

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS TRINDADE - CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS

Leandro Lourenço Bezerra de Amorim

**Estudo da difusão de fertilizantes de eficiência aprimorada de KCl encapsulado em  
CaSO<sub>4</sub> via simulação pelo método de elementos finitos**

Florianópolis  
2022  
Leandro Lourenço Bezerra de Amorim

**Estudo da difusão de fertilizantes de eficiência aprimorada de KCl encapsulado em  
CaSO<sub>4</sub> via simulação pelo método de elementos finitos**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da  
Universidade Federal de Santa Catarina como requisito  
para a obtenção do título de Bacharel/Licenciado em  
Engenharia de Materiais  
Orientador: Prof. Dr. -Ing. Márcio C Fredel,  
Coorientador: Eng. Thamyres Hellen da Silva

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Amorim, Leandro Lourenço Bezerra de Amorim Estudo da difusão de fertilizantes de eficiência aprimorada de KCl encapsulado em CaSO<sub>4</sub> via simulação pelo método de elementos finitos / Leandro Lourenço Bezerra de Amorim Amorim ; orientador, Prof. Dr.-Ing. Márcio C Fredel Fredel , coorientador, Eng<sup>a</sup>. Mat. Thamyres H. Silva H. Silva, 2022.

45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Fertilizante de eficiência aprimorada. 3. Elementos Finitos. I. Fredel , Prof. Dr.-Ing. Márcio C Fredel . II. H. Silva, Eng<sup>a</sup>. Mat. Thamyres H. Silva. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

Leandro Lourenço Bezerra de Amorim

**Estudo da difusão de fertilizantes de eficiência aprimorada de KCl encapsulado em  
CaSO<sub>4</sub> via simulação pelo método de elementos finitos**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Materiais” e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Materiais

Local, 30 de junho de 2022.

---

Prof. Dr.-Ing. Celso Peres Fernandes  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr.-Ing. Márcio C Fredel  
Orientador  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

---

M.Eng. Douglas Fabris  
Avaliador  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng<sup>a</sup>. Mat. Thamyres H. Silva  
Avaliadora  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e a minha filha amada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e aos professores por todo os ensinamentos e o auxílio durante esses anos de graduação.

Agradeço à Financiadora de Estudos e Projetos pelo apoio e por me permitir desenvolver este trabalho.

Agradeço à Sulgesso Indústria e Comércio SA pelo software e apoio dispendidos.

Agradeço ao Prof. Dr. Márcio Fredel por toda atenção dedicada durante a realização desta pesquisa, pelo auxílio na realização das atividades e contribuição durante todo o período de construção deste trabalho.

Agradeço à Engenheira Thamyres Hellen que sempre se mostrou disponível para auxiliar, mesmo não podendo continuar como orientadora, fico grato de ter tido seu auxílio na determinação e elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço imensamente aos meus pais, Cecília e Haroldo, pela oportunidade de realizar esta graduação, por me derem forças e acreditarem em mim. Sem vocês nada seria possível.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo geral a análise dos fertilizantes de cloreto de potássio revestidos com sulfato de cálcio, a fim de estudar a capacidade dos nutrientes de se difundirem em meio aquoso e encontrar o uso mais eficiente do fertilizante pelo solo. A função do fertilizante é corrigir a composição química do solo para equilibrar as necessidades nutricionais da planta. No entanto o uso de fertilizantes encontra problemas de eficiência no aproveitamento ideal dos nutrientes disponíveis no solo. Para tanto o uso de fertilizantes de eficiência aumentada, como o de cloreto de potássio (KCl) revestidos com sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), se mostra uma boa solução. Combinado com sua rápida absorção pelas plantas, sua composição é rica em potássio, tornando-o uma das fontes mais utilizadas deste mineral na agricultura. A força motriz para a difusão de nutrientes são as diferenças de concentração. Nos fertilizantes que aumentam a eficiência, a disseminação de nutrientes pelo solo através do revestimento de grânulos de fertilizante é devido às concentrações mais altas no núcleo dos grânulos. A difusão é o mecanismo de liberação de nutrientes observado em fertilizantes revestidos. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo utilizando método de elementos finitos via COMSOL MULTIPHYSICS® versão 5.6 que simula a difusão de fertilizantes KCl revestidos com  $\text{CaSO}_4$  em meio aquoso. Através da simulação é possível analisar o desempenho do fertilizante com boa precisão ao fenômeno observado em campo. A função "Transporte de Espécies Diluídas" (TDS) é utilizada para calcular o campo de concentração de um soluto diluído em um solvente. A partir da análise é possível concluir que a porosidade do revestimento de  $\text{CaSO}_4$  e a sua espessura influenciam no fenômeno de difusão e são diretamente relacionadas com a temperatura.

**Palavras-chave:** 1. Fertilizante de eficiência aprimorada; 2. Cloreto de potássio; 3. Sulfato de cálcio; 4. COMSOL MULTIPHYSICS® versão 5.6; 5. Elementos Finitos

## ABSTRACT

This work has as general objective the analysis of potassium chloride fertilizers coated with calcium sulfate, in order to study the ability of nutrients to diffuse in an aqueous medium and find the most efficient use of the fertilizer by the soil. The function of the fertilizer is to correct the chemical composition of the soil to balance the nutritional needs of the plant. However, the use of fertilizers encounters efficiency problems in the optimal use of nutrients available in the soil. For this, the use of fertilizers with increased efficiency, such as potassium chloride (KCl) coated with calcium sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ), is a good solution. Combined with its rapid absorption by plants, its composition is rich in potassium, making it one of the most used sources of this mineral in agriculture. The driving force for nutrient diffusion is concentration differences. In efficiency-enhancing fertilizers, the spread of nutrients through the soil through the coating of fertilizer granules is due to the higher concentrations in the granule core. Diffusion is the nutrient release mechanism observed in coated fertilizers. In this work, a model was developed using the finite element method via COMSOL MULTIPHYSICS® version 5.6 that simulates the diffusion of KCl fertilizers coated with  $\text{CaSO}_4$  in an aqueous medium. Through the simulation it is possible to analyze the performance of the fertilizer with good precision to the phenomenon observed in the field. The "Transport of Diluted Species" (TDS) function is used to calculate the concentration field of a solute diluted in a solvent. From the analysis, it is possible to conclude that the porosity of the  $\text{CaSO}_4$  coating and its thickness influence the diffusion phenomenon and are directly related to the temperature.

Keywords: 1. Improved efficiency fertilizer; 2. Potassium chloride; 3. Calcium sulfate; 4. COMSOL MULTIPHYSICS® version 5.6; 5. Finite elements

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Concentração mol/m <sup>3</sup> x Tempo (min).....	25
Figura 02 – Malha de refino normal.....	28
Figura 03 – Imagem do domínio de análise.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 10 – Temperatura 30°C.....	35
Tabela 11 – Temperatura 20°C.....	36
Tabela 12 – Temperatura 15°C.....	36
Tabela 04 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.2 e temperatura 30°C.....	29
Tabela 05 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.2 e temperatura 20°C.....	29
Tabela 06 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.2 e temperatura 15°C.....	30
Tabela 07 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.5 e temperatura 30°C.....	30
Tabela 08 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.5 e temperatura 20°C.....	31
Tabela 09 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.5 e temperatura 15°C.....	31
Tabela 10 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 30°C.....	32
Tabela 11 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 20°C.....	32
Tabela 11 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 20°C.....	33
Tabela 09 – Gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 15°C.....	34
Tabela 10 – ANOVA – Comparativo entre influências de porosidade e espessura de revestimento.....	34
Tabela 11 – ANOVA – Comparativo entre influências de porosidade e espessura de revestimento.....	34
Tabela 10 – ANOVA – Comparativo entre influências de porosidade e espessura de revestimento.....	35

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

TDS - Transporte de Espécie Diluída

CEN - Comitê Europeu de Normalização

IBDU - Isobutilideno-diureia

CDU - Crotonilideno-diureia

NPK – Nitrogênio, fósforo, potássio

ISO - International Organization for Standardization/ Draft International Standard

MEF - Método dos Elementos Finitos

MM - Massa molecular

V – Volume

C – Concentração saturada

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 FERTILIZANTES</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.1 Fertilizantes Convencionais</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.2 Fertilizantes de Eficiência Aprimorada</b> .....	<b>17</b>
<i>2.1.2.1 Fertilizantes de liberação lenta</i> .....	<i>18</i>
<i>2.1.2.2 Fertilizantes de liberação controlada</i> .....	<i>19</i>
<b>2.1.3 Fertilizante Cloreto de Potássio (KCl)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.4 Fertilizante Mineral Sulfato de Cálcio</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2 MECANISMO DE LIBERAÇÃO DE NUTRIENTE</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.1 Difusão de Compostos Químicos Através de Membrana Permeável</b> .....	<b>22</b>
<b>3. Materiais e métodos</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 COMSOL COMO FERRAMENTA PARA MODELAGEM</b> .....	<b>25</b>
<b>4. RESULTADOS E discussões</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 REVESTIMENTO DE SULFATO DE CALCIO DE POROSIDADE 0.2</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2 REVESTIMENTO DE SULFATO DE CALCIO DE POROSIDADE 0.5</b> .....	<b>30</b>
<b>4.3 REVESTIMENTO DE SULFATO DE CALCIO DE POROSIDADE 0.8</b> .....	<b>31</b>
<b>4.4 TRATAMENTO E VALIDAÇÃO DE DADOS</b> .....	<b>33</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>38</b>
<b>ANEXO 1 – Dados experimentais resultados COMSOL</b> .....	<b>41</b>
<b>ANEXO 2 - Estudo de Convergência de Malhas normal, extra fina e extra grosseira. .</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Este estudo baseia-se na análise da difusão em meio aquoso do fertilizante de cloreto de potássio revestido de sulfato de cálcio com o objetivo de encontrar o melhor aproveitamento do material pelo solo.

