

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
LUCAS ORQUISA JOSÉ

**GERAÇÃO DE DIAGRAMA TTP DE FORMAÇÃO DE CARBONETOS DE CROMO  
EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO TIPO 316 USANDO O DICTRA®**

São Bernardo do Campo

2019

LUCAS ORQUISA JOSÉ

**GERAÇÃO DE DRIAGRAMA TTP DE FORMAÇÃO DE CARBONETOS DE  
CROMO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO TIPO 316 USANDO DICTRA®**

Relatório Final de Iniciação Científica  
apresentado ao Centro Universitário FEI, como  
parte dos requisitos do Programa PIBIC-FEI.  
Orientado pelo Prof. Rodrigo Magnabosco.

São Bernardo do Campo

2019

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo criar o digrama Tempo-Temperatura-Precipitação (TTP) dos carbonetos de cromo do tipo  $M_{23}C_6$  no aço inoxidável austenítico 316 (UNS S31600) utilizando o Software DICTRA<sup>®</sup>. O software Thermo-Calc<sup>®</sup> foi utilizado para a determinação de diferentes diagramas de equilíbrio e composições de fases para várias composições da liga, dentro dos limites estabelecidos pela norma da mesma. Estes diagramas de composições e fases da liga foram analisados e serviram de base para entender e reforçar a influência de determinados elementos na liga como cromo, níquel e molibdênio, nas características da liga, como temperaturas de formação de suas fases e quantidades das mesmas. Posteriormente foram feitas as simulações no software DICTRA<sup>®</sup> viabilizando a construção dos diagramas TTP da liga 316, que foram analisados, comparados e sobrepostos aos diagramas encontrados na literatura existente, de origens experimentais e simuladas, que serviram como comparação e validação dos diagramas TTP obtido através do DICTRA<sup>®</sup>, comprovando a viabilidade de uso do software para construção deste tipo de diagrama.

Palavras-chave: Aço inoxidável 316. Diagrama TTP. Carbonetos de cromo  $M_{23}C_6$ . DICTRA<sup>®</sup>.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama TTP para o aço inoxidável austenítico 316 contendo 0,06%C.....	9
Figura 2 - Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS.....	10
Figura 3. Diagrama de TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas.....	10
Figura 4 – Diagrama de fração volumétrica das fases para a Liga 17.....	14
Figura 5 – Diagrama de fração volumétrica das fases para a Liga 8.....	15
Figura 6 – Fração volumétrica de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função da temperatura, liga 17.....	16
Figura 7 – Fração volumétrica de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função da temperatura, liga 8.....	16
Figura 8. Fração de carboneto M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo de tratamento isotérmico a 775°C para a Liga 8.....	17
Figura 9. Fração de carboneto M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo de tratamento isotérmico a 700°C para a Liga 8.....	17
Figura 10. Diagrama TTP para a liga UNS S31600 para a Liga 8.....	18
Figura 11. Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA para a liga UNS S31600.....	19
Figura 12. Diagrama de TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA para a liga UNS S31600.....	20
Figura 13. Detalhe ampliado da Figura 12.....	21
Figura 14 – Diagrama TTP de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> para a liga UNS S31600, Liga 1.....	21
Figura 15 – Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA® para a liga UNS S31600, Liga 1.....	22
Figura 16 – Diagrama TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA® para a liga UNS S31600, Liga 1.....	23
Figura 17 – Diagrama TTP de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> para a liga UNS S31600, Liga 20.....	24

Figura 18 – Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA® para a liga UNS S31600, Liga 20.....	25
Figura 19 – Diagrama TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA® para a liga UNS S31600, Liga 20.....	25
Figura 20- Liga 1: Diagrama de equilíbrio para a composição mínima permitida pela norma para o aço inoxidável 316, base de dados TCFE8.....	30
Figura 21- Liga 2: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento do cromo para 17%, base de dados TCFE8.....	30
Figura 22- Liga 3: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de cromo para 18%, base de dados TCFE8.....	31
Figura 23- Liga 4: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de níquel para 12%, base de dados TCFE8.....	31
Figura 24- Liga 5: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de níquel para 14%, base de dados TCFE8.....	32
Figura 25- Liga 6: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de molibdênio para 2,5%, base de dados TCFE8.....	32
Figura 26- Liga 7: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de molibdênio para 3,0%, base de dados TCFE8.....	33
Figura 27- Liga 8: Diagrama de equilíbrio para composição média permitida pela norma para o aço inoxidável 316, base de dados TCFE8.....	33
Figura 28- Liga 9: Diagrama de equilíbrio para liga base média com diminuição de cromo para 16%, base de dados TCFE8.....	34
Figura 29- Liga 10: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de cromo para 18%, base de dados TCFE8.....	34

Figura 30- Liga 11: Diagrama de equilíbrio para liga base média com diminuição de níquel para 10%, base de dados TCFE8.....	35
Figura 31- Liga 12: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de níquel para 14%, base de dados TCFE8.....	35
Figura 32- Liga 13: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com diminuição de molibdênio para 2,0%, base de dados TCFE8.....	36
Figura 33- Liga 14: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de molibdênio para 3,0%, base de dados TCFE8.....	36
Figura 34- Liga 15: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com diminuição de manganês para 0,001%, base de dados TCFE8.....	37
Figura 35- Liga 16: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de manganês para 2,0%, base de dados TCFE8.....	37
Figura 36- Liga 17: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de níquel para 14% e diminuição de molibdênio para 2,0%, base de dados TCFE8.....	38
Figura 37- Liga 18: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com diminuição de silício para 0,001%, base de dados TCFE8.....	38
Figura 38- Liga 19: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de silício para 1,0%, base de dados TCFE8.....	39
Figura 39- Liga 20: Diagrama de equilíbrio para composição máxima permitida pela norma para o aço inoxidável 316, base de dados TCFE8.....	39
Figura 40- Liga 21: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de cromo para o 16%, base de dados TCFE8.....	40
Figura 41- Liga 22: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de cromo para 17%, base de dados TCFE8.....	40

Figura 42- Liga 23: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de níquel para 10%, base de dados TCFE8.....	41
Figura 43- Liga 24: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de níquel para 12%, base de dados TCFE8.....	41
Figura 44- Liga 25: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de molibdênio para 2,0%, base de dados TCFE8.....	42
Figura 45- Liga 26: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de molibdênio para 2,5%, base de dados TCFE8.....	42
Figura 46- Liga 27: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de manganês para 0,001%, base de dados TCFE8.....	43
Figura 47- Liga 28: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de manganês para 1,0%, base de dados TCFE8.....	43
Figura 48- Liga 29: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de silício para 0,001%, base de dados TCFE8.....	44
Figura 49- Liga 30: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de silício para 0,5%, base de dados TCFE8.....	44
Figura 50- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 500°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	45
Figura 51- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 525°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	45
Figura 52- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 550°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	46
Figura 53- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 575°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	46

Figura 54- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 600°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	47
Figura 55- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 605°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	47
Figura 56- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 610°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	48
Figura 57- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 615°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	48
Figura 58- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 620°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	49
Figura 59- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 625°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	49
Figura 60- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 700°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	50
Figura 61- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 725°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	50
Figura 62- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 730°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	51
Figura 63- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 735°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	51
Figura 64- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 740°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	52
Figura 65- Liga 08: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 745°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	52



Figura 66- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 750°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	53
Figura 67- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 775°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	53
Figura 68- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 800°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	54
Figura 69- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 825°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	54
Figura 70- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 850°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	55
Figura 71- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 875°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	55
Figura 72- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 900°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	56
Figura 73- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 925°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	56
Figura 74- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 950°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	57
Figura 75- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 975°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	57
Figura 76- Liga 08: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 1000°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	58
Figura 77- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 500°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	58

Figura 78- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 550°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	59
Figura 79- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 600°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	59
Figura 80- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 650°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	60
Figura 81- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 700°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	60
Figura 82- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 750°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	61
Figura 83- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 800°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	61
Figura 84- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 825°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	62
Figura 85- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 850°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	62
Figura 86- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 875°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	63
Figura 87- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 900°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	63
Figura 88- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 925°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	64
Figura 89- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 950°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	64

Figura 90- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 975°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	65
Figura 91- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 980°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	65
Figura 92- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 985°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	66
Figura 93- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 990°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	66
Figura 94- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 995°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	67
Figura 95- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 550°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	67
Figura 96- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 600°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	68
Figura 97- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 650°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	68
Figura 98- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 700°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	69
Figura 99- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 725°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	69
Figura 100- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 750°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	70
Figura 101- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 775°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	70

Figura 102- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 800°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	71
Figura 103- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 825°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	71
Figura 104- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 850°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	72
Figura 105- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 875°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	72
Figura 106- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 900°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	73
Figura 107- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 925°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	73
Figura 108- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 950°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	74
Figura 109- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 975°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	74
Figura 110- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 1000°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	75
Figura 111- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 1025°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	75
Figura 112- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 1035°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	76
Figura 113- Liga 20: Diagrama de formação de M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> em função do tempo a 1050°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química em fração mássica.....	7
Tabela 2 – Composições simuladas (%m) .....	12

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1</b>	PROCEDIMENTOS THERMO-CALC <sup>®</sup> .....	<b>11</b>
<b>3.2</b>	PROCEDIMENTOS DICTRA <sup>®</sup> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>28</b>
	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

São denominados aços inoxidáveis aqueles que possuem no mínimo 11% em massa de Cromo (Cr), sendo este o responsável pela película passiva, que é auto regenerativa e se forma na presença de oxigênio, proporcionando resistência a corrosão em diversos meios (O'BRIEN, 2011). O aço inoxidável AISI 316 tem diversas aplicações na indústria marítima, química e de geração de energia, devido a sua alta resistência mecânica e a diversos tipos de corrosão. Derivado deste aço tem-se uma gama de ligas que se diferenciam em suas composições que trazem melhorias em suas propriedades, conforme demandas de aplicação (LAI. J. K. L., 1982; SEDRIKS, 1996).

Inúmeros processos que envolvem grande quantidade de energia em forma de calor (soldas, tratamento térmico, recozimento, etc.) podem acarretar no fenômeno de sensitização do aço inoxidável. Este fenômeno é basicamente a formação do precipitado do tipo  $M_{23}C_6$  nos contornos de grão, que leva o mesmo a sofrer corrosão intergranular além de alteração das propriedades mecânicas. O diagrama Tempo-Temperatura-Precipitação (TTP) deste carboneto tem como objetivo não só entender o comportamento do material, como também fornecer dados para que estes processos sejam feitos em condições a se evitar a formação do precipitado indesejado (SEDRIKS, 1996; Mc GUIRE, 2008).

Para construir um diagrama TTP de uma determinada liga, de forma experimental, é necessário um grande número de amostras, um controle preciso sobre suas composições e equipamento para os ensaios, o que leva tempo, e se torna muito custoso, apesar de indispensável. Portanto, o presente projeto tem o objetivo criar o diagrama TTP do carboneto de cromo (do tipo  $M_{23}C_6$ ) para o aço inoxidável austenítico 316 (UNS S31600), fazendo uso da simulação computacional da cinética de formação pelo software DICTRA<sup>®</sup>, e por fim, confrontar os resultados das simulações com a literatura disponível.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A série 300 é uma das classificações dada para os aços inoxidáveis com variações na composição em relação a liga original 18/8 (18%Cr- 8%Ni). Nesta série foram adicionados molibdênio, nitrogênio e níquel, além da redução da quantidade de carbono. A liga que foi estudada neste projeto é o aço inoxidável austenítico 316 (UNS S31600), sua matriz é caracterizada pela estrutura cristalina CFC (cúbica de faces centradas), em que a adição de molibdênio foi feita buscando aumentar a resistência a corrosão por pite, pois a adição de Mo aliada a redução de carbono resulta em ganho na resistência a corrosão do material (PARDO, 2007; SEDRIKS, 1996). A norma UNS S31600 delimita as faixas de composição aceitas para este aço, conforme mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Composição química em fração mássica (%m)

Código UNS	Código AISI	Cr	Ni	C	Mo	Mn	Si	Fe
S31600	316	16-18	10-14	0.08	2-3	2	1	Balanço

Fonte: DAVIS, J. R., 1994.

A precipitação dos carbonetos do tipo  $M_{23}C_6$  (onde M é majoritariamente Cr, podendo este ser substituído parcialmente por Fe e Mo) ocorre nesta liga quando o material é exposto a altas temperaturas por determinados períodos de tempo, como em tratamentos térmicos, soldas, elevadas temperaturas de serviço e resfriamento lento. Esta ocorre devido a difusão, que é a movimentação atômica no material, e que depende da energia de ativação que um elemento necessita para iniciar o movimento difusivo em uma determinada temperatura, e pode levar a formação de outras fases (SEDRIKS, 1996; CALLISTER, 2013).

O material é denominado sensitizado quando os carbonetos precipitados nos contornos do grão são ricos em Cromo, e como para cada átomo de Carbono são consumidos aproximadamente 4 átomos de cromo, pode aumentar a susceptibilidade a corrosão intergranular do mesmo devido ao empobrecimento de cromo na região próxima ao precipitado e nos contornos de grão, fragilizando a película passiva pela qual o cromo é responsável (SEDRIKS, 1996; CALLISTER, 2013; SILVA, 1988). Um material mais susceptível a corrosão intergranular é dito sensitizado.

Na matriz austenítica da liga a difusão do Carbono ocorre por solução intersticial, e devido a sua afinidade com o Cromo proporciona a formação de carbonetos estáveis,



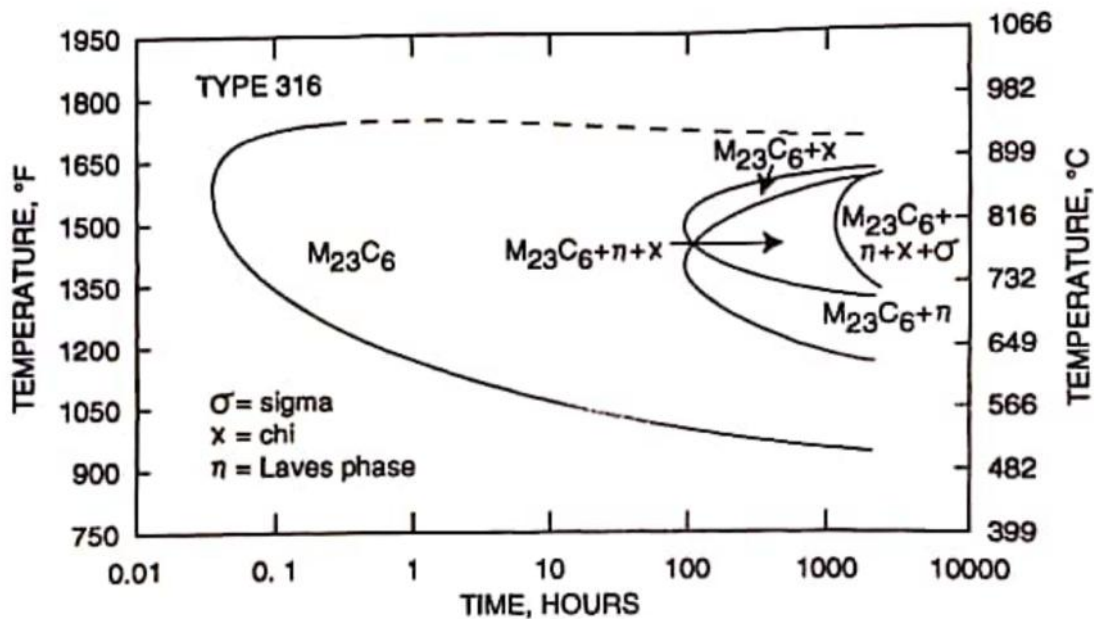
logo, o principal responsável pelo fenômeno da sensitização (J. CERMAK, 2014; SEDRIKS, 1996). Os elementos de liga Cromo, Molibdênio e Níquel são solutos substitucionais, e influenciam a solubilidade do carbono na matriz, sendo que o Cromo diminui a solubilidade do mesmo, enquanto o Níquel aumenta. Devido a estas características, em determinado equilíbrio estes elementos de liga evitam o ataque intergranular do material. Molibdênio também é um soluto substitucional na matriz, sua presença como elemento de liga reduz a tendência a corrosão localizada do material, porém, favorece a formação da fase sigma e tem uma maior tendência a formar carbonetos que o Cromo (SEDRIKS, 1996; SILVA, 1988).

A fase Sigma (  $\sigma$  ) na liga de Aço Inoxidável 316 tem a seguinte composição: 55%Fe-29%Cr-11%Mo-5%Ni. É considerada prejudicial ao meio no qual se precipita devido a sua quantidade de cromo e molibdênio concentrados para sua formação, o que deixa os grãos a sua volta empobrecidos, logo com menor resistência a corrosão (SEDRIKS, 1996; CALLISTER, 2013). As fases Chi (53%Fe-21%Cr-22%Mo-5%Ni), e Laves (38%Fe-11%Cr-45%Mo-6%Ni), se comparadas com a fase sigma, necessitam de uma menor quantidade de cromo para sua formação, porém, o consumo de molibdênio é alto para ambas, o que torna as mesmas potencialmente prejudiciais caso ocorram. Além de sua composição, mais ricas em Mo que em Cr, e o fato de necessitarem de um longo período de exposição para se formarem, em comparação ao  $M_{23}C_6$  sigma, chi e Laves se tornam fases de menor relevância para este estudo.

Carbonetos do tipo  $M_{23}C_6$  (M = Cr, Fe, Mo) que precipitam na liga 316, recebem maior atenção devido ao fato de se formar em tempos relativamente curtos em relação as outras fases citadas. Este precipitado ocorre primeiramente entre a interface Austenita-Ferrita, (caso ambas existam) e posteriormente entre os demais contornos de grão, sendo a faixa de precipitação entre 500°C e 950°C nos aços inoxidáveis 100% austeníticos. (DAVIS, J. R, 1994; SEDRIKS, 1996).

Para analisar e entender o comportamento da formação do  $M_{23}C_6$  é comum a construção de um diagrama Tempo-Temperatura-Precipitação (TTP); com ele é possível demonstrar para uma determinada liga, e composição, as faixas de temperatura e o tempo necessário para o início da precipitação da fase de uma amostra solubilizada, ou seja, na qual todos os elementos de liga estão em solução sólida. Na Figura 1 é possível observar o diagrama TTP esquemático do aço inoxidável 316, objeto de estudo deste trabalho (SILVA, 1988).

Figura 1. Diagrama TTP para o aço inoxidável austenítico 316 contendo 0,06%C.

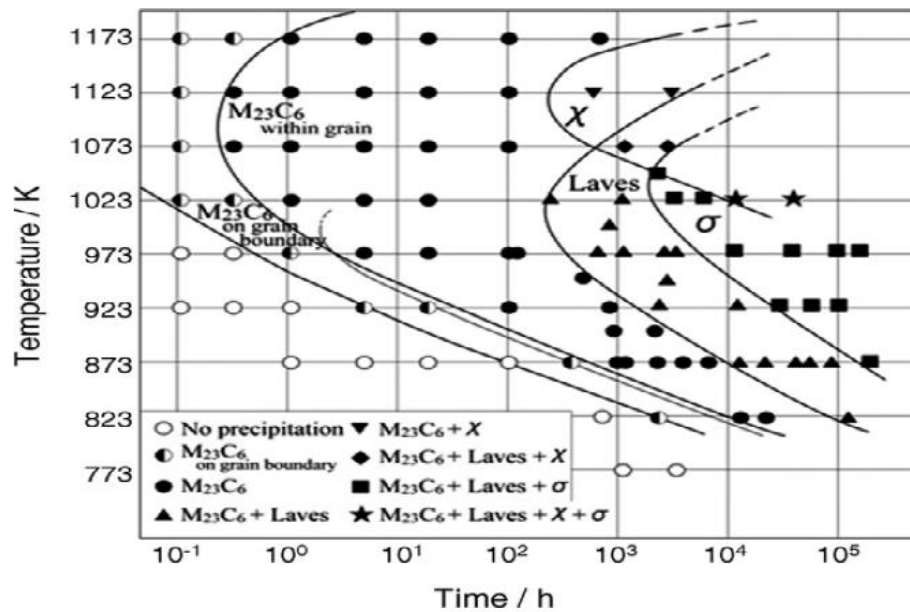


Fonte: SEEDRIKS, 1996.

A construção deste gráfico é feita pontualmente, onde o mesmo experimento é repetido com a mesma liga em diversas temperaturas, registrando o início da precipitação de cada fase, até compor o diagrama TTP. Na Figura 1 é possível observar a discrepância no tempo para início da formação das fases Sigma, Chi e Laves, quando comparadas a fase  $M_{23}C_6$  (SILVA, 1988). É esta formação mais rápida do carboneto  $M_{23}C_6$  que o torna objeto principal de preocupação nos ciclos térmicos destes aços, e por isso sua formação foi estudada nesta iniciação científica.

Na Figura 2 é apresentado um diagrama TTP para o Aço Inoxidável 316NIMS (National Institute for Materials Science), que foi obtido experimentalmente, e que traz informações não só da fase  $M_{23}C_6$  como de outras fases formadas no equilíbrio. Neste a fase  $M_{23}C_6$  foi classificada como precipitada no contorno de grão, e como fase formada dentro do grão da matriz, sendo assim uma forma mais completa de indicar o desenvolvimento dos precipitados formados. Nota-se que a formação em contornos de grão, que está relacionada a nucleação heterogênea, é mais rápida que aquela por nucleação homogênea dentro dos grãos. Assim, simular a formação destes carbonetos nos contornos de grão retrata a situação de maior cinética deste processo.

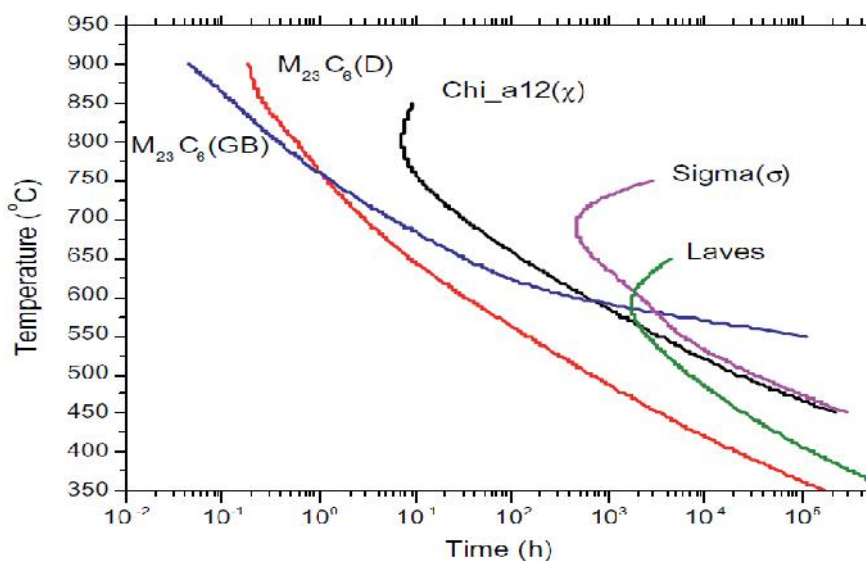
Figura 2. Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS.



Fonte: NRIM, 1988.

Na Figura 3 é apresentado um diagrama TTP para liga 316NIMS, obtido através de simulações utilizando a metodologia CALPHAD com a base de dados OCTANT, o qual passou por um processo de validação através de comparações com dados obtidos experimentalmente. A curva  $M_{23}C_6$  (GB) refere-se ao precipitado nos contornos de grão, enquanto a curva  $M_{23}C_6$ (D) refere-se ao precipitado dentro da matriz (Y. YANG, 2014).

Figura 3. Diagrama de TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas.



Fonte: Y. YANG, 2014.

### 3 METODOLOGIA

Com o intuito de encontrar e determinar composições da liga para serem testadas no software de simulação da cinética da formação das fases DICTRA<sup>®</sup>, foi utilizado o software Thermo-Calc<sup>®</sup> para a simulação dos diagramas de equilíbrio de fase. Os procedimentos utilizados nesta iniciação descrita estão a seguir descritos.

#### 3.1 PROCEDIMENTOS THERMO-CALC<sup>®</sup>

Thermo-Calc<sup>®</sup> é um software desenvolvido para cálculos termodinâmicos, especializados para ciência dos materiais. Possui diversas bases de cálculos termodinâmicos para atender a simulações de diversos tipos de materiais. Este software pode ser utilizado para calcular diagramas de equilíbrios de fase, quantidades e composições das mesmas, propriedades termodinâmicas, entre outras funcionalidades (Thermo-Calc-Software, 2019). Para obtenção dos diagramas de fases foi utilizada a versão 2019a do software, e a base de dados TCFE8, que é a mais adequada para ligas como o Aço Inoxidável 316.

Foram feitas 26 simulações, listadas na tabela 2, e todas as variações na composição partiram de três ligas base que são: Composição mínima (Liga 1), média (Liga 8) e máxima (Liga 20) permitidas pela norma. Dentro destas ligas base foram feitas variações dos elementos com o intuito de analisar a influência dos elementos no equilíbrio da liga, nas fases formadas, na quantidade e composição destas fases, além da temperatura de início de formação das mesmas.

Para cada simulação foi obtido o diagrama de equilíbrio em fração volumétrica das fases pela temperatura, uma tabela contendo a fração volumétrica de cada fase existente na faixa de temperatura e a fração volumétrica dos elementos dentro de todas as fases do material.

Tabela 2. Composições simuladas (%m)

Liga	Cr	Ni	C	Mo	Mn	Si	Fe
1	16,00	10,00	0,80	2,00	0,00	0,00	Balanço
2	17,00	10,00	0,80	2,00	0,00	0,00	Balanço
3	18,00	10,00	0,80	2,00	0,00	0,00	Balanço
4	16,00	12,00	0,80	2,00	0,00	0,00	Balanço
5	16,00	14,00	0,80	2,00	0,00	0,00	Balanço
6	16,00	10,00	0,80	2,50	0,00	0,00	Balanço
7	16,00	10,00	0,80	3,00	0,00	0,00	Balanço
8	17,00	12,00	0,08	2,50	1,00	0,50	Balanço
9	16,00	12,00	0,08	2,50	1,00	0,50	Balanço
10	18,00	12,00	0,08	2,50	1,00	0,50	Balanço
11	17,00	10,00	0,08	2,50	1,00	0,50	Balanço
12	17,00	14,00	0,08	2,50	1,00	0,50	Balanço
13	17,00	12,00	0,08	2,00	1,00	0,50	Balanço
14	17,00	12,00	0,08	3,00	1,00	0,50	Balanço
15	17,00	12,00	0,08	2,50	0,00	0,50	Balanço
16	17,00	12,00	0,08	2,50	2,00	0,50	Balanço
17	17,00	14,00	0,08	2,00	1,00	0,50	Balanço
18	17,00	12,00	0,08	2,50	1,00	0,00	Balanço
19	17,00	12,00	0,08	2,50	1,00	1,00	Balanço
20	18,00	14,00	0,08	3,00	2,00	1,00	Balanço
21	16,00	14,00	0,08	3,00	2,00	1,00	Balanço
22	17,00	14,00	0,08	3,00	2,00	1,00	Balanço
23	18,00	10,00	0,08	3,00	2,00	1,00	Balanço
24	18,00	12,00	0,08	3,00	2,00	1,00	Balanço
25	18,00	14,00	0,08	2,00	2,00	1,00	Balanço
26	18,00	14,00	0,08	2,50	2,00	1,00	Balanço
27	18,00	14,00	0,08	3,00	0,00	1,00	Balanço
28	18,00	14,00	0,08	3,00	1,00	1,00	Balanço
29	18,00	14,00	0,08	3,00	2,00	0,00	Balanço
30	18,00	14,00	0,08	3,00	2,00	0,50	Balanço

Fonte: Autor.

### 3.2 PROCEDIMENTOS DICTRA<sup>®</sup>

O software DICTRA<sup>®</sup> é uma extensão do Thermo-Calc<sup>®</sup> especializada em realizar simulações do processo de difusão em ligas multicomponentes, podendo ser utilizado para simular por exemplo processos de interdifusão de compostos, homogeneização de ligas e crescimento ou dissolução de fases intermetálicas (Thermo-Calc-Software, 2019). As simulações foram realizadas utilizando a versão 2019B do software, com a base de dados termodinâmicos TCFE9, e cinética MOBFE4, configurado para simular o modelo geométrico linear com difusão unidirecional e interface plana, onde o carboneto de Cromo nucleia na lateral esquerda da região da austenita.

Para a liga 8, composição média, foram feitas simulações em 25 temperaturas, partindo de 500°C com um intervalo de 25°C até atingir 1000°C, diminuindo para um intervalo de 5°C em regiões onde foram encontradas dificuldades de concluir as simulações, sendo que, anteriormente foram realizadas em torno de outras 50 simulações no qual estava sendo definido um intervalo coerente entre as temperaturas de simulação, e o tempo necessário para que ocorresse o crescimento da fase estudada. O mesmo procedimento foi realizado para a Liga 1 e para a Liga 20, referentes a composição mínima e máxima, onde foram simuladas respectivamente, 16 e 17 temperaturas seguindo os critérios de diminuição do intervalo para as temperaturas onde foram encontradas dificuldades nas simulações.

Em cada simulação foram obtidos gráficos da fração volumétrica da fase, em função do tempo para uma dada temperatura. Nestas simulações foram coletados os tempos para a formação de 10, 15, 20 e 30% com relação ao total de  $M_{23}C_6$  formado nas simulações de equilíbrio do Thermo-Calc<sup>®</sup> na temperatura de interesse, sendo assim, cada simulação gerou 4 pontos do diagrama TTP da liga da liga UNS S31600.

