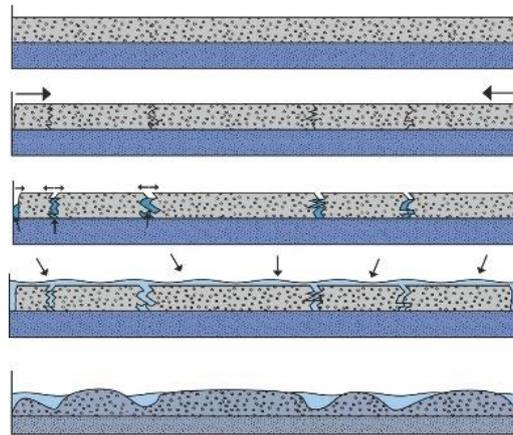


Figura 7.2 - Esquema do processo de formação de terrenos poligonais e posterior acumulação de água em excesso e suas consequências.

A modelação de pingos foi um pouco mais complicada devido à forma dos recipientes. A formação de um pingo requer porção de água retida e sem recorrer a separações por folha de papel de alumínio, por exemplo, esta divisão teve de ser feita através de um vidro de relógio, no qual se colocava a água antes da mistura de sedimentos. Esta água vai saturar os primeiros sedimentos a serem colocados, mas ainda assim é possível criar essa porção necessária. No esquema da figura 7.3 é possível verificar isso mesmo. Apenas nesta modelação o facto de o arrefecimento se dar de cima para baixo ajudou na formação da feição. O congelamento dá-se primeiro na água da caixa e de seguida na porção de água presa sob os sedimentos. Assim esta expande e cria a saliência, o pingo.

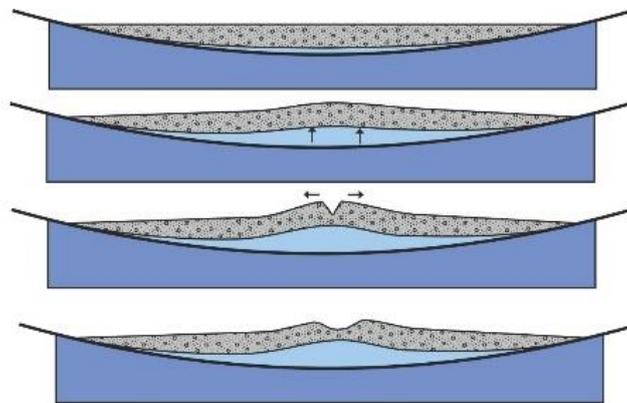


Figura 7.3 - Esquema da formação de pingos e sua cicatriz.

Estas são as duas feições de mais fácil interpretação. Os círculos calibrados foram das três feições os de mais difícil realização. Pelo que ficou perceptível, é necessário que o nível de saturação seja um valor exato, que nesta modelação não foi possível medir. Assim, a amostra da figura 6.2, que melhores resultados apresentou, revela-se difícil de recriar uma vez que foi elaborada por “tentativa-erro”. As figuras 7.4 e 7.5 demonstram dois esquemas de possíveis sequências para a formação de feições que não os círculos, mas ainda assim idênticas.

