



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

**DANIEL DE SOUSA GUEDES**

**IMPACTO DA PRESENÇA DE MICROPLÁSTICOS NA BIODISPONIBILIDADE DE  
NUTRIENTES DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris*)**

**FORTALEZA  
2025**

DANIEL DE SOUSA GUEDES

IMPACTO DA PRESENÇA DE MICROPLÁSTICOS NA BIODISPONIBILIDADE DE  
NUTRIENTES DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris*)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Química do Centro de  
Ciências da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do grau de  
bacharel com habilitação industrial em  
Química.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carla Bastos Vidal  
Coorientador: Ma. Crisiana de Andrade Nobre

Fortaleza

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G957i Guedes, Daniel de Sousa.  
Impacto da presença de microplásticos no biodisponibilidade de nutrientes do feijão (*Phaseolus vulgaris*) / Daniel de Sousa Guedes. – 2025.  
42 f : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Profa. Dra. Carla Bastos Vidal.  
Coorientação: Profa. Ma. Crisiana de Andrade Nobre.

1. Microplásticos. 2. Alimentos. 3. Adsorção. I. Título.

CDD 540

---

DANIEL DE SOUSA GUEDES

IMPACTO DA PRESENÇA DE MICROPLÁSTICOS NA BIODISPONIBILIDADE DE  
NUTRIENTES DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris*)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Química do Centro de  
Ciências da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do grau de  
bacharel com habilitação industrial em  
Química.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carla Bastos Vidal (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ma. Crisiana de Andrade Nobre  
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

---

Prof. Dr. Dieric dos Santos de Abreu  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus.

Aos meus pais, meu irmão, meus familiares e  
meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por nunca me abandonar e por sempre me mostrar que mesmo que eu pense que estou sozinho, Ele sempre estará lá por mim.

À minha mãe Celia, que me deu a vida, cuidou de mim, me educou e que por inúmeras vezes abdicou do próprio conforto para que eu tivesse tudo do bom e do melhor, a ela eu devo tudo que tenho e tudo que sou.

Ao meu pai Pedro, que sempre se esforçou para estar presente sempre que eu precisei.

Ao meu irmão Diego, que moldou boa parte do homem que sou hoje, a ele devo uma fração significante da minha educação, obrigado por todo apoio e incentivo que me deu durante toda minha vida.

Aos meus tios Genelucia (Tia Bena) e Francisco (Tio Kinca), por terem cuidado de mim como se eu fosse um filho durante toda minha infância.

Às minhas tias Ana Lúcia e Celia Maria por sempre zelarem por mim desde meu nascimento.

Aos meus primos Matheus e Felipe, por toda a convivência e fraternidade durante toda minha infância e adolescência.

Aos meus amigos do Suco de Zap: Bruno, Carlos, Gustavo, Henrique, João, Kayanne, Letícia, Mario, Samuel e Victor por toda a parceria e tudo que vivemos durante a graduação. Me lembro que ao entrar no curso eu dizia que não faria amigos e que meu único objetivo era conseguir o diploma e ir embora. Hoje eu facilmente percebo o quanto fui tolo, sem vocês eu não teria sobrevivido à loucura que é a graduação. Obrigado por serem a minha família dentro da UFC.

À Juliana, que chegou de mansinho no final e está sendo parte importante para o meu êxito.

Aos amigos e colegas do PET, todos os que passaram pelo Programa durante a minha estadia me marcaram de alguma forma e estarão guardados na minha memória.

À professora Dr.<sup>a</sup> Ruth Vidal, tutora do PET e minha professora, por todas as lições e conselhos que sempre chegaram em boa hora.

Ao Filipe pela parceria no laboratório e pela fraternidade fora dele.

Ao professor Dr. Dieric Abreu por ter aceitado participar da banca avaliadora e por ter sido meu orientador durante toda a graduação. Pelas lições, conselhos, por ser, além de meu orientador, um grande amigo.

À Ma. Crisiana Nobre por ter me recebido de portas abertas no NUTEC em duas oportunidades, e por ter se disposto a me coorientar nessa empreitada.

À professora Dr.<sup>a</sup> Carla Vidal por ter aceitado me orientar e por me receber tão bem em seu laboratório pra que eu executasse o meu trabalho.

“A simplificação de qualquer coisa é sempre sensacional!” (G.K. Chesterton, 1903)

## RESUMO

Os microplásticos são uma problemática cada vez mais recorrente no que tange a saúde humana hoje, havendo já estudos que indicam sua presença nos mais diversos ambientes, como corpos hídricos, plantações e até mesmo o corpo humano. Tal problemática traz a necessidade de se estudar tais materiais, bem como sua interação com os demais componentes do ambiente em que ele está inserido. Tendo isso em vista, o presente trabalho visa estudar como a presença de microplásticos no feijão pode alterar a disponibilidade dos nutrientes do alimento para quem o consumir, bem como analisar a influência de alterações na estrutura química dos microplásticos na interação deles com os nutrientes. Realizou-se diversos experimentos de adsorção utilizando o microplástico polietileno (PE) como adsorvente, tanto o microplástico *in natura* quanto o microplástico envelhecido por radiação ultravioleta. Nos experimentos, parâmetros foram variados, como o pH do meio, que é diferente para cada fase da digestão do alimento. Foram feitos também experimentos de cinética de adsorção para os diferentes sistemas e com os valores de concentração medidos, calculou-se a capacidade de adsorção de cada microplástico para cada tipo de nutriente presente nas amostras. Para a leitura de concentração das amostras utilizou-se a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado.

**Palavras-chave:** microplásticos; alimentos; adsorção.

## **ABSTRACT**

Microplastics are an increasingly common problem for human health today, with studies already indicating their presence in a wide range of environments, such as water bodies, crops, and even the human body. This problem raises the need to study these materials, as well as their interactions with other components of the environment in which they are found. With this in mind, this study aims to investigate how the presence of microplastics in beans can alter the availability of nutrients in the food for those who consume them, as well as to analyze the influence of changes in the chemical structure of microplastics on their interaction with nutrients. Several adsorption experiments were conducted using polyethylene (PE) as an adsorbent, both the natural microplastic and the microplastic aged by ultraviolet radiation. In the experiments, parameters were varied, such as the pH of the medium, which is different for each phase of food digestion. Adsorption kinetics experiments were also performed for the different systems, and the measured concentration values were used to calculate the adsorption capacity of each microplastic for each type of nutrient present in the samples. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry was used to determine sample concentrations.

**Keywords:** microplastics; food; adsorption.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Microplásticos identificados em amostras de sedimentos do Lago Ontário.....	18
Figura 2 – <i>Mulching</i> em uma plantação de aspargos no sul da Espanha.....	19
Figura 3 – Caminho de contaminação por microplásticos a partir de resíduos sólidos até os solos agricultáveis.....	20
Figura 4 – Alimentos com maior frequência de consumo, INA 2017-18.....	21
Figura 5 – Capacidade de adsorção do MP em diferentes tempos de envelhecimento.....	23

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Capacidade de adsorção dos microplásticos para o íon $\text{Ca}^{2+}$ em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c), e comparativo entre valores de pH (d).....	27
Gráfico 2	– Capacidade de adsorção dos microplásticos para o íon $\text{Fe}^{3+}$ em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c), e comparativo entre valores de pH (d).....	30
Gráfico 3	– Capacidade de adsorção dos microplásticos para o íon $\text{Zn}^{2+}$ em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c), e comparativo entre valores de pH (d).....	32
Gráfico 4	– Comparação de capacidade de adsorção dos microplásticos para os três íons em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c).....	33
Gráfico 5	– Cinética de adsorção dos microplásticos para o íon $\text{Ca}^{2+}$ (a), para o íon $\text{Zn}^{2+}$ (b), para o íon $\text{Fe}^{3+}$ (c), e para o íon $\text{Fe}^{3+}$ com apenas 5 pontos (d).....	35
Gráfico 6	– Comparação da cinética de adsorção dos microplásticos para os 3 íons com o PE <i>in natura</i> (a), e com o PE envelhecido (b).....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentrações dos metais no feijão cozido.....	24
Tabela 2 – Concentração do íon $\text{Ca}^{2+}$ nas soluções após o experimento.....	26
Tabela 3 – Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon $\text{Ca}^{2+}$ .....	26
Tabela 4 – Concentração do íon $\text{Fe}^{3+}$ nas soluções após o experimento.....	28
Tabela 5 – Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon $\text{Fe}^{3+}$ .....	29
Tabela 6 – Concentração do íon $\text{Zn}^{2+}$ nas soluções após o experimento.....	31
Tabela 7 – Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon $\text{Zn}^{2+}$ .....	31
Tabela 8 – Parâmetros dos experimentos variando pH.....	34
Tabela 9 – Parâmetros dos experimentos de cinética.....	35

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

MP	Microplástico
UV	Ultravioleta
PE	Polietileno
P.A	Para análise
TACO	Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
POT	Procedimento Operacional de Trabalho
LQI	Laboratório de Química Instrumental
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado
GC-MS	Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa
RPM	Rotações por minuto
FAO	Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ca	Cálcio
Fe	Ferro
Zn	Zinco
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
Fe(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido de Ferro
Zn(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Zinco
HCl	Ácido Clorídrico
NaOH	Hidróxido de Sódio
K <sub>ps</sub>	Produto de Solubilidade
Å	Angstrom
%	Porcentagem
®	Marca Registrada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	Objetivo Geral .....	16
2.2	Objetivos Específicos .....	16
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
3.1	Microplásticos: uma visão geral .....	17
3.2	Solos contaminados por microplásticos .....	18
3.3	Feijão ( <i>Phaseolus vulgaris</i> ): um alimento chave .....	21
3.4	Efeito do envelhecimento nos microplásticos .....	22
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
4.1	Reagentes.....	24
4.2	Experimento de Capacidade Adsorptiva variando pH .....	24
4.3	Experimento de Cinética de Adsorção .....	25
4.4	Medida das concentrações dos metais por ICP-OES.....	25
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>26</b>
5.1	Experimento de Capacidade de Adsorção variando pH .....	26
5.1.1	Cálcio.....	26
5.1.2	Ferro .....	28
5.1.3	Zinco.....	30
5.2	Experimento de Cinética de Adsorção .....	34
<b>6</b>	<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na natureza, os plásticos podem ser cominuídos a partículas microscópicas, que assim como seus análogos macroscópicos têm potencial de poluir ecossistemas inteiros. Tais partículas podem ser transportadas entre ambientes até mesmo pelo vento, estes são os chamados microplásticos (MPs)(Frias; Nash, 2019).