Para validação do diagrama obtido através das simulações, foram necessárias comparações com diagramas TTP da liga 316 tanto experimentais quanto simulados, avaliando o comportamento da curva, e verificando a proximidade dos pontos simulados no DICTRA<sup>®</sup> com os respectivos encontrados na literatura.

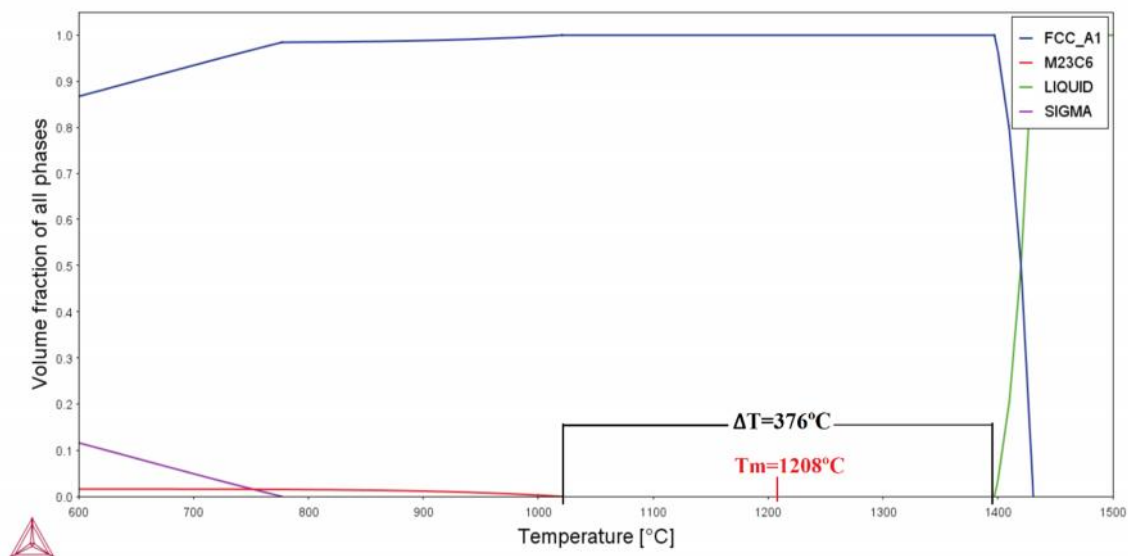
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para um melhor aproveitamento das simulações que foram geradas neste trabalho, foram estabelecidos parâmetros para que houvesse uma análise e um entendimento maior sobre a influência da composição dos elementos de liga. Para tal, foram observados os valores de temperatura de início da formação das fases austenita,  $M_{23}C_6$  e Sigma. A faixa de temperatura a qual é encontrada somente a fase austenita ( $T$ ) e a temperatura média a qual isto ocorre ( $T_m$ ) também foram estudadas devido a influência destes na produção da liga na indústria.

Para demonstrar o processo de análise que foi executado, a seguir será analisada a Liga 17 comparativamente a Liga 8, que é a Base média da composição.

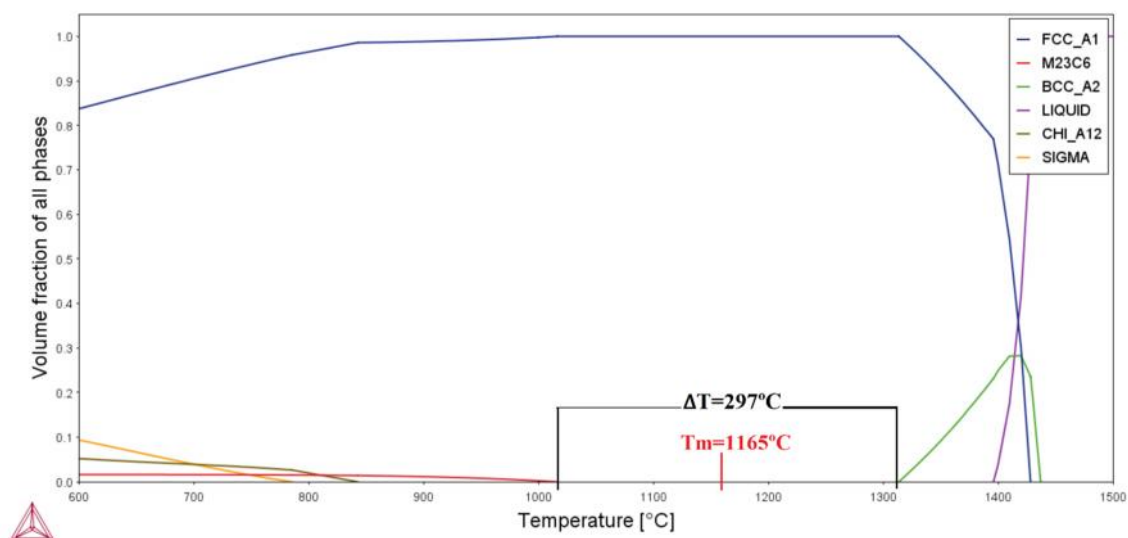
Na figura 4 é apresentado o digrama de equilíbrio para a Liga 17, nesta se pode analisar que o material é formado apenas pela fase austenita (FCC\_A1) entre 1020°C e 1396°C;  $T=376^\circ\text{C}$ ;  $T_m=1208^\circ\text{C}$ . Já na Figura 5, onde é apresentado o digrama de equilíbrio par a liga 8, tem-se o material formado apenas pela fase austenita entra 1016°C e 1313°C;  $T=297^\circ\text{C}$ ;  $T_m=1165^\circ\text{C}$ . Ao comparar estas composições fica claro o intervalo de fase 100% austenita no material é consideravelmente maior na Liga 17.

Figura 4: Diagrama de fração volumétrica das fases para a Liga 17.



Fonte: Autor.

Figura 5: Diagrama de fração volumétrica das fases para a Liga 8.



Fonte: Autor.

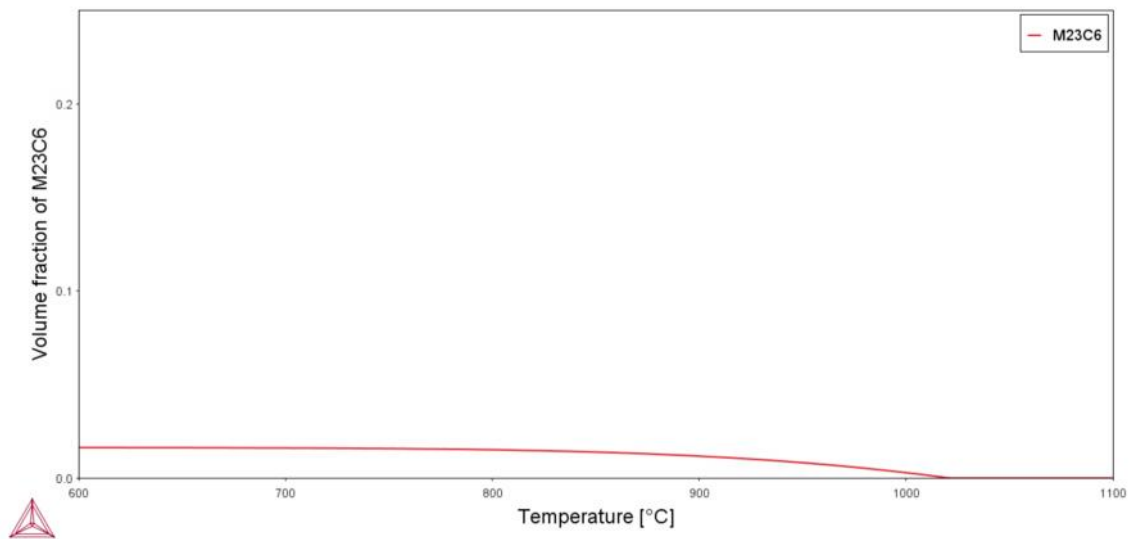
Com relação a outras fases a Liga 17 não apresentou formação da fase Chi (CHI\_A12) e Ferrita (BCC\_A2), e a fase  $M_{23}C_6$  não sofreu grandes variações em sua quantidade formada, quando comparado a Liga 8, dados estes que podem ser observados nas figuras 4 e 5. A temperatura de formação de  $M_{23}C_6$  não sofreu alteração significativa entre a liga 17 e a Liga 8, e como pode ser visto nas figuras 6 e 7 em ambas os carbonetos se formaram abaixo de  $1020^{\circ}\text{C}$ .

É possível notar a influência do níquel na liga, já que ele é um elemento estabilizador da fase austenita, logo, sua maior presença na Liga 17 favoreceu o aumento da faixa e temperatura da mesma. Devido a diminuição da quantidade de Mo na liga não foi observada a formação da fase Ferrita, já que maiores teores de Mo favoreceriam a formação da mesma (SILVA, 1988).

As análises discutidas anteriormente se deram, também, entre todas as ligas citadas na tabela 2, e os diagramas de equilíbrio destas estão apresentados nos apêndices deste relatório. Foi possível observar que a fase que está sendo estudada,  $M_{23}C_6$ , não sofreu variações de composição, mesmo com as mudanças da liga, o que era esperado. Com relação a sua formação, foram encontradas pequenas variações em sua temperatura de início, sendo que todas se deram abaixo de  $1050^{\circ}\text{C}$ , e a fração volumétrica formada não se alterou significativamente nas ligas simuladas, caracterizando um comportamento estável da formação da fase dentre os limites de composição aceitos para a liga segundo a sua norma.

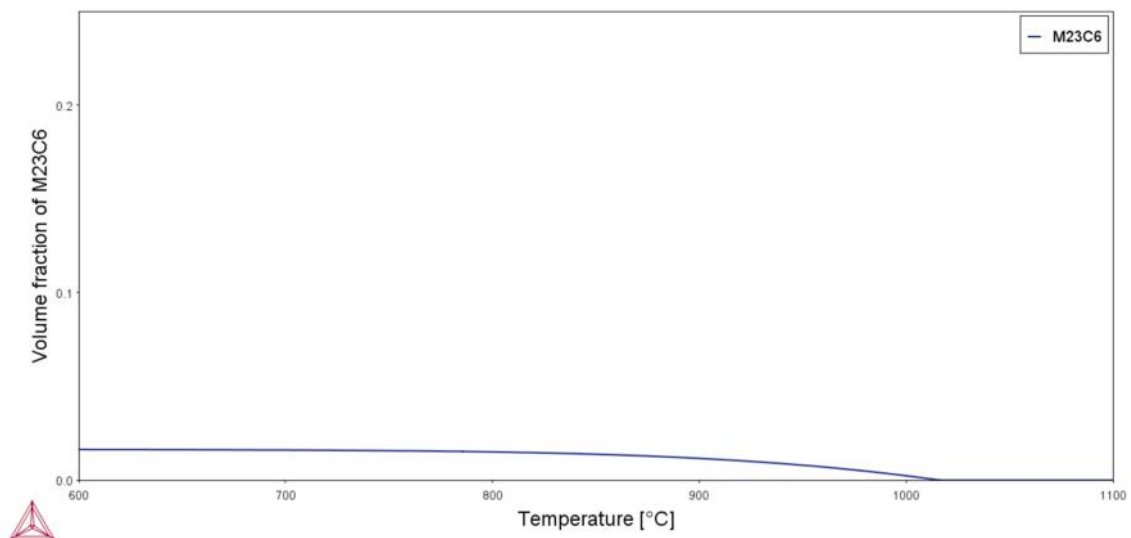


Figura 6: Fração volumétrica de  $M_{23}C_6$  em função da temperatura, liga 17.



Fonte: Autor.

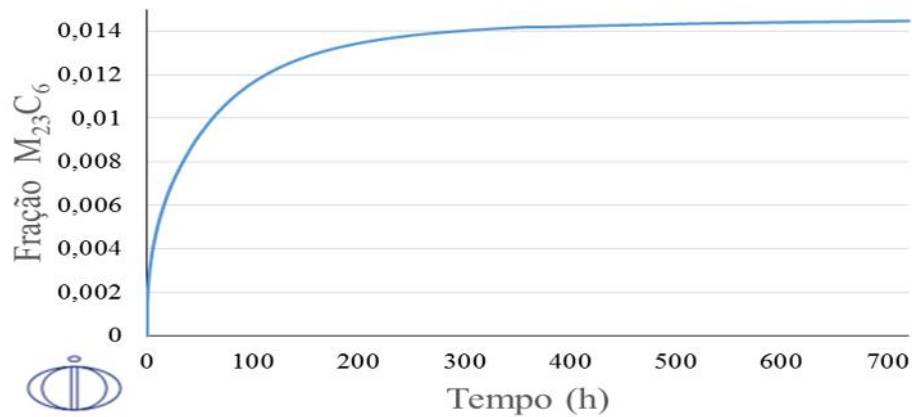
Figura 7: Fração volumétrica de  $M_{23}C_6$  em função da temperatura, liga 8.



Fonte: Autor.

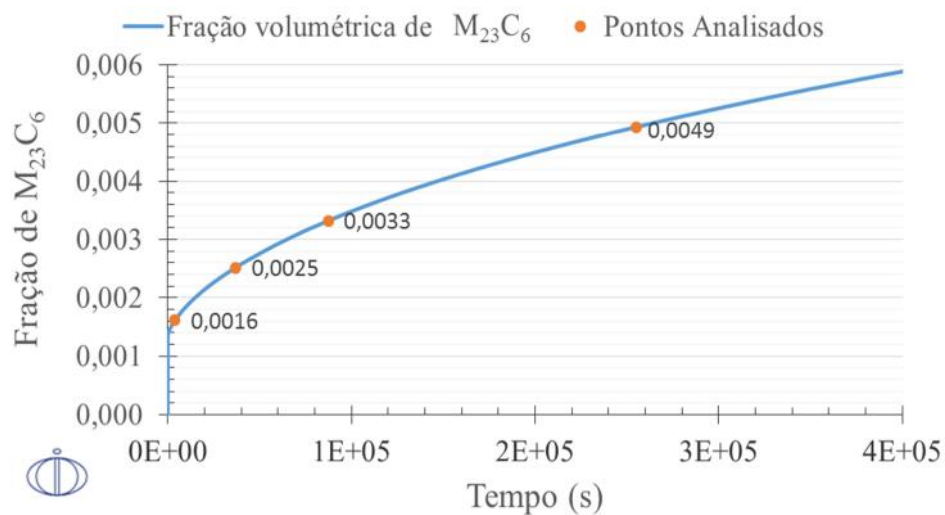
Utilizando o software DICTRA<sup>®</sup> na simulação do processo de difusão na liga 8 para a formação e crescimento da fase  $M_{23}C_6$ , foram obtidos gráficos da fração volumétrica da fase, em função do tempo para uma dada temperatura, como mostrado na Figura 8. A partir destas simulações foram coletados os tempos para a formação de 10, 15, 20 e 30% com relação ao total de  $M_{23}C_6$  formado nas simulações de equilíbrio da Liga 8 no Thermo-Calc<sup>®</sup>. Os pontos considerados estão exemplificados na Figura 9, que apresentou estabilização em 0,0161% de volume de  $M_{23}C_6$  para a Liga 8.

Figura 8. Fração de carboneto  $M_{23}C_6$  em função do tempo de tratamento isotérmico a  $775^\circ\text{C}$  para a Liga 8.



Fonte: Autor.

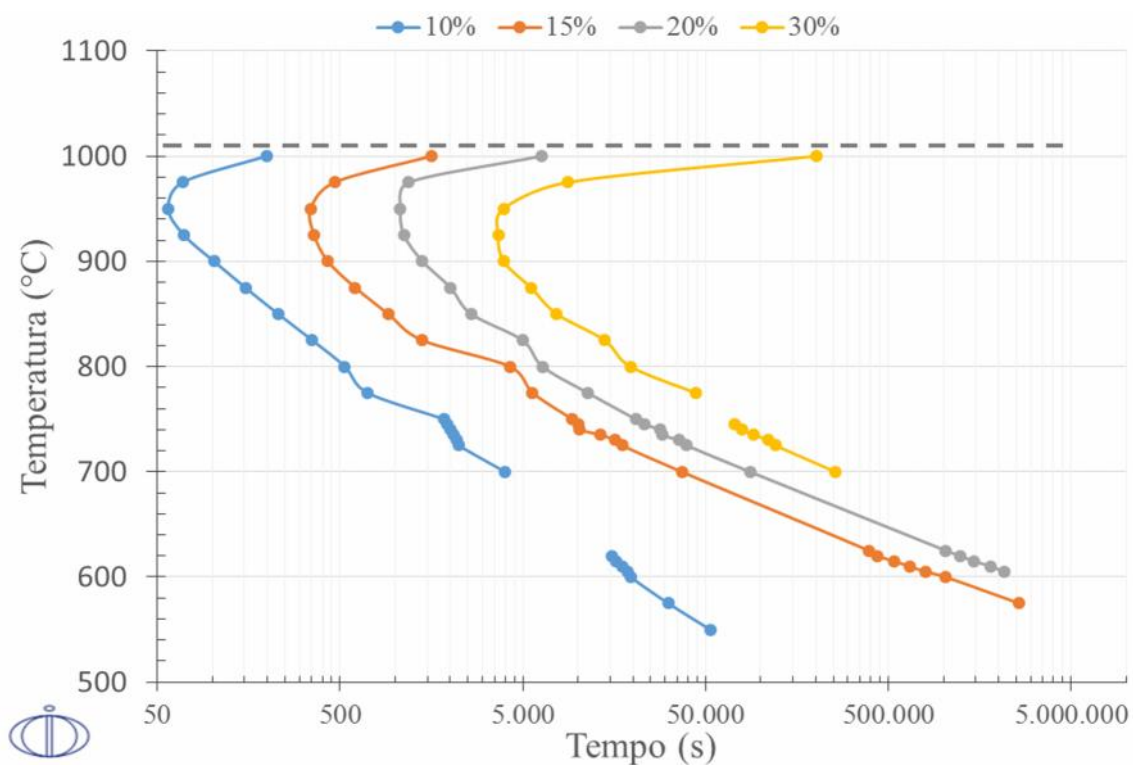
Figura 9. Fração de carboneto  $M_{23}C_6$  em função do tempo de tratamento isotérmico a  $700^\circ\text{C}$  para a Liga 8.



Fonte: Autor.

Os pontos indicados na Figura 9 são referentes a 10, 15, 20 e 30% da formação de  $M_{23}C_6$ , este processo foi repetido para todas as temperaturas simuladas, obtendo um total de 86 pontos utilizados para a formação do diagrama TTP do aço inoxidável 316 mostrado na figura 10. Um aproveitamento de 86% das simulações, pois dos 100 pontos esperados, em temperaturas mais baixas as simulações não foram longas o suficiente para atingir a formação de 20 e 30% de  $M_{23}C_6$ .

Figura 10. Diagrama TTP de  $M_{23}C_6$  para a liga UNS S31600, Liga 8.



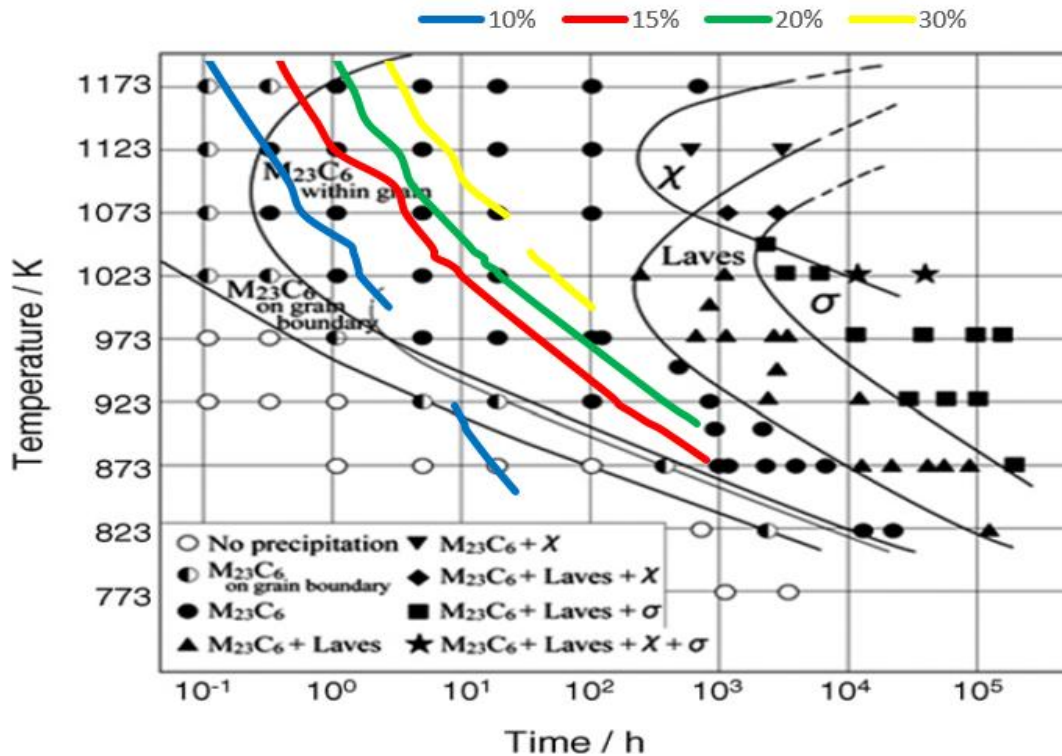
Fonte: Autor.

No diagrama TTP da figura 10 gerado no software DICTRA<sup>®</sup> pode ser observado que no intervalo de temperaturas de 625°C até 700°C, e de 700°C até 725°C, existe uma área de descontinuidade dos pontos obtidos, isto se deve a erros do software, que não conseguiu concluir a simulação nestas duas faixas de temperaturas. Estes erros nas simulações nestas faixas de temperaturas persistiram mesmo com a atualização do software da versão A, referente ao primeiro semestre de 2019, para a versão B, referente ao segundo semestre de 2019.

Para melhorar a tendência da curva próximo a região onde as simulações não tiveram êxito, foi alterado o intervalo de temperatura entre as simulações para 5°C para as regiões de 600°C até 625°C e de 725°C até 750°C. A maior quantidade de pontos nestas regiões reforça a tendência da curva proporcionando uma melhor estimativa dos dados que não foram obtidos.

A Figura 2 foi utilizada como base para comparação e validação das simulações realizadas devido ao fato de ter origem experimental. A Figura 2 foi sobreposta aos dados obtidos nas simulações do DICTRA<sup>®</sup>, e o resultado pode ser observado na figura 11.

Figura 11. Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA<sup>®</sup> para a liga UNS S31600.

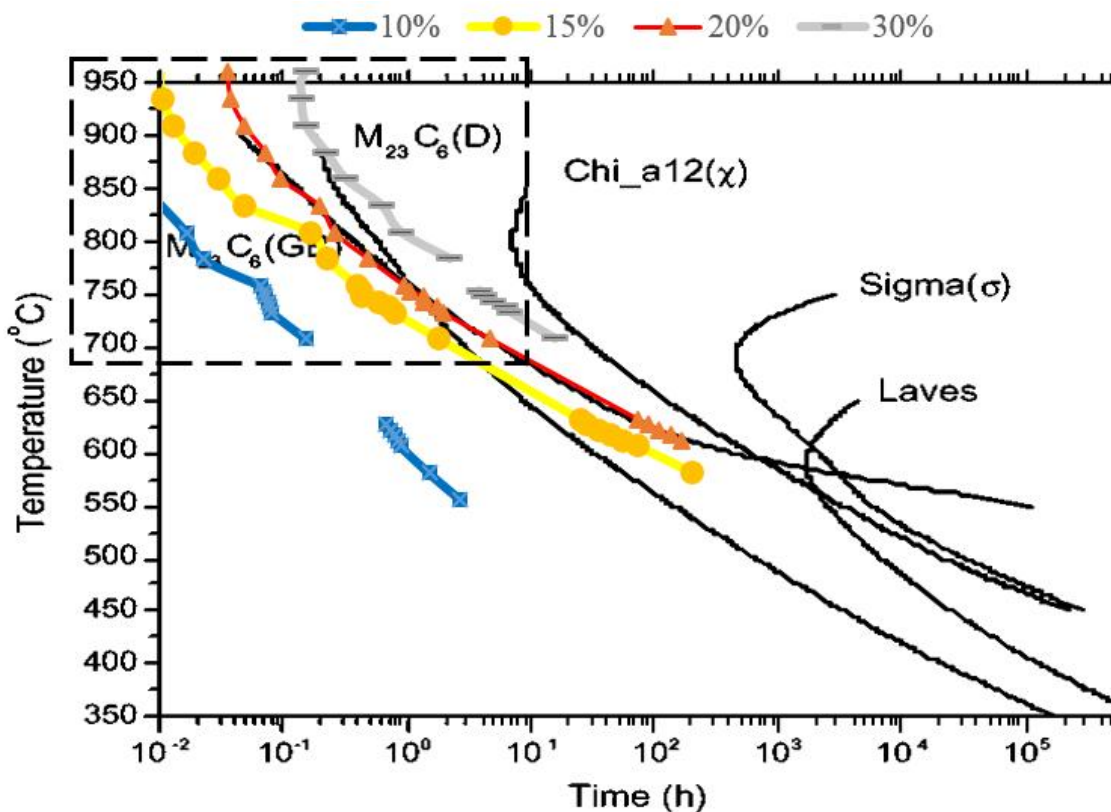


Fonte: NRIM, 1988. Editado pelo autor.

Tem-se mais uma vez as curvas de 10, 15, 20 e 30% da formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> destacadas conforme a legenda da Figura 11, proporcionando a visualização da coincidência das curvas, o comportamento similar, além do fato de ter grande parte dos pontos simulados localizados na região denominada M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> dentro do grão da matriz.

O mesmo processo de comparação visual foi realizado com a figura 3, que trata de um diagrama TTP para a liga 316 NIMS obtido através de simulações pelo método CALPHAD, que foi sobreposto pelos dados obtidos nas simulações do DICTRA<sup>®</sup> gerando a figura 12.

Figura 12. Diagrama TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA<sup>®</sup> para a liga UNS S31600.

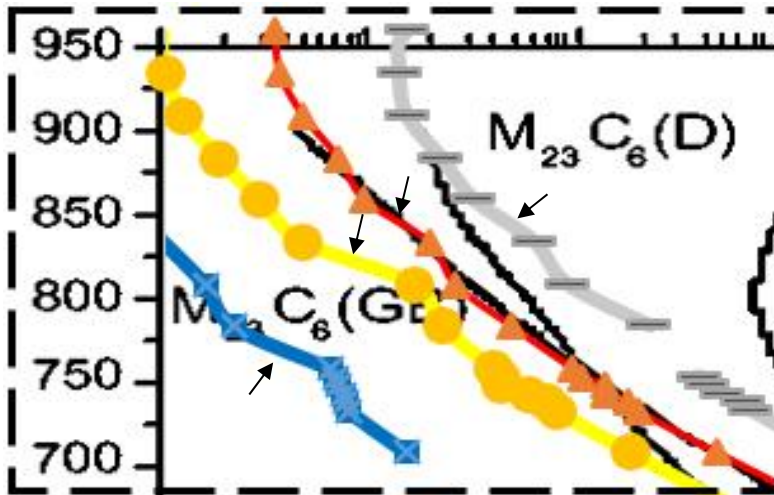


Fonte: Y. YANG, 2014. Editado pelo autor.

Ao analisar a sobreposição dos gráficos na figura 12 pode-se notar que a curva  $M_{23}C_6(GB)$ , referente ao precipitado no contorno de grão, coincidiu com a curva de 20% de formação de  $M_{23}C_6$  simulado pelo DICTRA<sup>®</sup>. As curvas de 15 e 30% mantiveram uma margem praticamente constante com relação a curva de  $M_{23}C_6$ , enquanto a curva de 10%, apesar de estar mais espaçada, teve um comportamento de desenvolvimento similar ao da curva  $M_{23}C_6(D)$ , que trata do precipitado dentro da matriz.

Na ampliação do detalhe da figura 13 pode se notar que as pequenas distorções na continuidade das curvas de 10, 15, 20 e 30% de  $M_{23}C_6$  oriundas do DICTRA<sup>®</sup>, ocorreram na região onde as curvas  $M_{23}C_6(GB)$  e  $M_{23}C_6(D)$  estavam convergindo, as maiores distorções podem ser vistas na curva de 10 e de 15%, indicados na figura. Estas distorções poderiam estar relacionadas a mudanças no mecanismo de transformação, que mudou de uma maior tendência a ir para o contorno de grão, para a tendência de ir ao centro da matriz, causando estes pequenos atrasos na formação e crescimento da fase nesta região do diagrama.