Desde os primórdios da sociedade um dos fatores que colaborou para que o ser humano dominasse seu território foi entender de que maneiras explorar e quais as melhores formas de se aproveitar os recursos que a terra pode fornecer. A otimização do uso dos recursos acarreta inúmeros benefícios ao produtor rural, como por exemplo, menor custo com material fertilizante, menor custo operacional e melhor aproveitamento de recursos naturais (NOVAIS et al., 2007).

O uso de fertilizantes convencionais é amplamente difundido no setor agrícola. Sua função consiste em corrigir a composição química do solo com a finalidade de equalizar a demanda de nutrientes necessários para a planta. Como cada tipo de plantio requer uma concentração específica de nutriente a uma determinada taxa de fornecimento, a escolha adequada do fertilizante é fundamental (NOVAIS et al., 2007).

Uma característica que deve ser observada nos fertilizantes é a taxa de liberação do nutriente, que pode ocorrer de forma lenta e controlada. Amplamente difundida a tecnologia dos fertilizantes de liberação controlada é aquela em que a taxa de liberação do nutriente é projetada para combinar a taxa de liberação de nutrientes com a necessidade específica da planta.

O fertilizante de cloreto de potássio (KCl) revestido com sulfato de cálcio é um exemplo de fertilizante de eficiência aprimorada, isto é, a taxa de liberação de nutrientes é prevista, podendo ser lenta ou acelerada de acordo com o planejamento de projeto do fertilizante. Apresenta um teor elevado de potássio em sua composição, o que o torna uma das fontes deste mineral mais utilizadas na agricultura.

Para que ocorra a difusão do fertilizante é necessário que exista um gradiente concentração como força motriz. Nos fertilizantes de eficiência aprimorada a propagação do

nutriente no solo deve-se pela maior concentração no interior do grão em relação ao meio externo.

Utilizando o software COMSOL MULTIPHYSICS® versão 5.6 foi possível criar uma modelagem analítica da difusão de fertilizante de KCl revestido de CaSO<sub>4</sub>, com a vantagem de prever o comportamento do fertilizante, o que é benéfico para reduzir os custos inerentes dos testes em campo.

Depois de definidos os parâmetros de geometria, características e parâmetros da física envolvida no processo, o software apresentará os resultados de simulação para o grão de fertilizante de cloreto de potássio revestido com sulfato de cálcio a fim de obter soluções de difusão otimizada.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a difusividade do fertilizante de eficiência aprimorada de KCl revestido com sulfato de cálcio em ambiente aquoso, utilizando o software COMSOL MULTIPHYSICS® versão 5.6.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a difusividade de fertilizante de cloreto de potássio em meio aquoso em condições controladas e tempo de observação de 1800 minutos;
- Analisar o revestimento de sulfato de cálcio com espessuras de 0.064 mm, 0.2 mm e 0.1mm no tempo de difusão;
- Analisar a influência das porosidades 0.8, 0.5 e 0.2 na difusão do fertilizante;
- Averiguar o comportamento da espessura e porosidade nas temperaturas ambientes de 30°C, 20°C e 15°C.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FERTILIZANTES

A evolução humana está intimamente relacionada com a melhoria da produção rural. Um dos fatores que tem contribuído para a dominação humana de seus territórios desde o início das sociedades foi entender como explorar e qual a melhor forma de utilizar os recursos que a terra proporciona. Hoje, dispomos de tecnologias que fornecem uma visão mais ampla sobre quais dinâmicas físicas, químicas e geológicas contribuem ou limitam a expansão da agricultura. O Brasil atualmente é um dos maiores produtores agrícolas. Isto se dá principalmente pela grande área agricultável e pelo clima favorável. Associado a isto, conta com suporte tecnológico e grande incentivo governamental (LOPES; LUIZ; GUIMARÃES GUILHERME, [s.d.]).

A otimização do uso dos recursos acarreta inúmeros benefícios ao produtor rural. Como por exemplo menor custo com material fertilizante, menor custo operacional e melhor aproveitamento de recursos naturais (LOPES; LUIZ; GUIMARÃES GUILHERME, [s.d.]).

Este trabalho aborda o uso de fertilizante de eficiência aprimorada como técnica de intervenção para correção das características do solo a fim de adapta-lo ao plantio.

#### 2.1.1 Fertilizantes Convencionais

O uso de fertilizantes é amplamente difundido no setor agrícola. Os fertilizantes convencionais compreendem uma classe de fertilizantes na qual não se observa nenhuma tecnologia de controle de liberação. Sua função consiste em corrigir a composição química do solo com a finalidade de equalizar a demanda de nutrientes necessários para a planta. Como cada tipo de plantio requer uma concentração específica de nutriente a uma determinada taxa de fornecimento, a escolha adequada do fertilizante é fundamental. Além disto, para que as plantas cresçam saudáveis é necessário que haja disponibilidade de componentes imprescindíveis ao bom desenvolvimento da planta, por exemplo: oxigênio, hidrogênio, carbono, nitrogênio, fósforo, ferro, potássio, zinco, entre outros compostos e substâncias químicas que muitas vezes se apresentam em quantidades insuficientes no solo ou no ambiente de cultivo (NOVAIS et al., 2007).

A fim de classificar os nutrientes importantes para as plantas, utiliza-se a denominação macronutriente e micronutriente. Minerais utilizados na ordem de kg/ha são definidos como macronutrientes; já os nutrientes ministrados em g/ha são ditos micronutrientes. Exemplos de macronutrientes são: Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio, Fósforo, Enxofre, Cálcio, Magnésio e Potássio (NOVAIS et al., 2007).

No ramo da agricultura os nutrientes são classificados quanto a sua origem, podendo ser orgânicos ou minerais. São orgânicos os constituídos por carbono, hidrogênio e oxigênio. Os ditos minerais são subdivididos em macronutriente primários (ex. Nitrogênio, Potássio e Fósforo); enquanto que os macronutrientes secundários são o Cálcio, Magnésio e Enxofre. Como micronutrientes podemos citar o Boro (B), Cloro (Cl), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Selênio (Se), Silício (Si) e Zinco (Zn) (BRASIL, 2018).

Os fertilizantes recebem ainda classificação quanto o pH, podendo ser ácidos quando possuem em sua composição fosfato, nitrato ou sulfato de amônia, ureia, sangue seco ou amônia anidra; alcalinos ou básicos quando apresentam em sua composição nitrato de sódio, calcário dolomítico, cal, nitrato de potássio entre outros; podem ainda ser classificados como neutros quando não influenciam na acidez do solo, podendo conter nitrocal, superfosfato e cloreto de potássio (“Fertilizantes”, 2019).

### 2.1.2 Fertilizantes de Eficiência Aprimorada

Uma característica que deve ser observada nos fertilizantes é a taxa de liberação do nutriente. É importante observar qual a demanda de determinado nutriente para a planta, assim estipular qual será a melhor taxa de fornecimento deste nutriente que irá atender à necessidade, sem que haja desperdícios ou déficit de nutriente (SHAVIV, 2001).

Nos últimos anos vêm ocorrendo um aumento no interesse em formulações e uso de aditivos que ajudam a aumentar a eficiência dos fertilizantes. Este fertilizante de eficiência aumentada funciona equilibrando a quantidade de nutriente disponível com a necessidade metabólica da planta através do encapsulamento do grão, que o protege da dissolução e lixiviação do solo. Dependendo da espessura do revestimento, das concentrações de fertilizantes no interior do grão e da porosidade do revestimento a proteção pode ser de poucos dias ou alguns meses. O encapsulamento possibilita que os nutrientes sejam liberados de forma

controlada e gradativa, permitindo reduzir a quantidade utilizada e o desperdício (VALDERRAMA e BUZZETTI, 2017).

Os benefícios dos fertilizantes aprimorados vão desde economia na produção à benefícios fisiológicos e ambientais (SHAVIV, 2001). Haja visto que com maior eficiência no uso de fertilizantes resulta em uma menor quantidade de agentes químicos no solo. Considerando também que o uso controlado reduz o trabalho necessário para manutenção da plantação, diminuindo os custos operacionais.

Embora se mostre viável o uso dos fertilizantes de eficiência aprimorada, existem limitações inerentes ao seu uso. Uma das questões que limitam seu uso é o custo que pode ser de 2 a 8 vezes superior aos fertilizantes convencionais. (VALDERRAMA et al., 2014).

Os fertilizantes de eficiência aprimorada podem ser divididos em 2 grupos: de liberação lenta e/ou controlada, e estabilizadores. Os de liberação lenta dosam a adição de compostos químicos com o tempo, enquanto que os estabilizadores controlam a liberação atuando como inibidores de uréase e inibidores de nitrificação, podendo ser referidos como adubos convencionais, solúveis em água, contendo aditivos capazes de alterar ou inibir processos enzimáticos e de micro-organismos do solo. (CHIEN, PROCHNOW e CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010).

