Food Science Today 3:1 (2024)
ISSN 2965-1190

ARTIGO ORIGINAL

FOOD SCIENCE TODAY

Isotermas de equilíbrio para análise do pomace de tomate

Equilibrium isotherms for tomato pomace analysis

Brenda Velasco Borges [a], Ellen Carvalho Silva [a], Gilberto Alessandre Soares Goulart [a*]

[a] Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, 74001-970, Goiânia, Goiás, Brasil.

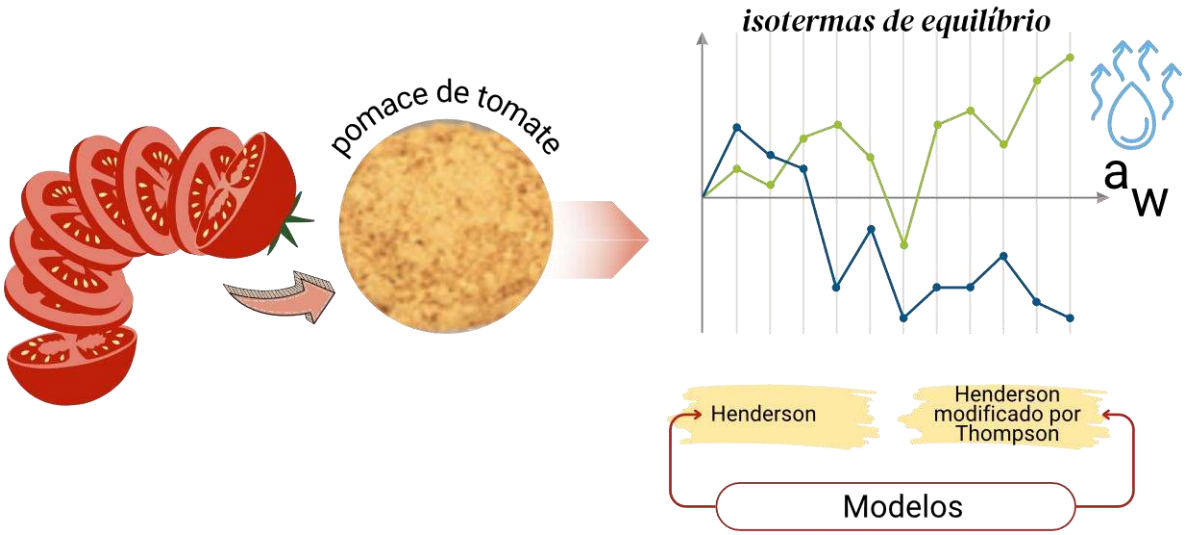
Resumo
O Brasil é um dos maiores produtores de tomate do mundo. Durante o processo de industrialização deste alimento, são gerados resíduos, conhecidos como pomace de tomate, que geralmente são descartados. O pomace, composto por casca, semente, fibras e restos de polpa de tomate, é um subproduto valioso, com potencial para ser utilizado na criação de novos produtos. Este trabalho tem como objetivo estudar a isoterma de equilíbrio do pomace de tomate seco a 95°C, utilizando os modelos matemáticos de Henderson e Henderson-Thompson para isoterma de adsorção. Foram analisadas a umidade de equilíbrio, a umidade teórica e a atividade de água. Após as análises e o estudo do gráfico da isoterma, os coeficientes de determinação encontrados foram 1 para o modelo de Henderson-Thompson e 0,548 para a curva obtida com os dados experimentais. Os resultados mostraram que os dados seguem uma curva sigmoidal e que o modelo de Henderson-Thompson se ajustou adequadamente aos dados experimentais. Em contraste, o modelo de Henderson não apresentou resultados plausíveis, indicando que os dados não se ajustaram a este modelo. Assim, o pomace de tomate demonstrou ser um subproduto promissor, com potencial para aplicação em novos produtos, destacando a importância do reaproveitamento de resíduos na indústria alimentícia.

Palavras-chave: Isoterma de equilíbrio, pomace de tomate, modelo matemático, propriedades de adsorção, subprodutos da indústria de alimentos.