A presença de microplásticos no ambiente tem se tornado uma preocupação crescente, inclusive no contexto da segurança alimentar. Estes contaminantes onipresentes, originados da degradação de materiais plásticos, têm sido identificados em diferentes etapas da cadeia de produção e consumo de alimentos de origem vegetal e animal, evidenciando que esses contaminantes já integram a dieta humana em diferentes partes do mundo (Pinheiro; Carvalho Junior; Freitas, 2022).

Os microplásticos em si podem atuar como adsorventes no ambiente químico em que estiverem presentes, porém ao passar pelo processo de envelhecimento com radiação ultravioleta (UV), a estrutura desses materiais sofre alteração, influenciando na maneira com que os materiais interagem com o ambiente químico (Santana et al., 2025a).

Além de poluir os ecossistemas os MPs são, ao longo do tempo, bioacumulados pelos organismos presentes e, por conta de sua capacidade adsorptiva, alterar a dinâmica de absorção dos nutrientes por esses organismos. Pela facilidade com que esses materiais são transportados entre ambientes os MPs podem estar presentes até mesmo em solos de plantação de alimentos (De Souza Machado et al., 2019a), podendo tanto alterar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, quanto ser conduzido ao organismo que consumirá o alimento proveniente daquela plantação.

Como exemplo de alimento pode-se citar o feijão, um dos grãos mais consumidos no Brasil\* e que tem uma concentração elevada de micronutrientes minerais, que são absorvidos por quem consome o feijão através do processo de digestão. Uma vez que alguém consome grãos de feijão contaminados por MPs, por conta de sua capacidade adsorptiva, a forma com que os micronutrientes serão absorvidos, bem como a sua disponibilidade para o organismo poderão ser afetadas. Os mecanismos pelos quais os MPs adsorvem os micronutrientes por sua vez podem ser afetados pelos parâmetros químicos do organismo, que variam nos diferentes estágios do processo de digestão. Parâmetros como pH, temperatura, variedade alimentar, e

outros mudam a interação (Silva; Cuba; Teran, 2025) de íons metálicos, por exemplo, com a superfície dos MPs.

Tendo a problemática citada como pretexto, faz-se necessário um estudo tanto da capacidade adsorptiva dos MPs nas matrizes alimentares, analisando tanto a influência do envelhecimento nessa capacidade, bem como a magnitude dessa interação MP-micronutriente para assim predizer o quanto a contaminação por MPs pode afetar a biodisponibilidade dos micronutrientes a quem consome alimentos contaminados.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é realizar uma análise preliminar a respeito da influência da presença de microplásticos, bem como do seu estado estrutural, na disponibilidade de nutrientes de uma cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*).

### 2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um experimento de adsorção com uma solução sintética que simule uma sopa de feijão variando os valores de pH do meio, utilizando como adsorvente uma amostra de polietileno (PE) *in natura* e uma amostra de PE envelhecido por 8h.
- Realizar um experimento de cinética de adsorção com uma solução sintética que simule uma sopa de feijão, utilizando como adsorvente uma amostra de polietileno (PE) *in natura* e uma amostra de PE envelhecido por 8h.
- Medir a concentração de metais, especificamente Ferro, Zinco e Cálcio da solução sintética antes e depois dos experimentos para avaliar a capacidade de adsorção dos microplásticos.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Microplásticos: uma visão geral**

Os microplásticos estão cada vez mais presentes nos mais diversos ecossistemas, sejam aquáticos, terrestres, no ar, e até mesmo dentro do organismo dos seres vivos. O termo microplástico foi utilizado pela primeira vez no ano de 2004 por Thompson et al., e no decorrer dos anos o debate sobre seus usos e efeitos passou a ser cada vez mais recorrente.

Microplásticos são partículas plásticas com tamanho menor que 5mm (“Proceedings of the Second Research Workshop on Microplastic Marine Debris”, 2012). Em 2011, Cole passou a dividir os microplásticos em dois grupos distintos: os microplásticos primários, que seriam produzidos já com o intuito de ter proporções microscópicas e podem ter diversas aplicações; e microplásticos secundários, que seriam resultado da degradação de partículas macroscópicas de plásticos, causada pelos fatores presentes no ambiente a qual o material se encontra.

Existem diversas fontes de microplásticos, e de acordo com Osman et al., elas são majoritariamente divididas em dois tipos, as fontes terrestres e as fontes marinhas. As fontes terrestres seriam sacolas plásticas, garrafas, resíduos da indústria alimentícia e de construção, diversas fibras sintéticas, entre diversas outras fontes. As fontes terrestres são responsáveis por 80-90% dos microplásticos presentes em corpos hídricos. Já as fontes marinhas seriam responsáveis por 10-20% desses materiais, e essas fontes seriam majoritariamente materiais provenientes da indústria da pesca comercial, indústrias *off-shore*, e o turismo marítimo (Duis; Coors, 2016).

Outra forma de classificar os microplásticos é quanto ao seu formato, porém, de acordo com Rodríguez-Seijo e Pereira, não há consenso entre os autores a respeito de quantos tipos de formato existem, e os que aparecem mais comumente nas classificações são “fragmentos”, “fibras” e “filmes”. Além do formato, a cor também é um parâmetro utilizado para distinguir tipos de microplásticos, diz-se que materiais translúcidos são feitos de polipropileno, materiais brancos seriam polietileno e materiais com cores opacas seriam polietileno de baixa densidade (Hidalgo-Ruz et al., 2012), além disso há a associação de pigmentos a alguma fonte específica, como fez Castro et al., ao associar uma alta porcentagem relativa de microplásticos azulados em uma amostra de água em Niterói-RJ ao descarte de produtos de higiene e à degradação de galões azuis utilizados no cultivo de mexilhões.

**Figura 1.** Microplásticos identificados em amostras de sedimentos do Lago Ontário.



Fonte: (Ballent et al., 2016)

Para além das características já citadas, a densidade também é um parâmetro utilizado para diferir os microplásticos, já que a densidade desses materiais varia tanto de acordo com o tipo de polímero, quanto com o processo de fabricação (Chubarenko et al., 2016).

Outra problemática associada aos microplásticos é a sua capacidade de bioacumulação e biomagnificação, que afeta toda a cadeia alimentar desde os consumidores primários até o topo da cadeia (Miller; Hamann; Kroon, 2020).

### 3.2 Solos contaminados por microplásticos

Já existem hoje estudos que mostram tanto a presença quanto a influência dos microplásticos no solo, principalmente nos solos utilizados para agricultura. Em um estudo publicado em 2018 na revista Nature, Piehl et al., estudou o solo de uma fazenda no sudeste da Alemanha para tentar identificar a presença de microplásticos, e o resultado foi de  $0,34 \pm 0,36$

partículas de MP por kg de solo superficial mesmo com os fazendeiros afirmando não utilizarem produtos que poderiam conduzir os MPs ao solo. Além disso, o uso de produtos plásticos na agricultura hoje é bastante recorrente (Miles et al., 2017), com embalagens plásticas, redes de proteção, a técnica de *mulching*, dentre outras atividades que acabam por transportar as partículas dos MPs ao solo, contaminando aquele ambiente.

**Figura 2.** *Mulching* em uma plantação de aspargos no sul da Espanha

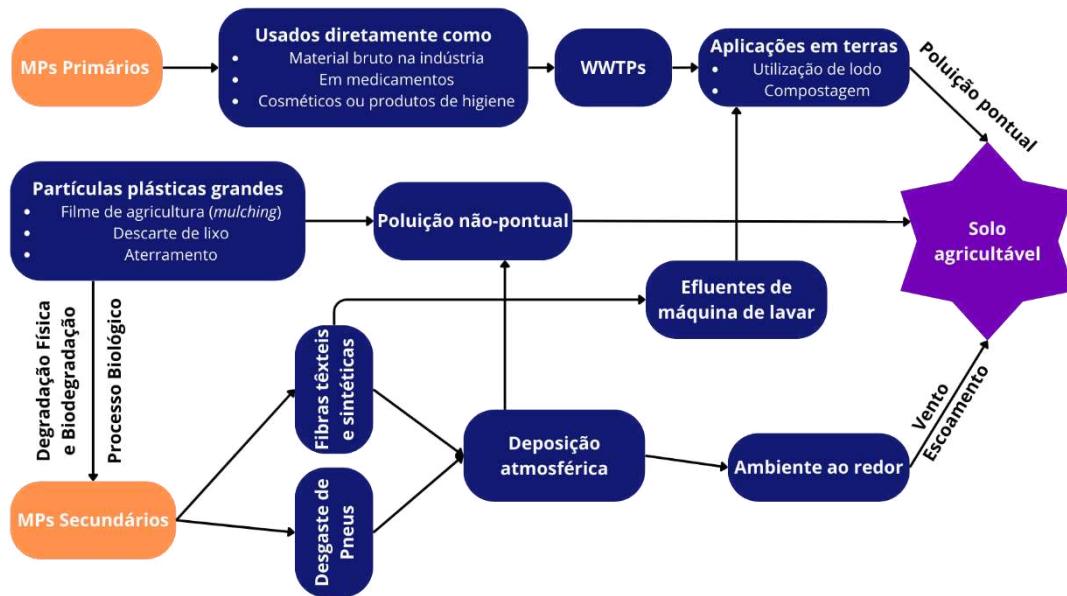


Fonte: (Espí et al., 2006)

Em 2022, Lwanga et al., compilou em sua revisão diversas referências apontando possíveis fontes para contaminação dos solos por microplásticos, dentre elas os já citados filmes para *mulching*, embalagens e redes de proteção, canos utilizados na irrigação, barbantes e até mesmo revestimentos poliméricos utilizados por indústrias de fertilizantes e pesticidas com o intuito de fornecer uma liberação gradual desses compostos no solo.