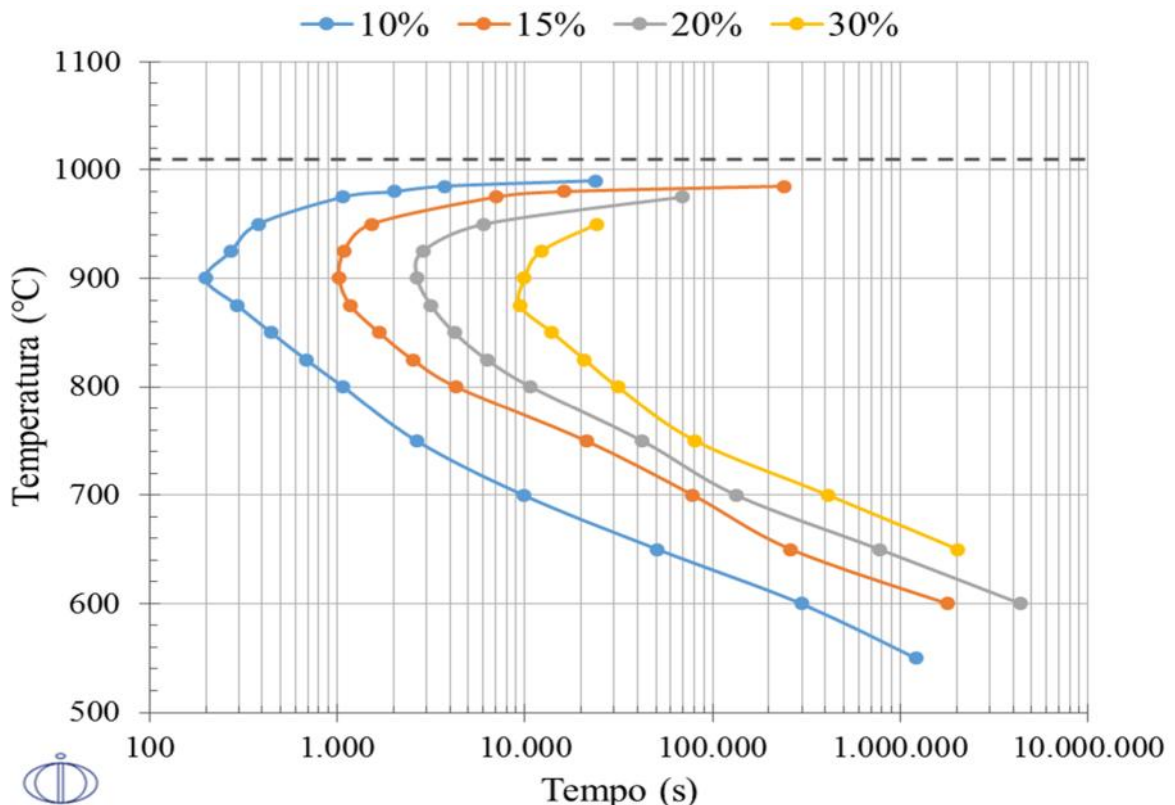
Figura 13. Detalhe ampliado da Figura 12.



Fonte: Y. YANG, 2014. Editado pelo autor.

Utilizando as simulações do software DICTRA<sup>®</sup> foi construído o diagrama TTP para a Liga 1, apresentado na Figura 14, que teve por base a estabilização em 0,0163% de volume de  $M_{23}C_6$ ; valor este obtido através da simulação de equilíbrio da liga no software Thermo-calc; para a formação das curvas de 10, 15, 20 e 30% de  $M_{23}C_6$ .

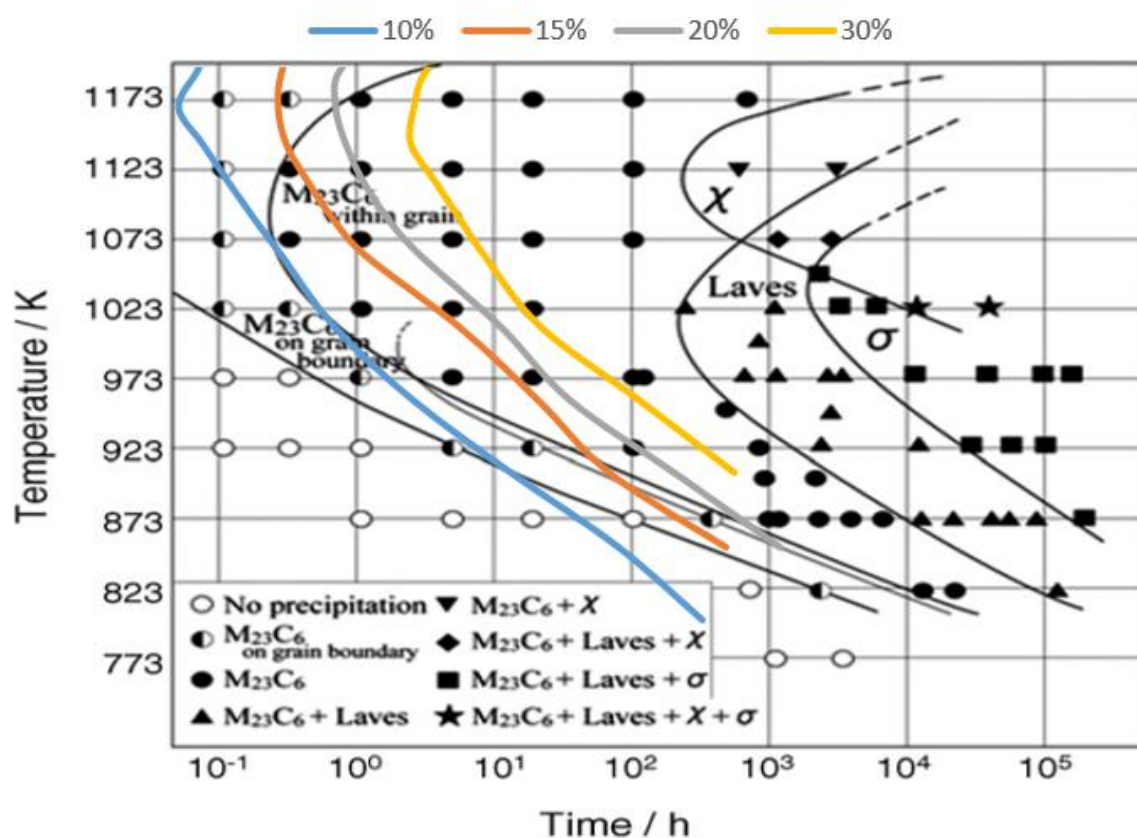
Figura 14. Diagrama TTP de  $M_{23}C_6$  para a liga UNS S31600, Liga 1.



Fonte: Autor.

A incidência de erros nas simulações para a Liga 1 foi menor do que para a Liga 8, assim como o tempo para conclusão das simulações, é plausível acreditar que isto ocorreu devido a menor quantidade de elementos na simulação, já que Mn e Si tendem a desaparecer da liga para a menor composição. A Figura 2 foi sobreposta aos dados obtidos nas simulações do DICTRA<sup>®</sup>, para comparação e validação do diagrama TTP da Liga 1, o resultado pode ser observado na figura 15.

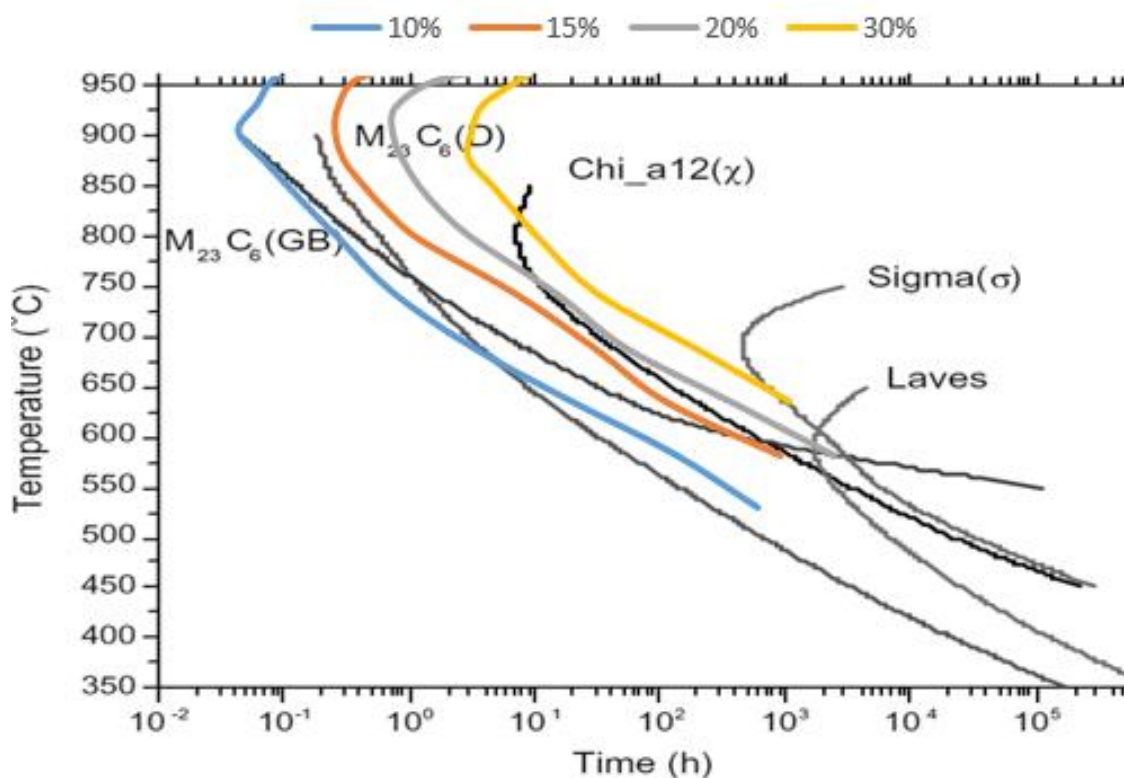
Figura 15. Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA<sup>®</sup> para a liga UNS S31600, Liga 1.



Fonte: NIRM, 1988. Editado pelo autor.

O mesmo processo de comparação visual foi realizado com a figura 3, que trata de um diagrama TTP para a liga 316 NIMS, que foi sobreposto pelos dados obtidos nas simulações do DICTRA<sup>®</sup> para liga 1, gerando a figura 16.

Figura 16. Diagrama TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA<sup>®</sup> para a liga UNS S31600, Liga 1.



Fonte: Y. YANG, 2014. Editado pelo autor.

Tanto na Figura 15 quanto na 16 podemos observar que as curvas obtidas no DICTRA<sup>®</sup> tem a mesma tendência e inclinação das curvas de  $M_{23}C_6$  dos diagramas utilizados como base para comparação. Pelo fato do diagrama TTP da Liga 1 não apresentar distorções em suas curvas, a sobreposição dos gráficos traz um resultado mais homogêneo.

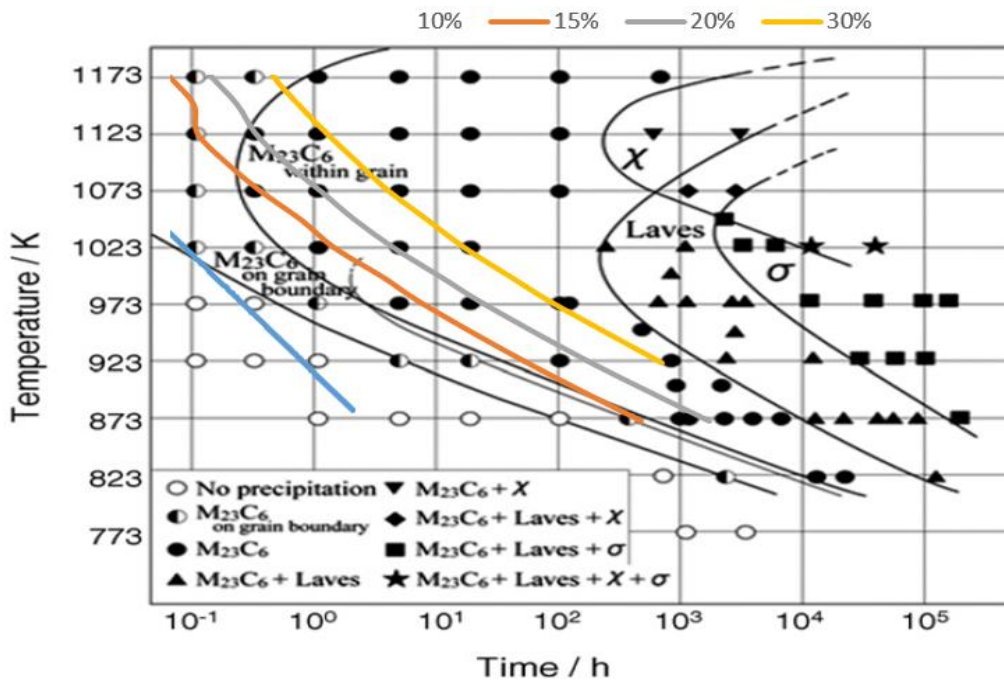
No comparativo da Figura 16 pode-se notar que a curva de 10% segue praticamente paralela a curva de  $M_{23}C_6(GB)$  entre as temperaturas de 675 e 900°C, distanciando conforme a curva  $M_{23}C_6(GB)$  se afasta da curva  $M_{23}C_6(D)$ .

Foram utilizadas as simulações do software DICTRA<sup>®</sup> para obter o diagrama TTP da Liga 20, apresentado na Figura 17, onde tem-se o valor base 0,0162% do volume de  $M_{23}C_6$ ; obtido em simulação de equilíbrio da liga no software Thermo-calc; para a formação das curvas de 10, 15, 20 e 30% de  $M_{23}C_6$ .





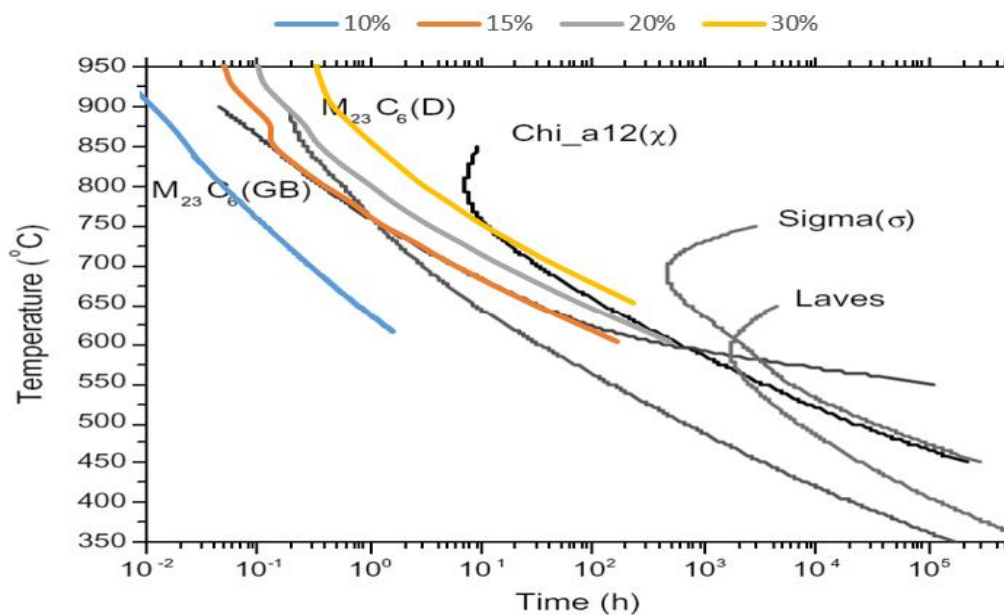
Figura 18. Diagrama TTP experimental para o aço inoxidável 316NIMS sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA<sup>®</sup> para a liga UNS S31600, Liga 20.



Fonte: NRIM, 1988. Editado pelo autor.

Para realizar a comparação entre o diagrama TTP para a Liga 20 obtido pelo DICTRA<sup>®</sup> e a Figura 3, tem-se a sobreposição na Figura 19.

Figura 19. Diagrama TTT do aço 316NIMS para 0,1% fração molar das fases precipitadas sobreposto pelas simulações realizadas no DICTRA<sup>®</sup> para a liga UNS S31600, Liga 20.



Fonte: Y. YANG, 2014. Editado pelo autor.

Na sobreposição da Figura 19 pode-se notar que a curva média de 10% segue praticamente paralela a curva de  $M_{23}C_6$  (GB), comportamento e inclinação similar. Mostrando uma maior coincidência entre os gráficos, para as curvas de 15 e 20% de formação de  $M_{23}C_6$ , tanto que a curva de 15%, entre 650 e 850°C, sobrepôs a curva  $M_{23}C_6$  (GB).

## 5 CONCLUSÕES

Através da análise dos gráficos de equilíbrio no software Thermo-Calc<sup>®</sup> das ligas foi possível notar a influência de certos elementos, como níquel e molibdênio, que em determinadas quantidades podem aumentar ou diminuir a presença de ferrita e austenita na liga, porém dentre todas as variações estudadas não foram observadas variações significativas na temperatura média ( $T_m$ ) de formação da fase austenita. A mesma estabilidade foi observada com relação a fase  $M_{23}C_6$ , que apesar de pequenas alterações em sua temperatura de início, não teve grandes variações na fração volumétrica formada da mesma.

O fato de que o software DICTRA<sup>®</sup> não foi capaz de concluir as simulações em um dado intervalo de temperaturas na Liga 8 não surtiu grande efeito no panorama geral do estudo, sendo possível seguir a tendência das curvas TTP geradas a partir das simulações, dando assim uma estimativa dos resultados não obtidos. Através dos resultados gerados nas simulações utilizando o Thermo-Calc<sup>®</sup> e o DICTRA<sup>®</sup>, foram construídos com êxito os diagramas TTP de carbonetos de cromo do tipo  $M_{23}C_6$  no aço austenítico do tipo 316, possibilitando a comparação destes com diagramas obtidos tanto experimentalmente quanto por métodos de simulações encontrados na literatura. O diagrama gerado se mostrou fiel a realidade, coincidindo com o diagrama experimental, levando em consideração as variações de composição, mostrando um perfil muito similar ao das curvas oriundas de simulação disponível na literatura, tendo isto por base, pode-se afirmar que o módulo de difusão DICTRA<sup>®</sup> do Thermocalc apresenta grande eficiência no cálculo de diagrama TTP de aço AISI 316, sendo completamente viável seu uso para este fim.

## REFERÊNCIAS

O'BRIEN; ANNETTE; GUZMAN; CARLOS. **Welding Handbook**. Miami: AWS 2011.

J. K. L. LAI. A Study of Precipitation in AISI Type 316 Stainless Steel. **Materials Science and Engineering**: Gt. Britain, Sep. 1982. p. 195-208.

SEDRIKS, A. John., **Corrosion of stainless steels**. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1996.

MC GUIRE, MICHAEL F. **Stainless Steels for Desing Engineers**. Ohio: ASM, 2008.

DAVIS, J. R. **Stainless steels**: ASM Specialty Handbook. Ohio: ASM 1994.

PORTER, David A., EASTERLING, Kenneth E. **Phase transformations in metals and alloys**. England: Van Nostrand Reinhold, 1986.

SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. Sumaré: Eletrometal, 1988.

Thermo-Calc Software 2019. Disponível em: < <https://www.thermocalc.com/>>. Acesso em: 04 de Mar. 2019.

PARDO, A. et al. Influence of Ti, C and N concentration on the intergranular corrosion behaviour of AISI 316Ti and 321 stainless steels. **Acta Materialia**, v. 55, 2007, p. 2239-2251.

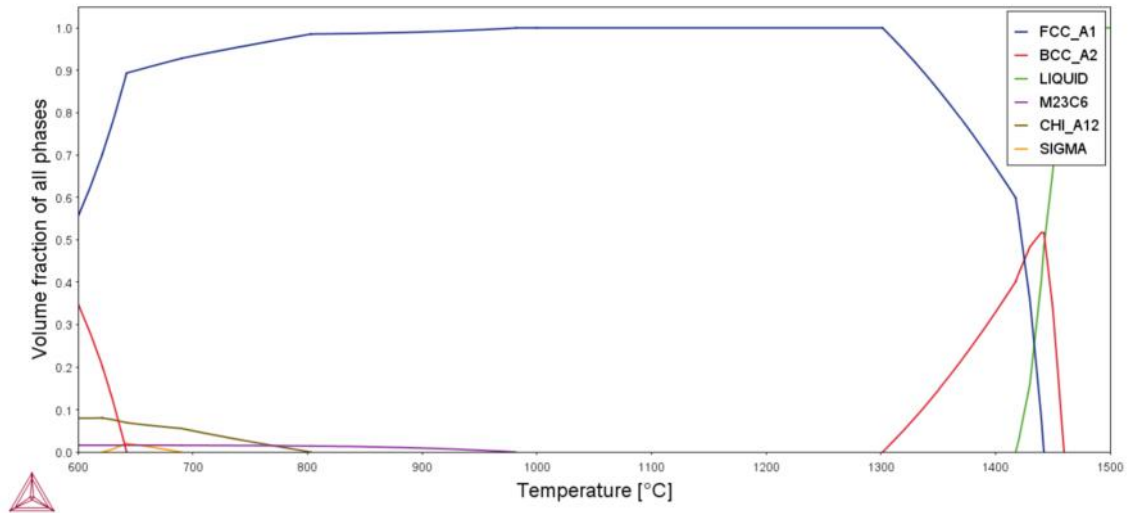
J. CERMAK, L. Kral. Carbon diffusion in carbon-supersaturated ferrite and austenite. **Journal of Alloys and Compounds**: Czech Republic, Oct. 2014. p. 129–135.

NRIM Creep Data Sheet, No. 14B, National Research Institute for Metals Science (NIMS), Tokyo, Japan, 1988.

Y. YANG, J.T. Busby. Thermodynamic modeling and kinetics simulation of precipitate phases in AISI 316 stainless steels. **Journal of Nuclear Materials:** Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA, Fev. 2014. p. 282–293.

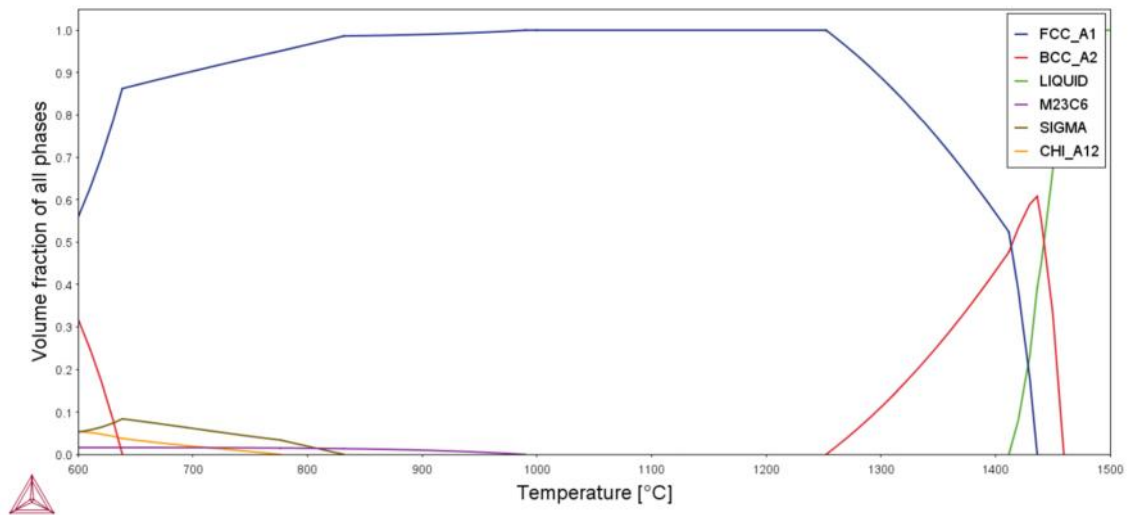
## ANEXO A - DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO OBTIDOS NO THERMO-CALC

Figura 20- Liga 1: Diagrama de equilíbrio para a composição mínima permitida pela norma para o aço inoxidável 316, base de dados TCFE8.



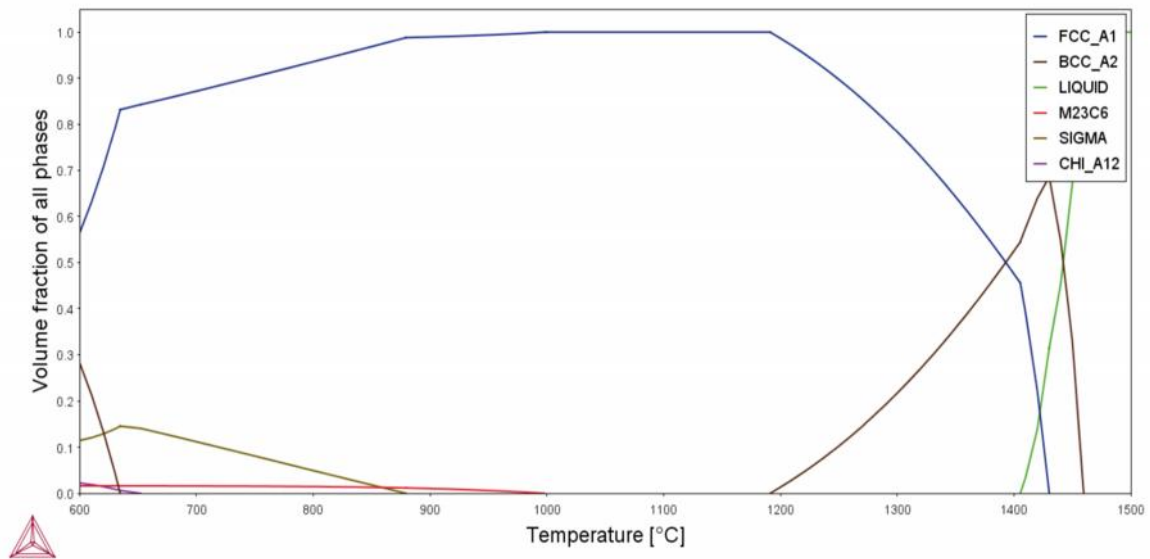
Fonte: Autor.

Figura 21- Liga 2: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento do cromo para 17%, base de dados TCFE8.



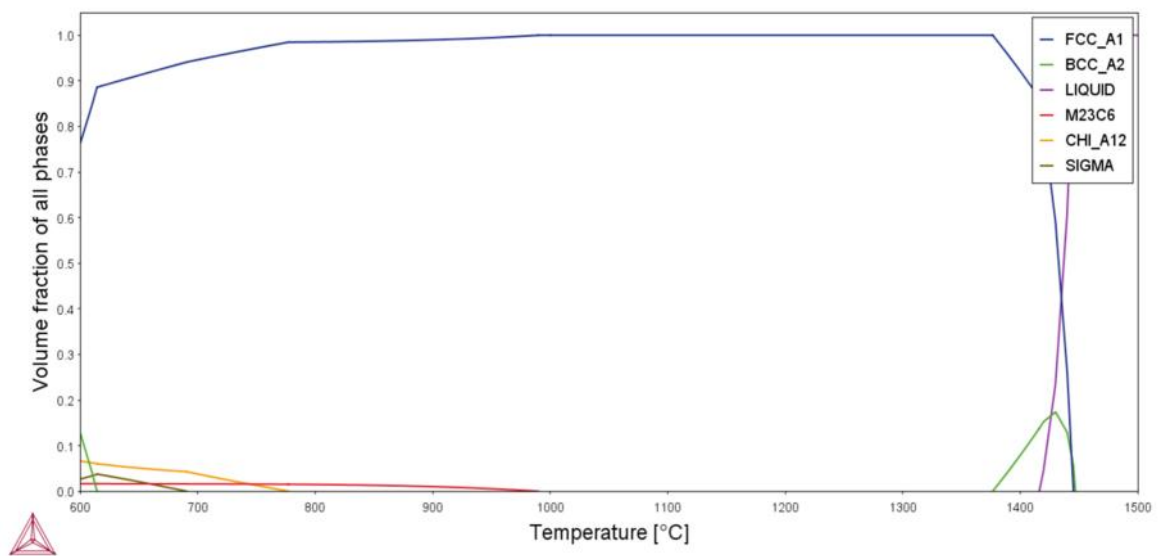
Fonte: Autor.

Figura 22- Liga 3: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de cromo para 18%, base de dados TCFE8.



Fonte: Autor.

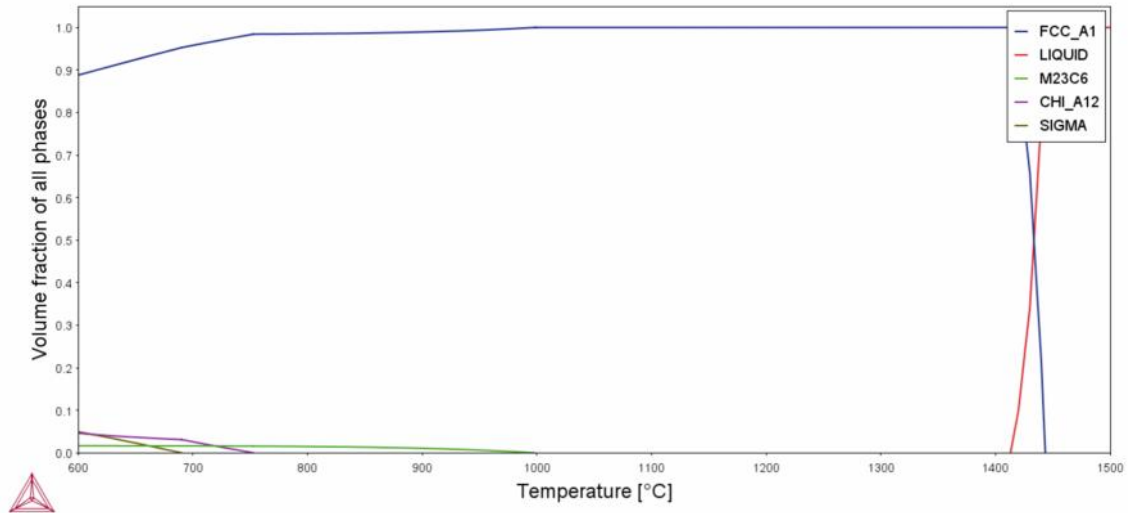
Figura 23- Liga 4: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de níquel para 12%, base de dados TCFE8.



Fonte: Autor.