Observa-se na literatura o uso equivocado dos termos “lenta” e “controlada”, sendo muitas vezes tratados como sinônimos. A liberação lenta ou controlada de nutrientes, pode ser alcançada pela redução ou ajuste da solubilidade do material em água por meio de revestimentos semipermeáveis, oclusão ou outras formas químicas, hidrólise lenta de compostos de baixa solubilidade em água ou por outros mecanismos (SHAVIV, 2001). De acordo com Shaviv (2005), os fertilizantes de liberação lenta envolvem a liberação do nutriente em uma taxa mais lenta do que é habitual, mas a taxa, padrão e a duração da liberação não são bem estabelecidos e controlados. Por outro lado, nos sistemas de liberação controlada a taxa, o padrão e a duração da liberação são ajustados por fatores conhecidos e controláveis no processo de produção do fertilizante (SHAVIV, 2005).

#### *2.1.2.1 Fertilizantes de liberação lenta*

A liberação de nutrientes no solo tanto para fertilizantes de ação aprimorada quanto os convencionais são função da ação microbiana do solo, solubilidade, tamanho da partícula,

temperatura, umidade, pH e aeração (SEMPEHO et al., 2014; VALDERRAMA e BUZETTI, 2017). Como foi dito anteriormente os fertilizantes de ação lenta apresentam uma taxa de liberação menor que os fertilizantes convencionais de referência.

Segundo Kloth (1996), o Comitê Europeu de Normalização (CEN) estipula que para que um fertilizante seja dito de liberação lenta, ele deve seguir a seguinte taxa de liberação de nutrientes, a 25°C:

- Não mais de 15% liberados em 24 horas;
- Não mais de 75% liberados em 28 dias;
- Pelo menos 75% liberados no tempo de liberação declarado.

Existem exemplos de fertilizantes de liberação lenta de origem industrial obtidos através das reações de condensação de ureia e ureia-aldeídos (VALDERRAMA e BUZETTI, 2017). Este processo de condensação da ureia consiste em aumentar a dimensão da molécula a fim de reduzir sua solubilidade em água (VALDERRAMA e BUZETTI, 2017). Por outro lado, existem também os de origem natural, como adubos verdes, coberturas mortas, esterco e compostos (RODELLA, 2018). Além desses, outros fertilizantes também se incluem nessa categoria, tais como, isobutilideno-diureia (IBDU), crotonilideno-diureia (CDU), ureias supergrânulos e demais produtos (VALDERRAMA e BUZETTI, 2017).

#### *2.1.2.2 Fertilizantes de liberação controlada*

Tem como objetivo manter a sincronização entre a liberação de nutrientes ao longo do tempo e as necessidades de nutrientes das plantas em diferentes estágios de seu desenvolvimento.

Além do tamanho e número de poros, a duração também pode ser prevista pela manipulação de algumas das variáveis de controle no processo de fabricação, como a natureza e a espessura do revestimento (TRENKEL, 2010). No entanto, outros fatores podem causar alterações nas taxas de liberação de nutrientes, como temperatura e umidade do solo. A temperatura aumenta para 24 vezes a permeabilidade da membrana revestida, levando a uma extensão dessa proteção. Nutrientes dissolvidos aumentam a pressão osmótica, que por sua vez ajuda a aumentar a taxa de liberação de nutrientes por difusão (VALDERRAMA e BUZETTI, 2017).

### 2.1.3 Fertilizante Cloreto de Potássio (KCl)

Pertencente ao grupo dos fertilizantes potássicos o cloreto de potássio (KCl) é um dos principais fertilizantes aplicados nas lavouras. Segundo a INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 39, de 8 de agosto de 2018, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (IMPrensa Nacional, 2018), estes fertilizantes devem apresentar em sua composição 50% de K<sub>2</sub>O, sendo o precursor de potássio (K) na agricultura e englobando 90% dos adubos potássicos. Aliado a uma disponibilização rápida para as plantas, o cloreto de potássio tem um teor bastante elevado de potássio em sua composição o que o torna uma das fontes deste mineral mais utilizadas na agricultura.

No Brasil, o cloreto de potássio é largamente utilizado no manejo agrícola. Dados do Ministério da Agricultura (ESTUDO ESTRATÉGICO DE PRODUÇÃO NACIONAL DE FERTILIZANTES, 2020), mostram que 80% do potássio utilizado no mundo é oriundo do Canadá, de Israel, da Rússia, da Bielorrússia e da Alemanha. E que mais de 75% das reservas mundiais de fosfato de rocha estão localizadas no Marrocos e no Sahara Ocidental ocupado pelo Marrocos.

Atualmente, o Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto do mundo, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. O principal nutriente aplicado no Brasil é o potássio, com 38%, seguido por cálcio, com 33%, e nitrogênio, com 29%. A maior cultura agrícola brasileira é a soja, que demanda mais de 40% dos fertilizantes aplicados.

(...)

A velocidade de crescimento da demanda brasileira tem superado a taxa de crescimento mundial e seu atendimento tem ocorrido via aumento de importações. O país deixou de ser exportador de fertilizantes para ser grande importador entre 1992 e 2020. Mais de 80% (oitenta por cento) dos fertilizantes consumidos no Brasil são de origem estrangeira, de maneira que a produção nacional responde por menos de 20% (vinte por cento) da demanda do país. (ESTUDO ESTRATÉGICO DE PRODUÇÃO NACIONAL DE FERTILIZANTES, 2020)

Fundamental para o metabolismo vegetal, o K perde em quantidade de uso somente outro macronutriente, o nitrogênio. Impactando fortemente produtividade, o K possui papel importante no processo de fotossíntese e produção de carboidratos na planta. Auxilia também no crescimento radicular e em profundidade das raízes, sendo fundamental para que a planta

consiga captar água. Sem este macronutriente a planta fica deficiente em proteínas e minerais, sofrendo um decréscimo de qualidade.

Envolvido em muitas funções vitais para o desenvolvimento da planta, o potássio é um dos nutrientes mais consumidos. Impactando diretamente na qualidade do produto agrícola. Influindo na ativação enzimática, colaborando na síntese proteica e fotossíntese, promovendo transporte de fotossintatos no floema, auxiliando no crescimento celular e na regulação do potencial hídrico das células, amenização ainda os estresses bióticos e abióticos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Manual de Adubação e de Calagem Para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, 2004).

Assim fica evidente a importância do KCl no manejo agrícola. Isto se torna especialmente relevante para o Brasil pois, segundo a Embrapa, no estudo *Aspectos relacionados ao mapeamento da disponibilidade de potássio nos solos do Brasil*, 2008, boa parte dos solos brasileiros tem baixa disponibilidade desse nutriente.

#### 2.1.4 Fertilizante Mineral Sulfato de Cálcio

Neste estudo o gesso faz parte da casca de revestimento poroso e, mesmo sendo um fertilizante, é observado apenas o aspecto filtrante deste. O sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), também conhecido como gesso agrícola, é um material usado para corrigir, condicionar e fertilizar o solo. A baixa concentração de sulfato de cálcio tornará o solo compacto e impedirá a infiltração de ar e água. Se não houver sulfato de cálcio suficiente, o solo perderá sua capacidade de filtração e ficará saturado com sal ou outros elementos prejudiciais ao desenvolvimento saudável das plantas (TRAY TECNOLOGIA, 2013).

Além de ser um precursor de cálcio, que é o quarto elemento mais necessário para as plantas no processo de cultivo e é essencial para a divisão celular e construção da parede celular, o sulfato de cálcio considerado um aditivo universal para o solo que pode melhorar a aeração e a penetração da água, aumentar o pH de solos ácidos e ajudar na germinação das sementes. Além disso, o sulfato de cálcio pode controlar o odor de compostos orgânicos no solo, evitar que o solo da superfície descasque e proteger a retenção de nitrogênio (TRAY TECNOLOGIA, 2013).

## 2.2 MECANISMO DE LIBERAÇÃO DE NUTRIENTE

Os fertilizantes revestidos, como dito anteriormente, são fertilizantes convencionais solúveis que recebem uma cobertura e/ou proteção de um material com solubilidade em água pré-determinada. Esta cobertura controla a saída e entrada de água no grão fertilizante, bem como a taxa de dissolução, a disponibilidade de nutrientes e a duração de liberação (TRENKEL, 2010). Nos fertilizantes recobertos, a disponibilidade dos nutrientes às plantas ocorre por meio do mecanismo de difusão que segue a Lei de Fick, que define o surgimento de um fluxo de partículas ou de temperatura quando ocorre um gradiente de concentração (força motriz). A Lei de Fick é uma consequência estatística do movimento aleatório das partículas, tendendo assim a homogeneizar e uniformizar a dissolução (PASQUILL; SMITH, 1983). A lei de Fick é uma lei quantitativa diferencial, que pode ser escrita como:

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Sendo J o fluxo molar (mol/m<sup>2</sup>.s), D coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>/s), e o termo dC/dx como o gradiente de concentração (mol/m<sup>3</sup>) em função do raio de partícula.

