

APLICAÇÃO DA ENERGIA DE GIBBS PARA ALOTROPIA DO FERRO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A LITERATURA COM A BASE DE DADOS DO NIST WEBBOOK

João Victor Barroso Xavier⁽¹⁾ (victor.jvbx@alu.ufc.br), João Vitor de Araujo Silva⁽¹⁾ (joaovitorsilvaz@alu.ufc.br), José Arlisson de Sousa Ribeiro⁽¹⁾ (arlisson.r@alu.ufc.br), Pedro Queiros Santiago⁽¹⁾ (pedroqueirossantiago@gmail.com), Laryssa Coutinho da Silva⁽¹⁾ (laryssacoutinho@alu.ufc.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal do Ceará (UFC); Departamento de Engenharia Metalúrgica

RESUMO:

O conceito de energia livre de Gibbs é fundamental para avaliar a estabilidade de um sistema em diferentes estados e explicar esses processos, sendo particularmente relevante para o setor siderúrgico. Este setor exige um conhecimento aprofundado dos conceitos termodinâmicos, especialmente nos processos de transformação de fase, como a alotropia, que envolve a alteração da estrutura cristalina de um material devido a mudanças de temperatura e pressão. Esse processo é comum em muitos materiais, especialmente no ferro puro, que é a base da fabricação do aço, material amplamente utilizado tanto no setor industrial quanto no dia a dia. Diante disso, este trabalho propõe explorar a relação entre a energia livre de Gibbs (G) e a alotropia do ferro puro (Fe), desde a estabilidade da fase alfa (α) até temperaturas superiores ao ponto de fusão, visando uma análise termodinâmica abrangente. Foram utilizadas as equações e a metodologia de cálculo de DeHoff e Porter, além de dados termodinâmicos obtidos pela base de dados do NIST WEBBOOK e o software FactSage. Os resultados obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura, contribuindo para uma melhor compreensão dos fundamentos termodinâmicos e das transformações de fases no ferro puro.

PALAVRAS-CHAVE: ENERGIA LIVRE, ESTABILIDADE, FERRO, ALOTROPIA, DADOS TERMODINÂMICOS.

APPLICATION OF GIBBS ENERGY TO IRON ALLOTROPY: A COMPARATIVE STUDY BETWEEN LITERATURE AND THE NIST WEBBOOK DATABASE

ABSTRACT:

The concept of Gibbs free energy is fundamental to evaluate the stability of a system in different states and explain these processes, being particularly relevant for the steel industry. This sector requires an in-depth knowledge of thermodynamic concepts, especially in phase transformation processes, such as allotropy, which involves the alteration of the crystalline structure of a material due to changes in temperature and pressure. This process is common in many materials, especially in pure iron, which is the basis for steel production, a material widely used both in the industrial sector and in daily life. In view of this, this work proposes to explore the relationship between Gibbs free energy (G) and the allotropy of pure iron (Fe), from the stability of the alpha phase (α) to temperatures above the melting point, aiming at a comprehensive thermodynamic analysis. The equations and calculation methodology of DeHoff and Porter were used, in addition to thermodynamic data obtained from the NIST WEBBOOK database and the FactSage software. The results obtained are compatible with those found in the literature, contributing to a better understanding of the thermodynamic fundamentals and phase transformations in pure iron.

KEYWORDS: FREE ENERGY, STABILITY, PURE IRON, ALLOTROPY, THERMODYNAMIC DATA.

1. INTRODUÇÃO

A termodinâmica é um campo de estudo fundamental para compreender as propriedades dos materiais, sendo uma ferramenta essencial para a análise e previsão das transformações de fases que ocorrem em materiais ou ligas sob pressões e temperaturas definidas. Aplicando os conceitos da termodinâmica, obtém-se uma ferramenta de conhecimento e apoio na tomada de decisões, especialmente relevante para o setor siderúrgico. (PORTER, 2009).

Quando se analisa a influência desse setor em território nacional, percebe-se que o mesmo desempenha um papel crucial na estabilidade econômica, sendo vital em períodos de incerteza e retração das atividades econômicas. (ZAGO, 2019; LEITE, 2014).