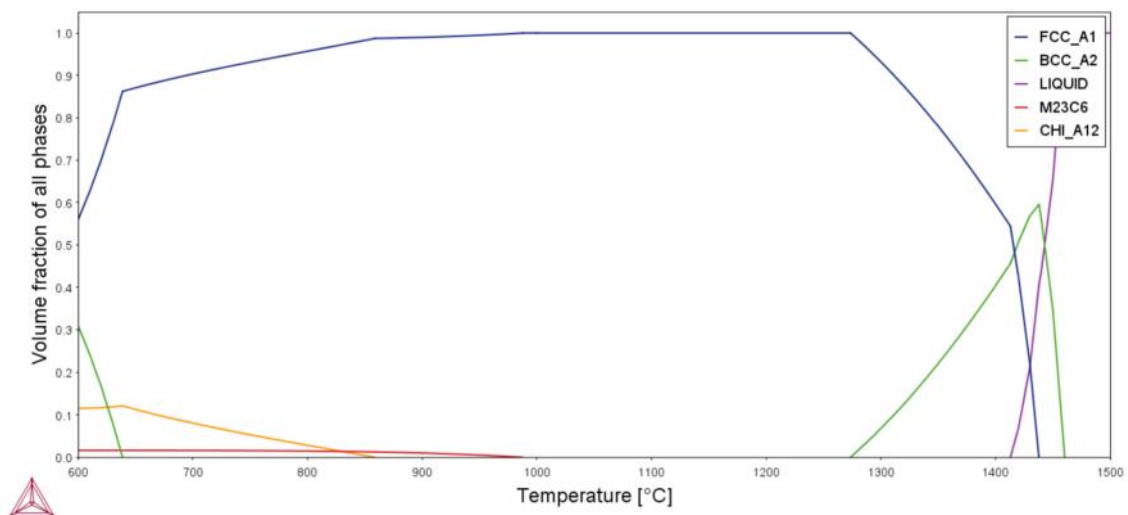


Figura 24- Liga 5: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de níquel para 14%, base de dados TCFE8.



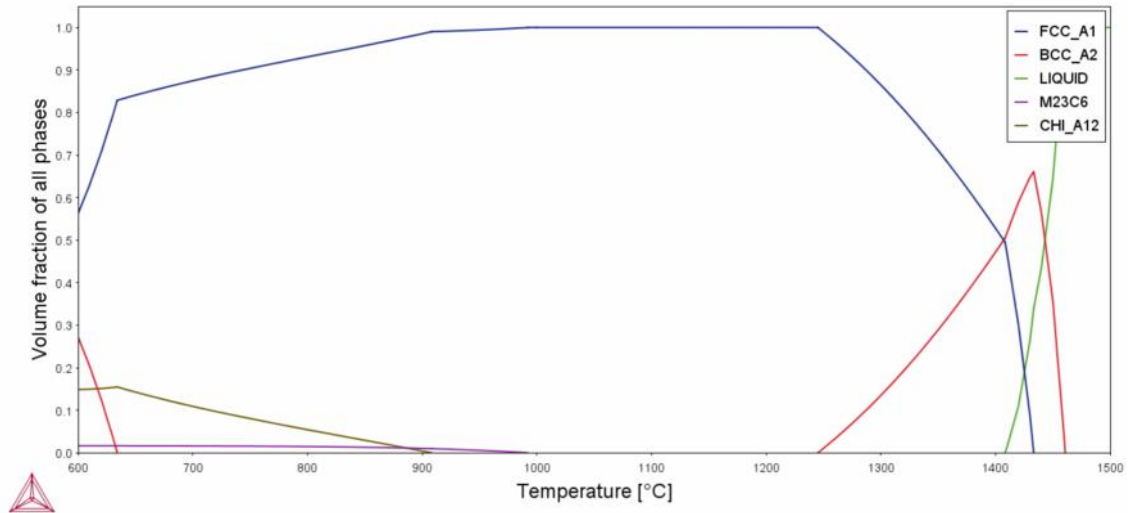
Fonte: Autor.

Figura 25- Liga 6: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de molibdênio para 2,5%, base de dados TCFE8.



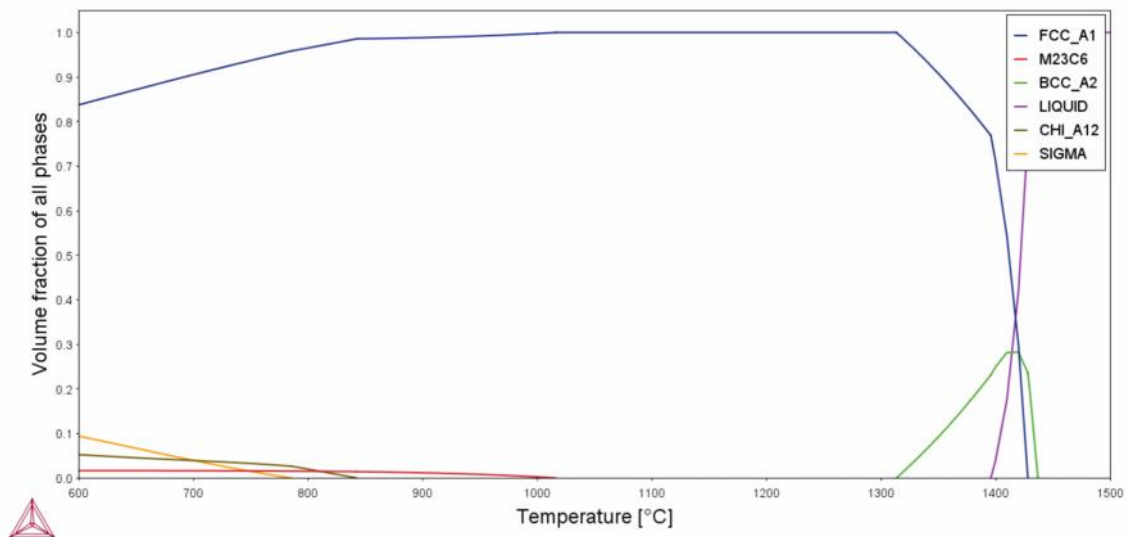
Fonte: Autor.

Figura 26- Liga 7: Diagrama de equilíbrio para a liga base mínima com aumento de molibdênio para 3,0%, base de dados TCFE8.



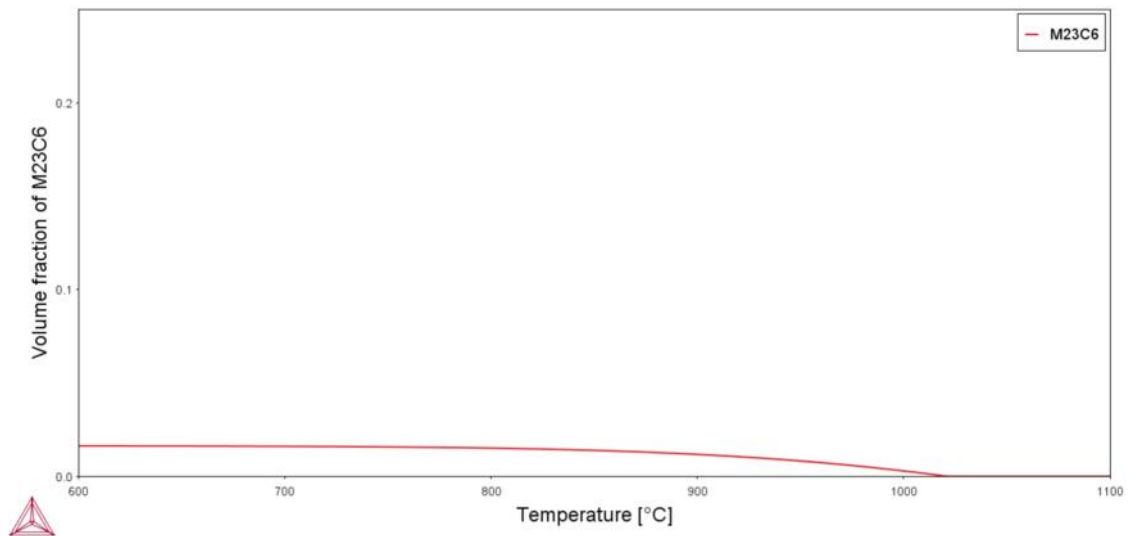
Fonte: Autor.

Figura 27- Liga 8: Diagrama de equilíbrio para composição média permitida pela norma para o aço inoxidável 316, base de dados TCFE8.



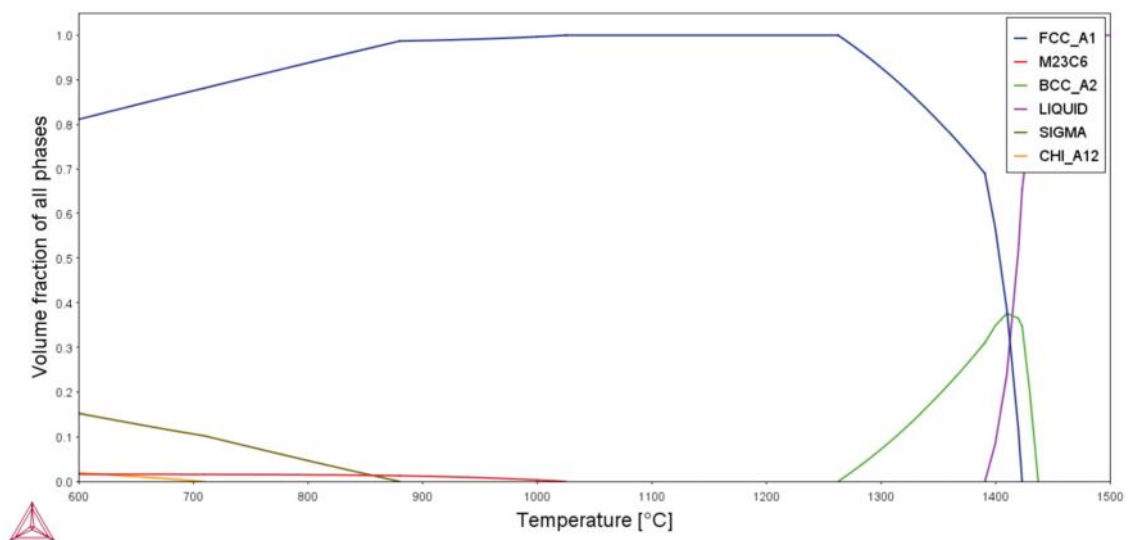
Fonte: Autor.

Figura 28- Liga 9: Diagrama de equilíbrio para liga base média com diminuição de cromo para 16%, base de dados TCFE8.



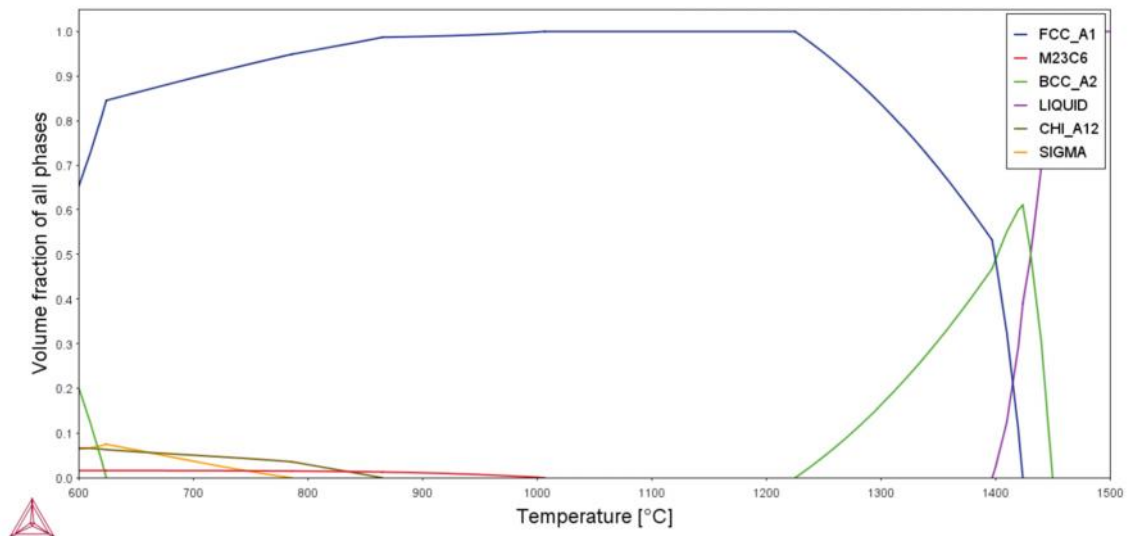
Fonte: Autor.

Figura 29- Liga 10: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de cromo para 18%, base de dados TCFE8.



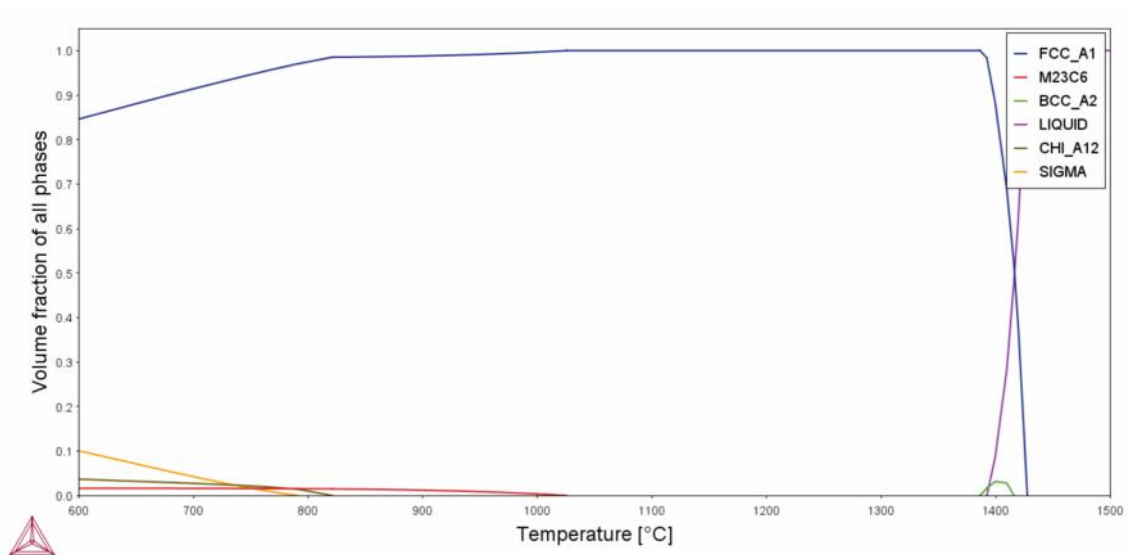
Fonte: Autor.

Figura 30- Liga 11: Diagrama de equilíbrio para liga base média com diminuição de níquel para 10%, base de dados TCFE8.



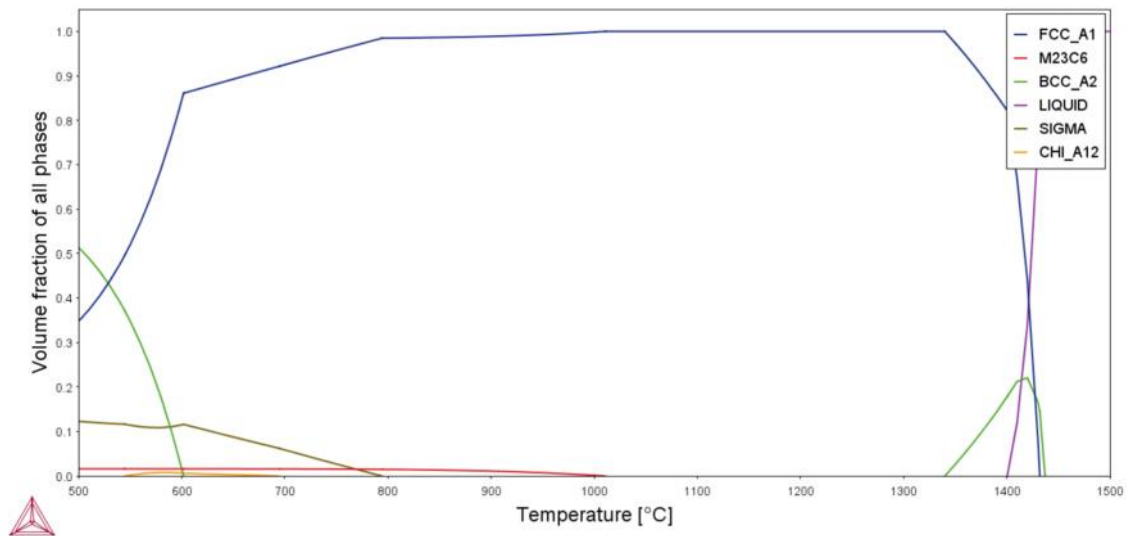
Fonte: Autor.

Figura 31- Liga 12: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de níquel para 14%, base de dados TCFE8.



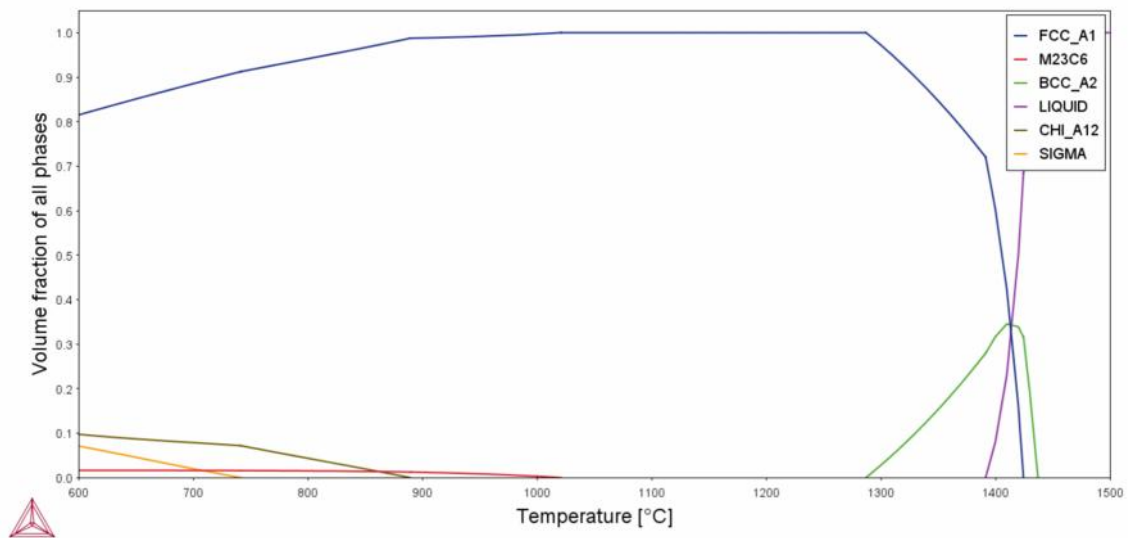
Fonte: Autor.

Figura 32- Liga 13: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com diminuição de molibdênio para 2,0%, base de dados TCFE8.



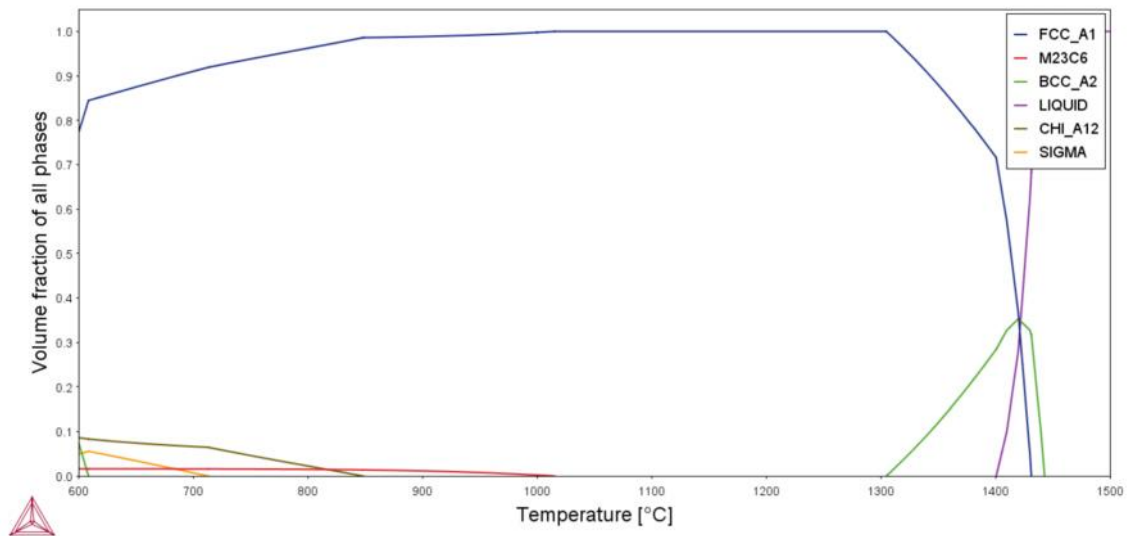
Fonte: Autor.

Figura 33- Liga 14: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de molibdênio para 3,0%, base de dados TCFE8.



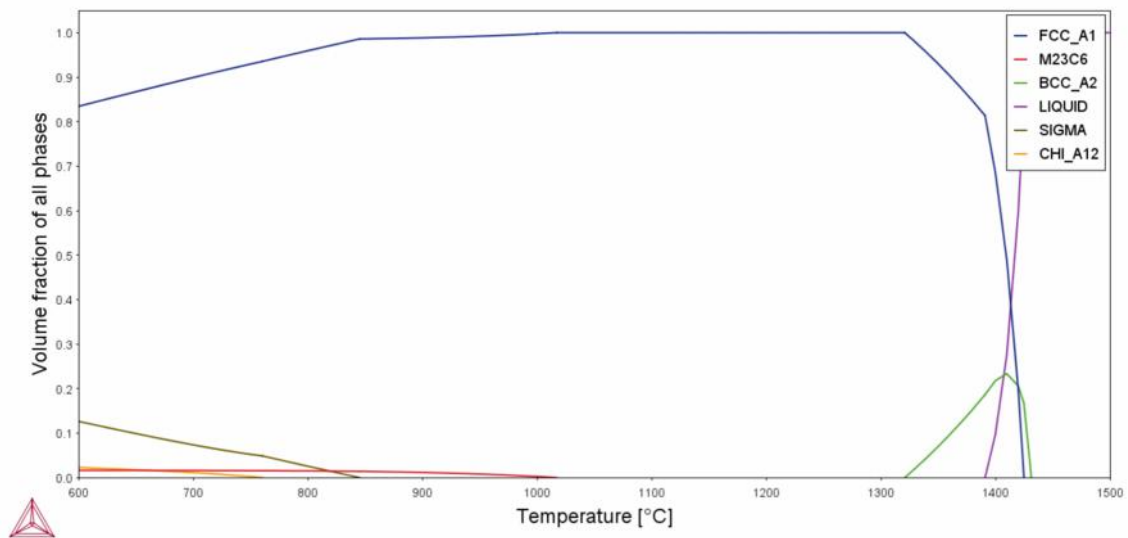
Fonte: Autor.

Figura 34- Liga 15: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com diminuição de manganês para 0,001%, base de dados TCF8.



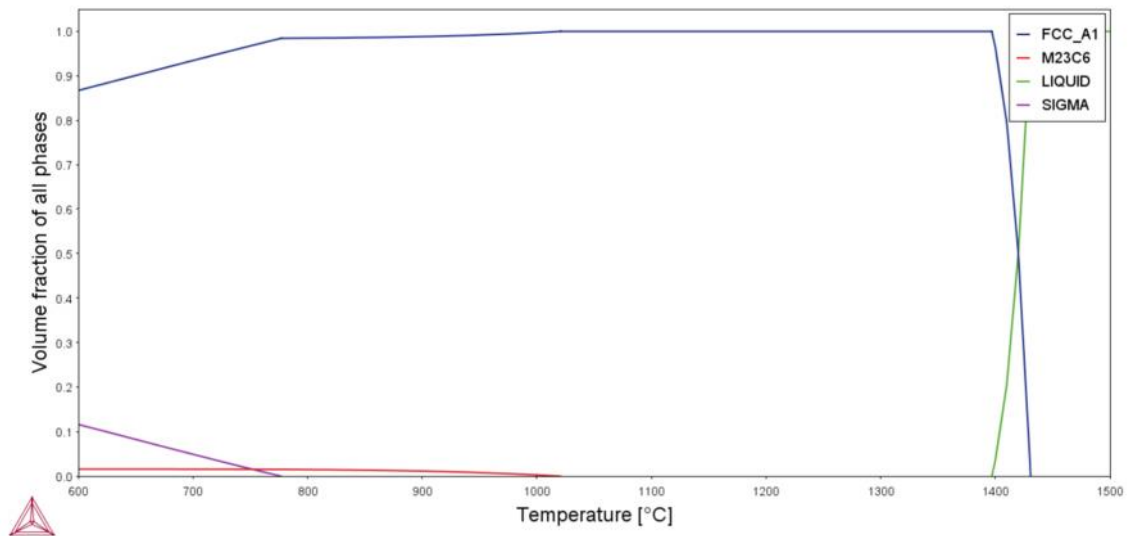
Fonte: Autor.

Figura 35- Liga 16: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de manganês para 2,0%, base de dados TCFE8.



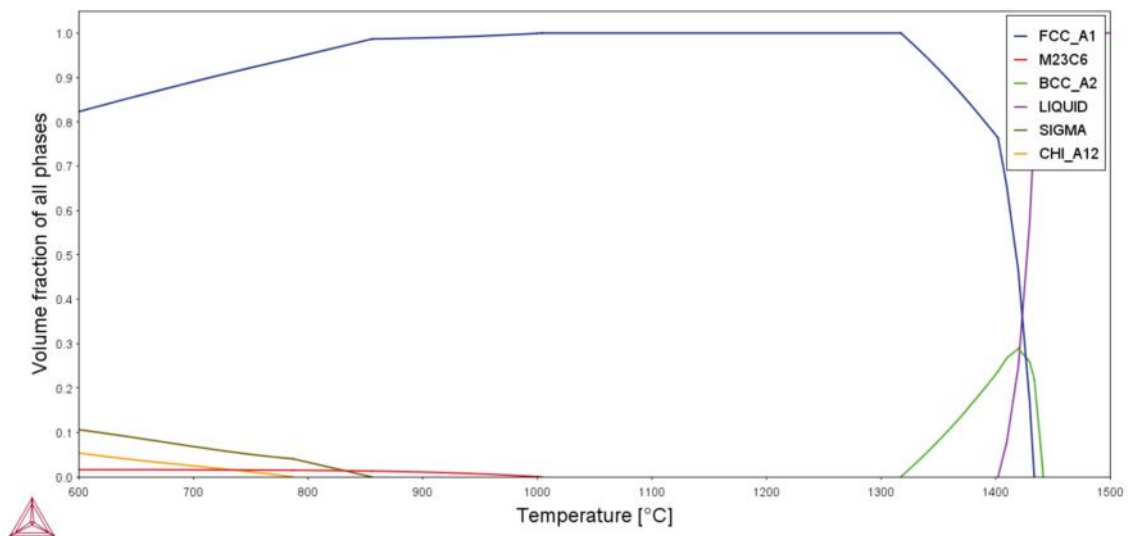
Fonte: Autor.

Figura 36- Liga 17: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de níquel para 14% e diminuição de molibdênio para 2,0%, base de dados TCFE8.



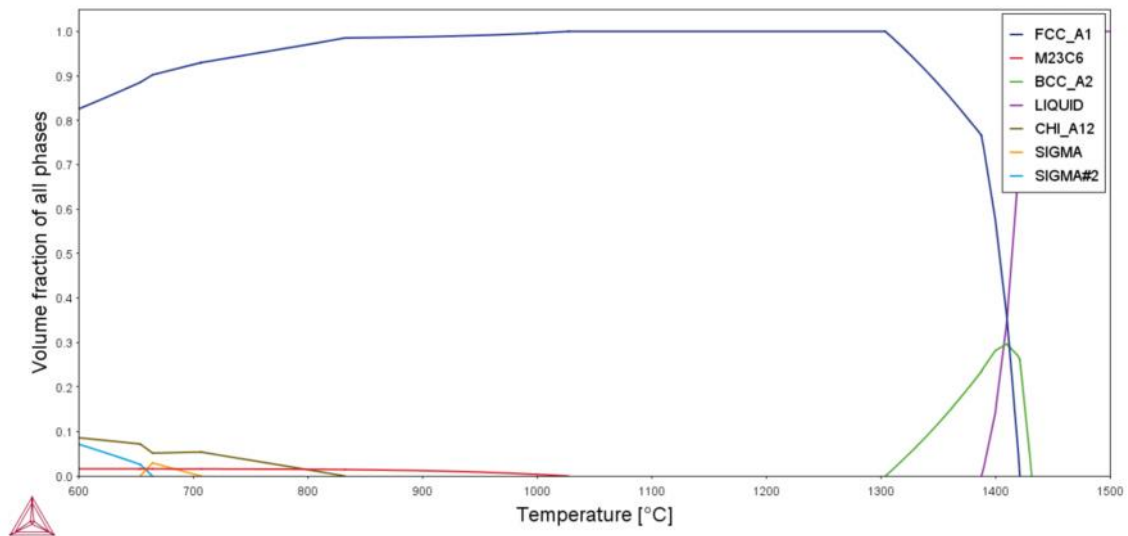
Fonte: Autor.

Figura 37- Liga 18: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com diminuição de silício para 0,001%, base de dados TCFE8.