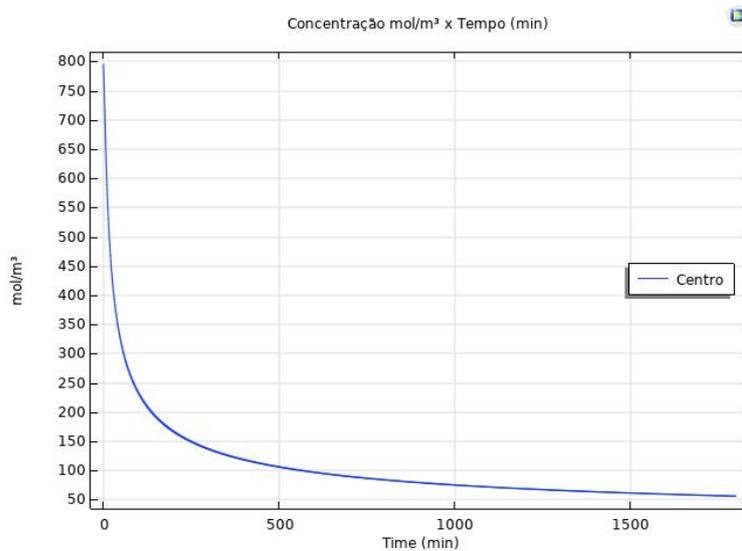
A dissolução do fertilizante, de acordo com a Lei de Fick, ocorre após a entrada de água no interior do grão, que passa a ser dissolvido. Após esta dissolução ocorre o aumento da pressão osmótica dentro do grão forçando a liberação dos nutrientes gradualmente até chegarem a planta (AZEEM et al., 2014). A passagem de nutrientes do meio ambiente para o grão é viabilizada pela presença de poros no recobrimento (VALDERRAMA e BUZZETTI, 2017).

### 2.2.1 Difusão de Compostos Químicos Através de Membrana Permeável

A difusão é o mecanismo de liberação de nutrientes observado nos fertilizantes revestidos. Neste trabalho foi modelado um fertilizante revestido com CaSO<sub>4</sub>, conhecido usualmente como gesso agrícola. Na literatura este modelo não é recorrente, sendo mais comum observarmos modelos revestidos com polímeros. Como referência comparativa usamos o estudo de Raban (1994) (apud Shaviv, 2000). Neste estudo Raban descreve o processo de difusão em três fases. Na primeira, dita fase de latência (lag), verifica-se pouca liberação de nutriente. Nesta fase inicial o grão fertilizante admite vapor d'água, que hidrata os sais de fertilizante, gerando um aumento de massa e ocasionando em um aumento da pressão

hidrostática no interior do grão. O segundo estágio de difusão é um período de liberação linear (linear release). Neste estágio a taxa de liberação de nutriente é constante, pois nesta fase ocorre presença de sais de fertilizante não dissolvidos que mantem condições de saturação de nutrientes na solução do interior do grão relativamente as concentrações de íons na solução de nutrientes em torno do grão.

Segundo os estudos de Raban o movimento dos nutrientes pode ocorrer ainda pelo transporte de massa através do revestimento quando ocorre a situação de saturação interna. Caso ocorra um aumento excessivo, tal que, extrapole a resistência da parede do grão, este pode vir a colapsar, liberando o fertilizante instantaneamente. Esta situação caracteriza um caso de falha (failure). A terceira fase é a fase de declínio (decay), onde a taxa de liberação de nutrientes é decrescente. Esta fase é identificada pela redução do gradiente de condução e redução da concentração de fertilizante no interior da capsula fertilizante (figura 01).



Fonte: Comsol Multiphysics 5.6

O professor Emérito Abraham Shaviv aplicou o modelo de difusão e o princípio físico de potencial de água para testar três fertilizantes minerais do sistema NPK, que são os fertilizantes precursores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), com diferentes tecnologias de revestimento a temperaturas de 5, 15, 20, 30 e 40 °C. Neste trabalho foi feita avaliação em água e em areia úmida e não foi constatada diferença apreciável na taxa de

liberação entre os dois meios de propagação. Contudo eles observaram diferença considerável entre os materiais para a liberação em água. O revestimento de resina termoendurecida demonstrou menor variação com a mudança da temperatura, pois liberou 40 % da massa total de nutrientes a 5 °C, chegando a 80 % a 40 °C. A rápida liberação inicial foi seguida por uma taxa constante decrescente ao longo do tempo. O revestimento de resina termoplástica foi mais eficaz em liberar os nutrientes gradativamente (20 a 40 %) na faixa de temperatura de 20 a 30 °C. No entanto, acelerou a liberação (40 a 60 %) na faixa de temperatura de 30 a 40 °C (Adams et al., 2013).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COMSOL COMO FERRAMENTA PARA MODELAGEM

O COMSOL Multiphysics é uma ferramenta de análise computacional para modelagem e exames de fenômenos físicos. Neste trabalho utilizou-se a função “Transporte de Espécie Diluída” (TDS). A interface TDS é usada para calcular o campo de concentração de um soluto diluído em um solvente. O transporte e as reações das espécies dissolvidas em um gás, líquido ou sólido podem ser calculados. A força motriz para o transporte será a difusão pela lei de Fick, sendo possível analisar a difusão em meios porosos saturados ou parcialmente saturados.

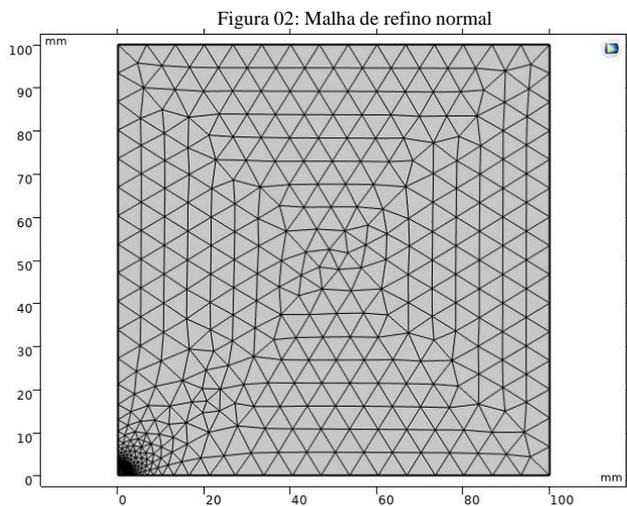
O software COMSOL Multiphysics® é utilizado para realizar a análise numérica, cujos dados são validados por modelagem analítica baseada no coeficiente de difusividade do material. O estudo teórico deste problema pode auxiliar no projeto e na otimização da geometria e configuração deste tipo de material fertilizante de cloreto de potássio e sulfato de cálcio, com a vantagem de prever o comportamento do fertilizante, tendo como benefício a redução de custos inerentes aos testes convencionais em campo.

Para o desenvolvimento dos dados utilizou-se o software COMSOL MULTIPHYSICS® versão 5.6, na criação da geometria, implementação das condições físicas, criação da malha e resolução do sistema de equações gerado pelo modelo. Os materiais utilizados neste modelo estão disponíveis na biblioteca de materiais do software.

Para determinar soluções aproximadas de problemas o software utiliza o procedimento numérico do Método dos Elementos Finitos (MEF), que consiste em subdividir o domínio de análise em pequenas partições. De igual modo, o estudo da “Liberação controlada de fertilizantes” realizado por Vitória S. Favini (2018), utilizou o MEF no software COMSOL na análise da difusão de ureia em ambiente aquoso, realizando simulações computacionais analisando se o fertilizante foi bem dimensionado a partir do modelo proposto. Para o presente modelo define-se uma malha de refino “normal” (Anexo 2 – Estudo de convergência de malha), gerando 724 nós e 1348 elementos de malha triangular (figura 02).

**Comentado [L1]:** Estudo de comparação

**Comentado [L2]:** Especificação das características de malha



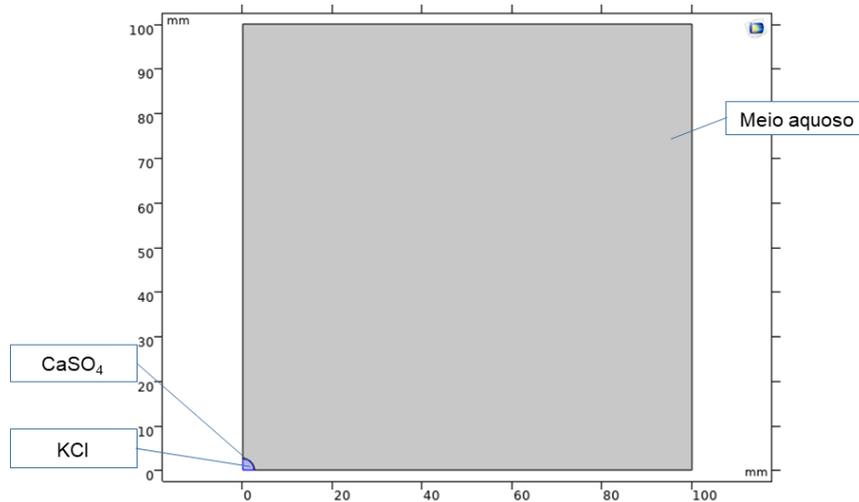
Fonte: Elaborada pelo autor

Para criar o modelo inicialmente selecionou-se a dimensão do espaço em duas dimensões. Após a seleção do plano de criação, escolhe-se a modalidade física que se aplica ao modelo. Neste caso, como se trata de um sólido concentrado que irá difundir pelo meio em que está inserido, utiliza-se a física TDS.