A importância desse setor exige um conhecimento aprofundado e a aplicação dos conceitos da termodinâmica, especialmente nos processos de transformação de fase. Nesse contexto, a energia livre de Gibbs é uma medida crucial para a avaliação da estabilidade de um sistema em diferentes estados e uma ferramenta eficaz para explicar como esses processos ocorrem.

Um dos processos de mudança que ocorrem em um material é a alotropia, que corresponde à alteração da estrutura cristalina de um material devido à mudança de temperatura e pressão. Esse processo é bastante comum em inúmeros materiais, especialmente no ferro puro, que é a base da fabricação do aço, um material de grande aplicação e relevância tanto no setor industrial quanto no dia a dia. (CÉSAR, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho propõe-se a explorar a relação entre a energia livre de Gibbs (G) e a alotropia do ferro puro (Fe), desde a estabilidade da sua fase alfa (α) até temperaturas superiores ao ponto de fusão, com o objetivo de realizar uma análise termodinâmica abrangente.

Motivado pela ampla utilização do minério de ferro em diversos setores da sociedade, especialmente quando associado a outros materiais formando ligas metálicas, este estudo visa analisar a ocorrência de suas fases e seus pontos de equilíbrio. Tal análise é fundamental para a compreensão de suas propriedades e contribui para a aplicação deste material em diversas áreas.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas as equações e a metodologia de cálculo abordadas por DeHoff (2006) e Porter (2009). Além disso, por meio de dados termodinâmicos disponíveis na bibliografia e da utilização do software FactSage, busca-se verificar a consistência dos resultados obtidos, contribuindo para uma melhor compreensão dos fundamentos termodinâmicos e comparação dos resultados obtidos relacionados às transformações de fases no ferro puro.

1.2 Alotropia do Ferro Puro

De acordo com Belzunce (2001), ao resfriar uma amostra de ferro puro inicialmente no estado líquido até o estado sólido (solidificação), observa-se que essa transformação ocorre a uma temperatura de 1538 °C. Nessa temperatura, o ferro puro apresenta uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), conhecida no meio metalúrgico como ferro delta, com um parâmetro de rede (a) de 2,93 angstroms (Å).

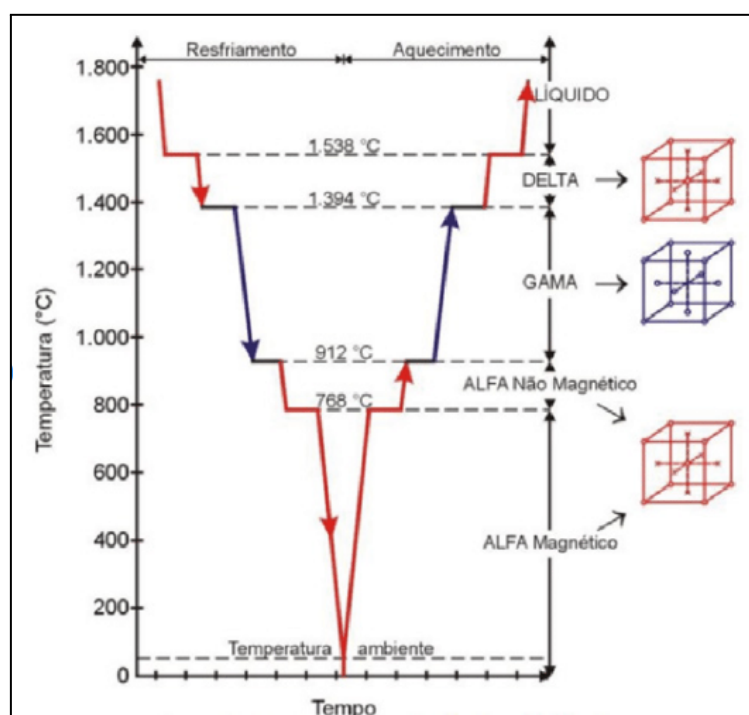
Continuando o processo de resfriamento, o ferro delta permanece estável até a temperatura de 1394 °C, quando ocorre uma mudança para uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), sendo então denominado austenita, com um parâmetro de rede de 3,65 Å.