Mondol (2025) traz um fluxograma explicando como e por quais vias ocorre a contaminação do solo por microplásticos:

**Figura 3.** Caminho de contaminação por microplásticos a partir de resíduos sólidos até os solos agricultáveis.



Fonte: Adaptado de (Mondol *et al.*, 2025)

Além de estarem presente nos solos, já é reportado que os MPs são capazes de alterar as características físicas, químicas e biológicas do solo onde estão presentes . Estudos publicados em 2021 (Leifheit; Lehmann; Rillig) e 2023 (Islam; Rahman; Hoque), apontam que a presença de MPs em baixas concentrações no solo pode ser benéfica por aumentar a aeração e a capacidade de retenção de água, porém em um estudo de 2022, Wang et al., aponta que em concentrações elevadas (2%) o polietileno degrada a textura do solo e interfere na absorção de água. Além desses impactos, as partículas dos MPs podem atuar como adsorventes de compostos tóxicos e/ou metais pesados (Angon *et al.*, 2024), sendo vetores desses contaminantes.

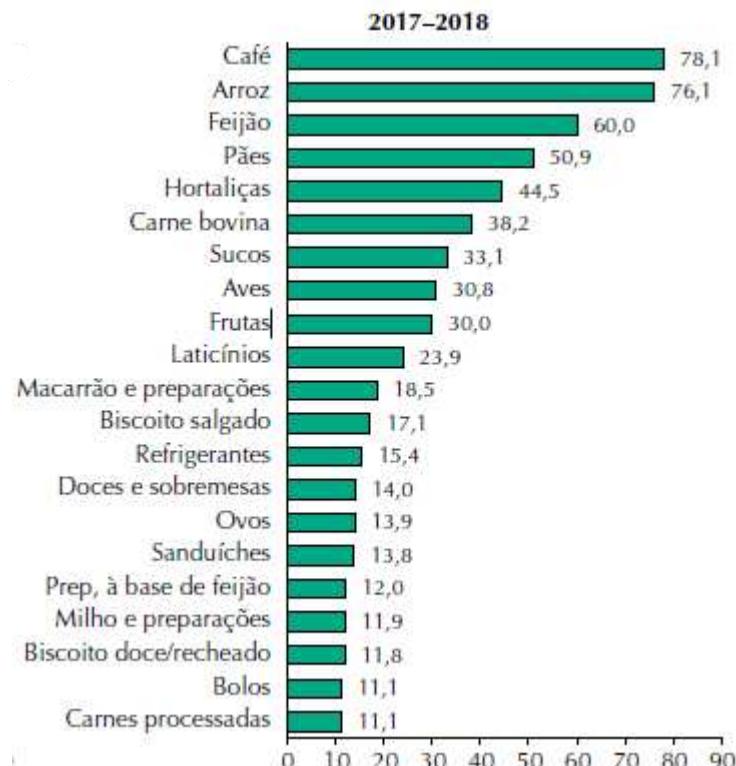
Junto das alterações físicas, os MPs também influenciam nas características químicas do solo. Trabalhos publicados na última década mostram que a presença dos MPs pode alterar desde o pH do solo (Wang et al., 2022), a quantidade de matéria orgânica disponível (Liu et al., 2021), ou até mesmo o equilíbrio dos nutrientes daquele solo (Chen et al., 2020).

Ao alterar tantas propriedades do solo, é esperado que o crescimento das plantas também seja afetado, e é o que mostra o trabalho publicado em 2019 por De Souza Machado et al., que faz uma comparação estatística e mostra que a presença de diferentes microplásticos no solo causa diferentes impactos no crescimento das plantas, impactos esses que são discutidos no trabalho e que não necessariamente são tomados como positivos ou negativos.

### 3.3 Feijão (*Phaseolus vulgaris*): um alimento chave

Segundo Rodrigues et al., o feijão foi, entre os anos de 2017 e 2018 (dados coletados no Inquérito Nacional de Alimentação (INA)), o terceiro alimento mais consumido no Brasil\*, sendo assim um alimento base da população brasileira.

**Figura 4.** Alimentos com maior frequência de consumo, INA 2017-18.



Fonte: (Rodrigues *et al.*, 2019)

Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) apontam que na safra de grãos 2024/25 o país pode alcançar a produção de 339,6 milhões de toneladas de grãos (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025), com o feijão contribuindo com cerca de 3,15 milhões de toneladas, representando quase 1% da produção, o que evidencia a importância desse alimento para o povo brasileiro.

Segundo o ranking da Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas (FAO) de 2023, o Brasil foi o 17º maior importador e o 14º maior exportador de feijão no mundo, somando mais de 150 mil toneladas do alimento negociadas com o mercado internacional (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

Sendo o feijão um alimento de tamanha relevância, é de suma importância que essa cultura receba atenção com relação à contaminação por microplásticos, e um estudo publicado em 2021 por Meng et al., comparou como dois tipos de MP afetariam o crescimento da planta do feijão comum, um deles era o polietileno de baixa densidade e o outro um microplástico biodegradável a base de um polímero chamado PBAT. Os resultados mostraram que ambos materiais impactaram no crescimento da planta do feijão, com o MP biodegradável tendo um impacto mais considerável, o que comprova que a presença desses materiais é capaz de alterar a dinâmica de interação entre a planta e o solo.

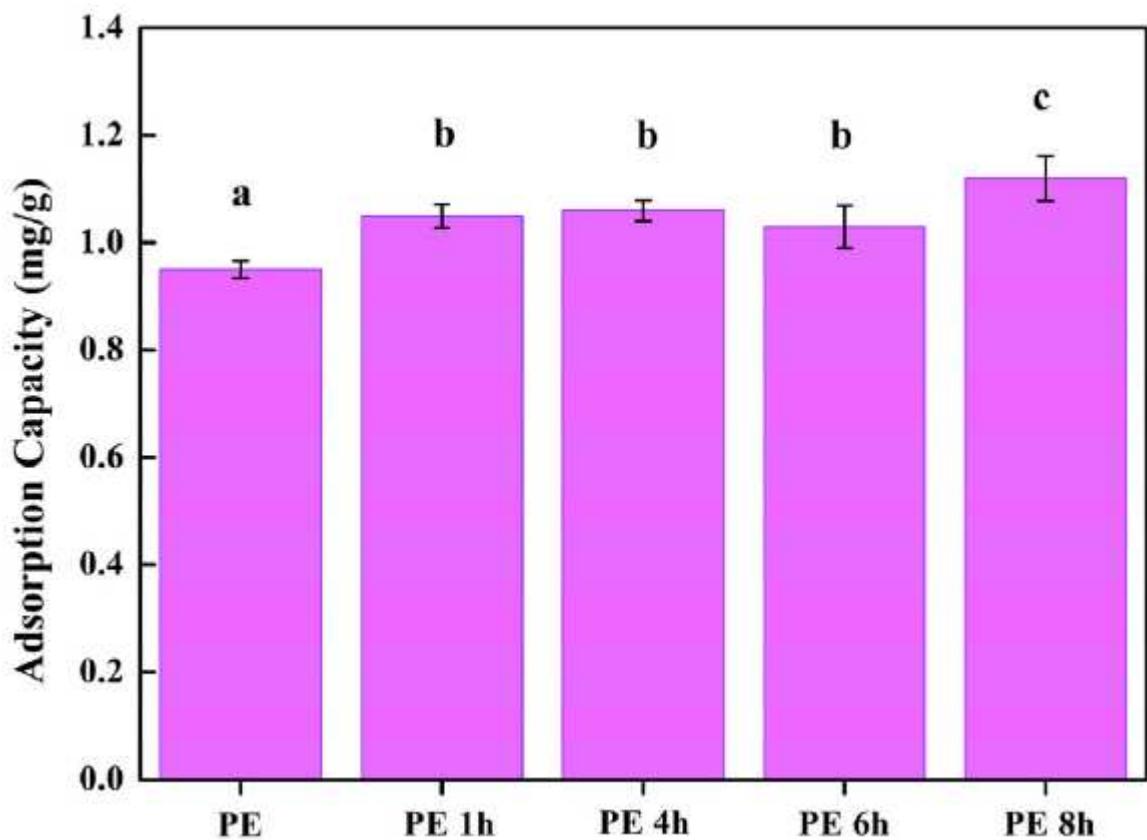
### **3.4 Efeito do envelhecimento nos microplásticos**

Como já colocado anteriormente, os microplásticos podem atuar como adsorventes de compostos poluentes (Guo; Wang, 2019), um dos MPs mais citados sendo o polietileno (PE). Seu caráter majoritariamente apolar confere a ele uma grande afinidade a compostos hidrofóbicos. Porém, quando na natureza, os MPs passam por processos de degradação, que alteram sua estrutura. Em 2024, De Vasconcelos Neto et al. estudou como o tratamento de partículas do microplástico PE com peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) poderia afetar sua capacidade de adsorver íons de metais pesados, mesmo se tratando de um composto apolar. O estudo verificou que o tratamento com  $H_2O_2$  introduziu na estrutura do PE grupos oxigenados, responsáveis por aumentar a intensidade da interação entre a estrutura do MP e os íons metálicos, tornando assim o MP um vetor de poluentes mais eficiente.