Abstract
Brazil is one of the world's largest tomato producers. During the industrialization process of this food, residues known as tomato pomace are generated and usually discarded. Tomato pomace, composed of skin, seeds, fibers, and remnants of tomato pulp, is a valuable by-product with potential for use in creating new products. This study aims to examine the equilibrium isotherm of dried tomato pomace at 95°C, using the mathematical models of Henderson and Henderson-Thompson for adsorption isotherms. Equilibrium moisture, theoretical moisture, and water activity were analyzed. Following the analyses and the study of the isotherm graph, the coefficients of determination found were 1 for the Henderson-Thompson model and 0.548 for the curve obtained with the experimental data. The results showed that the data followed a sigmoidal curve and that the Henderson-Thompson model fit the experimental data well. In contrast, the Henderson model did not provide plausible results, indicating that the data did not fit this model. Thus, tomato pomace has proven to be a promising by-product, with potential for application in new products, highlighting the importance of waste reuse in the food industry.

Keywords: Equilibrium isotherm; tomato pomace; mathematical model, adsorption properties, food industry by-products.

Graphical Abstract



*Corresponding author: Gilberto A. S. Goulart. E-mail address: gibagoulart@gmail.com
Invited Article; Accepted: 24 June 2024; Published: 02 July 2024.
© The Author(s) 2024. Open Access (CC BY 4.0).

ROYALDATASET

1. Introdução

O Brasil está entre os 10 maiores produtores mundiais de tomate, com os estados de Goiás, Bahia, São Paulo e Minas Gerais responsáveis por cerca de 72% da produção de tomate industrial e *in natura* (CONAB, 2020; Furquim & Nascimento, 2021). Podendo ser chamado de pomace de tomate, o subproduto do processamento do tomate industrial é destinado ao descarte, fazendo-se necessário estudar possíveis aproveitamentos e utilizações para reduzir o desperdício e contaminação do meio ambiente (Cantarelli et al., 1993; Machado et al., 1996).

A remoção da umidade em alimentos prolonga seu tempo de estocagem, sendo a secagem um método comum para eliminar a água, que poderia ser fonte de microrganismos e, por consequência, causar deterioração (Cano-Chauca et al., 2004). Segundo Orris (1997), a presença de água livre em um alimento é chamada de atividade de água (A_w), devido ao seu potencial de ser utilizada pelos microrganismos para sua proliferação. Assim, a secagem de frutas e hortaliças é uma prática comum para reduzir a perda do produto, principalmente por ação microbiana.

A técnica de leito de jorro é um método eficiente para a secagem de grãos, pastas e suspensões, promovendo um contato íntimo entre fluido e partícula, o que reduz o tempo de residência das partículas secas na câmara de secagem e resulta em um produto seco de melhor qualidade. Além de proporcionar características agradáveis ao consumidor, essa técnica pode gerar alimentos desidratados de fácil comercialização (Ferreira et al., 2002; Fiorda & Siqueira, 2009).

A isoterma de equilíbrio é um método de estudo crucial para caracterizar a absorção da água em alimentos, solucionar problemas de estocagem, além de possibilitar o estudo das qualidades químicas, físicas e microbiológicas de alimentos que têm a capacidade de absorver umidade (Ditchfield, 2000; Bracht et al., 2014). Para Iglesias e Chirife (1982), existe uma relação entre a atividade de água e o estudo de isoterma de adsorção, sendo possível a implementação de uma curva relacionando a umidade adquirida com a atividade de água para pressão e temperatura de secagem.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi determinar a curva da isoterma de equilíbrio, focando na atividade de água (A_w) e na umidade adquirida pelo pomace de tomate, e estudar possíveis alterações que podem ser corrigidas para aperfeiçoamento da técnica.

2. Material e Métodos

2.1 Matéria-prima

Utilizou-se farinha de pomace de tomate industrial (*Solanum lycopersicum* L.), composta por casca, tecido, fibras e sementes (Cantarelli et al., 1993). A farinha foi obtida após secagem do pomace em leito de jorro a 95 °C e subsequente processamento em moinho de martelo. O leito de jorro consiste em um equipamento que realiza a secagem de material úmido pelo contato de ar aquecido, que é soprado através do leito pelo soprador radial e conduzido até o ciclone Lapple.