A última fase alotrópica ocorre a 912 °C, com a formação da ferrita, onde o ferro apresenta novamente uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), com um parâmetro de rede de 2,9 Å.

É importante notar que, ao continuar o resfriamento até a temperatura ambiente, não ocorrem mais mudanças alotrópicas no ferro. A única transformação perceptível é que o ferro se torna magnético abaixo de 770 °C.

Para simplificar a apresentação dessas fases e suas respectivas faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações, a Figura 1 abaixo ilustra essas informações:

FIGURA 1. Alotropia do Ferro puro.



Fonte: SANTIAGO (2019).

1.2 Cálculo da Energia Livre de Gibbs

A energia livre de Gibbs corresponde a uma ferramenta matemática essencial para a interpretação e representação gráfica das curvas que relacionam a estabilidade de fases em determinadas temperaturas. Por meio dessa função de estado, é possível analisar sob o olhar termodinâmico, o que leva um determinado sistema a apresentar as transformações das fases observadas no dia a dia. (PORTER, 2009).

De acordo com DeHoff (2006), a Energia Livre de Gibbs pode ser mensurada por meio da Equação 1 a seguir:

$$G \equiv U + PV - TS \equiv H - TS \quad (1)$$

Onde:

U = energia interna do sistema;

P = Pressão;

V = volume;

S = entropia do sistema;

H = entalpia.

Com base na equação acima, pode-se estabelecer uma variação infinitesimal da variação da energia de Gibbs representada pela Equação 2:

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (2)$$

Considerando que a variação da Energia Interna (dU) pode ser expressa por meio da Equação 3, onde o termo ($\delta W'$) representa a derivada parcial do trabalho realizado.

$$dU = TdS - PdV + \delta W' \quad (3)$$

Reescrevendo dU da Equação 2 pela sua expressão informada na Equação 3. O resultado Com isso, pode-se obter a variação infinitesimal da energia de Gibbs (dG) em sua forma mais simplificada informada pela Equação 4:

$$dG = - SdT + VdP + \delta W' \quad (4)$$

Para um sistema no qual apresenta-se a pressão constante e sem realização de trabalho, que equivale a situação de transformação alotrópica do ferro estudada, a variação da energia livre de Gibbs pode ser calculada pela Equação 5:

$$dG = - SdT \quad (5)$$

No qual, o valor da Entropia (S), para uma determinada fase alfa, pode ser estimada por meio da Equação 6:

$$S^\alpha(T) = S_{298}^\alpha - \int_{298}^T \frac{C_p(T)}{T} dT \quad (6)$$

Onde:

O termo $C_p(T)$ corresponde a Capacidade Calorífica a pressão constante e S_{298}^α representa a entropia padrão a 298K. para uma dada fase alfa

A partir do equacionamento descrito acima, importantes aspectos relacionados à estabilidade e formação de fases podem ser observados, tais como:

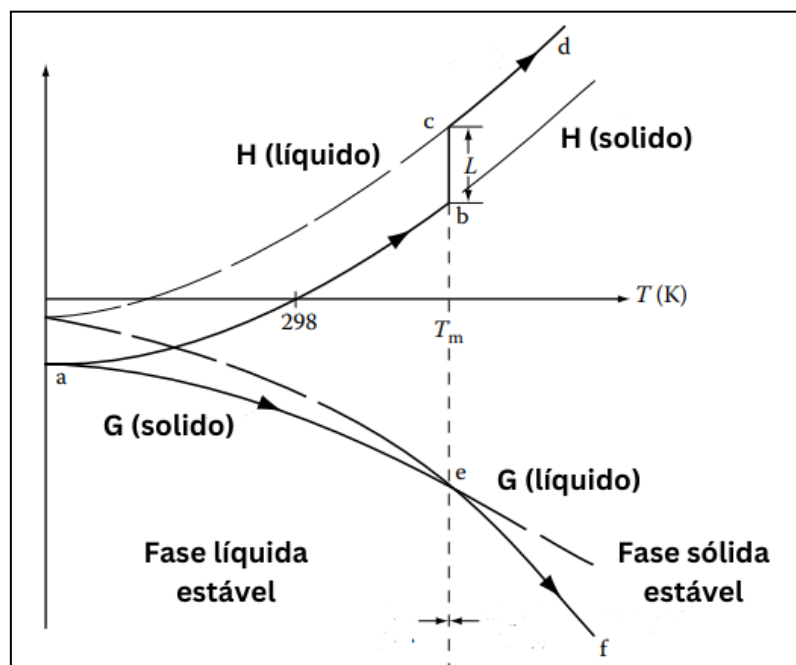
- A máxima estabilidade ocorre quando há um equilíbrio ideal entre baixa entalpia e alta entropia. Por esse motivo, em baixas temperaturas, as fases sólidas são mais estáveis devido à maior coesão atômica, ou seja, menor energia interna (entalpia);
- Por outro lado, em temperaturas elevadas, as fases com maior liberdade de movimento atômico (maior entropia) tornam-se mais estáveis. Tal fato ajuda a entender a maior percepção de fases líquidas e gasosas presentes em diversos materiais para valores de temperatura mais elevadas (PORTER, 2009).

Cabe destacar que uma forma de visualizar essa constatação é por meio da plotagem das curvas da energia de Gibbs em função da temperatura (G x T) e a localização de seus respectivos pontos de intercepção.

Por exemplo, conforme discutido anteriormente, a Equação 6 corresponde à curva da energia livre de Gibbs para uma fase alfa específica. De maneira semelhante, é possível representar a curva da energia livre associada a outras fases estáveis em uma determinada faixa de temperatura.

Com base nas expressões anteriores, pode-se representar graficamente as curvas referentes à variação da energia livre em função da temperatura para cada fase. A Figura 2 a seguir ilustra essas curvas para as fases sólida e líquida de um material hipotético.

FIGURA 2. Variação da Entalpia (H) e Energia Livre de Gibbs (G) em função da Temperatura (T) para uma fase Sólida e Líquida.



Fonte: PORTER (2009).

Como observado na figura acima, percebe-se que os pontos de interseção entre as curvas correspondem, na prática, aos pontos onde ocorrem as transformações de fase. Essa relação entre os pontos de interseção das curvas no gráfico e os dados mensurados na prática é explicada pelo fato de que é nesse intervalo que ocorre a variação dos valores da energia de Gibbs entre duas fases.

Em outras palavras, a curva de uma determinada fase passa a ter um valor menor que a outra, resultando numa maior estabilidade para o material permanecer no estado de menor energia livre a partir dessa faixa de temperatura em que ocorre a alternância de valores entre as curvas.

Por exemplo, o gráfico da Figura 2 indica que, para o intervalo de temperatura abaixo de T_m , a fase sólida apresenta um valor menor de energia livre de Gibbs em comparação com a fase líquida do material, visto que a curva G da fase sólida está abaixo da curva G da fase líquida.