Tal inserção de grupos oxigenados não ocorre apenas com tratamento usando  $H_2O_2$ , pelo menos é o que evidencia o estudo publicado por Santana et al. (2025) em que amostras do MP polietileno passam por um processo de envelhecimento por radiação UVB com o objetivo de comparar a capacidade de adsorção do material para o pesticida clorpirifós, utilizado na agricultura, antes e depois do processo de envelhecimento. O estudo concluiu que o processo de envelhecimento por radiação ultravioleta inseriu grupos carbonílicos na estrutura do MP, o que pode ter influenciado a forma com que o material adsorve o pesticida.

A figura 5 mostra a comparação das capacidades de adsorção do PE nas diferentes condições para o estudo de Santana *et al.*:

**Figura 5.** Capacidade de adsorção do MP em diferentes tempos de envelhecimento.



Fonte: (Santana *et al.*, 2025)

Tais resultados trazem à tona a questão: “Seriam os microplásticos capazes de diminuir a acessibilidade de nutrientes de um alimento apenas por estar em contato com ele?”. Portanto, o presente trabalho se preocupa em investigar tal hipótese.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Reagentes

Utilizou-se os sais Cloreto de Cálcio P.A. dihidratado da marca Vetec, Cloreto de Ferro (III) P.A. Hexahidratado da marca *Synth*, e Cloreto de Zinco P.A. Anidro da marca Vetec. Como materiais adsorventes utilizou-se microesferas de polietileno (PE) adquiridas em lojas locais em Fortaleza – CE, tanto *in natura* quanto envelhecidos por radiação ultravioleta por 8h.

### 4.2 Experimento de Capacidade Adsorptiva variando pH

Para este experimento preparou-se uma solução com sais dos metais alvo do trabalho (Fe, Zn e Ca) em concentrações aproximadas às seguintes, seguindo valores descritos na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO) para feijão cozido:

**Tabela 1.** Concentrações dos metais no feijão cozido

Metal	[ ] / mg Kg <sup>-1</sup>
Fe	13
Zn	7
Ca	270

Fonte: (TACO, 2011)

Ajustou-se então o pH da solução sintética para três diferentes valores: 2,5; 6,0; e 7,0. Para o ajuste de pH utilizou-se soluções de HCl e NaOH na concentração de 0,1mol L<sup>-1</sup> e a medida foi feita através de um pHmetro. Transferiu-se alíquotas de 25mL da solução em cada um dos valores de pH para Erlenmeyers de 50mL contendo 12,5mg do microplástico PE, tanto *in natura* quanto envelhecido por 8h. Tais sistemas foram dispostos numa mesa agitadora com controle de temperatura da marca Tecnal® modelo TE-424 por 24h sob os seguintes parâmetros: 36,5°C; 150rpm. Para todos os sistemas realizou-se triplicatas e também separou-se alíquotas para a solução controle. Após as 24h filtrou-se as soluções usando um funil de placa porosa Nº 4 para separar as soluções dos microplásticos.

#### **4.3 Experimento de Cinética de Adsorção**

Para o experimento de cinética utilizou-se a mesma solução do experimento anterior, mas desta vez mantendo o seu pH inicial (3,14). Transferiu-se alíquotas de 25mL da solução para Erlenmeyers de 50mL contendo 12,5mg tanto do PE *in natura*, quanto do PE envelhecido por 8h. Transferiu-se esses sistemas para a mesa agitadora com controle de temperatura da marca Tecnal® modelo TE-424, que estava programada para a temperatura de 36,5°C e 150rpm. Retirou-se os sistemas no tempo de 10 minutos; 20 minutos; 30 minutos; 1h; 2h; 4h; 8h; e 24h. Todos os sistemas foram feitos em triplicata. Posteriormente filtrou-se as soluções utilizando um funil de placa porosa Nº 4 a fim de separar as soluções dos microplásticos.

#### **4.4 Medida das concentrações dos metais por ICP-OES**

Após os experimentos foi realizada a medidas das concentrações dos metais na solução sintética utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). O equipamento utilizado é da marca Thermo Scientific, modelo iCap 6000; Visão Axial; RF Power 1150W; Gas Auxiliary 1,0L min<sup>-1</sup>; Gas Nebulizer 0,6L min<sup>-1</sup>; Gas Coolant 12L min<sup>-1</sup>. A metodologia de preparo da amostra utilizada foi a descrita no procedimento operacional de trabalho (POT) para análise de metais em água do Laboratório de Química Instrumental (LQI) do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Experimento de Capacidade de Adsorção variando pH

Para este experimento realizou-se análises individuais e comparativas através da medição da capacidade de adsorção ( $q$ ) dos microplásticos nos diferentes cenários. O valor de  $q$  foi medido através da seguinte equação:

$$q = \frac{(C_i - C_f)}{m} \cdot V \quad (1)$$

onde:  $q$  é a capacidade de adsorção dos microplásticos ( $\text{mg g}^{-1}$ );  $C_i$  é a concentração inicial dos metais na solução ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $C_f$  é a concentração dos metais na solução após os experimentos ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $m$  é a massa dos microplásticos utilizados (g); e  $V$  é o volume da solução (L).

#### 5.1.1 Cálcio

Para o íon  $\text{Ca}^{2+}$  em solução foram obtidos os seguintes valores de concentração em  $\text{mg L}^{-1}$ :

**Tabela 2.** Concentração do íon  $\text{Ca}^{2+}$  nas soluções após o experimento

Amostra	Concentração / $\text{mg L}^{-1}$		
	pH = 2,5	pH = 6,0	pH = 7,0
Controle	$228,4 \pm 9,8$	$210,9 \pm 1,5$	$210,9 \pm 5,4$
PE – <i>in natura</i>	$216,3 \pm 1,2$	$230,7 \pm 3,5$	$252,8 \pm 3,7$
PE – Envelhecido 8h	$197,3 \pm 1,3$	$218,3 \pm 2,8$	$279,6 \pm 9,9$

Fonte: O autor

Com os valores de concentração obtidos, utilizou-se a equação 1 para calcular os valores de capacidade de adsorção ( $\text{mg g}^{-1}$ ) das amostras, descritos a seguir:

**Tabela 3.** Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon  $\text{Ca}^{2+}$

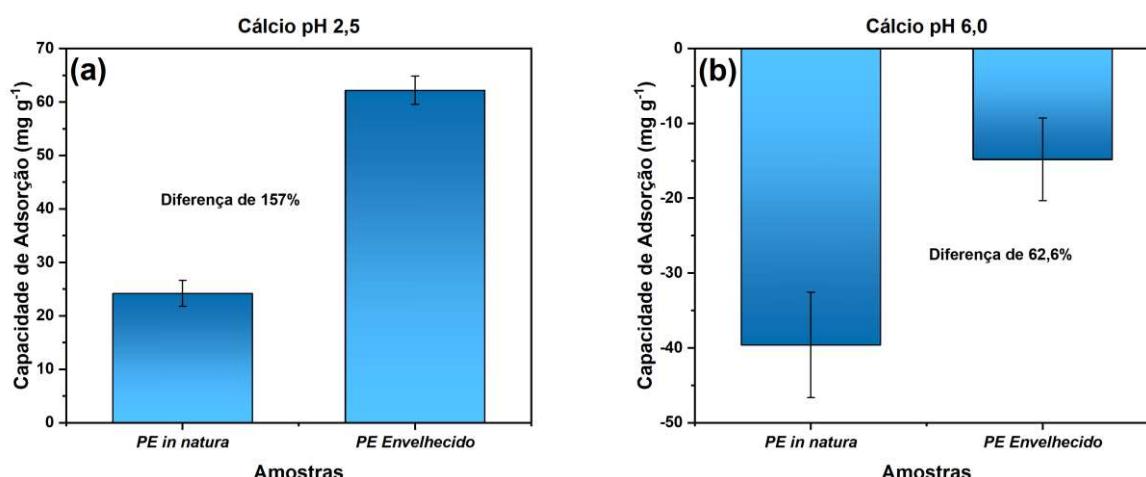
Amostra	Capacidade de Adsorção / $\text{mg g}^{-1}$		
	pH = 2,5	pH = 6,0	pH = 7,0

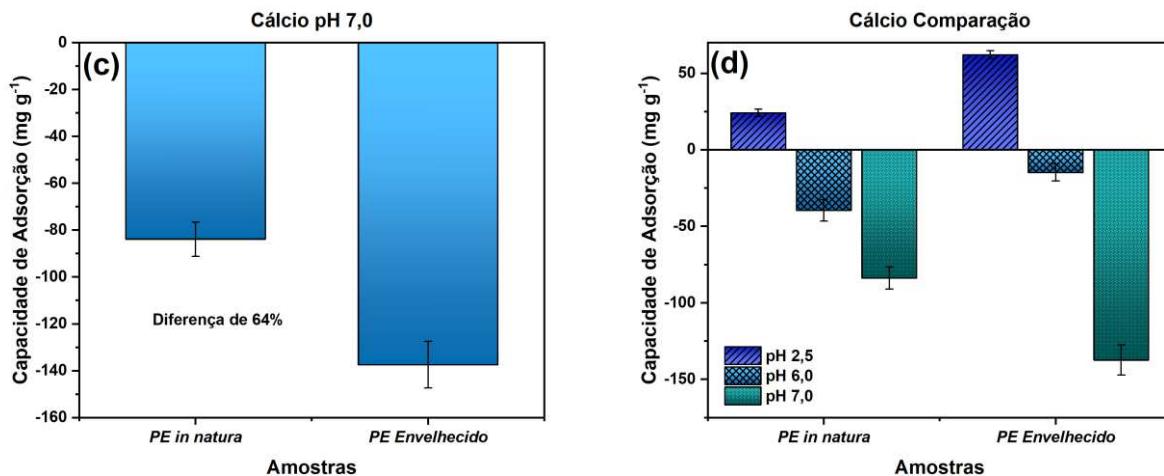
PE – <i>in natura</i>	$24,2 \pm 2,4$	$-39,6 \pm 7,0$	$-83,8 \pm 7,3$
PE – Envelhecido 8h	$62,2 \pm 2,6$	$-14,8 \pm 5,5$	$-137,4 \pm 9,9$