A geometria do modelo é estabelecida após as configurações iniciais. Para este estudo, o grão de fertilizante considerado é aproximado por uma esfera de raio de 2,5mm. Neste trabalho, o modelo de fertilizante utilizado é do tipo reservatório, que possui núcleo contendo o material a ser dispersado, envolvido por uma camada de revestimento sulfato de cálcio de espessura 0,1mm, 0,2mm e 0,064mm, e porosidade 0,2; 0,5 e 0,8.

Delimitou-se um domínio de análise representado no plano como um retângulo de 100 mm de lado, em que no ponto (0,0) fica localizado o centro do grão fertilizante, (figura 03). É necessário delimitar as partições do modelo, definindo o material de que cada parte será constituída. Para o núcleo selecionamos KCl, representado na figura 03 pela região em azul.

Figura 03: Definição da geometria. Na região em azul encontra-se o grão de fertilizante de KCl revestido pela camada de CaSO<sub>4</sub>, inserido no meio aquoso.



Fonte: Elaborada pelo autor

Nos fertilizantes revestidos de liberação controlada a função principal do revestimento é a retenção e liberação controlada do nutriente presente no núcleo. A propriedade que confere esta característica é a porosidade presente no revestimento de sulfato de cálcio, que tem a função de reter e controlar a liberação de nutrientes do solo. Sendo a difusão uma função da quantidade de poros no revestimento, é fundamental observar este aspecto para fazer uma análise mais próxima do fenômeno em campo. Neste modelo foi definido a porosidade de 0.1, 0.5 e 0.8 do revestimento de CaSO<sub>4</sub>.

Após definida a parte de geometria, é necessário informar o software quais parâmetros serão relevantes para a análise física. Nesta etapa se estabeleceu a temperatura de análise em 15°C, 20°C e 30°C; coeficiente de difusão do KCl no meio em  $2.231 \times 10^{-9} \text{ [m}^2/\text{s]}$ . Para definir a concentração inicial no interior do núcleo em  $45.122 \text{ mol/m}^3$ , foi considerado que a concentração saturada do KCl em água é  $4.43 \text{ mol/L}$ ; a massa na condição de parada é dada pela relação  $C = m/MM \times V$ , em que C é a concentração saturada de  $4430 \text{ mol/m}^3$ , MM a massa molecular do KCl e V o volume da esfera ( $6.54 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ), obtendo-se um valor  $2,77 \times 10^{-2} \text{ g}$  de

KCl no núcleo. No instante inicial a concentração no meio aquoso é de  $0 \text{ mol/m}^3$ . Neste estudo estabeleceu o tempo de observação em 1800 minutos.

Depois de definidos os parâmetros de geometria, características de cada parte do modelo e orientação dos parâmetros da física envolvida no processo, o software apresenta os resultados de simulação para o grão de fertilizante de cloreto de potássio revestido com sulfato de cálcio, nas espessuras de 0.1, 0.2 e 0.064, porosidade do revestimento de 0.2, 0.5 e 0.8 e em temperatura de análise de  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ .

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Esta seção se destina a introdução e discussão dos resultados obtidos nos modelos considerados no estudo, apresentando os dados obtidos da média aritmética da concentração de KCl, ponto a ponto na linha que liga a posição externa ao revestimento poroso de  $\text{CaSO}_4$ , ao ponto limite do domínio, localizado na coordenada (100,100), no intervalo de tempo de 30 horas (1800 minutos).

##### **4.1 REVESTIMENTO DE SULFATO DE CALCIO DE POROSIDADE 0.2**

Iniciaremos o estudo da difusão do fertilizante de KCl em função das espessuras de revestimento de 0.064 mm, 0.2 mm e 0.1 mm no tempo de 30 horas, com revestimento de  $\text{CaSO}_4$  com porosidade de 0.2 as temperaturas de  $30^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  e  $15^\circ\text{C}$ . (Dados numéricos nas tabelas em anexo).

Plotando os dados gera-se o gráfico de porosidade 0.2 e temperatura de  $30^\circ\text{C}$   $20^\circ\text{C}$  e  $15^\circ\text{C}$  de concentração ( $\text{mol/m}^3$ ) por tempo (minutos) para cada espessura na porosidade definida.

Tabela 04 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade (0.2) e temperatura 30°C

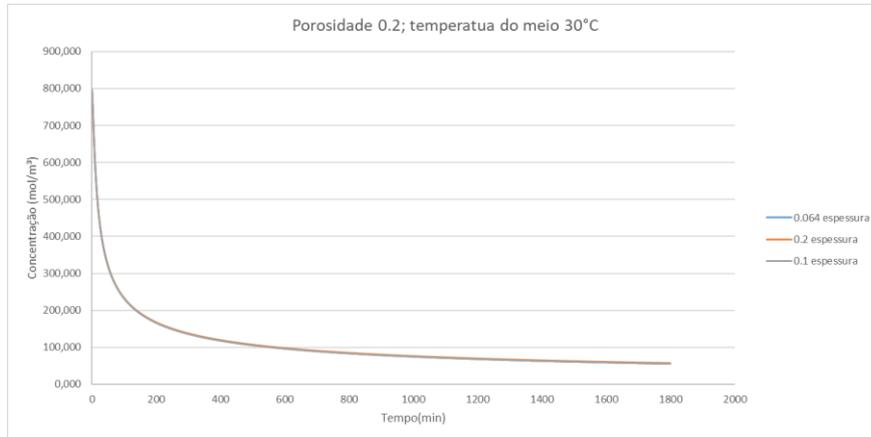


Tabela 05 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade (0.2) e temperatura 20°C

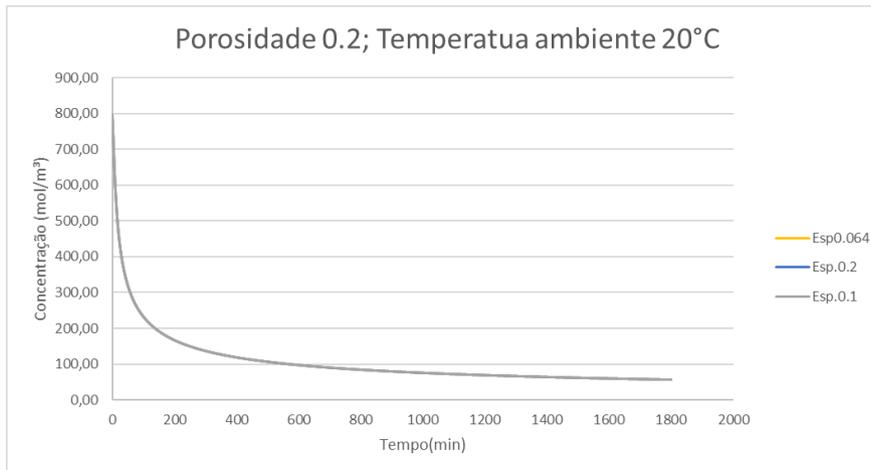
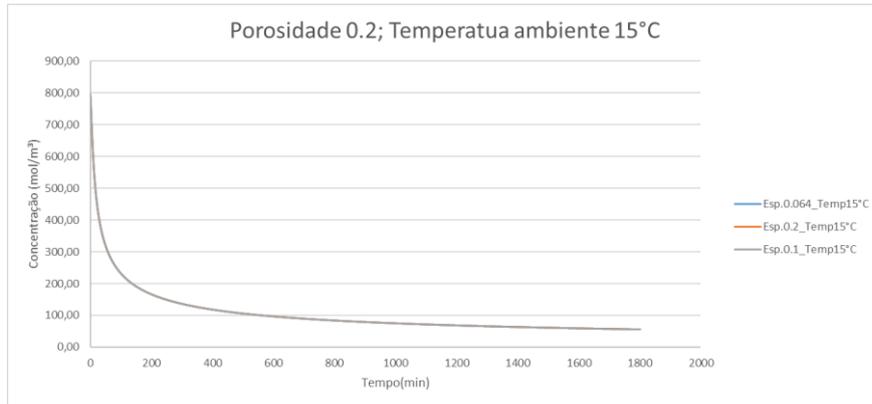


Tabela 06 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.2 e temperatura 15°C



#### 4.2 REVESTIMENTO DE SULFATO DE CALCIO DE POROSIDADE 0.5

Prosegue-se o estudo da difusão do fertilizante de KCl em função das espessuras de revestimento de 0.064, 0.2 e 0.1 no tempo de 30 horas, com revestimento de  $\text{CaSO}_4$  com porosidade de 0.5 as temperaturas de 30°C, 20°C e 15°C.