2.2 Umidade de equilíbrio: método estático

Para analisar a curva de adsorção do pomace, realizou-se a medição da umidade de equilíbrio por meio do seguinte experimento: aproximadamente 3 g da farinha de pomace foram colocadas em recipientes plásticos posicionados em um suporte dentro de potes hermeticamente fechados contendo soluções ácidas de H_2SO_4, como exibido na **Fig. 1**. As soluções variavam em concentrações de 25% a 65%, com incrementos de 5% entre elas, garantindo a variação da umidade relativa do ar. Cada concentração foi replicada três vezes para minimizar erros. Os recipientes foram então armazenados em incubadora “BOD” a 30 °C. As amostras foram pesadas 2 vezes, com intervalo de 7 dias entre cada pesagem.



Fig. 1 Pomace de tomate disposto no recipiente utilizado no experimento em incubadora BOD.

Este método é classificado como gravimétrico estático, onde tanto a temperatura (na incubadora) quanto a umidade do ar (dentro dos potes hermeticamente fechados) são mantidas constantes (Cardoso, 2012). O controle rigoroso dessas variáveis é crucial, pois ocorre transferência de massa entre o alimento e o ambiente circundante até que o equilíbrio seja alcançado.

2.3 Umidade de equilíbrio teórico

Há vários modelos que podem ser utilizados na realização de isotermas de adsorção. A **Tabela 1** apresenta dois modelos que foram utilizados no ajuste dos dados experimentais neste estudo, especificamente Henderson, e Henderson modificado por Thompson (Henderson, 1952; Thompson et al., 1968). A modelagem foi feita com o auxílio do software R (R Core Team, 2023).

Tabela 1 Modelos de sorção empregados na modelagem das isotermas de equilíbrio

Nomenclatura	Modelo
Henderson	$X_e = D\left[\frac{1}{T}\ln\left(\frac{1}{1-a_w}\right)\right]^B$
Henderson modificado por Thompson	$X_e = D\left[\frac{-\ln(1-a_w)}{D(T+B)}\right]^{\frac{1}{C}}$

Fonte: Henderson (1952); Thompson et al. (1968)

3. Resultados e Discussão

A **Tabela 2** apresenta a média das atividades de água obtidas para as amostras armazenadas em estufa e a amostra padrão.

Tabela 2 Valores de A_w obtidas após experimento com pomace de tomate

Amostras	Atividade de água (A_w)
Padrão	0,477
25%	0,6627
30%	0,597
35%	0,5737
40%	0,534
45%	0,586
50%	0,6237
55%	0,5993
60%	0,518
65%	0,46

Observa-se que, em comparação com a amostra padrão obtida apenas com a secagem do pomace a 95 °C, houve um aumento da atividade de água nas amostras tratadas com concentrações de H_2SO_4 variando entre 25% e 60%, conforme medidas após o experimento da isoterma de equilíbrio.

No entanto, ao analisar a amostra com 65% de H_2SO_4, verifica-se uma redução na atividade de água. Isso indica uma perda de água livre do pomace, causada pelo maior teor de ácido em relação à água no ambiente. Logo, para atingir o equilíbrio com a atmosfera que a envolvia, a amostra sofreu uma dessorção, transferindo água para o ambiente.

Existe uma clara relação entre a atividade de água medida após o experimento da isoterma de adsorção com a água livre presente no produto antes das análises. Essa diferença pode ser atribuída ao método utilizado na isoterma de adsorção, onde o material é seco e colocado em várias atmosferas diferentes, seguindo um padrão crescente e simétrico, e no fim é feita a medição de ganho de massa (Ditchfield, 2000).

Esses resultados evidenciam a influência significativa das condições ambientais controladas durante o experimento de isoterma de adsorção na redistribuição da umidade do pomace de tomate.