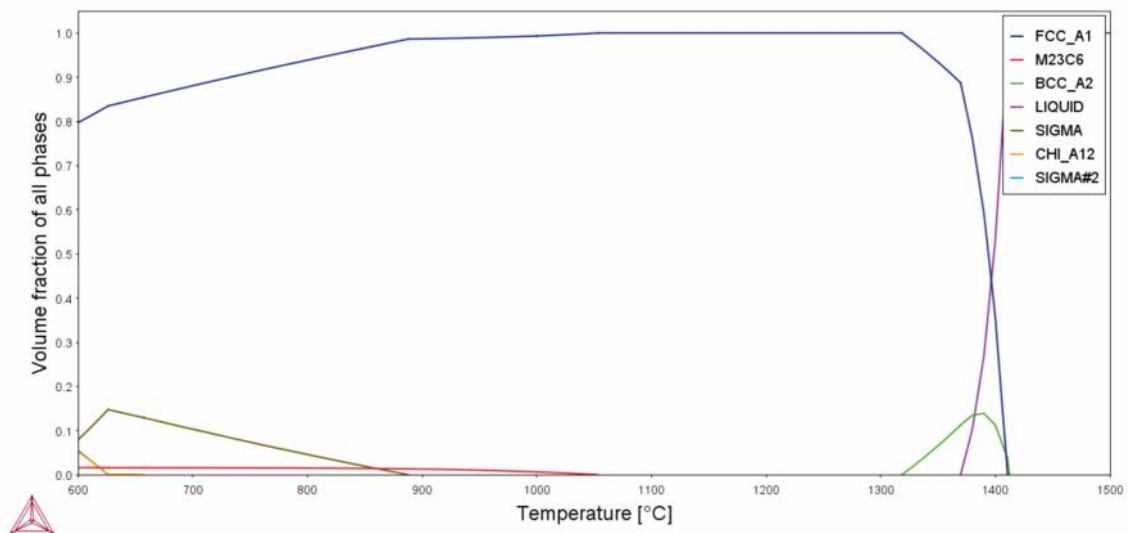
Fonte: Autor.

Figura 38- Liga 19: Diagrama de equilíbrio para a liga base média com aumento de silício para 1,0%, base de dados TCFE8.



Fonte: Autor.

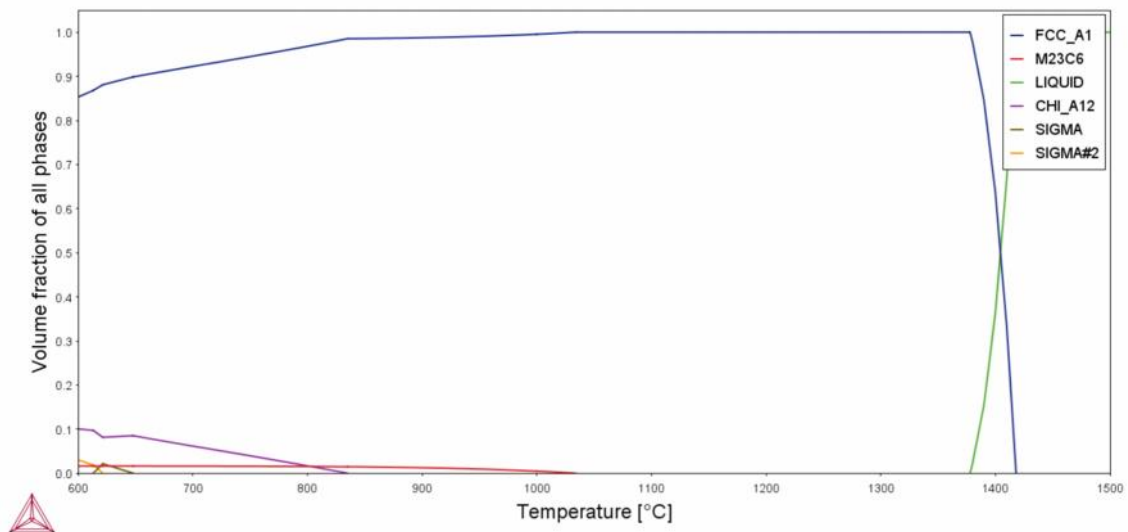
Figura 39- Liga 20: Diagrama de equilíbrio para composição máxima permitida pela norma para o aço inoxidável 316, base de dados TCFE8.



Fonte: Autor.

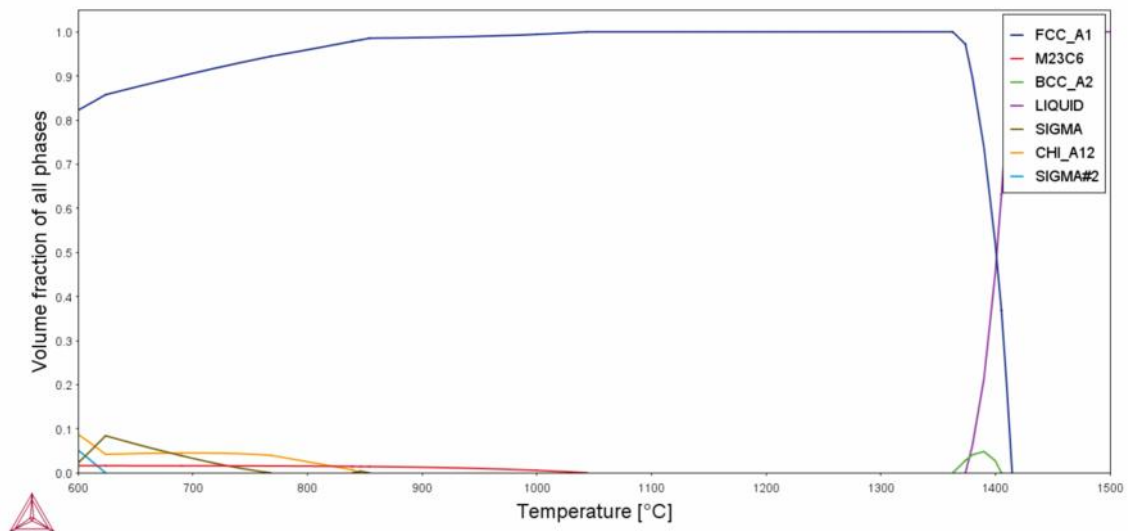


Figura 40- Liga 21: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de cromo para o 16%, base de dados TCFE8.



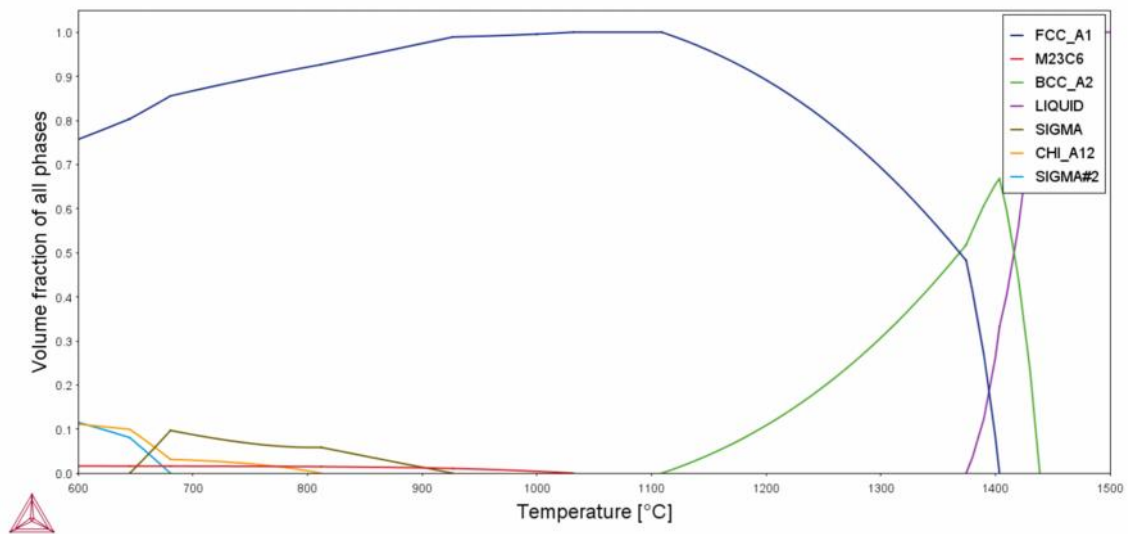
Fonte: Autor.

Figura 41- Liga 22: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de cromo para 17%, base de dados TCFE8.



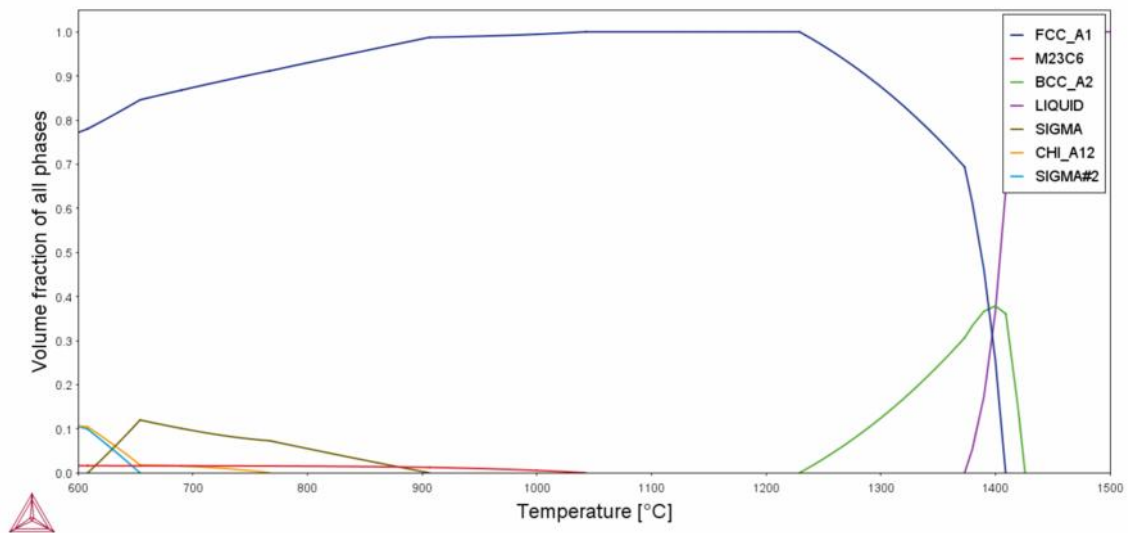
Fonte: Autor.

Figura 42- Liga 23: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de níquel para 10%, base de dados TCFE8.



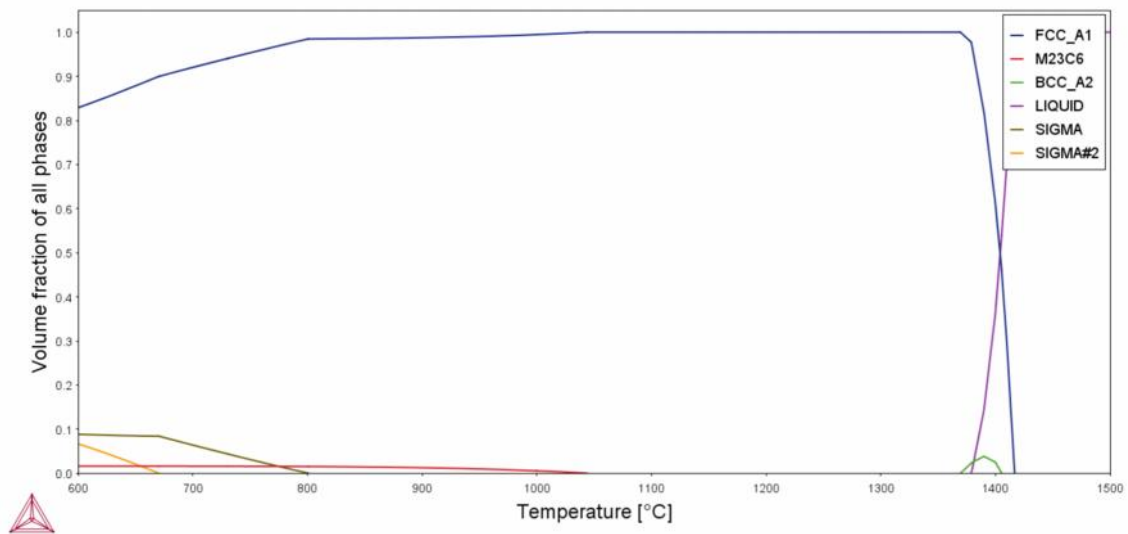
Fonte: Autor.

Figura 43- Liga 24: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de níquel para 12%, base de dados TCFE8.



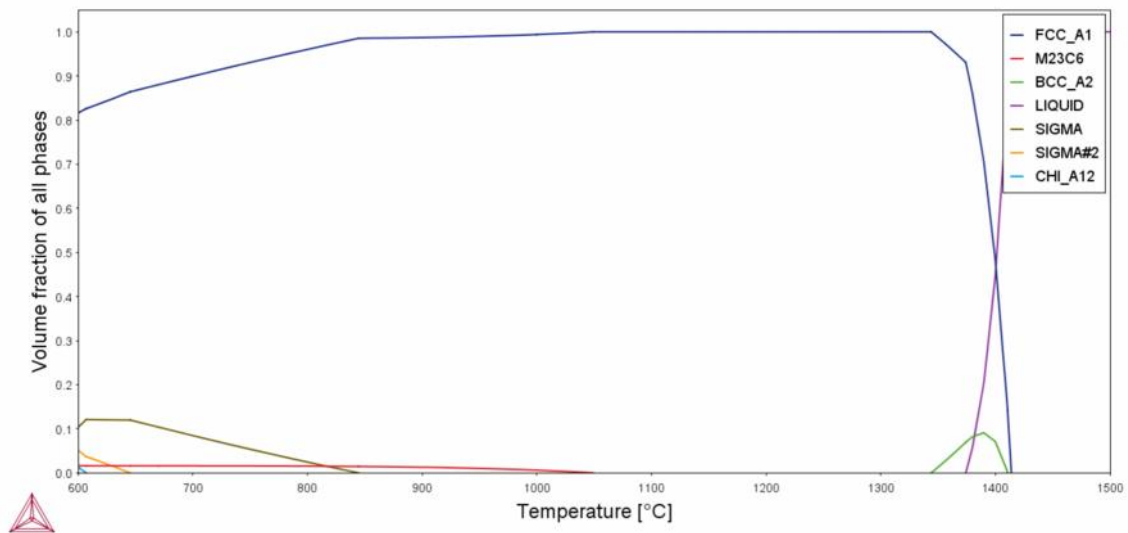
Fonte: Autor.

Figura 44- Liga 25: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de molibdênio para 2,0%, base de dados TCFE8.



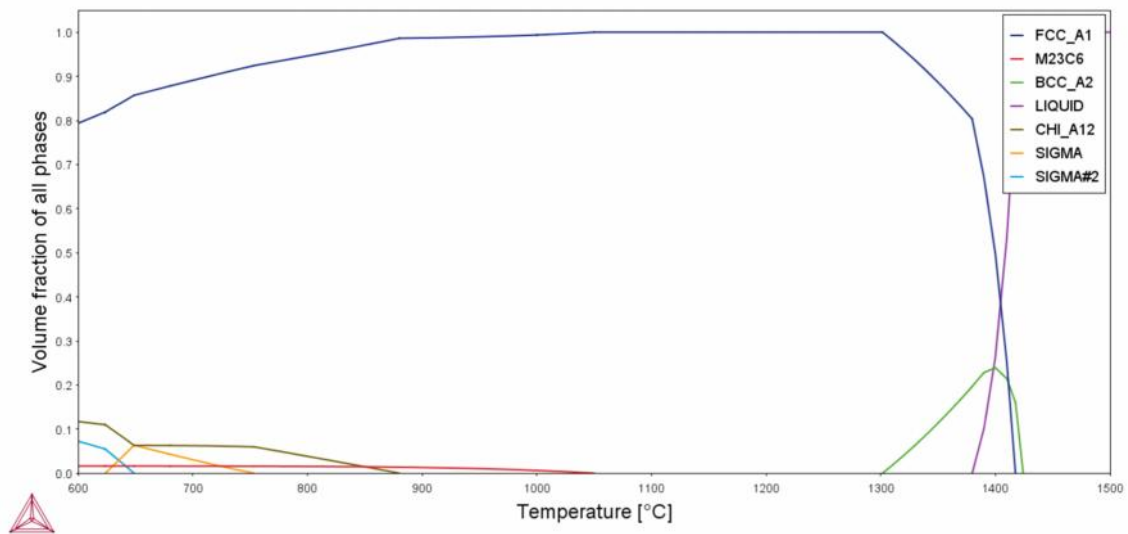
Fonte: Autor.

Figura 45- Liga 26: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de molibdênio para 2,5%, base de dados TCFE8.



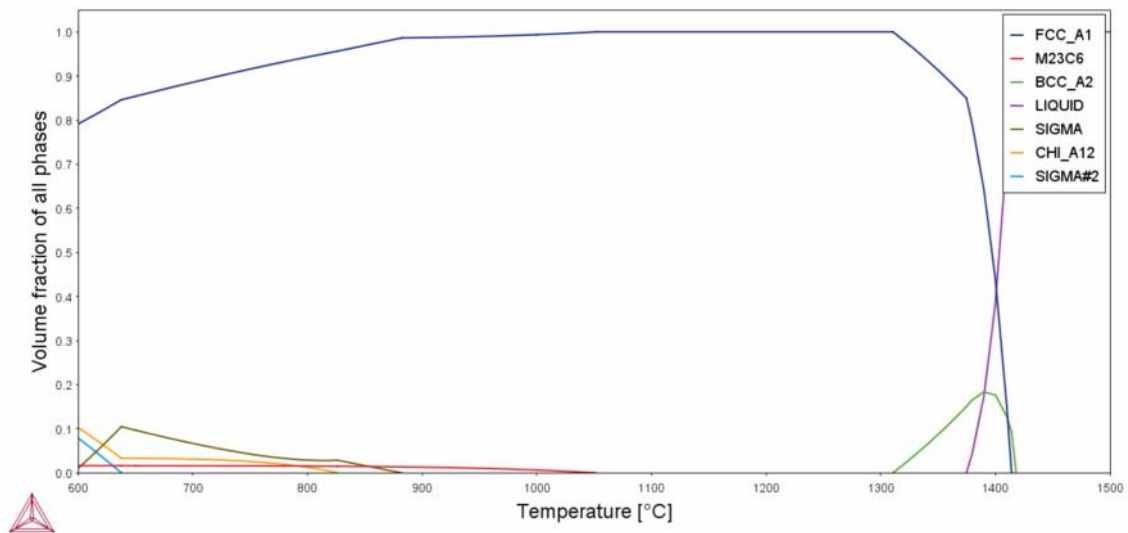
Fonte: Autor.

Figura 46- Liga 27: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de manganês para 0,001%, base de dados TCFE8.



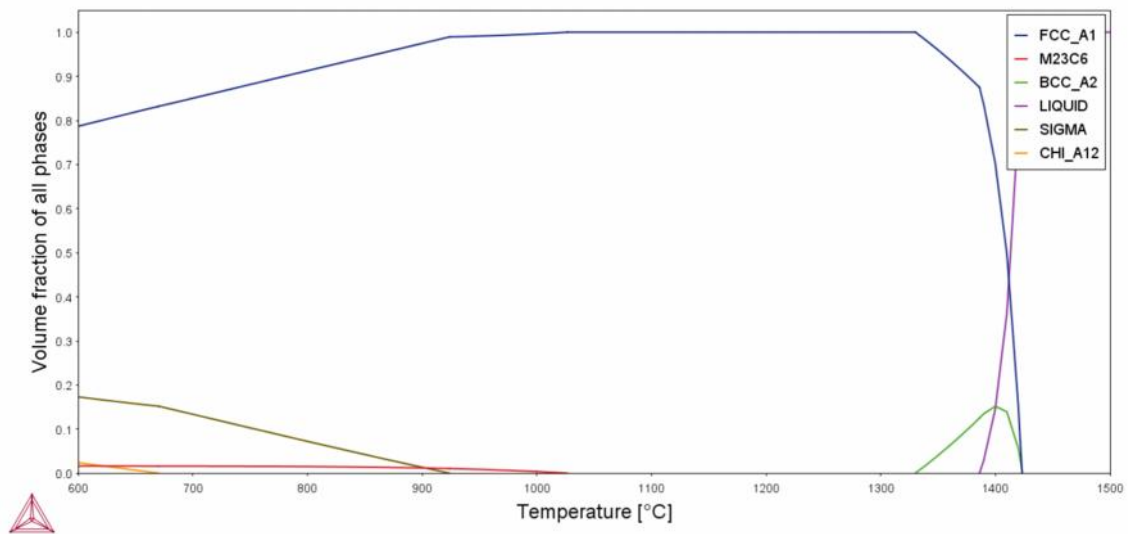
Fonte: Autor.

Figura 47- Liga 28: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de manganês para 1,0%, base de dados TCFE8.



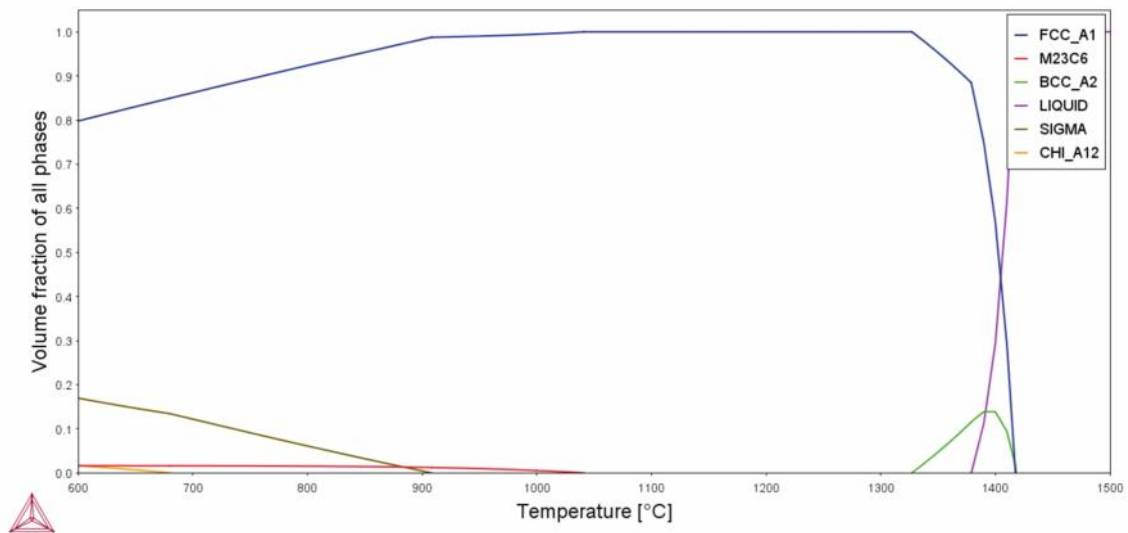
Fonte: Autor.

Figura 48- Liga 29: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de silício para 0,001%, base de dados TCFE8.



Fonte: Autor.

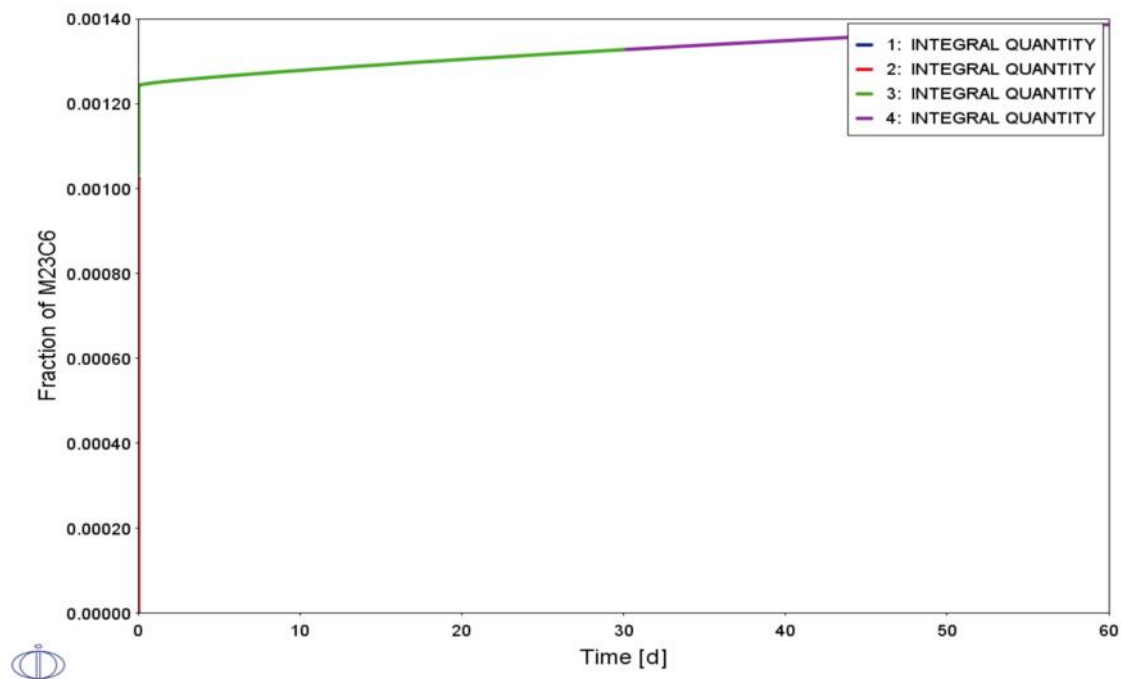
Figura 49- Liga 30: Diagrama de equilíbrio para a liga base máxima com diminuição de silício para 0,5%, base de dados TCFE8.



Fonte: Autor.

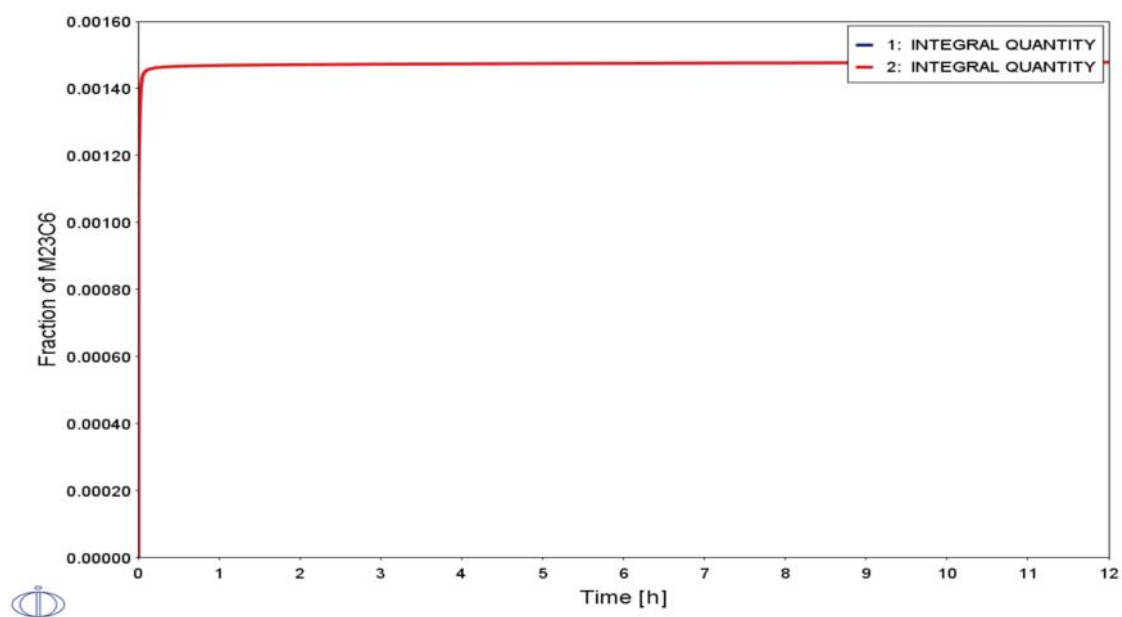
## ANEXO B - DIAGRAMAS DE FORMAÇÃO DE $M_{23}C_6$ OBTIDOS NO DICTRA®

Figura 50- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a 500°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



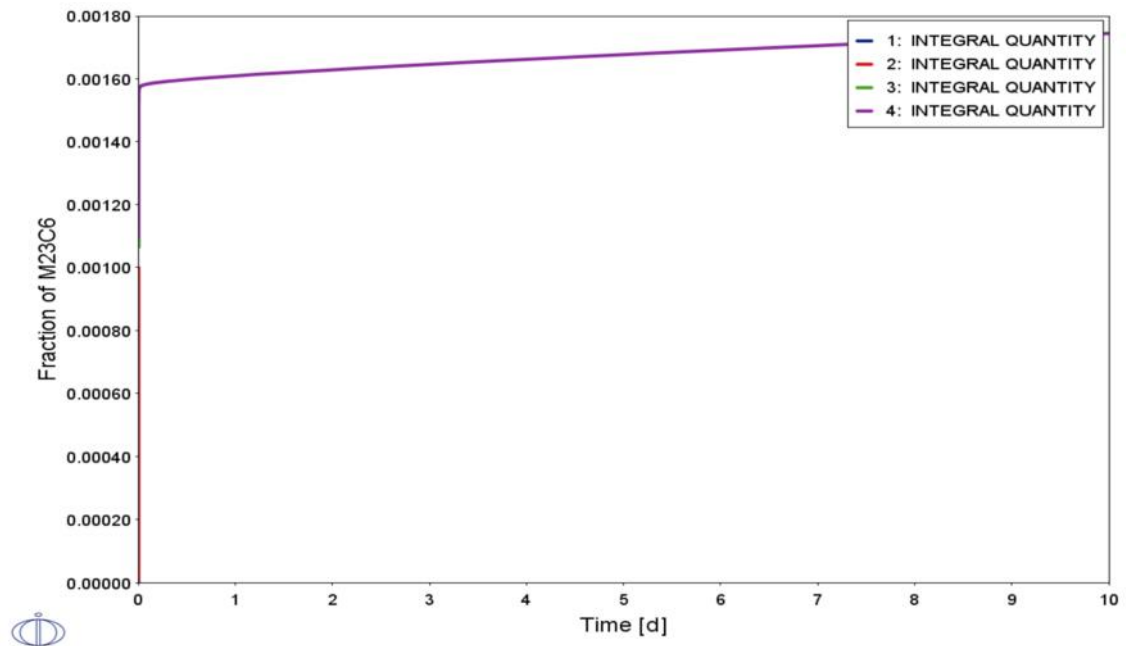
Fonte: Autor.