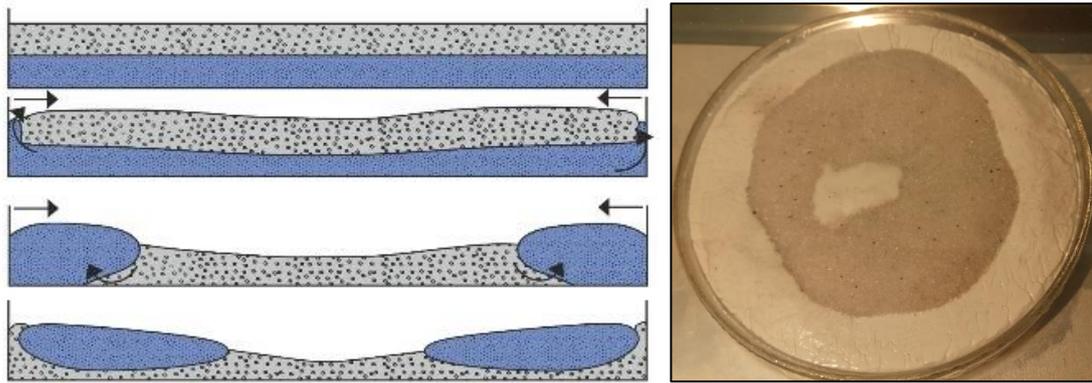


Figura 7.4 - Esquema de possíveis movimentos dos sedimentos, à esquerda, aquando da modelação da amostra “seq28D4/A4”, à direita.

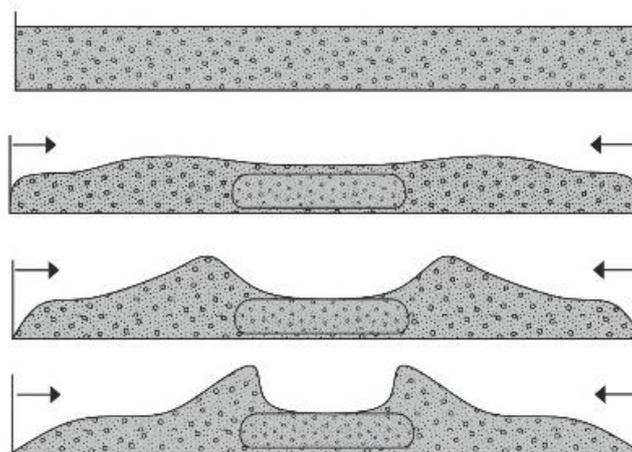


Figura 7.5 - Esquema da sequencia de passos para a formação da amostra “seq1920A13”.

A “seq28D4/A4” tem organização de granulometrias, mas inversa ao que seria de esperar. A “seq1920A13” Tem formação de um círculo, mas não calibrado e com grande probabilidade de estar relacionado com o efeito fronteira da forma do recipiente. Em conclusão, e com a observação dos resultados obtidos, para que se dê formação de um círculo calibrado é necessário um pouco destes dois exemplos e de empolamento dos sedimentos mais finos, figura 7.6. O esquema da figura 7.6 exemplifica este movimento. Aquando do congelamento, a expansão do gelo dá-se na perpendicular à base, empolando os sedimentos. No descongelamento os grãos descendem na vertical. Isto provoca um movimento de fora para dentro, neste caso.

Durante esta modelação foi ainda possível averiguar várias situações que outrora não seriam. A figura 7.7 trata uma amostra que, depois de seca, ao ser retirada da caixa de Petri, expõe as bolsas de ar que tinha retidas. Estas bolhas podem influenciar na modelação das feições uma vez que podem impedir um movimento livre dos sedimentos. Este pode ter sido o entrave para que algumas das amostras modeladas não tenham obtido o resultado esperado.

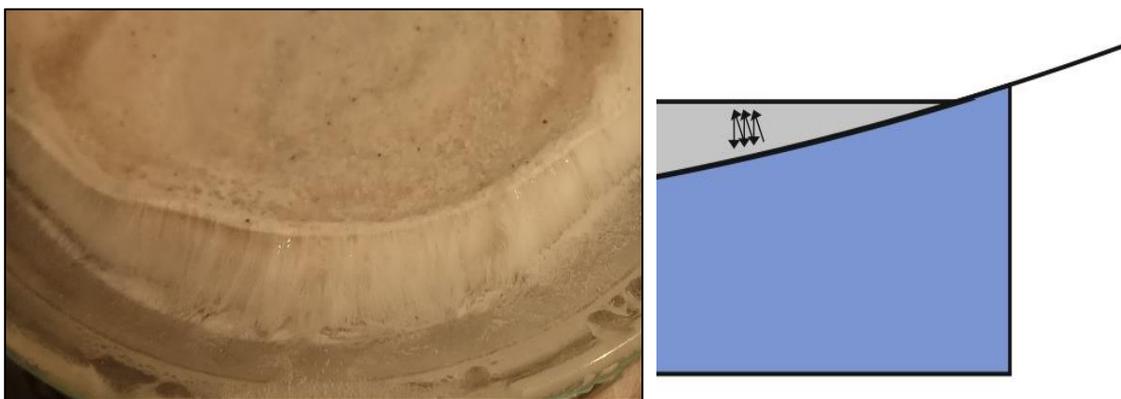


Figura 7.6 - Fotografia de uma amostra onde é visível o empolamento dos grãos mais finos através do congelamento da água envolvente, à esquerda, e respetivo esquema do movimento de um grão relativo a esse empolamento.