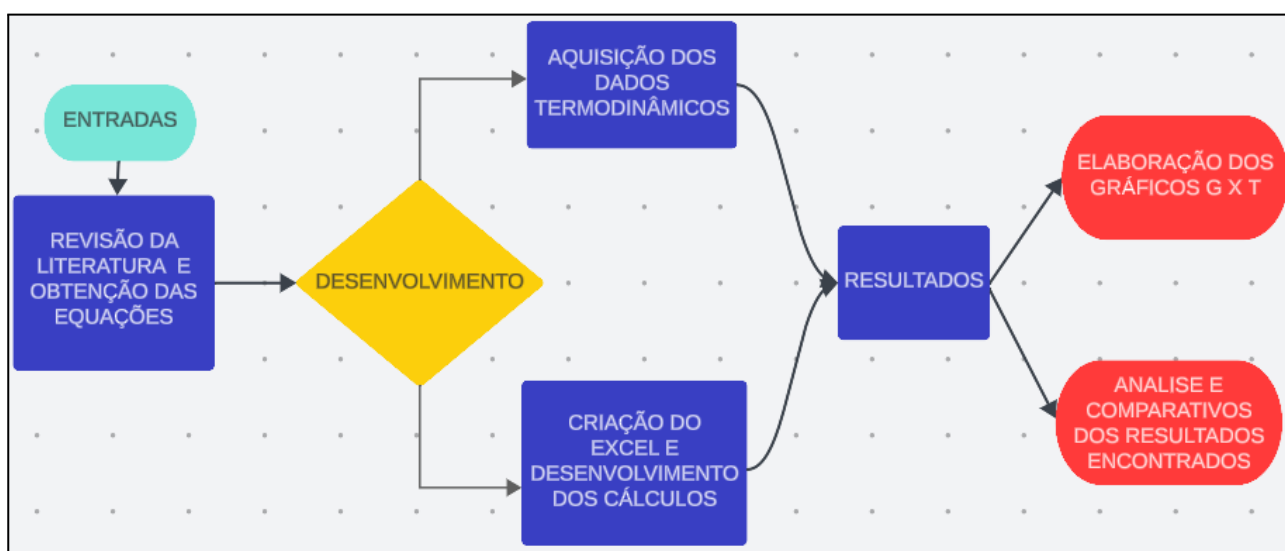
No entanto, no ponto de temperatura T_m , os valores de energia de ambas as fases tornam-se iguais, e para valores superiores a essa temperatura, a fase líquida apresenta um valor menor de energia, tornando-se mais estável nesse novo intervalo de temperatura. Nessa etapa, evidencia-se o processo de transformação de fase, com o valor L de calor latente absorvido ou liberado durante o processo.

Com essas variações, é possível obter os gráficos da energia de Gibbs (G) em função da temperatura (T) para cada uma dessas fases, relacionando os intervalos de temperatura em que uma fase é mais estável e explicando as transformações de fases visualizadas em um sistema.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Tomando como base o objetivo deste trabalho e para explicar a ocorrência e a faixa de temperatura das fases alotrópicas do Ferro por meio de suas respectivas curvas de Energia Livre de Gibbs, o trabalho foi dividido em cinco importantes etapas correlacionadas durante seu desenvolvimento, conforme ilustrado pelo fluxograma da Figura 3, desenvolvido pelos autores.

FIGURA 3. Fluxograma do Desenvolvimento do Trabalho.



Fonte: AUTOR (2024).

Em relação ao fluxograma acima, as entradas iniciais para o desenvolvimento deste trabalho consideram o estudo e a revisão da literatura disponível, com o objetivo de obter o equacionamento e o fundamento teórico, bem como as equações descritas inicialmente na introdução deste trabalho. Isso é necessário para identificar e quantificar a variação da energia livre de Gibbs para cada faixa de temperatura de transformação de fase.

Com as equações desenvolvidas, os dados termodinâmicos utilizados para os cálculos foram retirados da literatura. Por exemplo, para a forma do polinômio utilizado no cálculo da capacidade calorífica a pressão constante (C_p), entalpia (H) e entropia (S) em função da temperatura (T) de cada fase foi utilizado as Equações 7, 8 e 9 a seguir:

$$C_p = A + B * T + C * T^2 + D * T^3 + E/T^2 \quad (7)$$

$$H(T) - H_{298} = A * T + B * T^2/2 + C * T^3/3 + D * T^4/4 - E/T + F - H \quad (8)$$

$$S(T) = A * \ln(T) + B * T + C * T^2/2 + D * T^3/3 - E/(2T^2) + G \quad (9)$$

Onde para os coeficientes informados nas expressões acima, que corresponde na segunda parte (desenvolvimento) do fluxograma, foram utilizados os dados recomendados pelo NIST JANAF WebBook, conforme mostrado no Quadro 1:

QUADRO 1. Exemplo do Banco de Dados do NIST WEBBOOK.