Figura 51- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a 525°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



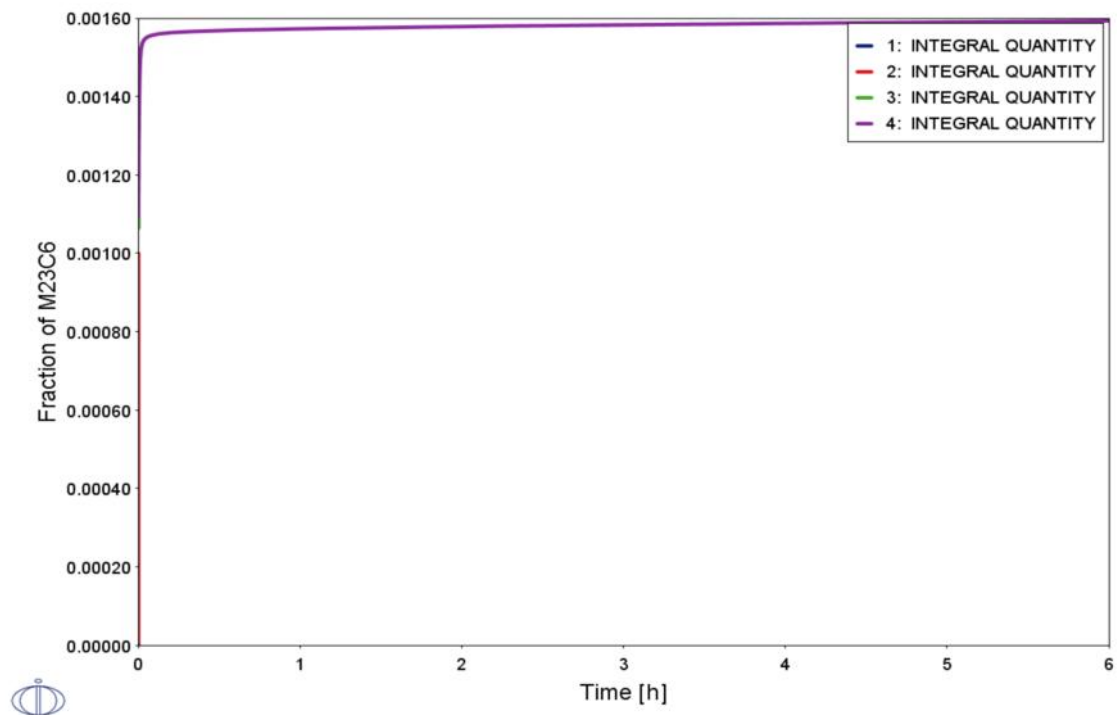
Fonte: Autor.

Figura 52- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $550^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



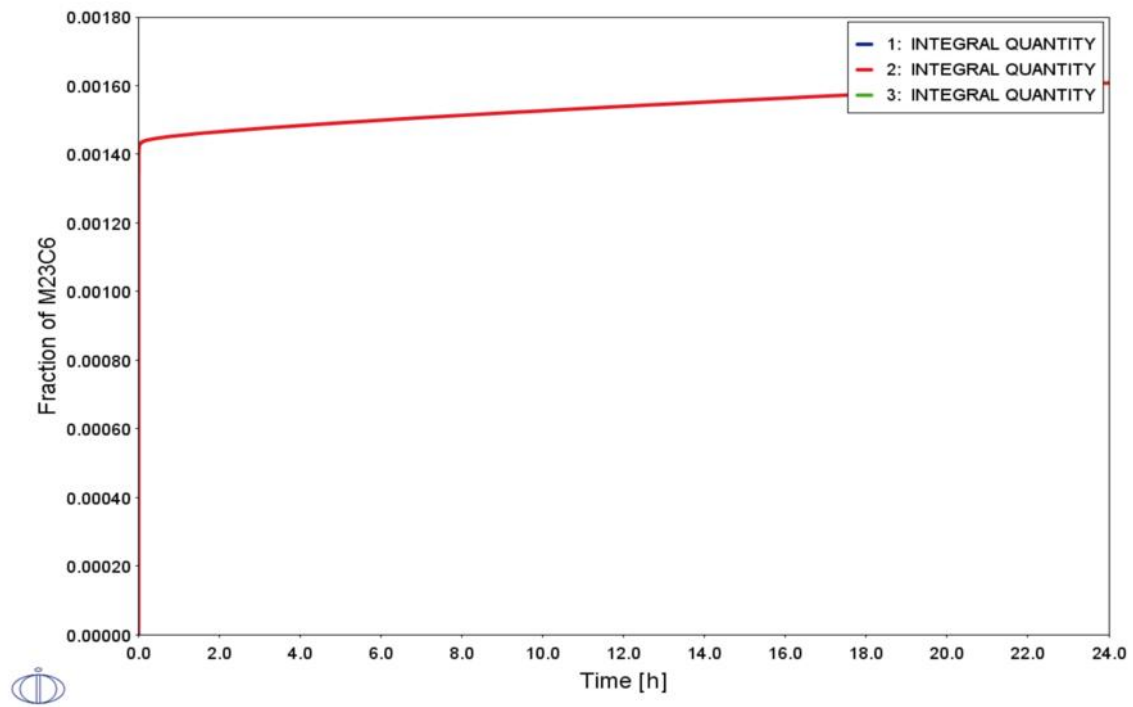
Fonte: Autor.

Figura 53- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $575^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



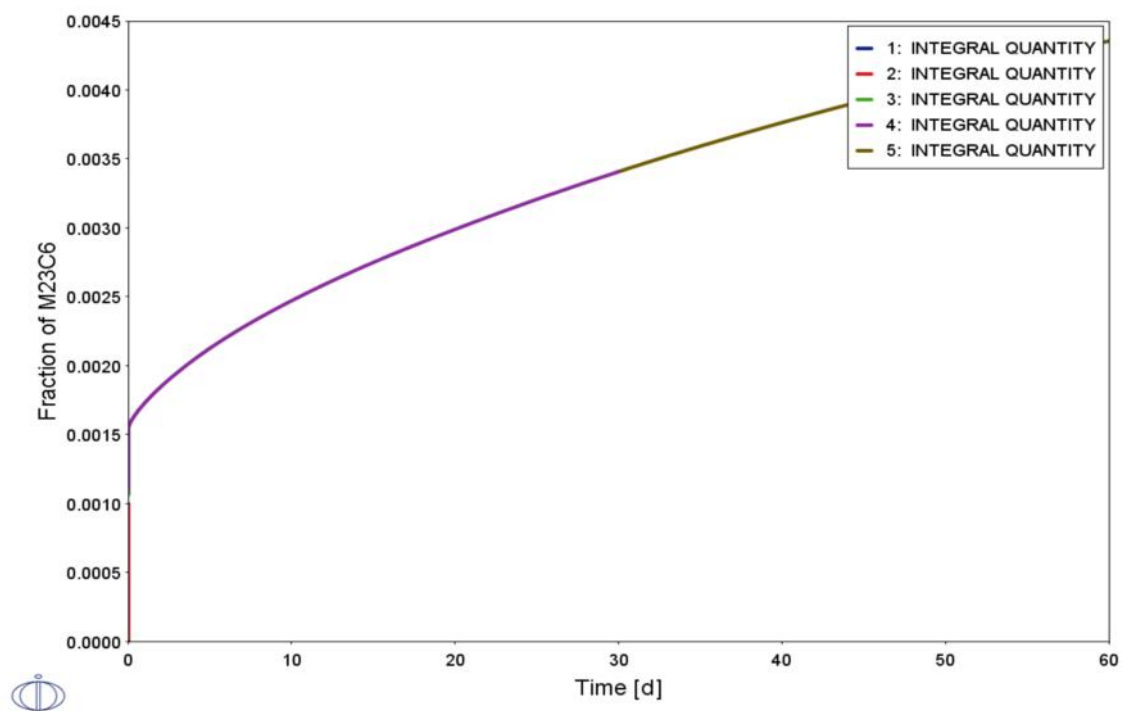
Fonte: Autor.

Figura 54- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $600^\circ\text{C}$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

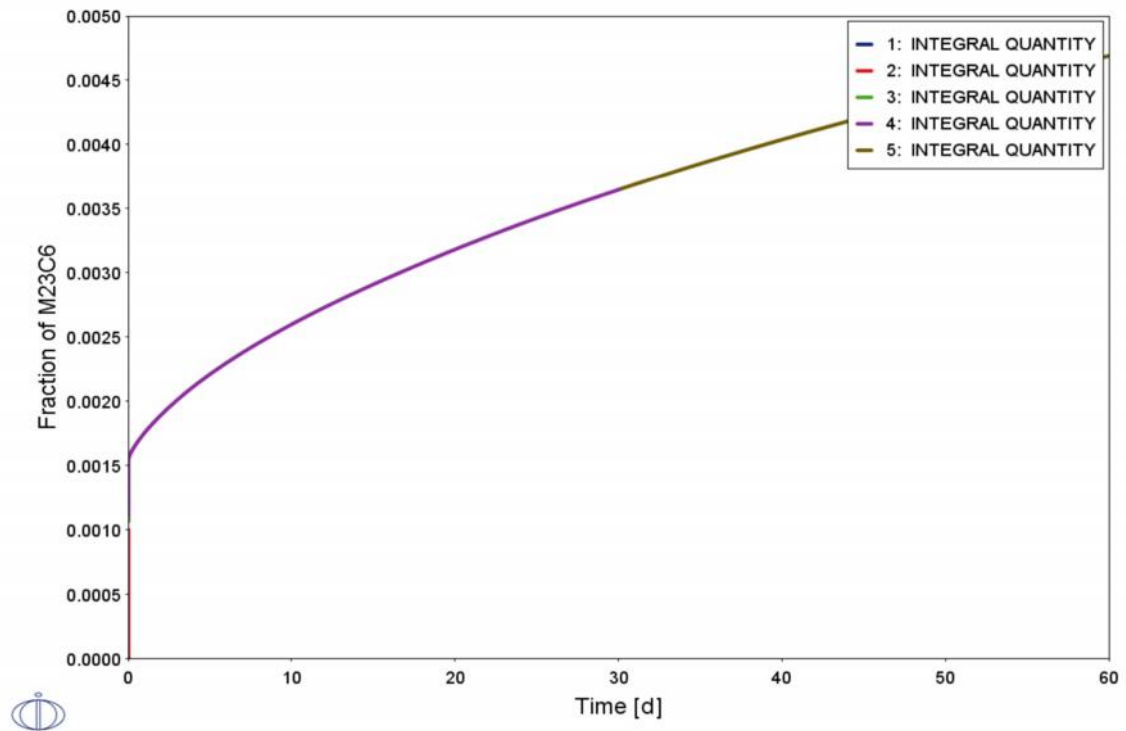
Figura 55- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $605^\circ\text{C}$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

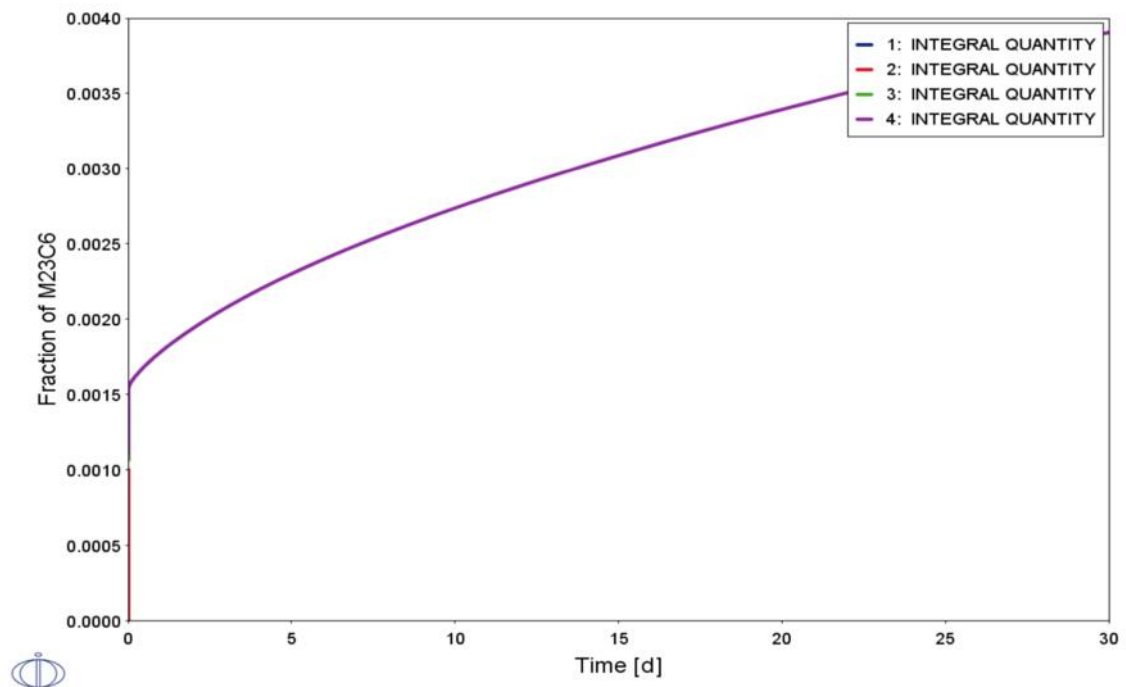


Figura 56- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $610^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



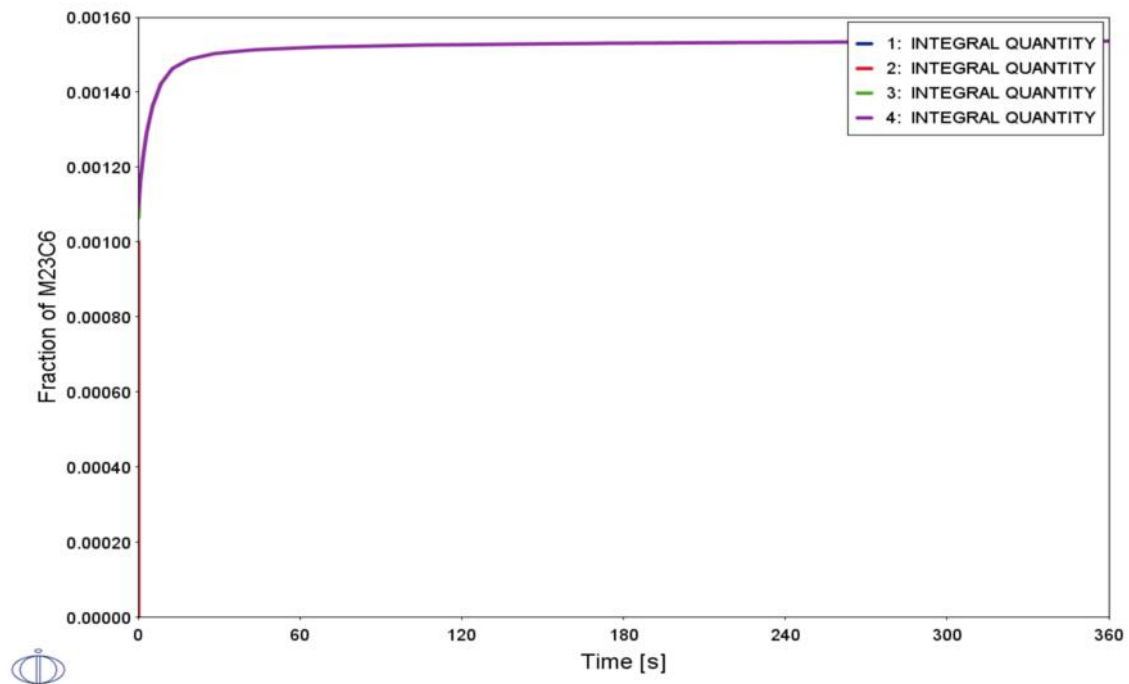
Fonte: Autor.

Figura 57- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $615^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



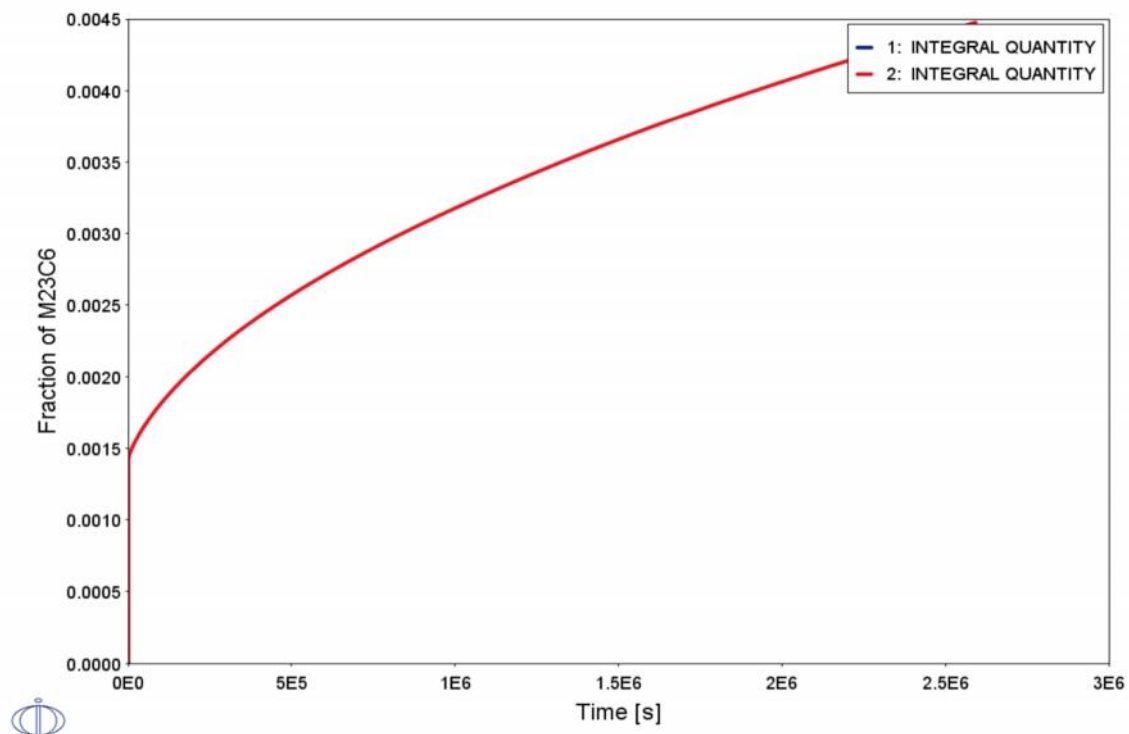
Fonte: Autor.

Figura 58- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $620^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



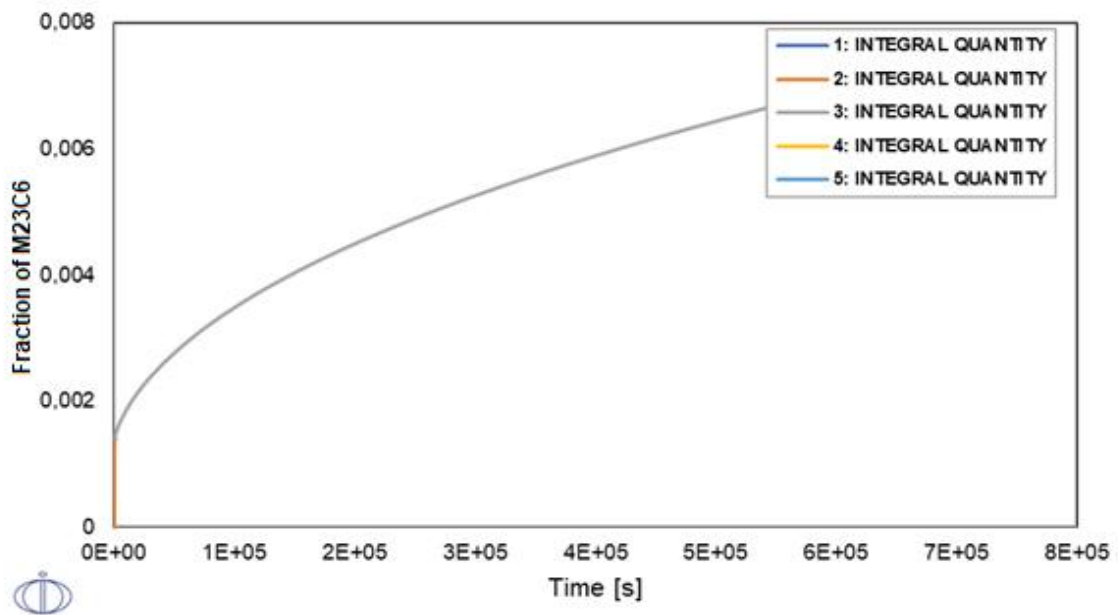
Fonte: Autor.

Figura 59- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $625^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



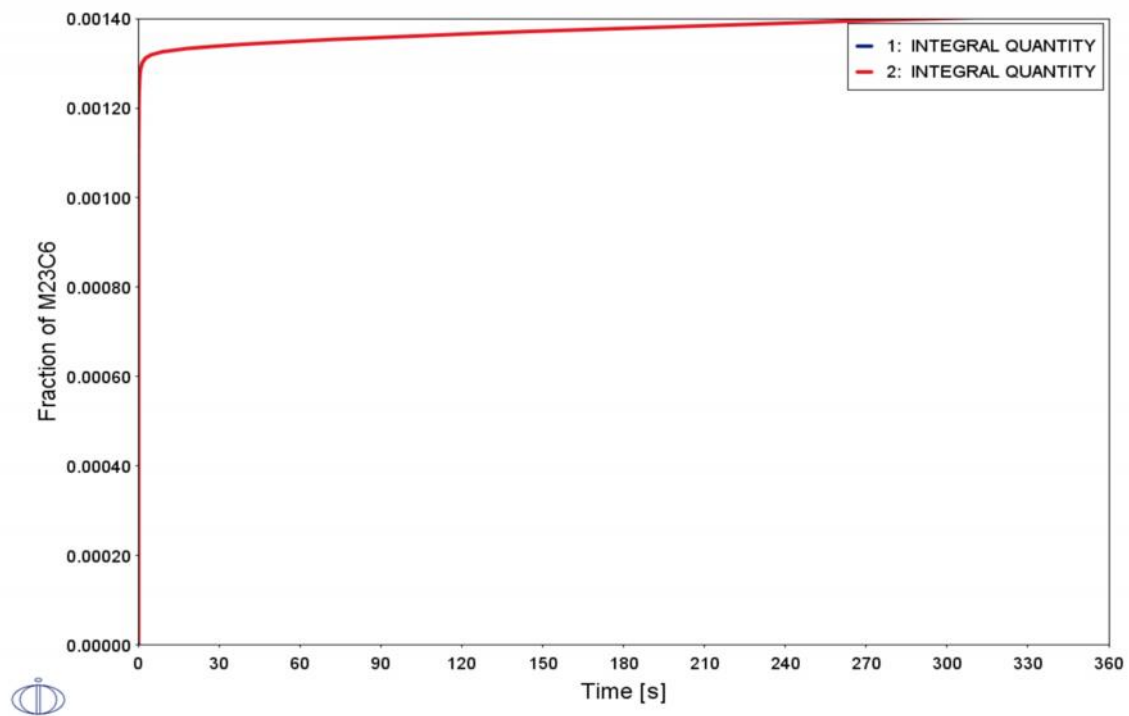
Fonte: Autor.

Figura 60- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $700^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



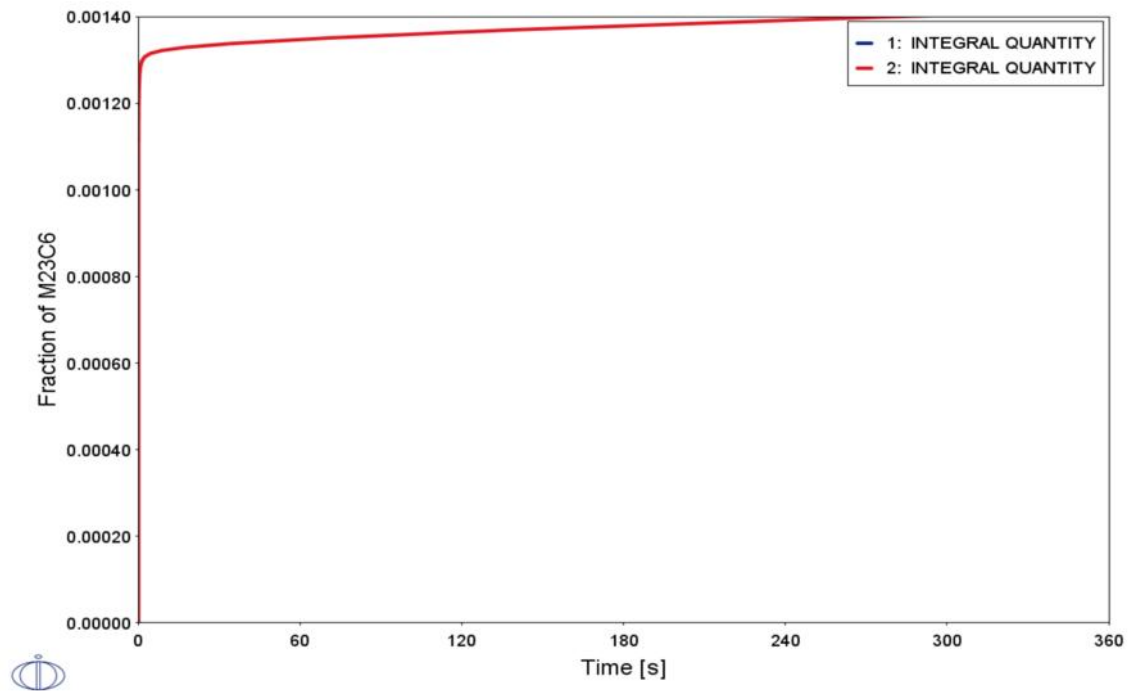
Fonte: Autor.

Figura 61- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $725^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



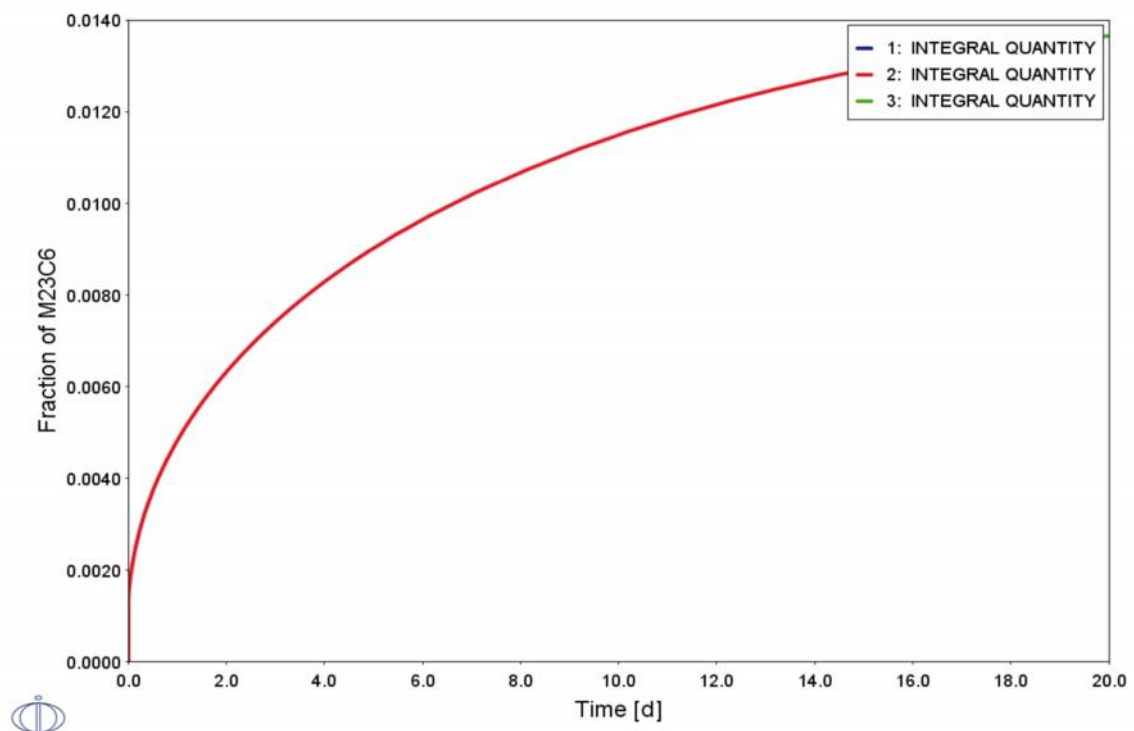
Fonte: Autor.