Figura 7.7 - Fotografia de bolsas de ar retidas numa amostra.

A hipótese de pelo menos algumas das redes de drenagem de Titã serem feições periglaciais, produzidas por ciclos gelo/degelo de hidrocarbonetos foi talvez a conclusão mais surpreendente deste trabalho. Em suporte dessa conclusão podem-se alegar as condições climáticas favoráveis em Titã.

Na figura 7.8 representa-se o diagrama de fases para o metano (CH_4). A curva de pressão de vapor foi obtida por aplicação da equação de Antoine (1888), com parâmetros recolhidos de CHERIC (2017). Na mesma figura representam-se as condições médias na superfície de Titã ($T=93.7$ K; $P= 152$ KPa), obtidas de McKay *et al.* (1991). Observa-se que a temperatura média superficial na lua está apenas 3 K acima do ponto de congelação do metano. Se se juntar a este facto o conjunto de observações publicadas sobre as variações sazonais da temperatura superficial em um inverno e uma primavera de Titã (Jennings *et al.*, 2016), onde se vê uma variação de mais de 1 K, à latitude 80° N, e as variações observadas atrás, na figura 4.2, não é irrazoável supor que a variação extrema entre inverno e verão possa atravessar ciclicamente a curva *solidus* num processo análogo ao que foi modelado em laboratório.