Tabela 07 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.5 e temperatura 30°C

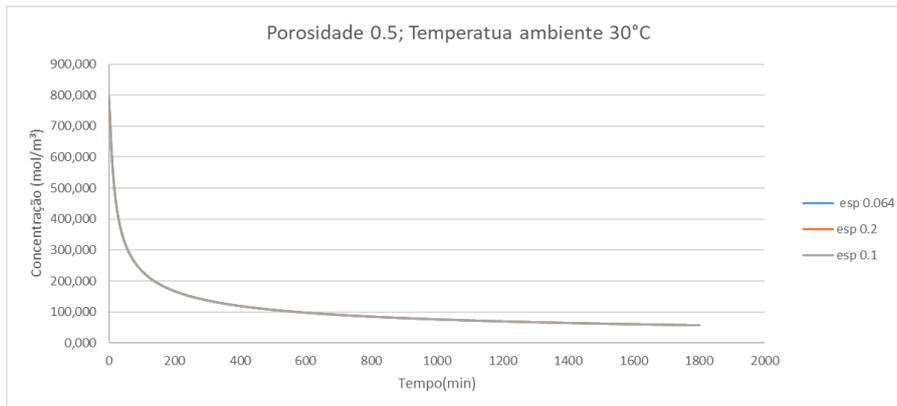


Tabela 08 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.5 e temperatura 20°C

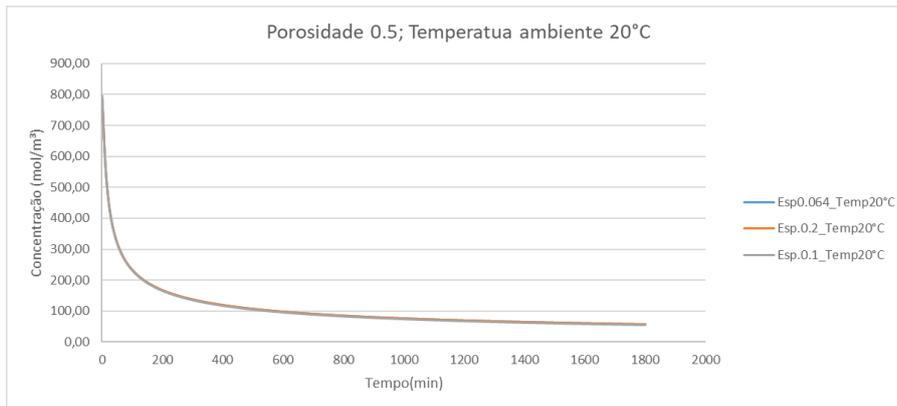
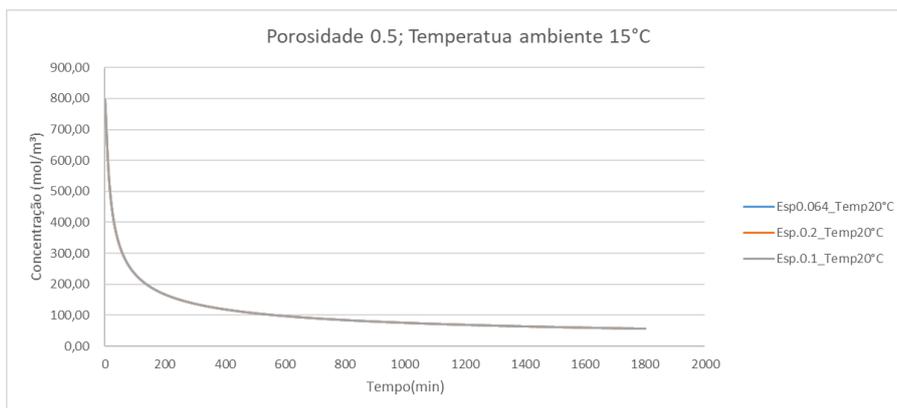


Tabela 09 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.5 e temperatura 15°C



#### 4.3 REVESTIMENTO DE SULFATO DE CALCIO DE POROSIDADE 0.8

Prossegue-se o estudo da difusão do fertilizante de KCl em função das espessuras de revestimento de 0.064, 0.2 e 0.1 no tempo de 30 horas, com revestimento de  $\text{CaSO}_4$  com porosidade de 0.8 a temperatura de 30°C, 20°C e 15°C.

Tabela 10 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 30°C

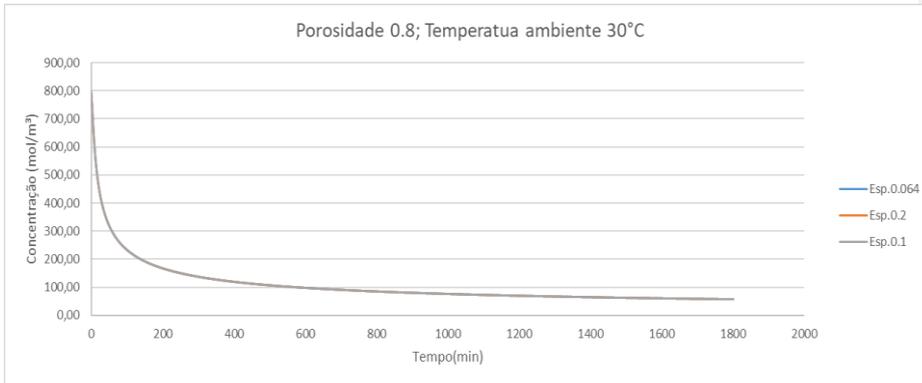


Tabela 11 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 20°C

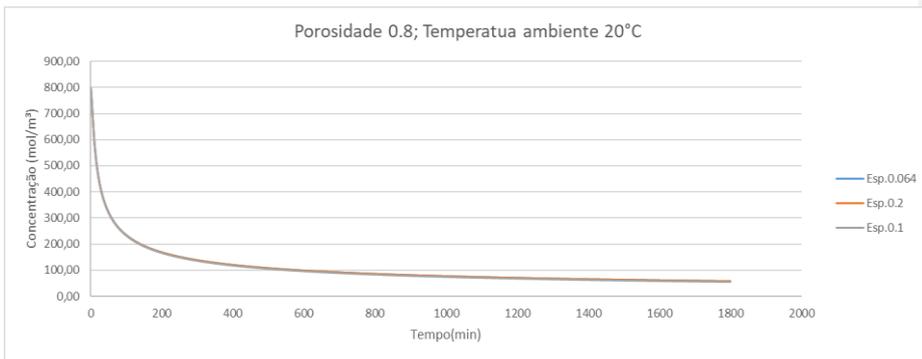
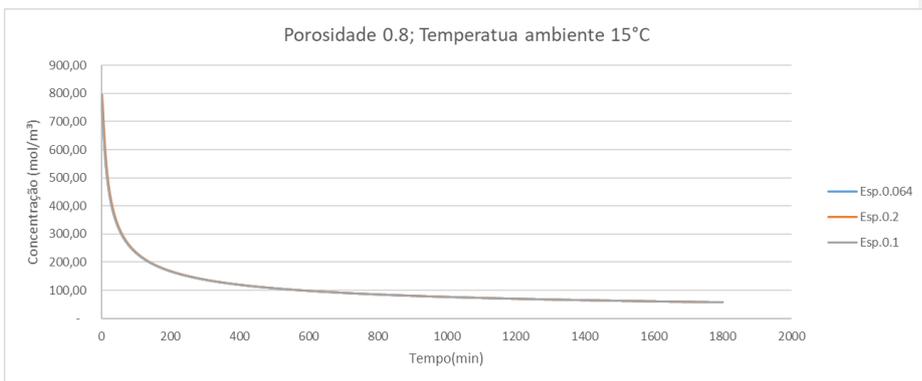


Tabela 12 – gráfico da difusão de KCl em função da porosidade 0.8 e temperatura 15°C



#### 4.4 TRATAMENTO E VALIDAÇÃO DE DADOS

A partir dos gráficos, é possível calcular a integral das curvas obtidas. Esta integral corresponde a variação da concentração com o tempo. A área calculada abaixo da curva, ou a integral da curva, expressa a média da variação da concentração de KCl ao longo do tempo de análise no domínio de controle. Esta integral representa a difusão nas condições de contorno definida no estudo. Na tabela seguinte observa-se o valor calculado da integral para cada espessura de revestimento nas temperaturas 30°C, 20°C e 15°C.

A fim de validar os dados obtidos pelo COMSOL, aplicou-se uma ferramenta estatística de análise de variância, chamada Anova. Para realizar esta comparação utilizou-se Anova com fator duplo sem repetição. Esta é uma ferramenta para comparar simultaneamente diferentes médias. Nesta avaliação compara-se os valores de entrada, que são as difusividades em função das espessuras, com a porosidade. Desta forma obtemos os resultados estatísticos:

Tabela 13 – ANOVA – Comparativo entre influências de porosidade e espessura de revestimento

Temperatura de 30°C						
POROSIDADE	ESPESSURA 0.064	ESPESSURA 0.2	ESPESSURA 0.1			
Porosidade 0.8	369,7315	369,602	369,54			
Porosidade 0.5	369,7765	369,317	369,54			
Porosidade 0.2	369,7765	369,317	369,54			

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	0,0128	2	0,0064	0,599531616	0,591929	6,944272
Colunas	0,1875965	2	0,09379825	8,786721311	0,034378	6,944272
Erro	0,0427	4	0,010675			
Total	0,2430965	8				

O cálculo da anova fornece um F-calculado menor que F-crítico. Isto significa que a hipótese H0 é aceita. Isto quer dizer que os dados não apresentam diferença entre si. Conforme este estudo, os dados em linha, dados de variação de porosidade do revestimento de sulfato de cálcio, não exercem influência sobre a difusividade, nas condições de 30°C. Ainda nesta análise, observamos que o F-calculado para os dados em coluna, neste caso a espessura, é superior ao F-crítico. O que representa aceitar a hipótese H1, o que quer dizer que os dados em

coluna são diferentes entre si. Neste caso então, conclui-se que a difusividade é diretamente influenciada pela variação de espessura, nas condições de análise aqui estipuladas.