Figura 62- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $730^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



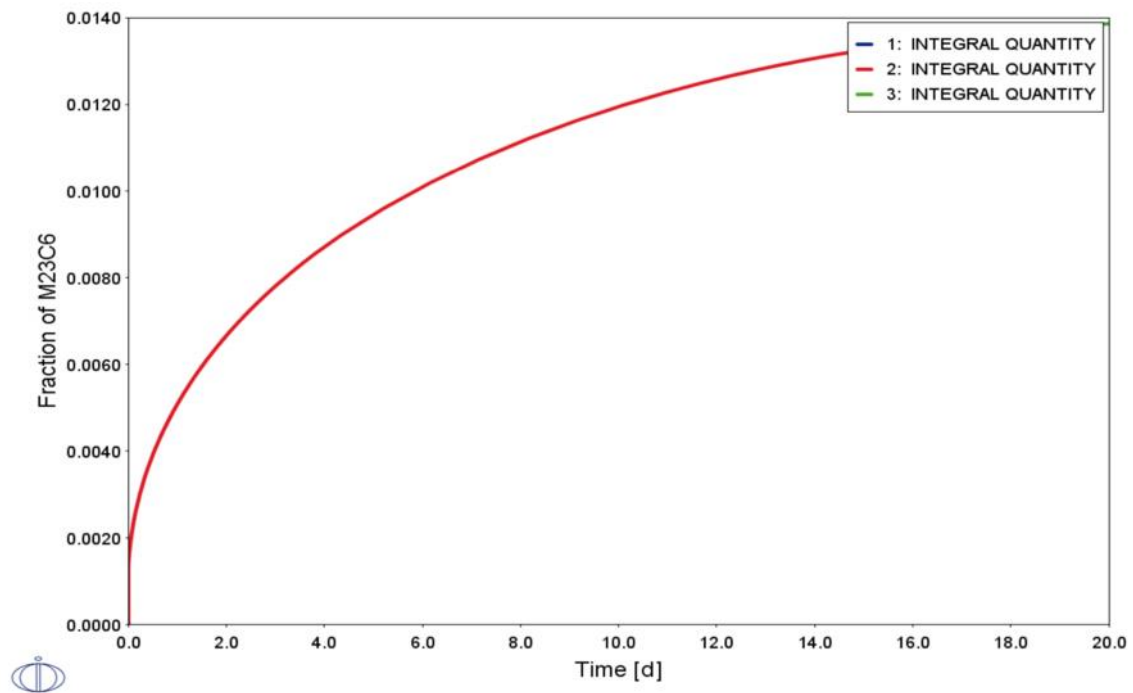
Fonte: Autor.

Figura 63- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $735^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



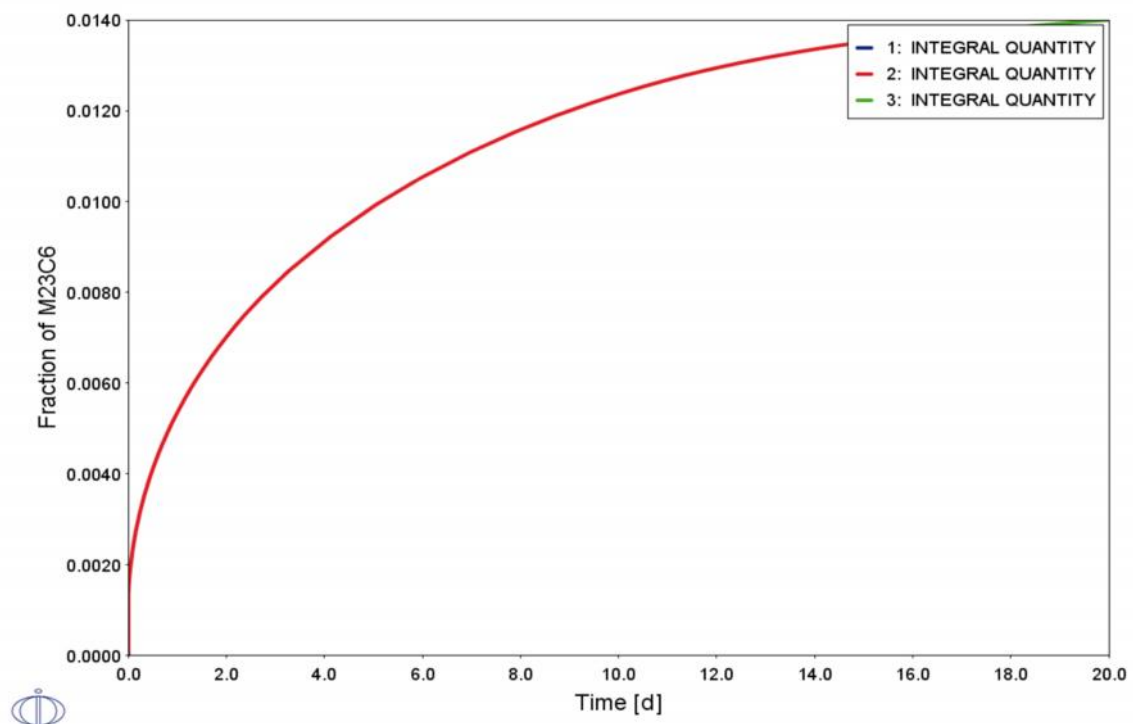
Fonte: Autor.

Figura 64- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $740^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



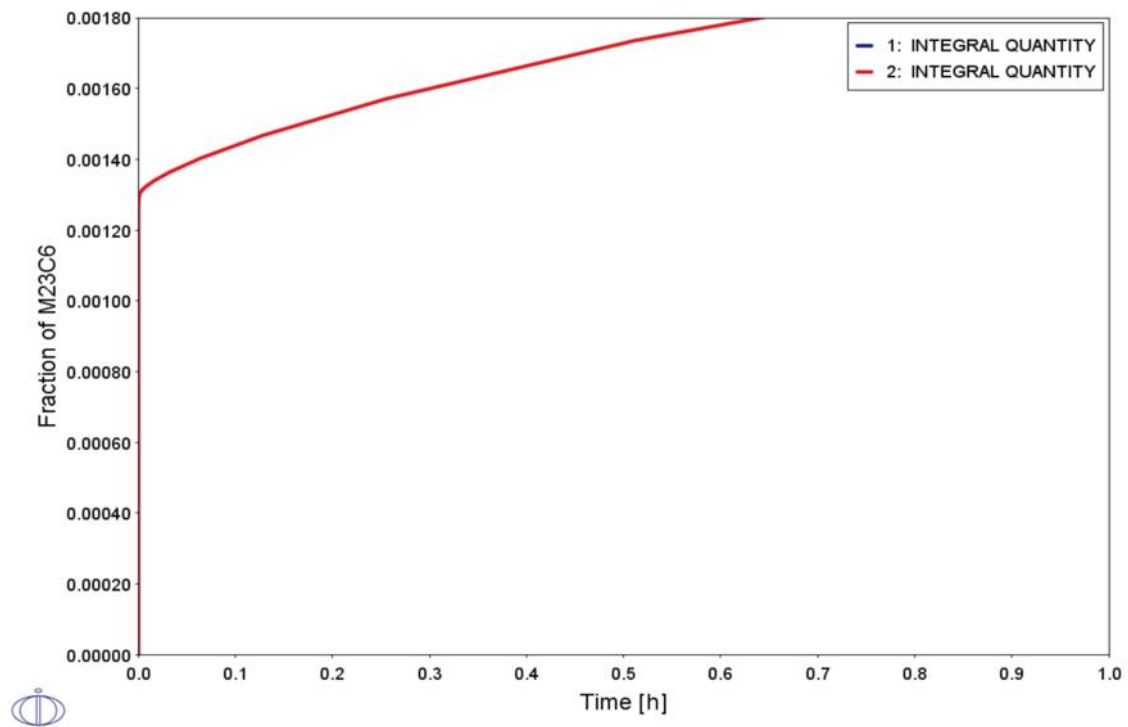
Fonte: Autor.

Figura 65- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $745^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



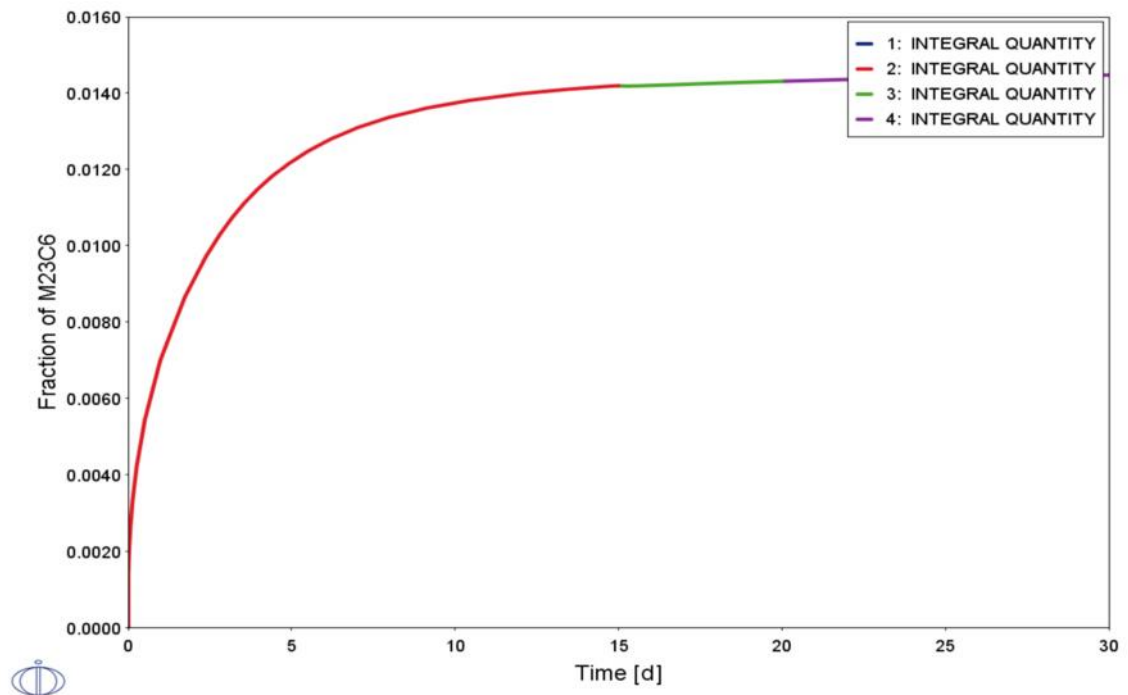
Fonte: Autor.

Figura 66- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $750^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



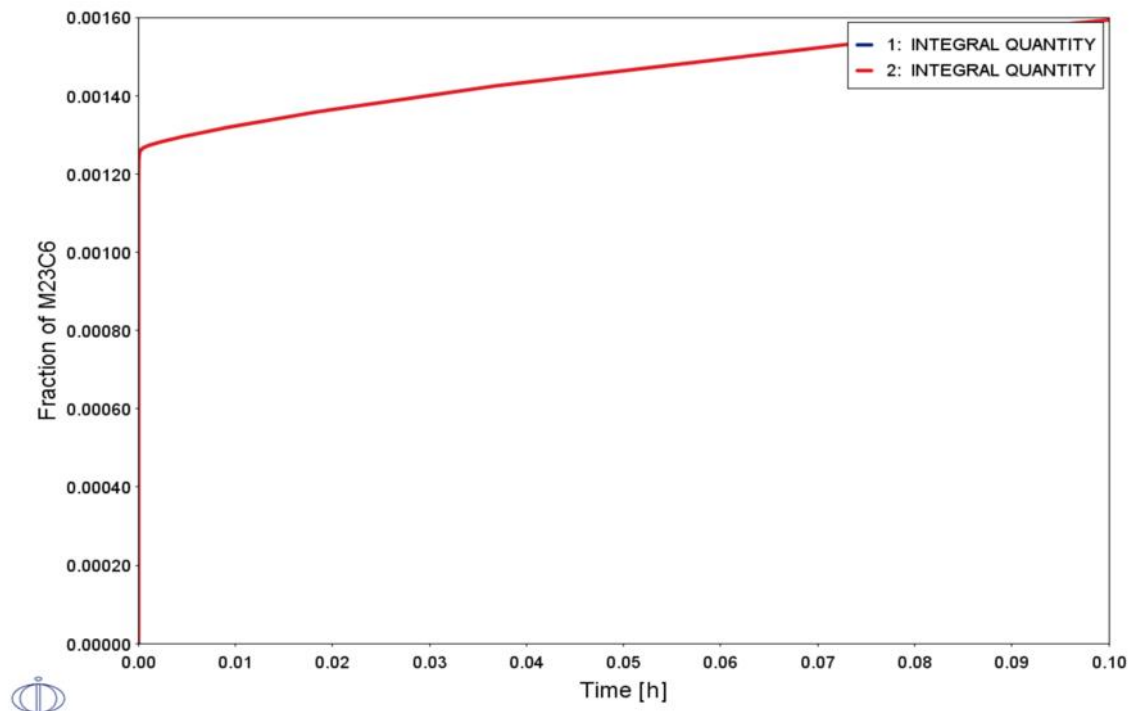
Fonte: Autor.

Figura 67- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $775^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



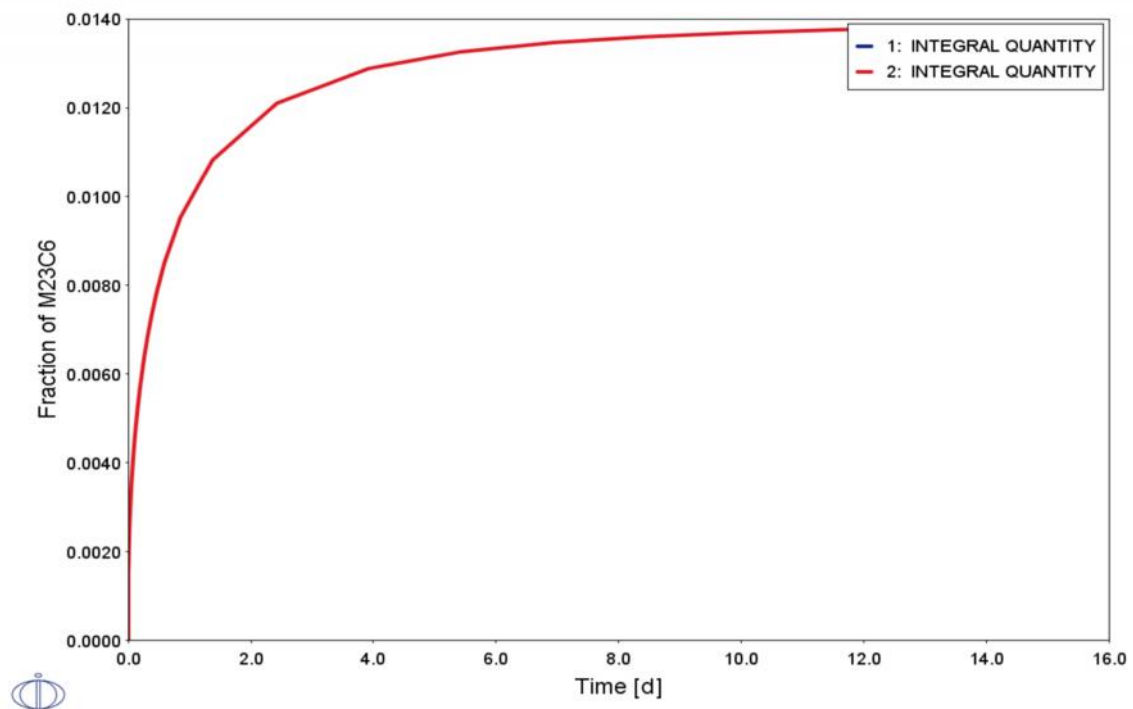
Fonte: Autor.

Figura 68- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $800^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



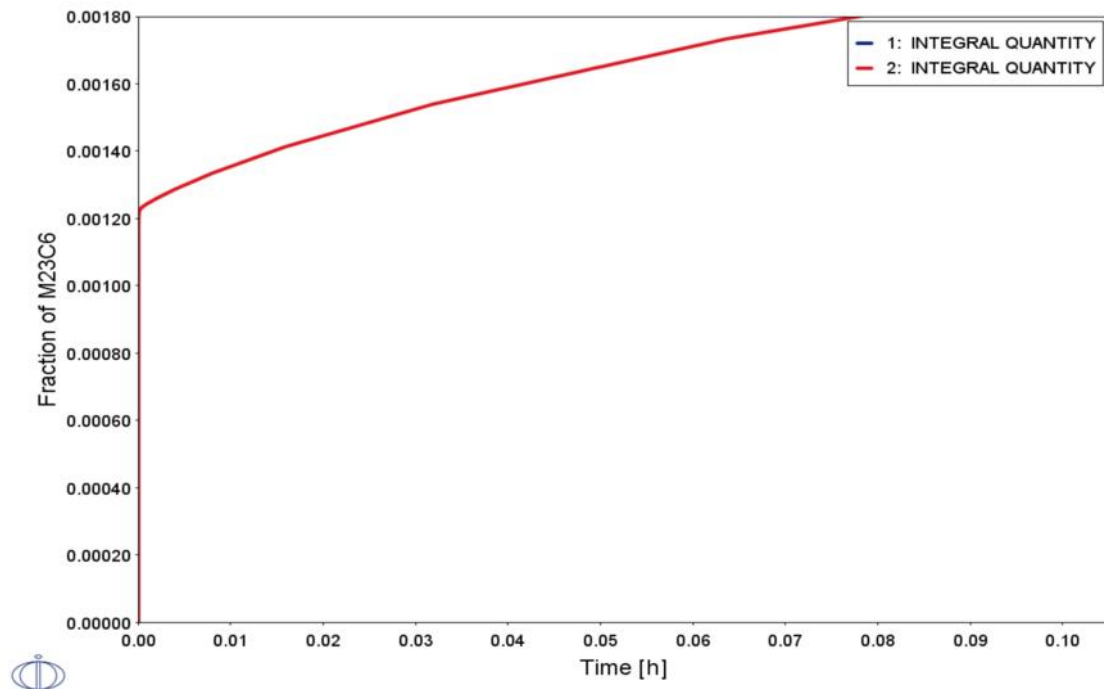
Fonte: Autor.

Figura 69- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $825^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



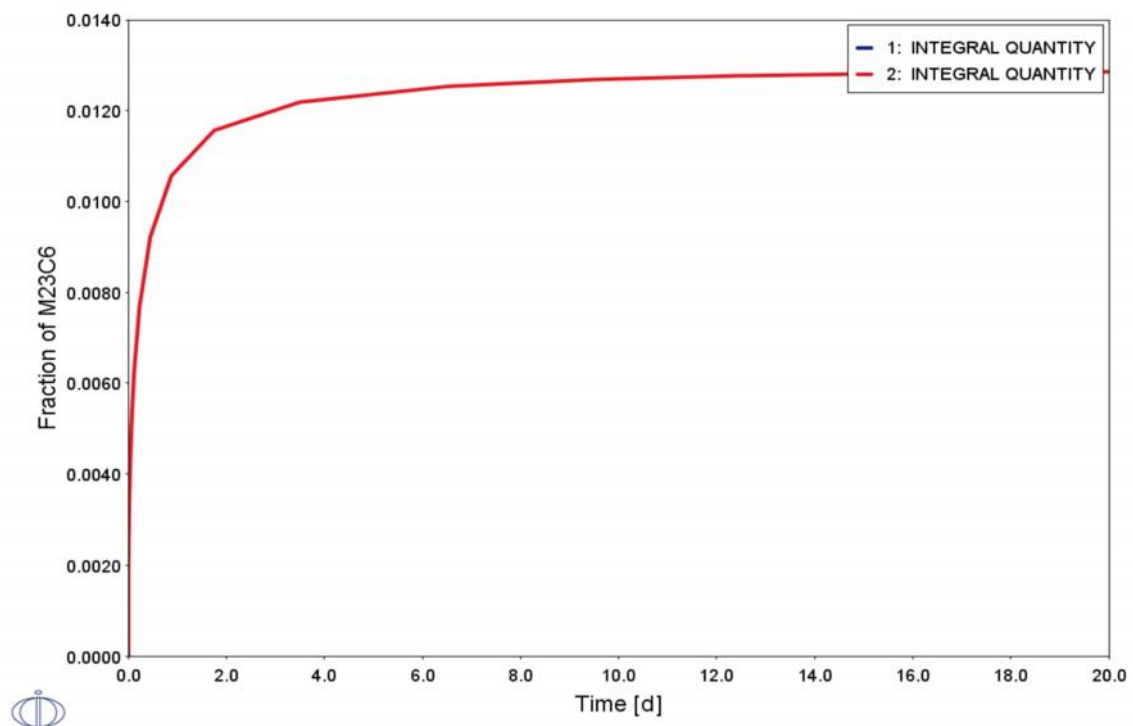
Fonte: Autor.

Figura 70- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $850^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

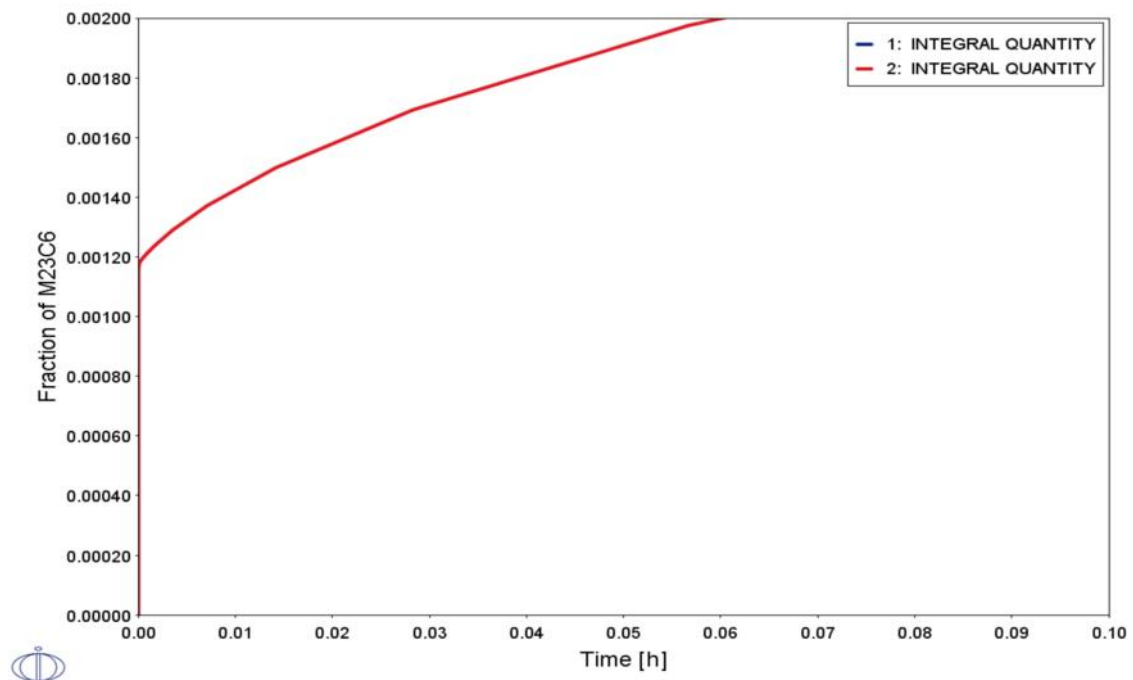
Figura 71- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $875^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

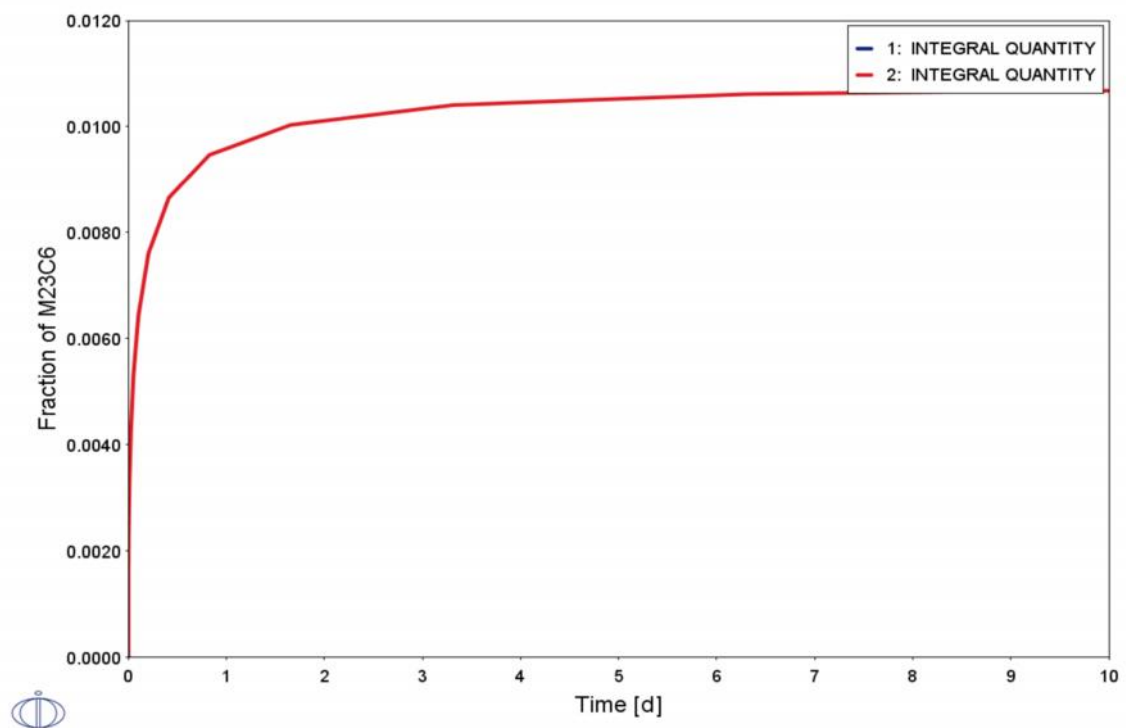


Figura 72- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $900^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



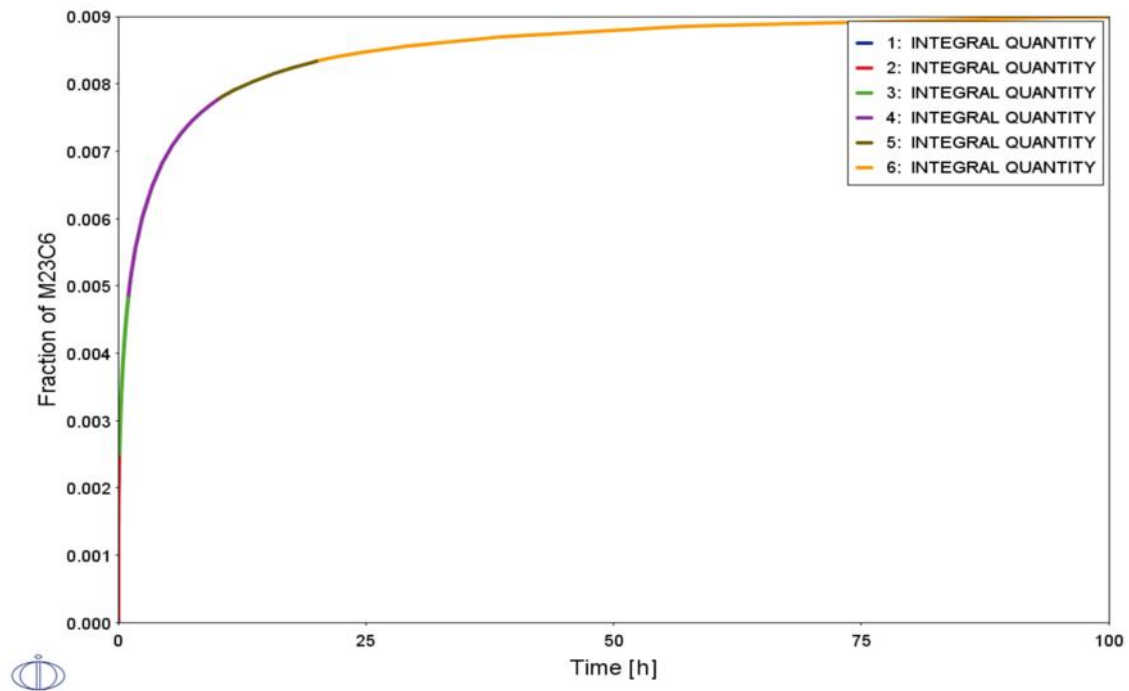
Fonte: Autor.

Figura 73- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $925^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



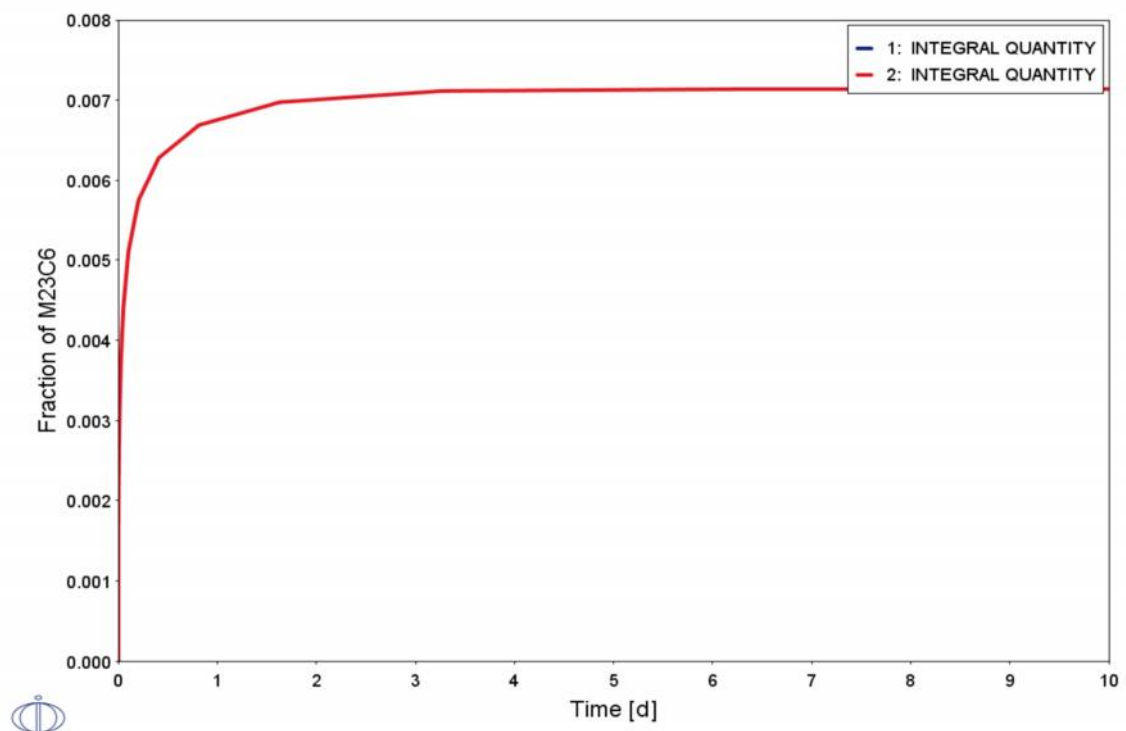
Fonte: Autor.