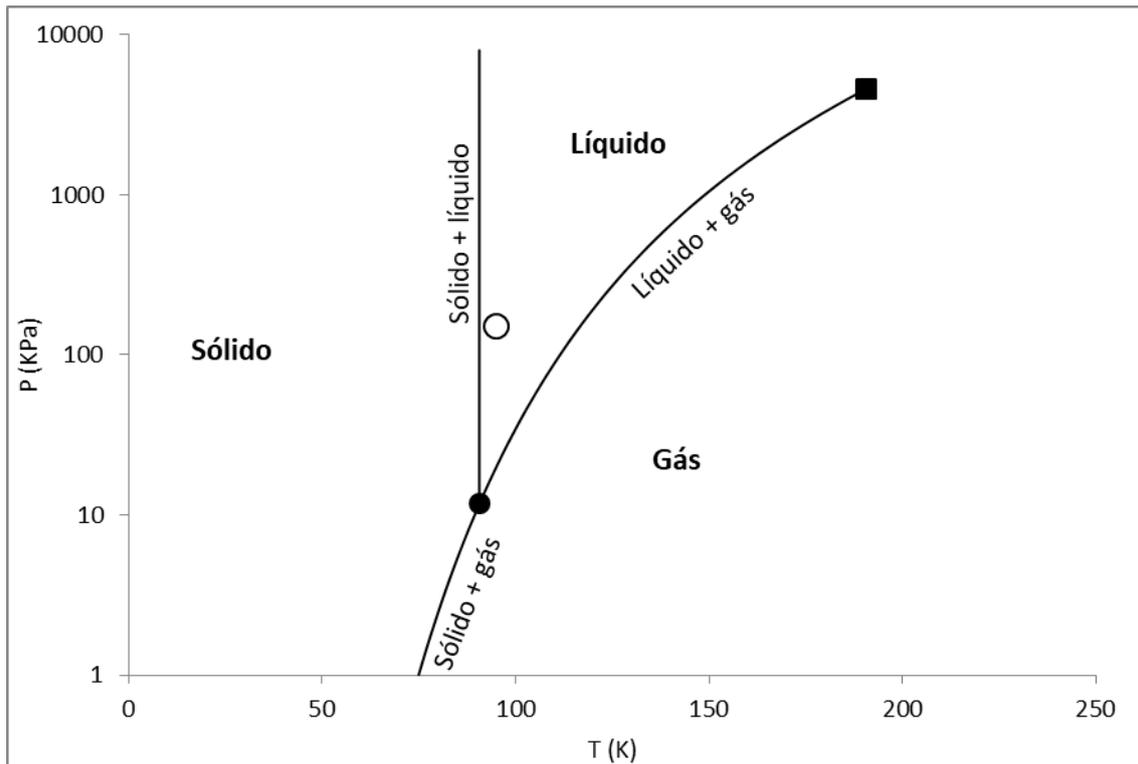


Figura 7.8 - Diagrama de fases para o metano. O círculo aberto representa as condições T-P predominantes na superfície de Titã.

Mais que respostas, este trabalho obrigou a fazer muitas perguntas. Espera-se se possível, num futuro próximo, responder-lhes com maior exatidão que aqui. Sendo este um trabalho com limite temporal, foi realizado o possível com o equipamento, tempo e condições existentes. No futuro poderá ser continuado com acesso a mais equipamentos que se revelaram necessários durante este período de experimentações. Podem também ser realizados outros tipos de amostras, com diferentes granulometrias, outros ciclos, com outras caixas. Todos os parâmetros desta simulação laboratorial podem ser alterados e testados para que se tente obter outro tipo de resultados e chegar a outro tipo de conclusões.

8. Referências

- Acuña, M.H., Connerney, J.E.P., Ness, N.F., Lin, R.P., Mitchell, D., Carlson, C.W., McFadden, J., Anderson, K.A., Rème, H., Mazelle, C., Vignes, D., Wasilewski, P., Cloutier, P. (1999). Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment. *Science*, 284, 790-793.
- Aharonson, O., Hayes, A. G., Hayne, P. O., Lopes, R. M., Lucas, A., & Perron, J. T. (2014). *Titan's surface geology*. Titan, by Ingo Müller-Wodarg, Caitlin A. Griffith, Emmanuel Lellouch, Thomas E. Cravens, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014, p. 63, 63.
- Alves, E. I. (2010). *Pequeno Atlas do Sistema Solar*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Alves, E. I., Andrade, A. I. A. S & Vaz, D. A. (2017) – A better view over Titan drainage networks through RGB fusion of Cassini SAR images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (in press).
- Antoine, C. (1888). Tensions des vapeurs; nouvelle relation entre les tensions et les températures, *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 107: 681–684
- Ballantyne, C.K., & Harris, C., 1994. *The Periglaciation of Great Britain*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Ballantyne, C. K., & Matthews, J. A. (1982). The development of sorted circles on recently deglaciated terrain, Jotunheimen, Norway. *Arctic and Alpine Research*, 341-354.
- Balme, M. R., Gallagher, C. J., Page, D. P., Murray, J. B., & Muller, J. P. (2009). Sorted stone circles in Elysium Planitia, Mars: Implications for recent martian climate. *Icarus*, 200(1), 30-38.
- Barata, T., Alves, E. I., Machado, A., & Barberes, G. A. (2012). Characterization of palimpsest craters on Mars. *Planetary and Space Science*, 72(1), 62-69.
- Bockheim, J. G.; Hall K. J. (2002). Permafrost, active-layers Dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *South African Journal of Science* 82-90
- Brown, R., Lebreton, J. P., & Waite, J. (Eds.). (2009). *Titan from Cassini-Huygens*. Springer Science & Business Media.
- Bue, B. D.; Stepinski, T. F. (2005). Automated classification of landforms on Mars. *Computers & Geosciences* 32(5), 604-614.
- Burr, D. M., Tanaka, K. L., & Yoshikawa, K. (2009). Pingos on Earth and Mars. *Planetary and Space Science*, 57(5), 541-555.
- Carr, M. H. (1984). *The geology of terrestrial planets*, Washington D.C., NASA
- Carr, M. H. (1996). *Water on Mars*. New York: Oxford University Press.