Os resultados apresentados na **Tabela 3** mostram as umidades de equilíbrio obtidas experimentalmente a 95 °C e as umidades teóricas calculadas utilizando o modelo de Henderson modificado por Thompson. A atividade de água (A_w) é uma medida crucial que indica a disponibilidade de água no pomace de tomate, afetando diretamente sua estabilidade e qualidade durante o armazenamento.

Tabela 3 Valores de umidade de equilíbrio para o pomace de tomate seco à 95 °C e teóricos a partir do modelo de Henderson-Thompson.

Atividade de água (A_w)	Umidade de equilíbrio à 95 °C	Umidade de equilíbrio teórica
0,6627	1,9098	0,3282
0,5970	1,0964	0,3233
0,5737	0,5271	0,3216
0,5340	0,0000	0,3186
0,5860	0,0000	0,3225
0,6237	0,1068	0,3253
0,5993	0,4244	0,3235
0,5180	0,9803	0,3174
0.4600	0,6492	0,3129

Observa-se que, para a maioria das atividades de água avaliadas, as umidades de equilíbrio medidas experimentalmente tendem a ser mais elevadas do que as previstas pelo modelo teórico. Esse fenômeno pode ser atribuído a diversos fatores, como variações na composição do pomace de tomate, heterogeneidade na distribuição de umidade dentro das partículas, ou mesmo limitações nos pressupostos do modelo teórico utilizado.

Cardoso (2012) explica que a adsorção é um processo complexo influenciado pela interação entre o material sólido e o ambiente gasoso circundante. Em relação às isotermas de adsorção, elas permitem caracterizar a capacidade do pomace de tomate em adsorver água, sendo a camada monomolecular um ponto crítico onde podem iniciar-se reações químicas de deterioração, como mencionado por Ferreira e Pena (2003).

A **Fig. 2** ilustra graficamente as curvas obtidas a partir dos dados experimentais, comparadas com as curvas teóricas geradas pelos modelos de Henderson e Henderson-Thompson. Essa comparação visual evidencia a adequação dos modelos teóricos na previsão das umidades de equilíbrio em diferentes condições de atividade de água, apesar das variações observadas.

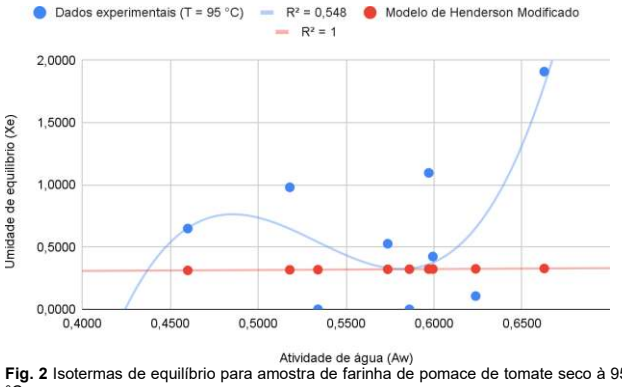


Fig. 2 Isotermas de equilíbrio para amostra de farinha de pomace de tomate seco à 95 °C

Na **Fig. 2** são apresentadas as isotermas de equilíbrio para a amostra de farinha de pomace de tomate seco a 95 °C. Os valores obtidos são correlacionados com os coeficientes de determinação (R^2), que foram respectivamente 1 e 0,548 para o modelo de Henderson-Thompson e para a curva obtida pelos dados experimentais. Considerando que o intuito do experimento é encontrar uma curva que representa a relação de adsorção entre a umidade de equilíbrio e atividade de água, o gráfico demonstra que o modelo de Henderson-Modificado não apresentou um bom ajuste e dos dados experimentais, apresentando um formato sigmoidal.

Santos et al. (2010) destacam que a variação da umidade está relacionada diretamente à temperatura, tempo e condições de armazenamento, os quais permitem a absorção e dessorção de água pelo produto.

Segundo Cardoso (2012), alimentos, materiais proteicos e farináceos geralmente apresentam isotermas de adsorção não lineares do tipo II, ou seja, possuem forma sigmoidal. A **Fig. 3** apresenta os tipos de isotermas de adsorção (Cardoso, 2012).