Fonte: O autor

Como pode ser visto nos gráficos 1(b) e 1(c) os valores de capacidade de adsorção para íon cálcio nos pHs 6,0 e 7,0 foram negativos, o que significa que as concentrações desse íon após o experimento foram maiores que a concentração na solução controle. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que em pH 6,0 e em pH 7,0 o íon  $\text{Ca}^{2+}$  precipita em forma de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $K_{\text{ps}} = 5,5 \times 10^{-6}$ ) (Haynes; Lide; Bruno, [S.d.]), o que faz com que a concentração do íon tanto na solução controle quanto nas amostras diminua. Porém, durante o experimento, as soluções passam por alterações na temperatura, elevando-as a 36,5°C, o que altera o equilíbrio de solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  assim aumentando a concentração do íon  $\text{Ca}^{2+}$  na solução. A dissolução de forma isolada não seria capaz de dar alguma conclusão pois tanto a solução controle quanto as amostras passaram pelo aumento de temperatura, o que leva à interpretação de que a presença dos MPs alterou também de algum modo o equilíbrio de solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , fazendo com que uma menor quantidade fosse dissolvida para uma mesma temperatura num sistema que não contivesse os MPs, o que resulta numa concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  mais alta nas soluções amostra. A precipitação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  não ocorre numa sopa de feijão convencional pois, na matriz do feijão, há substâncias que são capazes de formar complexos com o  $\text{Ca}^{2+}$ , como os taninos e fitatos (Beatriz Barrueto-Gonzalez, [S.d.]), fazendo com que este permaneça em solução mesmo em valores mais elevados de pH.

**Gráfico 1.** Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon  $\text{Ca}^{2+}$  em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c), e comparativo entre valores de pH (d).





Fonte: O autor

Já para a amostra em pH 2,5, como mostra o gráfico 1(a) notou-se um aumento de 157% no valor de capacidade de adsorção, o que pode ser explicado pelo aumento da presença de grupos carbonílicos na estrutura do microplástico após o envelhecimento, o que faz com que a interação intermolecular entre a estrutura do microplástico e os íons passe de apenas íon-dipolo induzido para íon-dipolo, que por sua vez são mais fortes, favorecendo a interação entre o MP e os íons (Santana et al., 2025b).

O gráfico 1(d) mostra que, comparativamente, a maior capacidade de adsorção de ambos microplásticos se dá em valores de pH mais baixos, em ambientes mais ácidos como o do estômago, podendo ser um indicativo de que essa fase da digestão seja a mais propícia para que a adsorção ocorra.

### 5.1.2 Ferro

As medidas para o íon Fe<sup>3+</sup> apontaram os seguintes valores de concentração em mg L<sup>-1</sup>:

**Tabela 4.** Concentração do íon Fe<sup>3+</sup> nas soluções após o experimento

Amostra	Concentração / mg L <sup>-1</sup>		
	pH = 2,5	pH = 6,0	pH = 7,0
Controle	3,90 ± 0,04	0,50 ± 0,46	0,080 ± 0,003

PE – <i>in natura</i>	$3,70 \pm 0,08$	$0,006 \pm 0,005$	$0,002 \pm 0,001$
PE – Envelhecido 8h	$2,80 \pm 0,01$	$0,006 \pm 0,002$	$0,000 \pm 0,001$

Fonte: O autor

É evidente que para as soluções em pH 6,0 e em pH 7,0 as concentrações estão próximas ou iguais a zero, o que é explicado pela precipitação do íon  $\text{Fe}^{3+}$  na forma de  $\text{Fe(OH)}_3$  no pH em que as soluções se encontravam que por sua vez ficou retido no funil após a etapa de filtração. A precipitação do  $\text{Fe(OH)}_3$  não ocorre na sopa convencional de feijão por conta da presença dos agentes complexantes (taninos e fitatos) (Beatriz Barrueto-Gonzalez, [S.d.]), que mantêm o íon  $\text{Fe}^{3+}$  na solução.

Utilizando a equação 1 calculou-se a capacidade de adsorção ( $\text{mg g}^{-1}$ ) dos microplásticos para o íon  $\text{Fe}^{3+}$  a partir dos valores de concentração medidos:

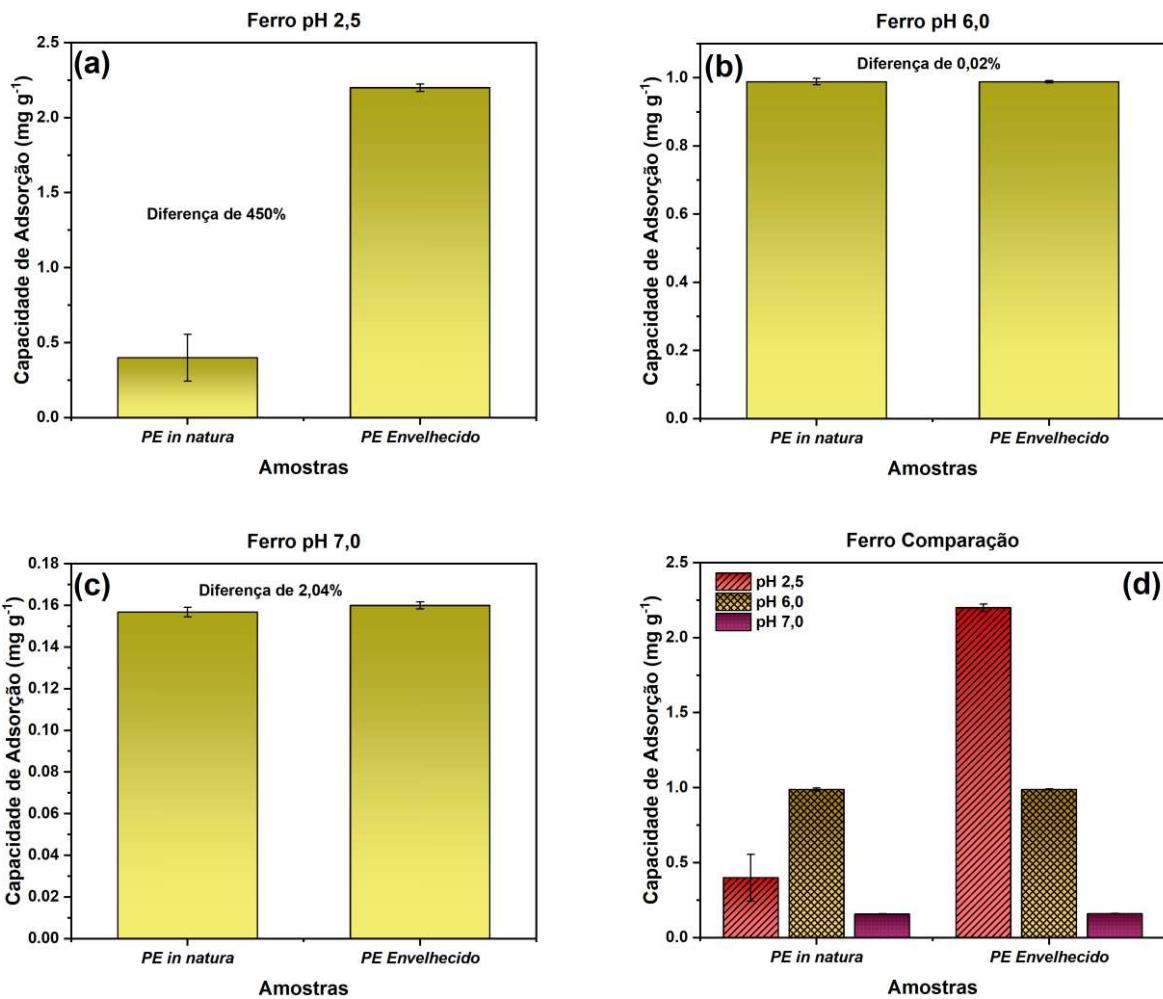
**Tabela 5.** Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon  $\text{Fe}^{3+}$

<b>Amostra</b>	<b>Capacidade de Adsorção / <math>\text{mg g}^{-1}</math></b>		
	<b>pH = 2,5</b>	<b>pH = 6,0</b>	<b>pH = 7,0</b>
PE – <i>in natura</i>	$0,4 \pm 0,1$	$0,99 \pm 0,01$	$0,157 \pm 0,002$
PE – Envelhecido 8h	$2,20 \pm 0,02$	$0,988 \pm 0,003$	$0,160 \pm 0,002$

Fonte: O autor

Como pode ser visto no gráfico 2(a), em pH 2,5 a capacidade de adsorção dos MPs para o íon  $\text{Fe}^{3+}$  aumentou em 450% quando comparadas as amostras *in natura* e envelhecida, o que novamente pode ser explicado pelo aumento da presença de grupos carbonílicos na estrutura do microplástico após o processo de envelhecimento (Santana et al., 2025b), alterando a interação intermolecular de apenas íon-dipolo induzido para íon-dipolo. Tal comportamento pode indicar que para o íon  $\text{Fe}^{3+}$ , um ambiente como o do estômago também seja propício para que a adsorção do íon ao microplástico ocorra.