- Carr, M. H., & Schaber, G. G. (1977). Martian permafrost features. *Journal of Geophysical Research*, 82(28), 4039-4054.
- Cattermole, P. J. (2001) *Mars: the Mystery Unfolds*. Terra Publishing.
- CHERIC (2017), Chemical Engineering and Materials Research Center, <https://www.cheric.org/research/kdb/hcprop/cmprch.php> [acedido em 2017.08.02]
- COMET (2017) - Permafrost dynamics in the remote canadian arctic revealed by high-resolution topographic measurements, <http://comet.nerc.ac.uk/permafrost-dynamics-remote-canadian-arctic-revealed-high-resolution-topographic-measurements/>. [acedido em 17.09.2017]
- DiSalvo, F. J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 285(5428), 703-706.
- Elachi, C., Wall, S., Allison, M., Anderson, Y., Boehmer, R., Callahan, P., ... & Hamilton, G. (2005). Cassini radar views the surface of Titan. *Science*, 308(5724), 970-974.
- Flaugergues, H. (1809). Les taches de la planète Mars. *Journal de Physique* (Paris) 69, p. 126.
- Flemal, R. C. (1976). Pingos and pingo scars: Their characteristics, distribution, and utility in reconstructing former permafrost environments. *Quaternary Research*, 6(1), 37-53.
- French, Hugh M. (1980). Periglacial geomorphology and permafrost. *Progress in Physical Geography*. Sage Journals. 4: 254–261. Retrieved 2016-09-26.
- Gehrels, T., Baker, L. R., Beshore, E., Blenman, C., Burke, J. J., Castillo, N. D., ... & Gotobed, J. (1980). Imaging photopolarimeter on Pioneer Saturn. *Science*, 207(4429), 434-439.
- Hauber, E., Reiss, D., Ulrich, M., Preusker, F., Trauthan, F., Zanetti, M., ... & Olymo, M. (2011). Periglacial landscapes on Svalbard: Terrestrial analogs for cold-climate landforms on Mars. *Geological Society of America Special Papers*, 483, 177-201.
- Hiesinger, H., & Head, J. W. (2000). Characteristics and origin of polygonal terrain in southern Utopia Planitia, Mars: results from Mars Orbiter Laser Altimeter and Mars Orbiter Camera data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E5), 11999-12022.
- Hunten DM (1978) A Titan atmosphere with a surface temperature of 200 K. In Hunten DM, Morrison D (eds) *The Saturn System, NASA Conf. Publ.* 2068, Washington DC, pp 127–140
- Hynek, B.M., Beach, M., and Hoke, M.R.T. (2010). Updated global map of martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes: *Journal of Geophysical Research*, v. 115, doi: 10.1029/2009JE003548.
- Jennings, D. E., Cottini, V., Nixon, C. A., Achterberg, R. K., Flasar, F. M., Kunde, V. G., ... & Coustenis, A. (2016). Surface temperatures on Titan during northern winter and spring. *The Astrophysical Journal Letters*, 816(1), L17.