Temperature (K)	298. to 700.	700. to 1042.	1042. to 1100.	1100. to 1809.	298. to 1809.
A	18.42868	-57767.65	-325.8859	-776.7387	23.97449
B	24.64301	137919.7	28.92876	919.4005	8.367750
C	-8.913720	-122773.2	0.000000	-383.7184	0.000277
D	9.664706	38682.42	0.000000	57.08148	-0.000086
E	-0.012643	3993.080	411.9629	242.1369	-0.000005
F	-6.573022	24078.67	745.8231	697.6234	0.268027
G	42.51488	-87364.01	241.8766	-558.3674	62.06336
H	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	7.788015
Reference	Chase, 1998	Chase, 1998	Chase, 1998	Chase, 1998	Chase, 1998
Comment	α - δ phase; Data last reviewed in March, 1978	α - δ phase; Data last reviewed in March, 1978	α - δ phase; Data last reviewed in March, 1978	α - δ phase; Data last reviewed in March, 1978	γ phase; Data last reviewed in March, 1978

Fonte: NIST JANAF (2024).

Após essas etapas, foi criada uma planilha no Excel com o objetivo de automatizar os cálculos e organizar os parâmetros termodinâmicos obtidos. Com os quadros anteriores, foi possível identificar e organizar as variações da energia de Gibbs para cada fase do ferro puro ao

longo da variação de temperatura, desde 298K até 2004K, abrangendo desde a fase alfa até a transformação do ferro delta em líquido.

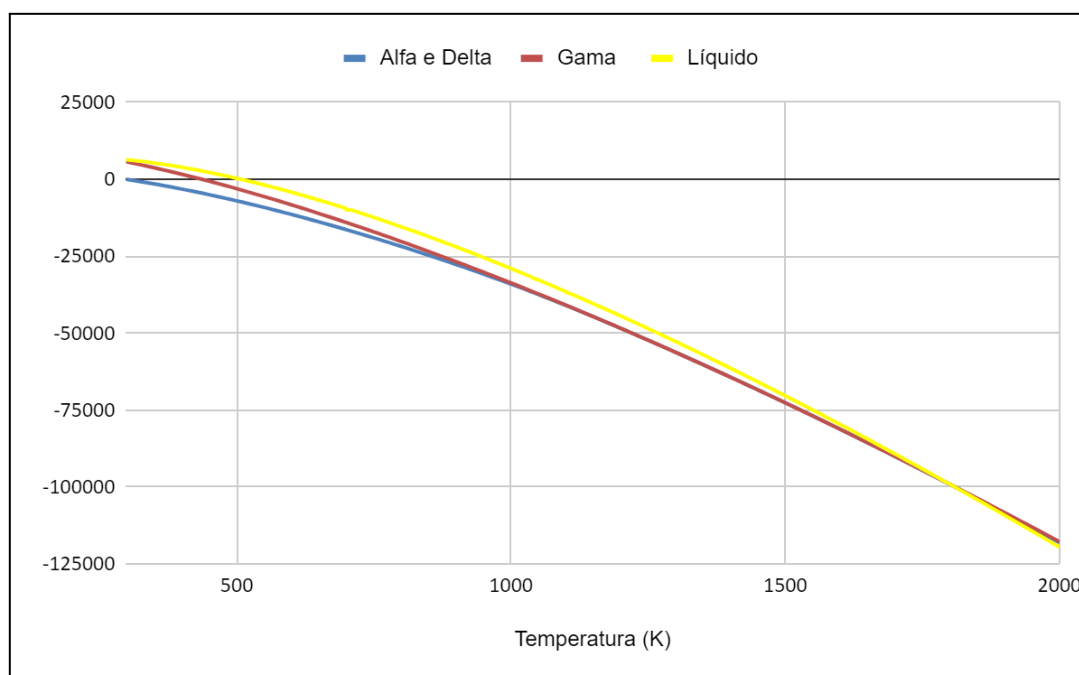
Com todas as informações no Excel organizadas e os valores da variação da energia para cada temperatura calculados, foi elaborado um conjunto de gráficos contendo as curvas $G \times T$ referentes a cada fase estudada neste trabalho. Esses gráficos permitem a comparação com os valores de referência encontrados na literatura, utilizando o software FactSage, que é uma das principais ferramentas computacionais para identificação de parâmetros termodinâmicos, com dados consolidados pela literatura. (FERRARO, 2014).