**Gráfico 2.** Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon  $\text{Fe}^{3+}$  em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c), e comparativo entre valores de pH (d).



Fonte: O autor

Os gráficos 2(b) e 2(c) mostram a comparação da capacidade de adsorção para pH 6,0 e pH 7,0. Não há diferença significativa entre o valor da capacidade de adsorção para os dois MPs em ambos os valores de pH, e esse resultado pode ser justificado pela precipitação do íon durante o experimento, que fez com que a concentração desse diminuisse significativamente chegando próximo a zero, tornando a análise não conclusiva para essas condições.

### 5.1.3 Zinco

Os resultados obtidos das leituras de concentração do íon  $\text{Zn}^{2+}$  no ICP-OES apontaram os seguintes valores em  $\text{mg L}^{-1}$ :

**Tabela 6.** Concentração do íon Zn<sup>2+</sup> nas soluções após o experimento

Amostra	Concentração / mg L <sup>-1</sup>		
	pH = 2,5	pH = 6,0	pH = 7,0
Controle	20,36 ± 0,06	16,81 ± 0,20	11,91 ± 0,04
PE – <i>in natura</i>	20,27 ± 0,21	13,40 ± 0,08	8,08 ± 0,04
PE – Envelhecido 8h	19,15 ± 0,07	14,010 ± 0,002	8,14 ± 0,03

Fonte: O autor

Percebe-se que para o íon Zn<sup>2+</sup> nos valores de pH 6,0 e pH 7,0, apesar de ainda afetar, a precipitação na forma de Zn(OH)<sub>2</sub> impactou menos na concentração do que no caso do íon Fe<sup>3+</sup>, o que pode ser explicado pela diferença na concentração inicial dos íons na solução, mas mais ainda pela diferença nos valores de produto de solubilidade (K<sub>ps</sub>) dos dois hidróxidos, sendo  $4,5 \times 10^{-17}$  para o Zn(OH)<sub>2</sub> e de  $2,5 \times 10^{-39}$  para o Fe(OH)<sub>3</sub> (Haynes; Lide; Bruno, [S.d.]). Como é possível analisar, o Fe(OH)<sub>3</sub> é muito menos solúvel que o Zn(OH)<sub>2</sub> o que torna plausível o fato de a concentração do íon Zn<sup>2+</sup> cair menos expressivamente que a concentração do íon Fe<sup>3+</sup>.

Através da equação 1, os valores de capacidade de adsorção (mg g<sup>-1</sup>) para o íon Zn<sup>2+</sup> foram calculados e estão dispostos a seguir:

**Tabela 7.** Capacidade de adsorção dos micropplásticos para íon Zn<sup>2+</sup>

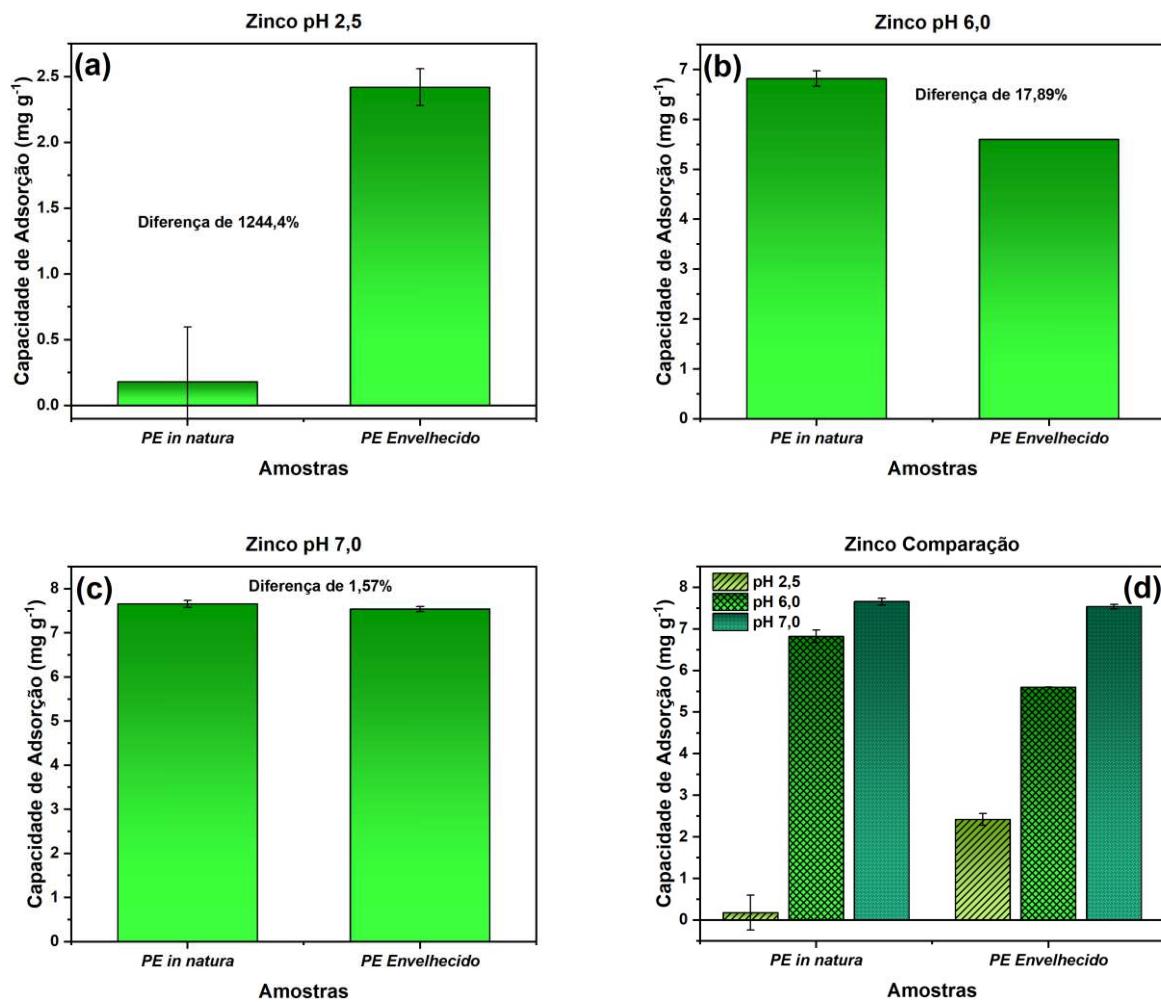
Amostra	Capacidade de Adsorção / mg g <sup>-1</sup>		
	pH = 2,5	pH = 6,0	pH = 7,0
PE – <i>in natura</i>	0,18 ± 0,42	6,82 ± 0,15	7,66 ± 0,08
PE – Envelhecido 8h	2,42 ± 0,14	5,600 ± 0,004	7,54 ± 0,05

Fonte: O autor

Como notado no gráfico 3(a) houve aumento significativo no valor de capacidade de adsorção do PE envelhecido se comparado ao *in natura*, mais especificamente um aumento de 1244,4%, o que como esperado deve-se às mudanças na estrutura do PE após o envelhecimento (aumento do índice de carbonilas). O que chama mais atenção, porém, é que em contrapartida aos outros dois íons de estudo, o íon Zn<sup>2+</sup> parece ter uma maior afinidade ao PE tanto *in natura* quanto envelhecido em ambientes com pH mais elevados, como se nota nos

gráficos 3 ((b) e (c)). Tal comportamento pode ser um indicativo de que as fases da digestão nas quais o PE é mais capaz de adsorver o íon  $Zn^{2+}$  são durante a mastigação, já que o pH da boca tem valor por volta de 7,0, e no duodeno ou mais à frente no intestino, onde o valor de pH está entre 6,0 e 8,0.

**Gráfico 3.** Capacidade de adsorção dos microplásticos para íon  $Zn^{2+}$  em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c), e comparativo entre valores de pH (d).



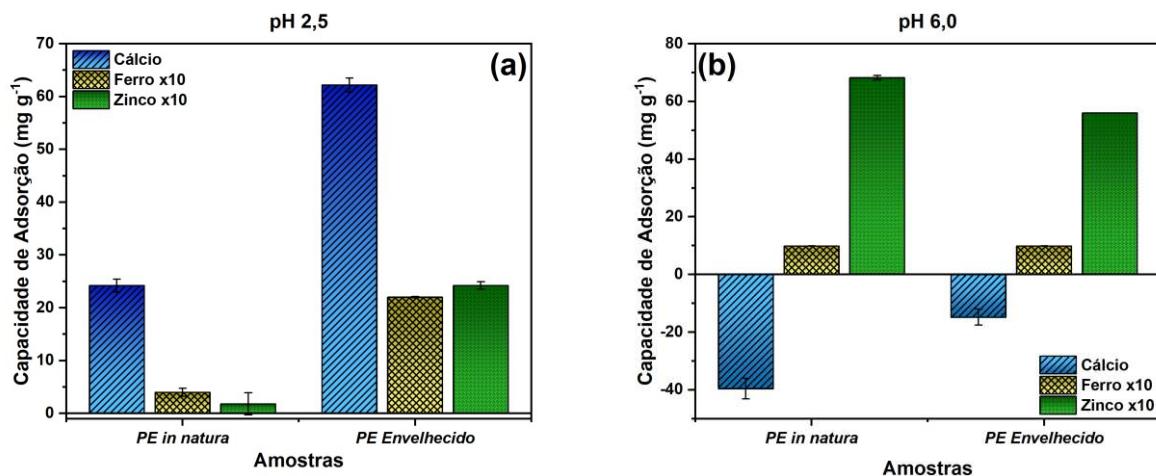
Fonte: O autor

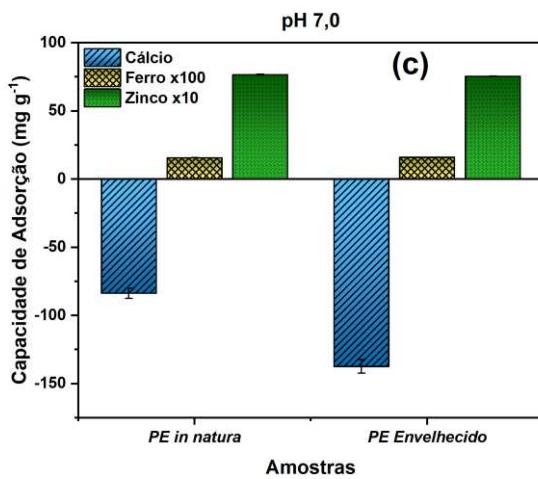
Ao comparar o PE *in natura* com o PE envelhecido para o valor de pH 7,0 (gráfico 3(c)) percebe-se que não há uma diferença considerável entre os desempenhos de ambos MPs na adsorção do íon  $Zn^{2+}$ , isso indica que o mecanismo de adsorção para este íon pode não se dar apenas por interações do tipo íon-dipolo, que para os outros íons estudados parecia ser a hipótese mais plausível. Comportamento semelhante é notado em pH 6,0 (gráfico X(b)), onde

o PE *in natura* apresentou valor de capacidade de adsorção ligeiramente superior ao PE envelhecido.