- Kessler, M. A., Murray, A. B., Werner, B. T., & Hallet, B. (2001). A model for sorted circles as self-organized patterns. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B7), 13287-13306.
- Kessler, M. A., & Werner, B. T. (2003). Self-organization of sorted patterned ground. *Science*, 299(5605), 380-383.
- Kieffer H. H, Jakosky B. M., and Snyder C. W. (1992). The Planet Mars: From Antiquity to Present, in *Mars*, H.H. Kieffer, B.M. Jakosky, C.W. Snyder, and M.S. Matthews, eds., Tucson, AZ: University of Arizona Press, pp. 1-33.
- Kieffer, H. H., Martin, T. Z., Peterfreund, A. R. and Jakosky, B. M. et al. (1977). Thermal and albedo mapping of Mars during the Viking primary mission. *Journal of Geophysical Research*, 82, 4249-91.
- Leffingwell, E. D. K. (1915). Ground-ice wedges: The dominant form of ground-ice on the north coast of Alaska. *The Journal of Geology*, 23(7), 635-654.
- Leffingwell, E. D. K. (1919). *The Canning River region, northern Alaska* (No. 109). US Government Printing Office.
- Levy, J. S., Head, J. W., & Marchant, D. R. (2008). The role of thermal contraction crack polygons in cold-desert fluvial systems. *Antarctic Science*, 20(06), 565-579.
- Levy, J. S., Head, J. W., Marchant, D. R., & Kowalewski, D. E. (2008). Identification of sublimation-type thermal contraction crack polygons at the proposed NASA Phoenix landing site: Implications for substrate properties and climate-driven morphological evolution. *Geophysical Research Letters*, 35(4).
- Levy, J. S., Head, J. W., & Marchant, D. R. (2009). Concentric crater fill in Utopia Planitia: History and interaction between glacial “brain terrain” and periglacial mantle processes. *Icarus*, 202(2), 462-476.
- Levy, J. S., Head, J. W., Marchant, D. R., Dickson, J. L., & Morgan, G. A. (2009). Geologically recent gully–polygon relationships on Mars: Insights from the Antarctic Dry Valleys on the roles of permafrost, microclimates, and water sources for surface flow. *Icarus*, 201(1), 113-126.
- Levy, J. S., Marchant, D. R., & Head, J. W. (2010). Thermal contraction crack polygons on Mars: A synthesis from HiRISE, Phoenix, and terrestrial analog studies. *Icarus*, 206(1), 229-252.
- Lopes, R. M. C., Stofan, E. R., Peckyno, R., Radebaugh, J., Mitchell, K. L., Mitri, G., ... & Hayes, A. (2010). Distribution and interplay of geologic processes on Titan from Cassini radar data. *Icarus*, 205(2), 540-558.
- Lorenz, R. D., Lopes, R. M., Paganelli, F., Lunine, J. I., Kirk, R. L., Mitchell, K. L., ... & Miyamoto, H. (2008). Fluvial channels on Titan: initial Cassini RADAR observations. *Planetary and Space Science*, 56(8), 1132-1144.

- Mann, D. (2003). On patterned ground. *Science*, 299(5605), 354-355.
- Marchant, D. R., & Head, J. W. (2007). Antarctic dry valleys: Microclimate zonation, variable geomorphic processes, and implications for assessing climate change on Mars. *Icarus*, 192(1), 187-222.
- Matsuoka, N., Abe, M., & Ijiri, M. (2003). Differential frost heave and sorted patterned ground: field measurements and a laboratory experiment. *Geomorphology*, 52(1), 73-85.
- Mackay, J. R. (1973). The growth of pingos, western Arctic coast, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 10(6), 979-1004.
- Mackay, J. R., and Black, R. F. (1973). Origin, composition, and structure of perennially frozen ground and ground ice: A review. In *Permafrost: The North American Contribution to the Second International Conference*, pp. 185-192. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- McCord, T. B., Hansen, G. B., Buratti, B. J., Clark, R. N., Cruikshank, D. P., D'Aversa, E., ... & Filacchione, G. (2006). Composition of Titan's surface from Cassini VIMS. *Planetary and Space Science*, 54(15), 1524-1539.
- McKay, C., Pollack, J., & Courtin, R. (1991). The greenhouse and antigreenhouse effects on Titan. *Science*, 253(5024), 1118-1121.
- McSween H. Y., (2015). *Petrology on Mars*. Mineralogic Society of America.
- Morgenstern, A., Hauber, E., Reiss, D., van Gasselt, S., Grosse, G., & Schirrmeyer, L. (2007). Deposition and degradation of a volatile-rich layer in Utopia Planitia and implications for climate history on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E6).
- Suc1982 (2017). *TimerCamera*.
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.suc1982.timercam> [acedido em 2017.09.12]
- NASA (2006) – *Candle in the Dark*, https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia08235.html [consultado em 2017.08.23]
- NASA (2013) – *Vast Ligeia Mare in False Color*, https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia17031.html [consultado em 2012.08.22]
- NASA (2016) – *Titan Temperature Lag Maps & Animation*, <https://www.nasa.gov/image-feature/jpl/pia20020/titan-temperature-lag-maps-animation/> [consultado em 2017.08.24]
- NASA (2017a) – *Titan: “Goodbye Kiss”*, <https://saturn.jpl.nasa.gov/> [consultado em 2017.08.25]