3. RESULTADOS

O Gráfico 1 apresenta as curvas da Energia de Gibbs em relação à temperatura para cada uma das fases alotrópicas do ferro: alfa, delta, gama e líquida. Cabe destacar que a base de dados do NIST WebBook não utiliza a extrapolação da curva da energia para cada fase, o que faz com que as curvas das fases alotrópicas com o mesmo arranjo cristalino acabem agrupadas.

Isso explica a presença de um único gráfico englobando tanto as fases alfa quanto a delta, que possuem estrutura cúbica de corpo centrado.

GRÁFICO 1. Energia de Gibbs (J) x Temperatura (K) do Ferro Puro.



Fonte: Autor (2024).

Por meio desse gráfico, é possível identificar o decréscimo dos valores da energia com o aumento da temperatura em todas as curvas, o que está de acordo com o proposto pela literatura, uma vez que, nesses intervalos de alta temperatura, as proporções entrópicas apresentam maior relevância para os valores de G .

Ainda em conformidade com a teoria, observa-se que os resultados ilustram que, para temperaturas mais baixas, os efeitos da entropia são minimizados. Como consequência disso, é nessa faixa de valores que se pode observar de forma mais clara a diferença de energia livre em cada uma das três fases, fato notado pela distinção visível de cada fase através de sua respectiva curva no gráfico.

Em relação à sequência de transformações que o ferro em seu estado puro sofre, percebe-se, através do gráfico e da análise das energias livres de Gibbs, que em temperaturas baixas e pressões moderadas, a fase alfa (α) do ferro, com estrutura cristalina compacta e estável, é predominante devido à sua menor energia livre de Gibbs.

À medida que a temperatura aumenta, a fase gama (γ), com estrutura cristalina cúbica de face centrada e maior desordem atômica, pode tornar-se mais estável, devido à maior contribuição da entropia em relação à entalpia, resultando em uma diminuição da energia livre de Gibbs.

Esse processo é ilustrado por meio da análise do gráfico acima, onde curvas das fases Alfa (α) e Gama (γ) tendem a se igualar, especialmente próximo dos 1000K, tornando difícil distinguir apenas pelo gráfico as duas curvas. Esse intervalo de temperatura corresponde à faixa de valores em que ocorre a mudança de fases $\alpha \rightarrow \gamma$.

Próximo aos valores de 1600K, as curvas referentes às fases Gama e Delta tendem a coincidir, indicando que nessa faixa de temperatura ocorre uma mudança de fase, como indicado pela transformação $\gamma \rightarrow \delta$.

De forma semelhante, o gráfico também mostra que para valores próximos a 1800K, a curva Delta novamente tende a interceptar-se com a curva de outra fase, neste caso, com a da fase líquida, onde as curvas acabam se igualando próximo a essa faixa de temperatura.

Isso indica uma tendência para ocorrer um processo de mudança de fase $\delta \rightarrow L$, uma vez que a energia livre de Gibbs do líquido está se tornando menor do que a da fase delta nesse intervalo.

Uma medida empregada para uma análise mais aprofundada dos dados obtidos é a elaboração do Quadro 2, que compara os valores da energia de Gibbs próximos às temperaturas de transformação em relação aos mesmos valores utilizados como referência na literatura, estes últimos obtidos através do FactSage.

QUADRO 2. Comparativo dos Valores da Energia Livre de Gibbs (em joules) para as Mudanças de Fase no Ferro Puro.