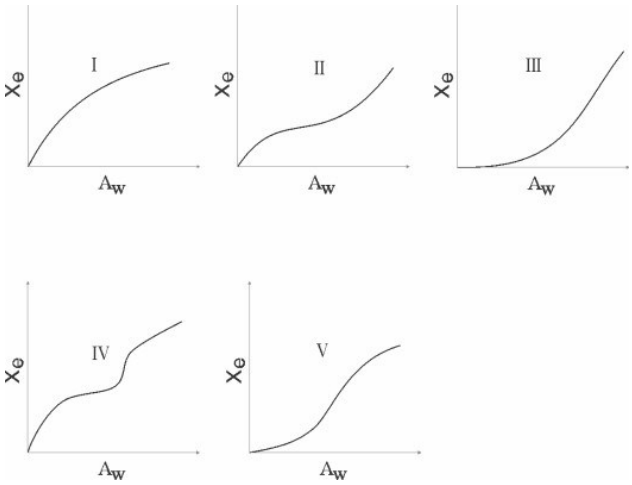


Fig. 3 Isotermas de adsorção de Van der Waals. Fonte: Cardoso (2012)

Ao analisar o gráfico I, na **Fig. 3**, percebe-se o formato sigmoidal da isoterma de adsorção do pomace de tomate analisado à 30 °C. Porém, pode-se perceber a não adequação do modelo de Henderson-Thompson aos dados, visto que ele apresentou um formato linear. Em relação ao modelo de

Henderson, não houve ajuste pelos parâmetros, não podendo ser utilizado.

A atividade de água é a variável mais importante no processo de fermentação do alimento. Quando relacionado a atividade de água e o armazenamento do material, pode ocorrer a perda do alimento. Assim, quando analisado o tipo de isoterma de um experimento é possível retardar ou até inibir a fermentação (Fiorentin et al., 2010). Sampaio et al (2015) cita a importância acerca das informações obtidas através de isotermas: pode ser utilizado na escolha de embalagem adequada considerando a permeabilidade do produto, predição de estabilidade física e química e até mesmo na formulação de misturas. Cardoso (2012) também cita a importância do formato da isoterma: é um auxílio na escolha de embalagem mais apropriada e na avaliação de estabilidade do alimento, pois representa a relação entre a ligação da água com a superfície do material.

4. Conclusão

Com o estudo da isoterma de equilíbrio, observou-se que o pomace de tomate seco em leito de jorro a temperatura de operação de 95°C, ocorre o processo de adsorção em sua maior parte, demonstrando uma dessorção apenas para a concentração de ácido mais alta aplicada. Assim, o produto estudado adquiriu massa através da absorção de água entre as concentrações de 25% a 60%. Após as passagens foi possível verificar a umidade de equilíbrio a 95°C e a atividade de água medida depois do experimento, com isso foi possível aplicar os modelos matemáticos e, assim, encontrar a umidade de equilíbrio teórica. Porém, os dados não se ajustaram ao modelo de Henderson, não podendo obter resultados plausíveis, enquanto para o modelo de Henderson-Thompson houve um baixo ajuste, visto que este apresentou uma linearização em contrapartida aos dados, que apresentaram uma isoterma com formato sigmoidal. Assim, faz-se necessário o estudo de outros modelos que se adequam à farinha de pomace de tomate, pois, através dessas informações, será possível prever o comportamento do produto e auxiliar na escolha de embalagem, formulações e vida de prateleira do mesmo.

Agradecimentos

Em especial ao Pós-Doutorando Diogo Pedrosa Corrêa da Silva e ao Professor Luis Carlos Cunha Junior, do laboratório de tecnologia pós-colheita (LTPC) da Escola de Agronomia da UFG, por toda a ajuda e empréstimo das BODs durante o experimento da isoterma de equilíbrio e para as pessoas que colaboraram com este trabalho.

Contribuições dos Autores

B.V.B.: Curadoria de Dados, Redação - Preparação do Rascunho Original; Revisão e Edição; E.C.S.: Curadoria de Dados, Redação – Preparação do Rascunho Original; G.A.S.G.: Supervisão, Redação -Revisão e Edição; Revisão e Edição, Metodologia e Administração de Projetos. Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito final.