A seguir observando ao gráfico 4 lê-se um comparativo entre as capacidades de adsorção do PE *in natura* e do PE envelhecido para os três íons de estudo para cada valor de pH (os valores de capacidade de adsorção para os íons Fe<sup>3+</sup> e Zn<sup>2+</sup> estão aumentados de 10 vezes (100 vezes para o Fe<sup>2+</sup> em pH 7,0) para facilitar a comparação com os valores para o íon Ca<sup>2+</sup>). Esse comparativo nos mostra, para valor de pH 2,5 (gráfico 4(a)), que as maiores capacidades de adsorção dos MPs usados é para o íon Ca<sup>2+</sup>. Porém é importante ressaltar que pela intenção de reproduzir as concentrações dos íons de uma amostra real de feijão cozido, a concentração do íon Ca<sup>2+</sup> é consideravelmente maior que as concentrações dos outros dois íons, e isso pode ter refletido nos valores de capacidade de adsorção calculados, já que se tratou do estudo de uma solução multielementar. É notável também que, nos três valores de pH, a capacidade de adsorção para o íon Zn<sup>2+</sup> é superior à capacidade de adsorção para o íon Fe<sup>3+</sup>, tal diferença pode ser associada tanto à diferença de concentração entre os íons quanto aos seus raios iônicos. Por ter um menor raio iônico, o íon Zn<sup>2+</sup> (~0,63Å) pode vir a ser mais facilmente adsorvido pelo material que o íon Fe<sup>3+</sup> (~0,74Å) (Shannon, 1976).

**Gráfico 4.** Comparação de capacidade de adsorção dos microplásticos para os três íons em pH 2,5 (a), pH 6,0 (b), pH 7,0 (c).





Fonte: O autor

**Tabela 8.** Parâmetros dos experimentos variando pH.

Massa MPs	12,5mg
Velocidade de Rotação	150rpm
Temperatura	36,5°C
Tempo	24h

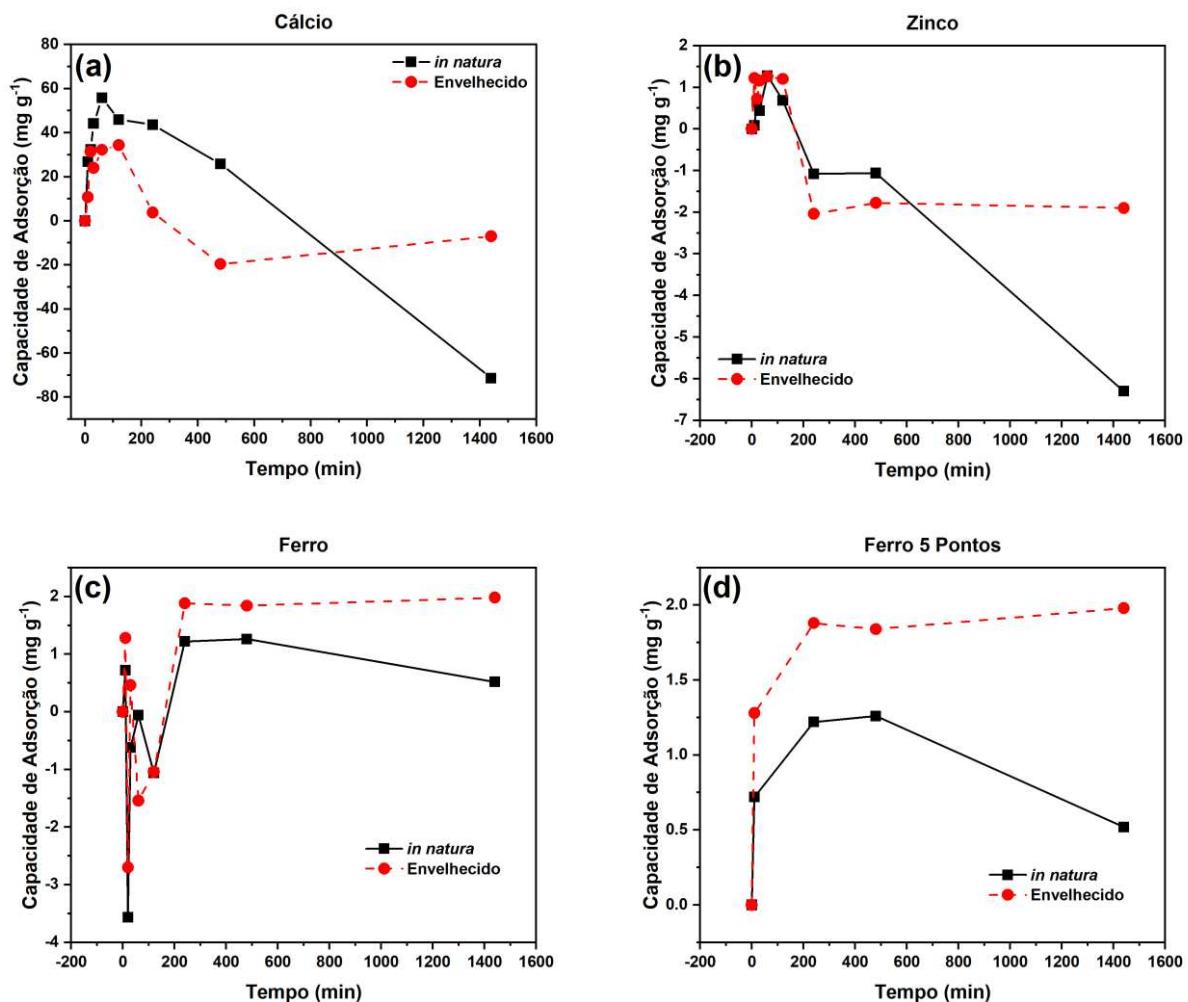
Fonte: O autor

## 5.2 Experimento de Cinética de Adsorção

Os resultados do experimento de cinética de adsorção com o PE *in natura* (gráfico 5) mostram que para os três íons não parece haver um tempo de equilíbrio mesmo após 24h. Há uma espécie de ponto de máxima capacidade de adsorção para os íons entre 120min e 240min, porém com o passar do tempo esses valores tendem a cair, o que pode indicar uma dessorção desses íons ao longo do restante do experimento, evidenciando que a interação entre os íons e a superfície do MP é fraca e facilmente quebrada. Para além disso, o tempo de digestão do feijão no organismo humano pode levar até 14h (Noah et al., [S.d.]), o que mostra que o processo de dessorção poderia influenciar na quantidade dos íons que estaria disponível para absorção do organismo. Já para o PE envelhecido (gráfico 5), há uma certa tendência de equilíbrio por volta de 240min de experimento, não havendo decréscimo considerável do valor de capacidade de adsorção mesmo após 24h, o que diz que a interação entre os íons e o MP que passou pelo processo de envelhecimento é mais forte que com o MP *in natura*. Para o íon  $Fe^{3+}$  retirou-se arbitrariamente pontos que pareciam estar completamente fora da tendência (após a realização do Teste de Dixon) do restante da curva (gráfico 5(d)), e nota-se que o padrão se repetiu tanto

para o PE *in natura* quanto para o envelhecido, mostrando que possivelmente essa variação ocorra naturalmente e que não seja necessariamente um “mau ponto”.

**Gráfico 5.** Cinética de adsorção dos microplásticos para o íon Ca<sup>2+</sup> (a), para o íon Zn<sup>2+</sup> (b), para o íon Fe<sup>3+</sup> (c), e para o íon Fe<sup>3+</sup> com apenas 5 pontos (d).