Temperatura (k)	Alfa - Delta Calculado	Alfa FACTSAGE	Gama Calculado	Gama FACTSAGE	Líquido Calculado	Líquido FACTSAGE
298	0	0	5692	5402	6355	16376
...	...	...	...	...	...	...
1182	-47505	-47298	-46205	-47148	-47518	-42476
1183	-47630	-47372	-47390	-47223	-47214	-42558
1184	-47740	-47446	-47740	-47446	-47310	-42640
1185	-47810	-47520	-48120	-47573	-47406	-42722
...	...	...	...	...	...	...
1662	-86142	-86794	-85981	-86645	-84811	-85533
1663	-86321	-86882	-86078	-86733	-84922	-85629
1664	-86401	-86971	-86376	-86821	-85032	-85725
1665	-86720	-87059	-86720	-87059	-86142	-85820
1666	-87940	-87147	-87880	-87997	-86853	-85916
1667	-88720	-87236	-88457	-88084	-87363	-86012
...	...	...	...	...	...	...
1805	-99545	-99541	-112109	-99461	-99229	-99522
1806	-99748	-99634	-112209	-99553	-99442	-99628
1807	-99952	-99727	-112310	-99646	-99586	-99735
1808	-99995	-99821	-112410	-99738	-99870	-99841
1809	-100024	-99914	-112511	-99831	-10024	-99914
1810	-100163	-100007	-112611	-99923	-100198	-100253

Fonte: Autor (2024).

Através da análise dos resultados dos quadros e dos cálculos utilizadas na elaboração dos gráficos mencionados anteriormente, observa-se que as temperaturas de transformação para os processos $\alpha \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow \delta$ e $\delta \rightarrow L$ são, respectivamente, 1184 K, 1665 K e 1809 K. Para esses valores encontrados, nota-se uma concordância precisa com os resultados geralmente utilizados na literatura disponível.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que os dados obtidos por meio da metodologia de cálculo descrita são compatíveis com os encontrados na literatura. É importante ressaltar que eventuais variações nos valores podem ser explicadas pelas aproximações matemáticas do polinômio e pelas extrapolações da faixa de valores dessas funções para alguns intervalos de temperatura.

Uma forma de minimizar os erros dessa metodologia e melhorar o trabalho consiste em encontrar outra base de dados que abranja toda a faixa de temperatura analisada (298 - 2000 K) para qualquer uma das fases alotrópicas do ferro, ou que apresente uma melhor aproximação dos coeficientes do polinômio dos valores calculados. Isso permitiria comparar os resultados dessa nova base com os obtidos neste trabalho, ou até mesmo com os obtidos pelo software FactSage.

Por fim, é importante mencionar a possibilidade de, em trabalhos futuros, realizar um estudo de convergência e análise dos resultados obtidos, visando não apenas compreender melhor a precisão entre os diferentes métodos ou bancos de dados escolhidos, mas também aumentar as discussões pertinentes à precisão e confiabilidade desses resultados por meio desse estudo de convergência.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BELZUNCE, F. J. ACEROS Y FUNDICIONES: ESTRUCTURAS, TRANSFORMACIONES, TRATAMIENTOS TERMICOS y APLICACIONES. Espanha: Universidad de Oviedo, 2001. 215 p.

CÉSAR, A.; **BIANCHI**, D. ESTRUTURA CRISTALINA DO AÇO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/25006/1/ALLAN_BIANCHI_DEFESA.pdf>.

DEHOFF, R. Thermodynamics in materials science. Boca Raton FL: CRC Press, 2006.

FACTSAGE, [http://www.crct.polymtl.ca/factsage/fs_general.php].

FERRARO, B.; **PAULO**, S. Estudo das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escórias Sintéticas de $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/p/augusto.neiva/TCC/TCCs-finais-2014/2014-07.pdf>>.

LEITE, Roberto Rodrigues. Mecanismo para superação das barreiras na implantação da produção mais limpa em pequenas e médias empresas: estudo de múltiplos casos no setor metalúrgico. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014.

CHASE, M. W. **NIST-JANAF** Thermochemical Tables, Fourth Edition. p. 1–1951, 1998.

PORTER, D. A.; **EASTERLING**, K. E.; **SHERIF**, M. Y. Phase Transformations in Metals and Alloys. Third ed. Boca Raton FL: CRC Press; 2009.

SANTIAGO, Fabio. (2019). Práticas de Materiais Para construção Mecânica e tratamento térmico.

DE ALMEIDA, L.; **ZAGO**, C. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA TÉCNICA DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA POR PARÂMETROS MAGNÉTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO MICROESTRUTURAL EM UM AÇO AISI 4140 JOÃO PESSOA -PB. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25388/1/TCC%20LUCAS%20ZAGO.pdf>>.