- NASA, Mars Exploration (2017b) – *Program & Missions*, <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/> [consultado em 2017.04.02]
- NASA, Mars Exploration (2017c) – *Program & Missions – Geology*, <https://mars.nasa.gov/programmissions/science/goal3/> [consultado em 2017.04.22]
- NASA, Mars Exploration (2017d) – *Program & Missions – Mars Express*, <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/present/express/> [consultado em 2017.04.15]
- NASA, Mars Exploration – (2017e) – *Program & Missions – Mars Global Surveyor*, <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/past/globalsurveyor/> [consultado em 2017.05.01]
- NASA, Mars Exploration (2017f) – *Program & Missions – Maven*, <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/present/maven/> [consultado em 2017.05.02]
- NASA, Mars Exploration (2017g) – *Program & Missions – Viking 1 & 2*, <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/past/viking/> [consultado em 2017.05.02]
- Niemann, H. B., Atreya, S. K., Bauer, S. J., & Carignan, G. R. (2005). The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, 438(7069), 779.
- Péwé, T. L. (1969). The periglacial environment. In: Péwé, T. L., ed., *The Periglacial Environment*. McGill-Queen's University Press, Montreal, pp. 1–9.
- Pidwirny, M. (2006). Periglacial Processes and Landforms, in *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10ag.html> [acedido em 10/09/2017]
- Porco, C. C., Baker, E., John, B., & Beurle, K. (2005). Imaging of Titan from the Cassini spacecraft. *Nature*, 434(7030), 159.
- PROTOLAB (2017) – *Tabela de Condutividade Térmica de Materiais de Construção*, <http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm> [consultado em 2017.02.29]
- Reis, P. A., Alves, E. I., e Barata, M. T. (2012). Condicionalismo climático dos terrenos poligonais em Vénus, na Terra e em Marte. In *Para conhecer a Terra*, DCTUC.
- Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I., Frise, E. et al. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods* 9(7): 676-682.
- Sletten, R. S., Hallet, B., Fletcher, R. C. (2003). Resurfacing time of terrestrial surfaces by the formation and maturation of polygonal patterned ground. *Journal of Geophysical Research*, 108 (E4), 8044, doi: 10.1029/2002JE001914, 2003; GDS 25-1-10.

- Soare, R. J., Séjourné, A., Pearce, G., Costard, F., & Osinski, G. R. (2011). The Tuktoyaktuk Coastlands of northern Canada: A possible “wet” periglacial analog of Utopia Planitia, Mars. *Geological Society of America Special Papers*, 483, 203-218.
- Sotin, C., Seignovert, B., Lawrence, K., MacKenzie, S., Barnes, J., & Brown, R. (2014). Titan's geoid and hydrology: implications for Titan's geological evolution. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 16).
- TECA (2017). *EasyLog Software for the TC-4300 Temperature Controller - Product Manual V01.3*. <http://www.thermoelectric.com/2010/manuals/pdf/Manual-EZlog-V01-3.pdf> [acedido em 2017.09.12]
- Tricart, J. (1968). Periglacial landscapes. In: Fairbridge, R. W., ed., *Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold, New York, pp. 829–833
- Van Everdingen, R. (2005). *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*, National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, Boulder.
- Van Gasselt, S., Hauber, E., Rossi, A. P., Dumke, A., Orosei, R., & Neukum, G. (2011). Periglacial geomorphology and landscape evolution of the Tempe Terra region, Mars. *Geological Society, London, Special Publications*, 356(1), 43-67.
- Van Vliet-Lanoë, B. (2014). Patterned ground and climate Change. In *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Nova Science Publishers, Inc..
- Washburn, A. L. (1973). *Periglacial processes and environments*. E. Arnold.