Disponibilidade de dados e materiais

Os dados que dão suporte aos resultados deste estudo estão disponíveis através do autor correspondente mediante solicitação razoável.

Conflitos de Interesses

Os autores declaram que não têm interesses conflitantes.

Referências

Bracht, C. K., Menezes, M. L., Ambrosio-Ugri, M. C., & Pereira, N. C. (2014). Determinação das isotermas de equilíbrio das sementes de uva das variedades Cabernet Sauvignon e Bordô. *Engevista*, *17*(1), 44. https://doi.org/10.22409/engevista.v17i1.558

Cano-Chauca, M., Ramos, A. M., Stringheta, P. C., Marques, J. A., & Silva, P. I. (2004). Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, *22*(1). https://doi.org/10.5380/cep.v22i1.1184

Cantarelli, P. R., Regitano-d'Arce, M. A. B., & Palma, E. R. (1993). Physicochemical characteristics and fatty acid composition of tomato seed oils from processing wastes. *Scientia Agricola*, *50*(1), 117–120. https://doi.org/10.1590/s0103-90161993000100016

Cardoso, F. F. 2012. *Propriedades de adsorção de água em farinhas mistas de arroz e bagaço de cevada pré-gelatinizadas por extrusão termoplástica*. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Goiás.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). 2020. Tomate: análise dos indicadores da produção e comercialização no mercado mundial, brasileiro e catarinense. *Compêndio de estudos Conab*, v. 21, p. 11-12.

Ditchfield, C. 2000. *Estudo dos métodos para medida da atividade de água*. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Pós-Graduação em Engenharia Química, São Paulo.

Ferreira, J. A., T.C. Andrade, M.C. Mancini, & Scheid, C. M. (2002). Obtenção do concentrado de feijão em pó em leito de jorro bidimensional. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*, *22*(1), 105–112.

Fiorda, F. A. & Siqueira, M. I. D. de. 2009. Avaliação do pH e atividade de água em produtos cárneos. *Revista Estudos - Revista de Ciências Ambientais e Saúde* 36: 817–26. https://doi.org/10.18224/est.v36i4.1132

Fiorentin, L. D., Menon, B. T., Barros, S. T. D. de, Pereira, N. C., Lima, O. C. da M., & Modenes, A. N. (2010). Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *14*(6), 653–659. https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000600012

Furquim, M. G. D.; Nascimento, A. R. Aspectos relevantes para o entendimento da cadeia do tomate de mesa no Brasil. In: *Estudos em Agronegócio: participação brasileira nas cadeias produtivas*, v. 5, p. 173-196, 2021.

Henderson, M. S. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, *33*, 29–32. https://ci.nii.ac.jp/naid/10017619952

Iglesias, H.A.; & Chirife J. 1982. *Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food components*. 1.ed. New York: Academic Press, 374 p.

Machado, C. F., Manterola, H., Porte, E., & Cerda, D. (1996). Study of ruminal pH, VFA and N-NH3 in Steers fed with increasing levels of tomato pomace. *Avances En Producción Animal*, *21*(1–2), 105–113.

Orriss, G. D. (1997). Animal diseases of public health importance. *Emerging Infectious Diseases*, *3*(4), 497–502. https://doi.org/10.3201/eid0304.970413

R Core Team. R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023. Acesso em: 30 mar. 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org>

Sampaio, R. M., Matos, E. N. V., & Paula, M. L. de. (2015). Determinação das isotermas de adsorção e do calor de sorção da farinha de babaçu comercial. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 5031–5037. https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1852-17210-137084

Santos, J. C., Silva, G. F., Santos, J. A. B., & Oliveira Júnior, A. M. (2010). Processamento e avaliação da estabilidade da farinha de banana verde. *Exacta*, *8*(2), 219–224. https://doi.org/10.5585/exacta.v8i2.2245

Thompson, T. L., Peart, R. M., & Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying - A new model. *Transactions of the ASAE*, *11*(4), 0582–0586. https://doi.org/10.13031/2013.39473