Tabela 14 – ANOVA – Comparativo entre influências de porosidade e espessura de revestimento

TEMPERATURA DE 20°C			
POROSIDADE	ESPESSURA 0.064mm	ESPESSURA 0.2mm	ESPESSURA 0.1mm
Porosidade 0.8	397,99	397,56	397,72
Porosidade 0.5	369,78	397,56	397,72
Porosidade 0.2	369,78	397,56	397,72

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	176,8046122	2	88,40230608	1	0,444444444	6,94427191
Colunas	681,3625355	2	340,6812678	3,853759962	0,116732066	6,94427191
Erro	353,6092243	4	88,40230608			
Total	1211,776372	8				

A partir da análise estatística, fica evidenciado que nas condições de contorno adotadas neste estudo a 20°C, a porosidade (dados de entrada em linha) e espessura (dados de entrada em coluna) não tem influência na difusividade.

Tabela 15 – ANOVA – Comparativo entre influências de porosidade e espessura de revestimento

TEMPERATURA DE 15°C			
POROSIDADE	ESPESSURA 0.064mm	ESPESSURA 0.2mm	ESPESSURA 0.1mm
Porosidade 0.8	369,78	397,56	397,72
Porosidade 0.5	397,99	397,56	397,72
Porosidade 0.2	369,78	369,32	369,54

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	1237,575859	2	618,7879295	6,99832023	0,049401155	6,94427191
Colunas	164,0258211	2	82,01291054	0,927543321	0,466716689	6,94427191
Erro	353,6779737	4	88,41949343			
Total	1755,279654	8				

Observando os dados conclui-se que a espessura de revestimento de 0.064mm apresentou a maior difusividade nas temperaturas analisadas. Sendo que entre as temperaturas de 15°C e 20°C o revestimento de 0.064mm combinado com a porosidade de 0.8 apresentou

um melhor desempenho de dispersão de cloreto de potássio. Próximo dos 30°C o desempenho de liberação controlada de fertilizante se mostrou similar para as porosidades de 0.5 e 0.2.

Desta forma o estudo da difusão de fertilizantes de eficiência aprimorada de KCl encapsulado em sulfato de cálcio, via simulação em Comsol e análise de variância, afirma que a eficiência do grão de fertilizante sofre influência com a variação de temperatura. Portanto, o grão de fertilizante deve ser projetado de acordo com a temperatura ambiente, tendo em vista que o revestimento de 0.064 mm exerce maior influência na difusividade do que fator de porosidade.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo estudar a difusividade do fertilizante de eficiência aprimorada de KCl revestido com sulfato de cálcio em ambiente aquoso, utilizando o método de elementos finitos via software COMSOL MULTIPHYSICS® versão 5.6.

Inicialmente foram definidos os parâmetros de geometria, bem como as características de cada parte do modelo e foi realizada a orientação dos parâmetros da física envolvida no processo. O COMSOL apresentou os resultados de simulação para o grão de fertilizante de cloreto de potássio revestido com sulfato de cálcio, nas espessuras de 0.1mm, 0.2mm e 0.064mm, porosidade do revestimento de 0.1, 0.5 e 0.8 e em temperatura de análise de 15°C, 20°C e 30°C.

Em análise na influência das porosidades, em 30°C o desempenho de liberação controlada de fertilizante se mostrou similar para as porosidades de 0.5 e 0.2

Por meio da análise de dados obtidos na simulação foi possível discutir os resultados no tempo de análise de 1800 minutos. A partir dos dados obtidos é possível concluir que tanto a porosidade do revestimento de  $\text{CaSO}_4$  quanto a sua espessura, impactam no fenômeno de difusão e são diretamente relacionadas com a temperatura. Nas condições de contorno de 30°C concluiu-se que a difusividade do grão de fertilizante de eficiência aumentada de cloreto de potássio revestido de sulfato de potássio é diretamente influenciada pela variação de espessura.

A partir dos dados obtidos verificou-se que o revestimento de espessura 0.064 mm e porosidade 0.8 apresentou melhor desempenho entre 15°C e 20°C.

Portanto, os grânulos de fertilizantes devem ser projetados de acordo com a temperatura ambiente, considerando que em temperaturas em torno de 30°C, o efeito da espessura do revestimento na difusividade é maior que o fator de porosidade, enquanto que em baixas temperaturas o fator de porosidade tem uma implicação maior na difusividade. E que para as temperaturas analisadas a espessura de 0.064 mm apresentou o melhor desempenho de liberação do fertilizante em meio aquoso.

Este estudo possui limitação quanto ao módulo utilizado. O módulo TDS deve ser coordenado com outro módulo para prever interações químicas entre fertilizantes e solos, para que a dissolução química possa ser monitorada e analisada e, finalmente, informações relevantes, como alterações de pH, possam ser obtidas. Outra limitação relevante é o aparato tecnológico. Objetivando uma melhor proximidade com a situação real, é interessante que as

ferramentas tecnológicas sejam robustas para que as simulações sejam as mais próximas da realidade e que o custo operacional de simulação não seja demasiado. É primordial notar que um sistema real é frequentemente muito complexo e as simulações que o descrevem são sempre baseadas em modelos que contém necessariamente simplificações e aproximações da realidade a modelagem do sistema.

**Comentado [L3]:** Limitações quanto ao modelo

Para entender-se que toda pesquisa não se restringe aos resultados nela apresentados e, levando-se em consideração as barreiras do presente trabalho, podem-se realizar algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como, avaliar o desempenho do grão de fertilizante imerso em um meio ambiente com características específicas; avaliar as influências do pH do solo no desempenho difusivo do grão de fertilizante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, C.; FRANTZ, J.; BUGBEE, B. **Características de liberação de macro e micronutrientes de três fertilizantes revestidos com polímeros: Teoria e medições.**

AZEEM, B. et al. **Revisão de materiais e métodos para produzir Fertilizante de ureia revestido de liberação controlada.** Diário de Liberação Controlada, v. 181, p. 11-21, 2014. Disponível

em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168365914001205?via%3Dihub>>. Acesso em outubro de 2021.

BRASIL, Instrução normativa n. 61 de 8 de julho de 2020. **Definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes destinados à agricultura.** Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>>.

Acesso em dezembro de 2021.

CENTRO OESTE, Galpão; **Adubo Cloreto de Potássio 60% de KCL - Saco 50 kg.** Disponível em: <<https://galpaocentrooeste.com.br/adubo-cloreto-de-potassio-saco.html>>.

Acesso em: 4 nov. 2021.

CHIEN, S. H; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. **Desenvolvimentos recentes da produção e uso de fertilizantes para melhorar a eficiência dos nutrientes e minimizar os impactos ambientais.** Em: CHIEN, S. H; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Avanços em Agronomia. San Diego: Academic Press, v.102, 2009, p.267-322. Disponível em: Acesso em novembro de 2021.

ESTRATÉGICO, E.; SECRETARIA, E.; DE. **PRODUÇÃO NACIONAL DE FERTILIZANTES Desenvolvimento Econômico.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae\\_publicacao\\_fertilizantes\\_v10.pdf](https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2022.

FAVINI, S. VITÓRIA. **Liberação controlada de fertilizantes**. 14 de novembro de 2018.

IMPRESA NACIONAL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 39, DE 8 DE AGOSTO DE 2018 - Imprensa Nacional**. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/36278414/do1-2018-08-10-instrucao-normativa-n-39-de-8-de-agosto-de-2018-36278366](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/36278414/do1-2018-08-10-instrucao-normativa-n-39-de-8-de-agosto-de-2018-36278366)>. Acesso em: 16 abr. 2022.

**ITEH STANDARDS**. Disponível em: <[https://standards-iteh-ai.translate.google.com/catalog/standards/iso/146016f3-c2b1-470b-b59f-d2a6cc3003b7/iso-18644-2016?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt-BR&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://standards-iteh.ai.translate.google.com/catalog/standards/iso/146016f3-c2b1-470b-b59f-d2a6cc3003b7/iso-18644-2016?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=sc)>. Acesso em: 23 abr. 2022.

**Journal of plant nutrition and soil science**. Weinheim, v.176, p. 76-88, 2013.

LOPES, A.; LUIZ; GUIMARÃES GUILHERME, R. **I - FERTILIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~nutricao/plantas/fertisolo.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2022.

MAJEED, Z. et. al. **Uma revisão abrangente sobre polímeros biodegradáveis e suas misturas usadas em processos de fertilizantes de liberação controlada**. Revisões em Engenharia Química, Berlim, v. 31, n. 1, p. 69-95, 2015.

NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

PASQUILL, F; SMITH, FB. **Difusão atmosférica.: Estudo da dispersão de material transportado pelo vento de fontes industriais e outras**. JOHN WILEY & SONS, 605 TERCEIRA AVE., NEW YORK, NY 10016, USA. 1983., 1983.

PRADO, R. B.; BENITES, V. de M.; MACHADO, P. L. O. de A.; POLIDORO, J. C.; NAUMOV, A. **Aspectos relacionados ao mapeamento da disponibilidade de potássio nos solos do Brasil**. Disponível em: [https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS-2009-09/14025/1/doc104\\_2008cnps\\_cnpaf\\_asp\\_potassio.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS-2009-09/14025/1/doc104_2008cnps_cnpaf_asp_potassio.pdf). Acesso em: 16 abr. 2022.