Fonte: O autor

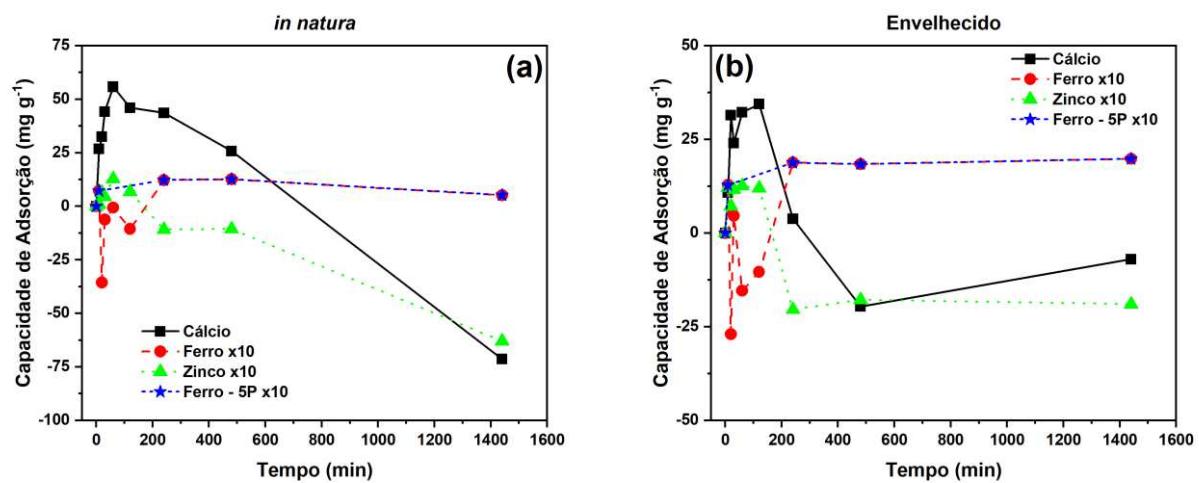
**Tabela 9.** Parâmetros dos experimentos de cinética.

Massa MPs	12,5mg
Velocidade de Rotação	150rpm
Temperatura	36,5°C

Fonte: O autor

No gráfico 6 é possível notar essas diferentes tendências para os três íons. Os gráficos são comparativos e, para facilitar a visualização, as capacidades de adsorção dos íons  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  foram aumentadas de 10 vezes.

**Gráfico 6.** Comparação da cinética de adsorção dos microplásticos para os 3 íons com o PE *in natura* (a), e com o PE envelhecido (b).



Fonte: O autor

## 6 PERSPECTIVAS

Para a continuidade desta pesquisa, pretende-se realizar as caracterizações físicas e químicas de amostras de feijão utilizando diversas técnicas dentre elas: espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES); cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) para identificação e quantificação de agrotóxicos; e também técnicas físico-químicas de caracterização a fim de determinar teores de carboidratos, proteínas, fibras e demais componentes do feijão. Deseja-se também repetir os experimentos realizados nesse trabalho, porém utilizando não mais uma solução sintética, mas a própria sopa de feijão. Posteriormente, pretende-se realizar testes de bioacessibilidade dos micronutrientes (metais) na amostra de feijão que entrou em contato com os diferentes tipos de microplástico.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Findados os experimentos, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados, e que os microplásticos têm sim potencial de adsorver os nutrientes presentes no feijão e que, além disso, o tempo de exposição desse material à radiação ultravioleta causa alterações capazes de influenciar a interação do material com os nutrientes do alimento. Conclui-se também que a interação do MP com cada íon difere a depender o pH do meio, e que existe uma condição de pH “ótima” para que cada íon seja adsorvido. Por fim, conclui-se que o estudo deve ser continuado pois de fato a presença de microplásticos aparenta ter influência na disponibilidade dos nutrientes do feijão para quem o consome.

## REFERÊNCIAS

- ANGON, Prodipto Bishnu *et al.* Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon* Elsevier Ltd, , 15 abr. 2024.
- BALLENT, Anika *et al.* Sources and sinks of microplastics in Canadian Lake Ontario nearshore, tributary and beach sediments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 110, n. 1, p. 383–395, 15 set. 2016.
- BEATRIZ BARRUETO-GONZALEZ, Norka. **BIODISPONIBILIDADE DE MINERAIS DAS FONTES LEGUMINOSAS.** [S.l.: S.n.].
- CASTRO, Rebeca Oliveira *et al.* Evaluation of microplastics in Jurujuba Cove, Niterói, RJ, Brazil, an area of mussels farming. **Marine Pollution Bulletin**, v. 110, n. 1, p. 555–558, 15 set. 2016.
- CHEN, Huiping *et al.* Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function. **Chemosphere**, v. 243, 1 mar. 2020.
- CHUBARENKO, I. *et al.* On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 108, n. 1–2, p. 105–112, 15 jul. 2016.
- COLE, Matthew *et al.* Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, dez. 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Produção pode alcançar 339,6 milhões de toneladas e superar safra anterior.** Disponível em: <Produção pode alcançar 339,6 milhões de toneladas e superar safra anterior>. Acesso em: 27 jul. 2025.
- DE SOUZA MACHADO, Anderson Abel *et al.* Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. **Environmental Science and Technology**, v. 53, n. 10, p. 6044–6052, 21 maio 2019a.
- DE SOUZA MACHADO, Anderson Abel *et al.* Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. **Environmental Science and Technology**, v. 53, n. 10, p. 6044–6052, 21 maio 2019b.
- DE VASCONCELOS NETO, Joaquim R. *et al.* Adsorption of Metals Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Ni<sup>2+</sup> onto Hydrogen Peroxide-Treated Polyethylene Microplastics. **Revista Virtual de Química**, v. 16, n. 3, p. 391–399, 2024.
- DUIS, Karen; COORS, Anja. **Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects.** Environmental Sciences Europe Springer Verlag, , 1 dez. 2016.
- ESPÍ, Enrique *et al.* Plastic films for agricultural applications. **Journal of Plastic Film and Sheeting**, v. 22, n. 2, p. 85–102, abr. 2006.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Top 20**

**Country, Export quantity of Beans, dry.** Disponível em:  
[https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity\\_exports](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity_exports). Acesso em: 27 jul. 2025.

FRIAS, J. P. G. L.; NASH, Roisin. Microplastics: Finding a consensus on the definition. **Marine Pollution Bulletin**, v. 138, p. 145–147, 1 jan. 2019.

GUO, Xuan; WANG, Jianlong. **The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review.** **Marine Pollution Bulletin** Elsevier Ltd, , 1 maio 2019.

HAYNES, W. M.; LIDE, David R.; BRUNO, Thomas J. **CRC Handbook of Chemistry and Physics 97 th Edition.** [S.l.: S.n.]

HIDALGO-RUZ, Valeria *et al.* Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 6, p. 3060–3075, 20 mar. 2012.

ISLAM, Md. Ikramul; RAHMAN, Sadikur; HOQUE, Mohammad Mohsin Ul. The Influence of Elimination of Roving Frame on Ring Spun Cotton Yarn Characteristics. **World Journal of Engineering and Technology**, v. 11, n. 01, p. 10–19, 2023.

LEIFHEIT, Eva F.; LEHMANN, Anika; RILLIG, Matthias C. Potential Effects of Microplastic on Arbuscular Mycorrhizal Fungi. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 1 fev. 2021.

LIU, Weiyi *et al.* **A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms.** **Environment International** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2021.

LWANGA, Esperanza Huerta *et al.* **Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment.** **Chemical and Biological Technologies in Agriculture** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 dez. 2022.

MENG, Fanrong *et al.* Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth to soil contaminated with microplastics. **Science of the Total Environment**, v. 755, 10 fev. 2021.

MILES, Carol *et al.* Suitability of biodegradable plastic mulches for organic and sustainable agricultural production systems. **HortScience**, v. 52, n. 1, p. 10–15, 1 jan. 2017.

MILLER, Michaela E.; HAMANN, Mark; KROON, Frederieke J. **Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms: A review and meta-analysis of current data.** **PLoS ONE** Public Library of Science, , 1 out. 2020.

MONDOL, Monisha; ANGON, Prodipto Bishnu; ROY, Arpita. **Effects of microplastics on soil physical, chemical and biological properties.** **Natural Hazards Research** KeAi Communications Co., , 1 mar. 2025.

NOAH, Lionel *et al.* **Human Nutrition and Metabolism Digestion of Carbohydrate from White Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Healthy Humans 1.** [S.l.: S.n.]

OSMAN, Ahmed I. *et al.* **Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review.** Environmental Chemistry Letters Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 ago. 2023.

PIEHL, Sarah *et al.* Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.

PINHEIRO, Patrícia Barros; CARVALHO JUNIOR, Roberval de; FREITAS, Fabricio de Lima. MICROPLÁSTICO EM PEIXES MARINHOS: UM REFERENCIAL TEÓRICO. In: **Engenharia de Pesca: aspectos teóricos e práticos - Volume 3.** [S.l.]: Editora Científica Digital, 2022. p. 162–172.

**Proceedings of the Second Research Workshop on Microplastic Marine Debris.** . [S.l.: S.n.]

RODRIGUES, Renata Muniz *et al.* Most consumed foods in Brazil: evolution between 2008-2009 and 2017-2018. **Revista de Saude Publica**, v. 55, 2021.

RODRÍGUEZ-SEIJO, Andrés; PEREIRA, Ruth. Morphological and Physical Characterization of Microplastics. **Comprehensive Analytical Chemistry**, v. 75, p. 49–66, 2017.

SANTANA, Giuliana B. *et al.* Photoaging effects on polyethylene microplastics: Structural changes and chlorpyrifos adsorption. **Marine Environmental Research**, v. 203, 1 jan. 2025a.

SANTANA, Giuliana B. *et al.* Photoaging effects on polyethylene microplastics: Structural changes and chlorpyrifos adsorption. **Marine Environmental Research**, v. 203, 1 jan. 2025b.

SHANNON, R. D. **Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chaleogenides**Acta Cryst. [S.l.: S.n.]

SILVA, Herlane; CUBA, Renata; TERAN, Francisco. Influência dos parâmetros ambientais na adsorção de glifosato em microplásticos de politereftalato de etileno. In: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento, 6 maio 2025.

TACO. **Tabela Brasileira de Composicao de Alimentos - TACO 4 Edicao Ampliada e Revisada.** [S.l.: S.n.]

THOMPSON, Richard C. *et al.* Lost at Sea: Where Is All the Plastic? **Science**, v. 304, n. 5672, p. 838, 7 maio 2004.

WANG, Fayuan *et al.* **Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives.** **Journal of Hazardous Materials**Elsevier B.V., , 15 fev. 2022.