QUEVEDO, Renata Tomaz **Fertilizantes**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/agricultura/fertilizantes/>>. Acesso em: 1 abril. 2022.

Reddy, J.N. (2006). **Introdução ao Método de Elementos Finitos**. ed. [S.l.]: McGraw-Hill. ISBN 9780071267618

SEMPEHO, S. I. et al. **Visão geral meticulosa sobre os fertilizantes de liberação controlada**. *Avanços em Química*, v. 2014, 16 p., 2014. Disponível em: < <https://www.hindawi.com/journals/ac/2014/363071/> >. Acesso em novembro de 2021.  
SHAVIV, A. *Advances in controlled-release fertilizers*. *Advances in Agronomy*. San Diego, v.71, n.5, p. 1-49, 2001. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211301710115> >. Acesso em setembro de 2021.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de Adubação e de Calagem Para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

TRAY TECNOLOGIA. **Fertilizante Suplemento Sulfato de Cálcio 50g**. Disponível em: <<https://www.greenpowercultivo.net.br/biobizz/fertilizante-mineral-sulfato-de-calcio-50g>>. Acesso em: 4 de março. 2022

TRENKEL, M. E. **Fertilizantes de Liberação Lenta e Controlada e Estabilizados: Uma opção para aumentar a eficiência do uso de nutrientes na agricultura**. Paris: Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes, 2010. Disponível em: < [https://www.fertilizer.org/images/Library\\_Downloads/2010\\_Trenkel\\_slow%20release%20book.pdf](https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2010_Trenkel_slow%20release%20book.pdf) >. Acesso em:4 de abril. 2021

VALDERRAMA, M. et al. **Adubação nitrogenada em milho com uréia revestida com diferentes fontes de polímeros**. *Rev. Ciências Agrárias*, Londrina, v.35, n.2, p.659-670, 2014. Disponível em: < <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/13168> >. Acesso em outubro de 2021.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S. **Fertilizantes de eficiência aprimorada**. Jaboticabal: Funep, 2017.

**ANEXO 1 – Dados experimentais resultados COMSOL**

	Porosidade 0.2		
	Esp0.064_Temp30°C	Esp0.2_Temp30°C	Esp0.1_Temp30°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,970	795,110	795,44
1	778,430	777,660	777,42
2	759,300	759,930	758,81
3	737,660	738,490	737,34
4	714,430	714,950	714,05
5	690,980	691,280	690,58
6	668,340	668,340	667,87
7	646,880	646,600	646,33
8	626,750	626,300	626,18
9	607,990	607,440	607,44
(...)			
1795	574,370	573,610	573,78
1796	559,250	558,480	558,66
1797	545,170	544,410	544,65
1798	531,990	531,300	531,52
1799	519,760	519,040	519,3
1800	508,200	507,590	507,81

	Porosidade 0.2		
	Esp0.064_Temp20°C	Esp.0.2_Temp20°C	Esp.0.1_Temp20°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,49	56,55	56,43
1796	56,47	56,53	56,41
1797	56,46	56,51	56,40
1798	56,44	56,50	56,38
1799	56,43	56,48	56,37
1800	56,41	56,47	56,35

Porosidade 0,2			
Espessura	Esp.0.064_Temp15°C	Esp.0.2_Temp15°C	Esp.0.1_Temp15°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,49	56,55	56,44
1796	56,47	56,53	56,42
1797	56,46	56,52	56,41
1798	56,44	56,50	56,39
1799	56,43	56,49	56,37
1800	56,41	56,47	56,36

Porosidade 0.5			
Espessura	Esp.0.064_Temp30°C	Esp.0.2_Temp30°C	Esp.0.1_Temp30°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,50	56,55	56,44
1796	56,48	56,54	56,42
1797	56,46	56,52	56,41
1798	56,45	56,51	56,39
1799	56,43	56,49	56,38
1800	56,42	56,48	56,36

Porosidade 0.5			
Espessura	Esp.0.064_Temp20°C	Esp.0.2_Temp20°C	Esp.0.1_Temp20°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,49	56,55	56,43
1796	56,47	56,54	56,42
1797	56,46	56,52	56,40
1798	56,44	56,50	56,39
1799	56,43	56,49	56,37
1800	56,41	56,47	56,35

Porosidade 0.5			
Espessura	Esp.0.064_Temp15°C	Esp.0.2_Temp15°C	Esp.0.1_Temp15°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,50	56,55	56,44
1796	56,48	56,54	56,42
1797	56,46	56,52	56,41
1798	56,45	56,51	56,39
1799	56,43	56,49	56,38
1800	56,42	56,48	56,36

Porosidade 0.8			
Espessura	Esp.0.064_Temp30°C	Esp.0.2_Temp30°C	Esp.0.1_Temp30°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,50	56,55	56,44
1796	56,48	56,54	56,42
1797	56,46	56,52	56,41
1798	56,45	56,51	56,39
1799	56,43	56,49	56,38
1800	56,42	56,48	56,36

Porosidade 0.8			
Espessura	Esp.0.064_Temp20°C	Esp.0.2_Temp20°C	Esp.0.1_Temp20°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,50	56,55	56,44
1796	56,48	56,54	56,42
1797	56,46	56,52	56,41
1798	56,45	56,51	56,39
1799	56,43	56,49	56,38
1800	56,42	56,48	56,36

	Porosidade 0.8		
Espessura	Esp.0.064_Temp15°C	Esp.0.2_Temp15°C	Esp.0.1_Temp15°C
Tempo(min)	Concentração (mol/m³)	Concentração (mol/m³)	Concentração (mol/m³)
0	795,97	795,11	795,44
1	778,43	777,66	777,42
2	759,30	759,93	758,81
3	737,66	738,49	737,34
4	714,43	714,95	714,05
5	690,98	691,28	690,58
6	668,34	668,34	667,87
7	646,88	646,60	646,33
8	626,75	626,30	626,18
9	607,99	607,44	607,44
(...)			
1795	56,50	56,55	56,44
1796	56,48	56,54	56,42
1797	56,46	56,52	56,41
1798	56,45	56,51	56,39
1799	56,43	56,49	56,38
1800	56,42	56,48	56,36

## ANEXO 2 - ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHAS NORMAL, EXTRA FINA E EXTRA GROSSEIRA.

Normal (objeto do estudo): 724 nós e 1348 elementos de malha triangular;

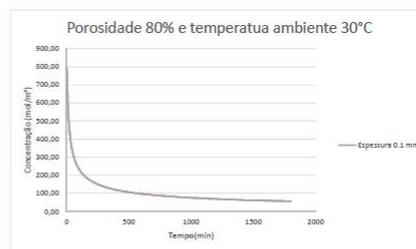
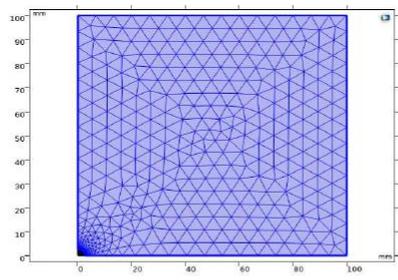
Extra fina (convergência): 299 nós e 7256 elementos de malha triangular;

Extra grosseira (convergência): 98 nós e 488 elementos de malha triangular.

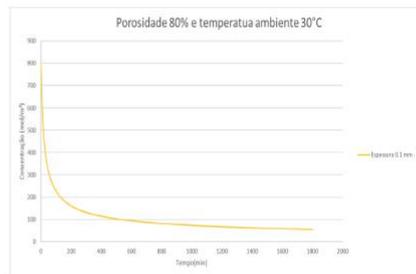
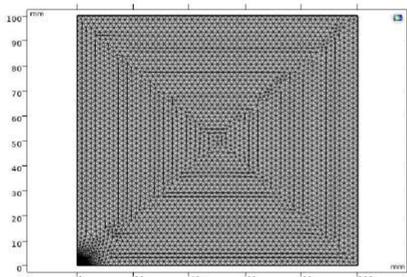
**Comentado [L4]:** Estudo de convergência.

**Comentado [L5]:** Especificações das malhas

Espessura 0.1mm; Temperatura ambiente 30°C; Porosidade 80%; Malha de refino normal	
Tempo (min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,44
1	777,42
2	758,81
3	737,34
4	714,05
5	690,58
6	667,87
7	646,33
...	...
1794	56,45
1795	56,44
1796	56,42
1797	56,41
1798	56,39
1799	56,38
1800	56,36



Espessura 0.1mm; Temperatura ambiente 30°C; Porosidade 80%; Malha de refino extra fino	
Tempo (min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	795,44
1	777,42
2	758,81
3	737,34
4	714,05
5	690,58
6	667,87
7	646,33
...	...
1794	56,45
1795	56,44
1796	56,42
1797	56,41
1798	56,39
1799	56,38
1800	56,36



Espessura 0.1mm; Temperatura ambiente 30°C; Porosidade 80%; Malha de refino extra grosseira	
Tempo (min)	Concentração (mol/m <sup>3</sup> )
0	794,59
1	777,51
2	761,03
3	738,93
4	714,53
5	690,28
6	667,05
7	645,24
...	...
1794	56,45
1795	56,44
1796	56,42
1797	56,41
1798	56,39
1799	56,38
1800	56,36