Figura 74- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $950^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



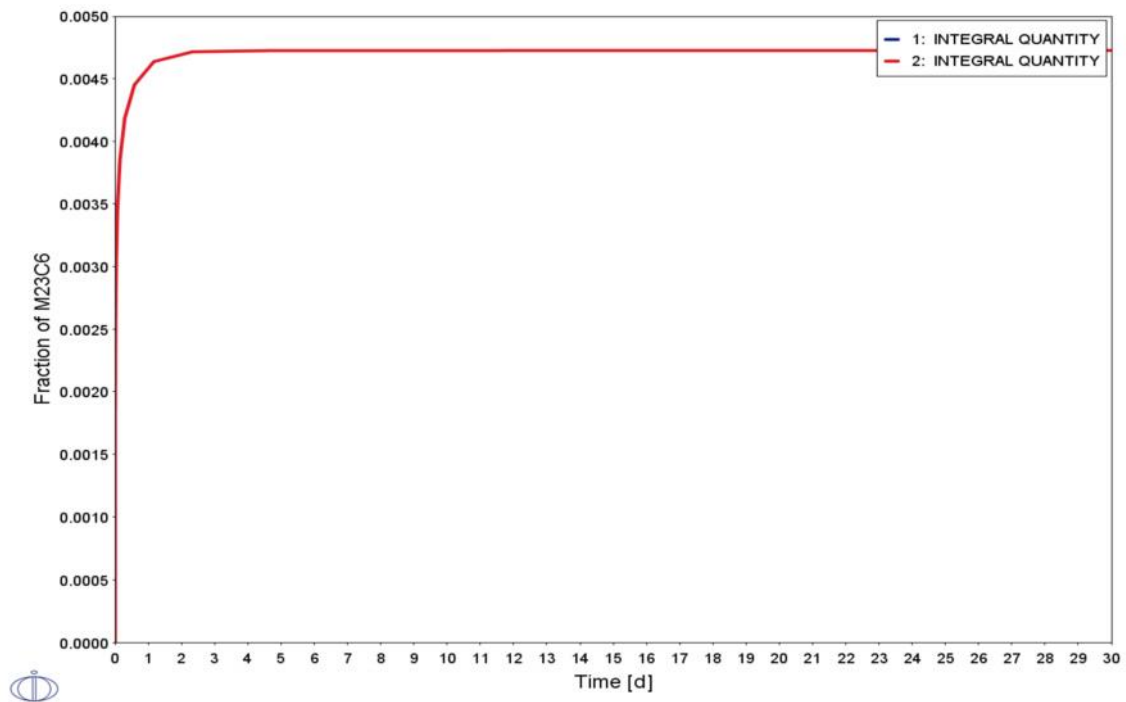
Fonte: Autor.

Figura 75- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $975^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



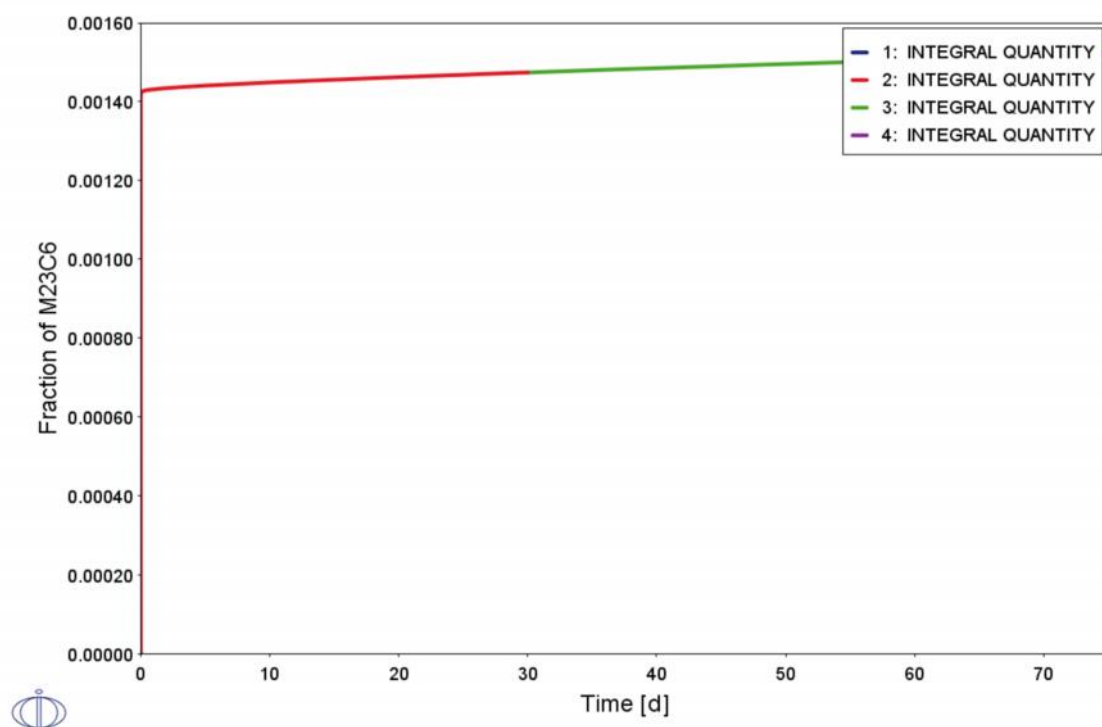
Fonte: Autor.

Figura 76- Liga 08: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $1000^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



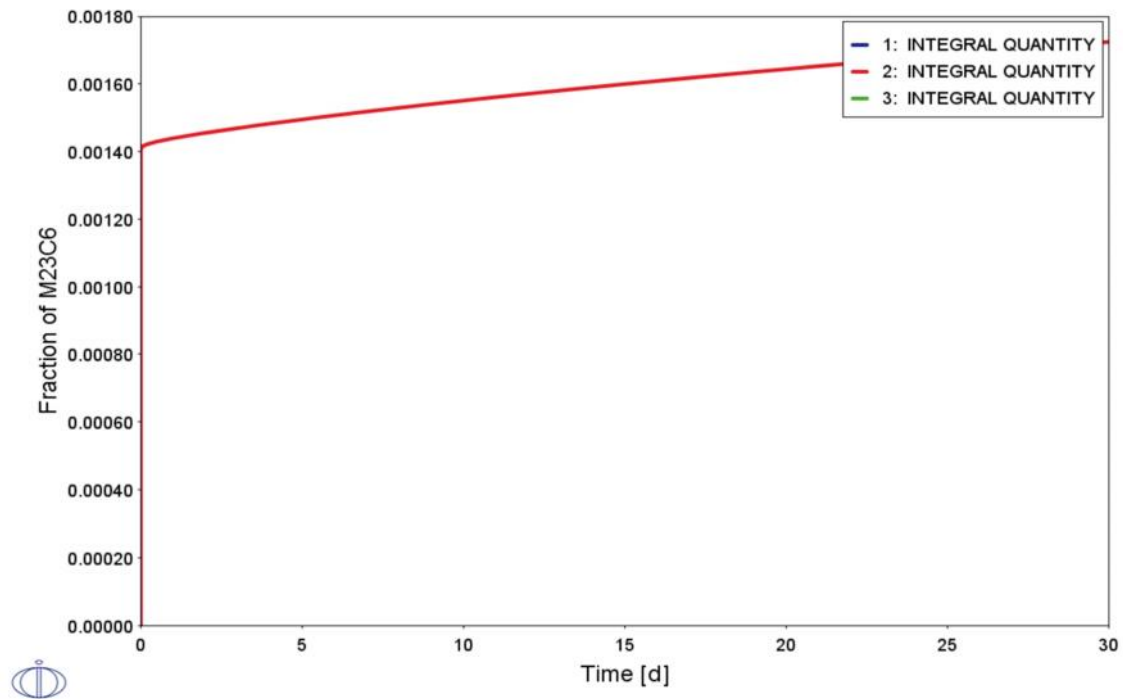
Fonte: Autor.

Figura 77- Liga 01: Diagrama de formação de  $M_{23}C_6$  em função do tempo a  $500^{\circ}C$  utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



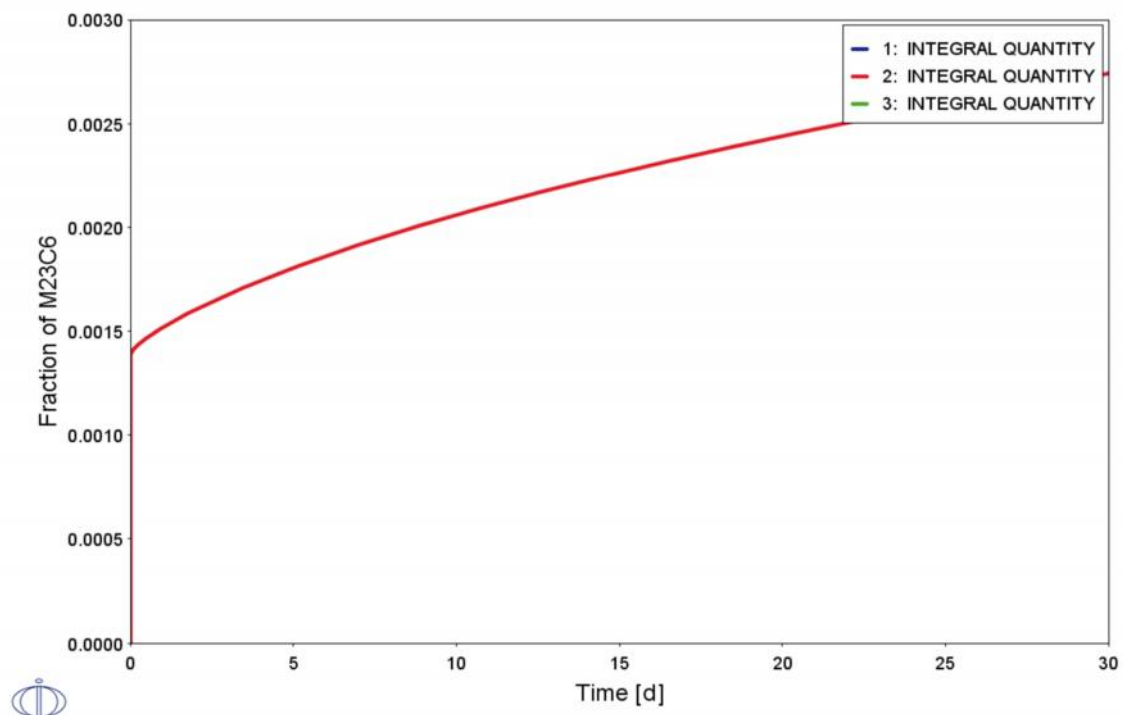
Fonte: Autor.

Figura 78- Liga 01: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 550°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



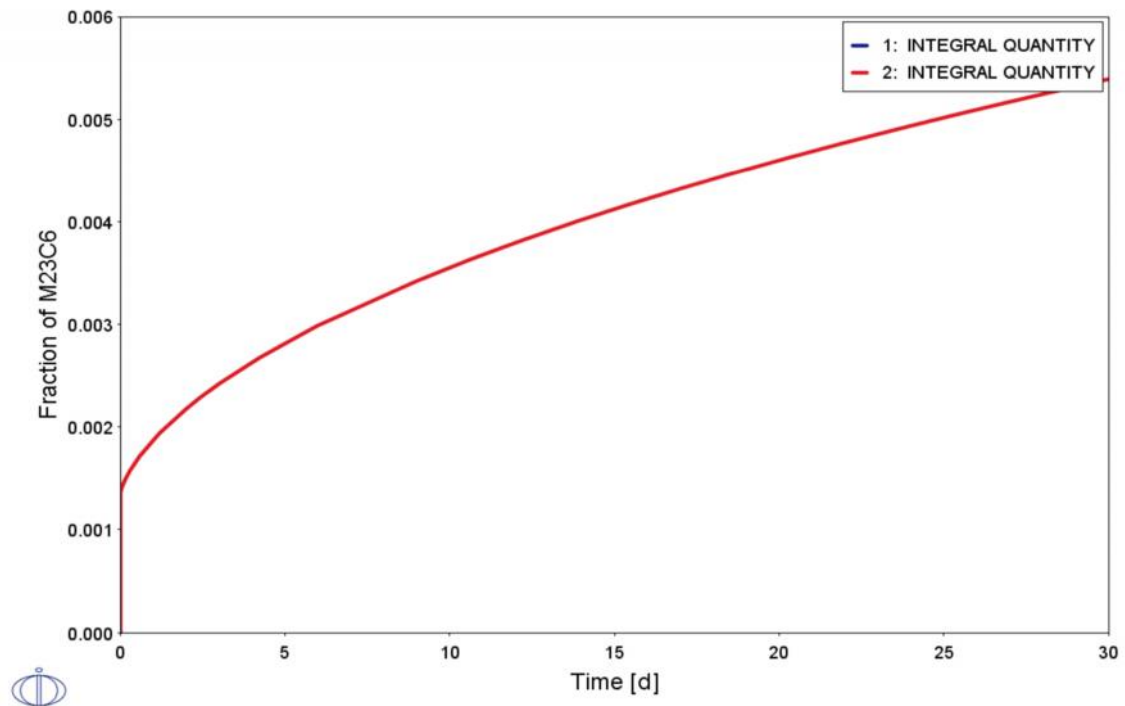
Fonte: Autor.

Figura 79- Liga 01: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 600°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



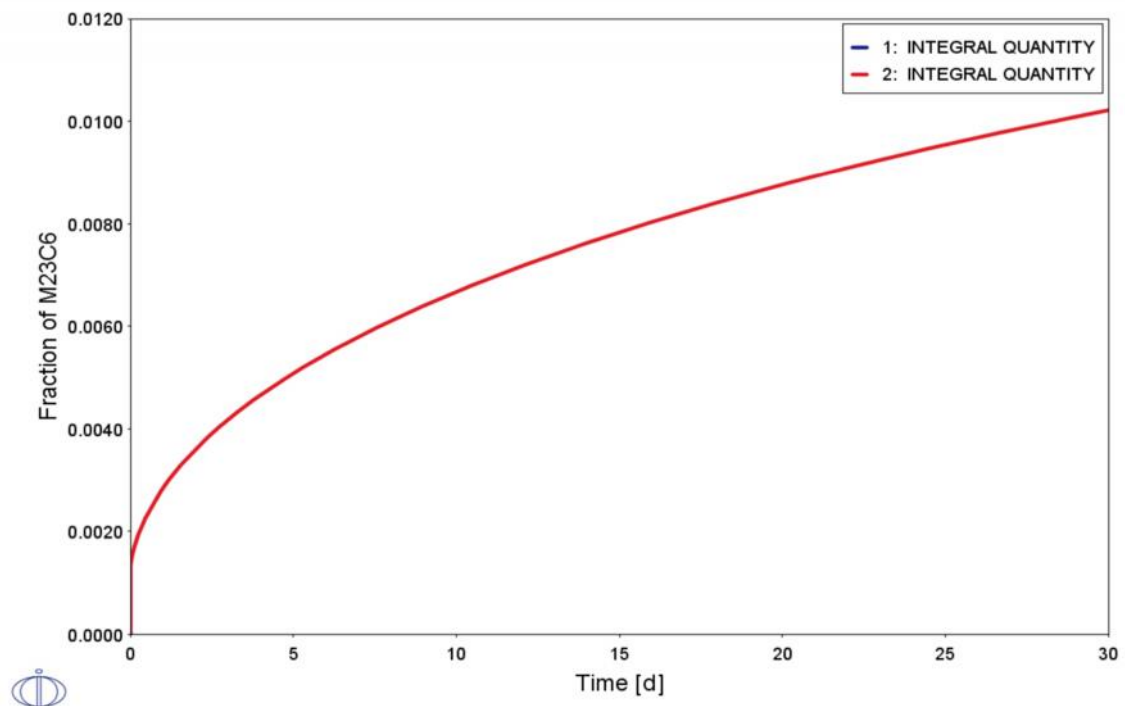
Fonte: Autor.

Figura 80- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 650°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



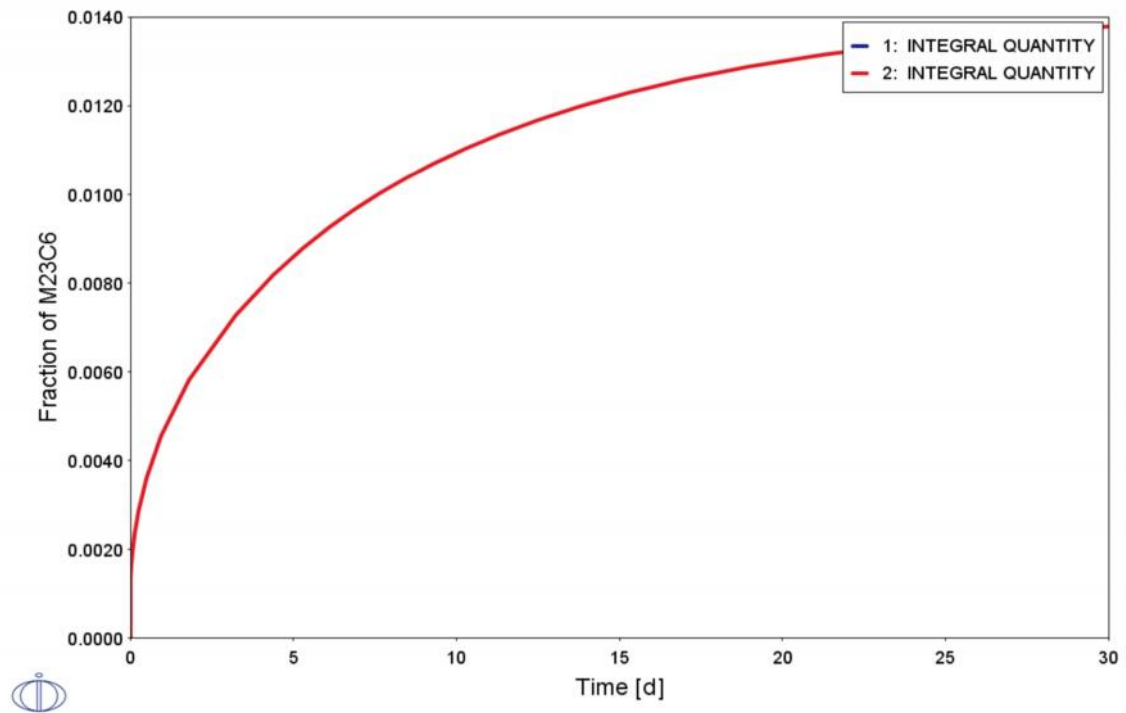
Fonte: Autor.

Figura 81- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 700°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



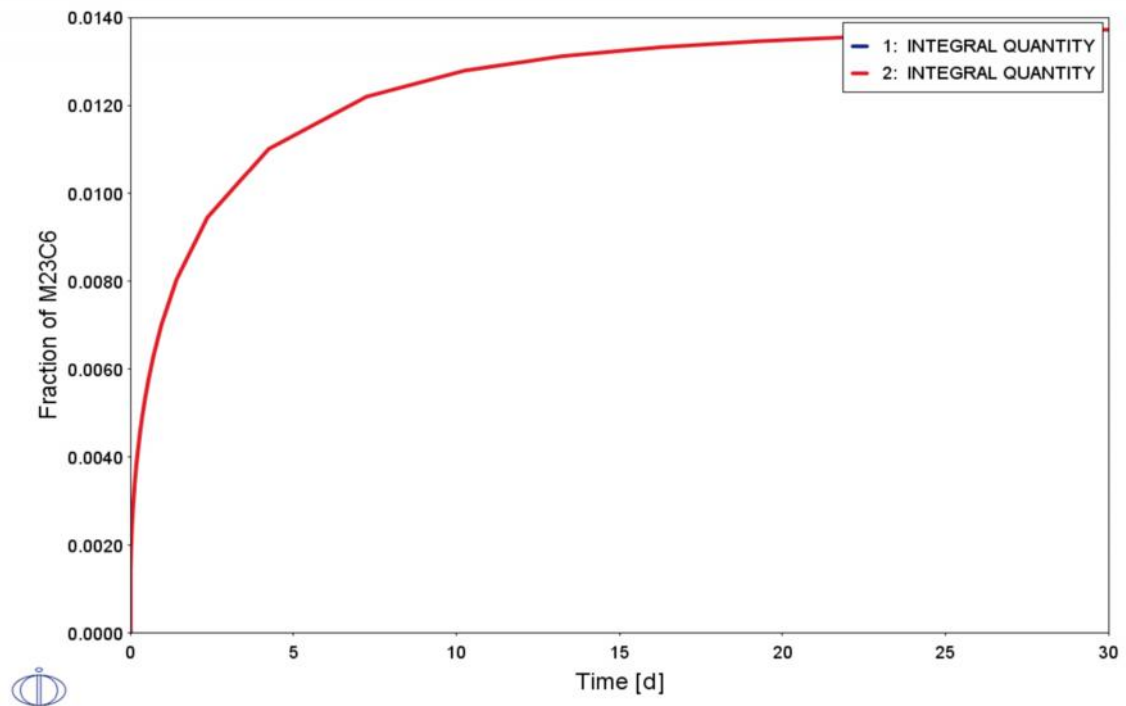
Fonte: Autor.

Figura 82- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 750°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



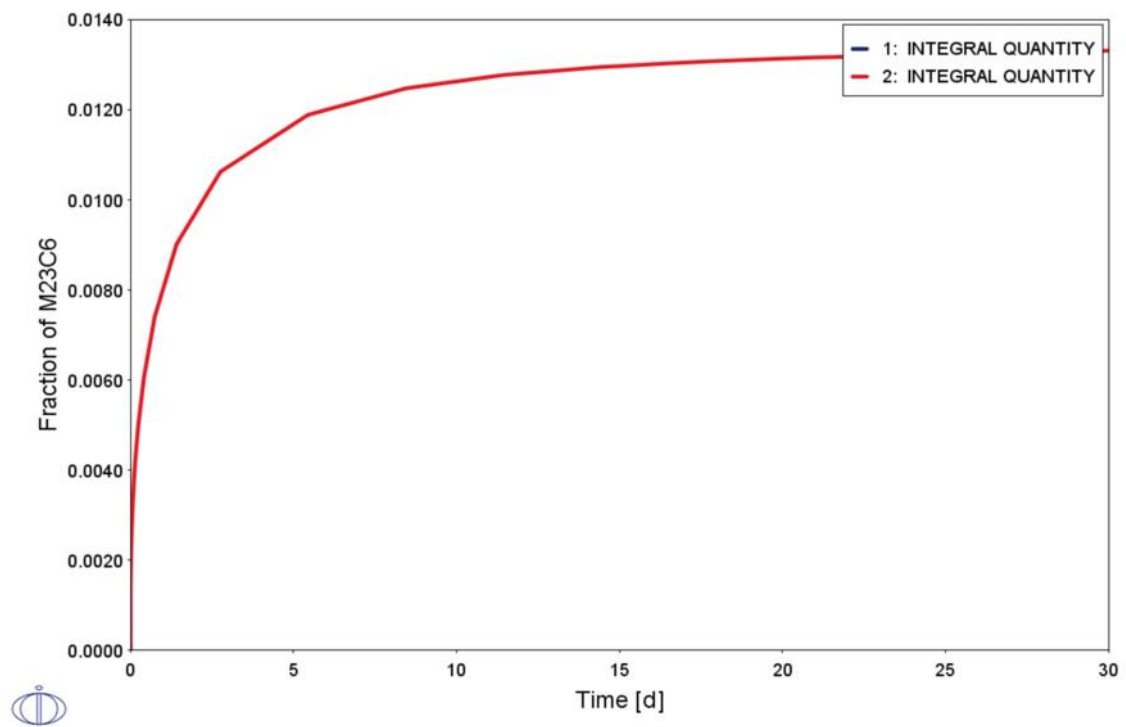
Fonte: Autor.

Figura 83- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 800°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



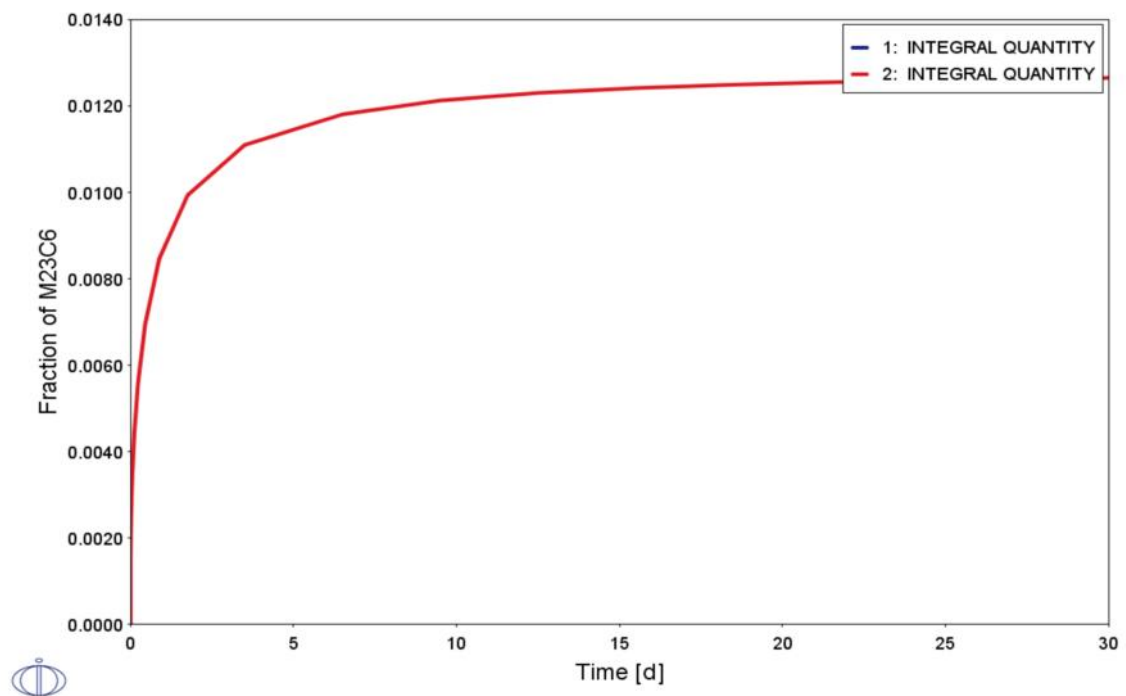
Fonte: Autor.

Figura 84- Liga 01: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 825°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



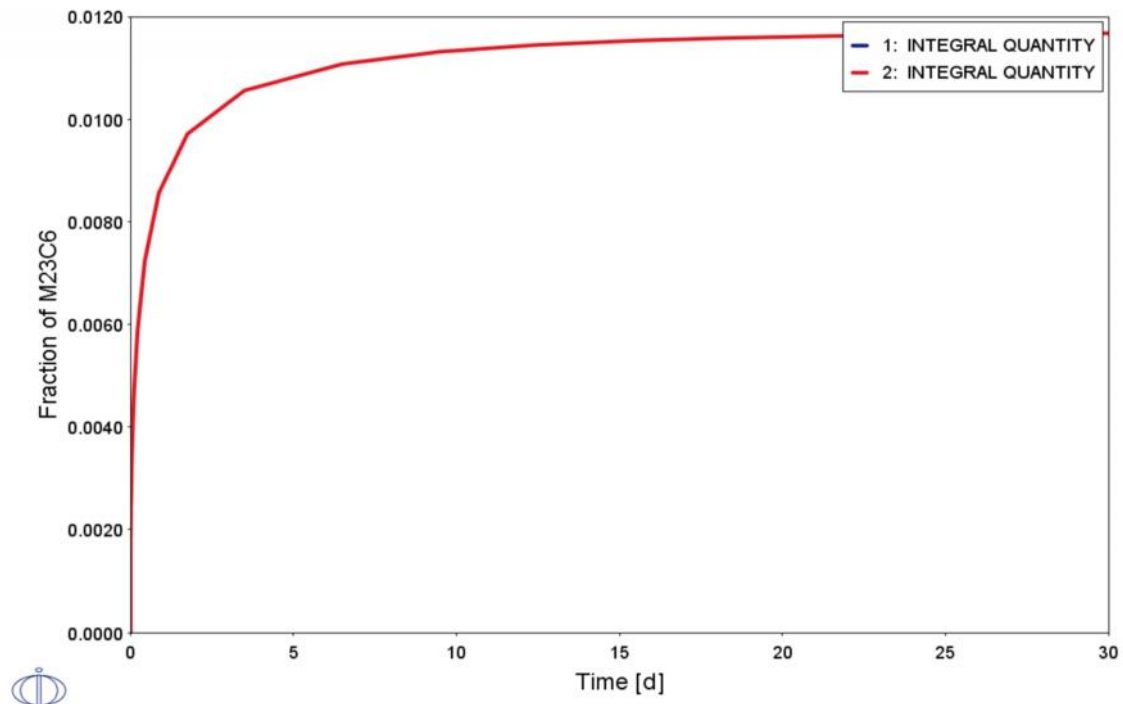
Fonte: Autor.

Figura 85- Liga 01: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 850°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



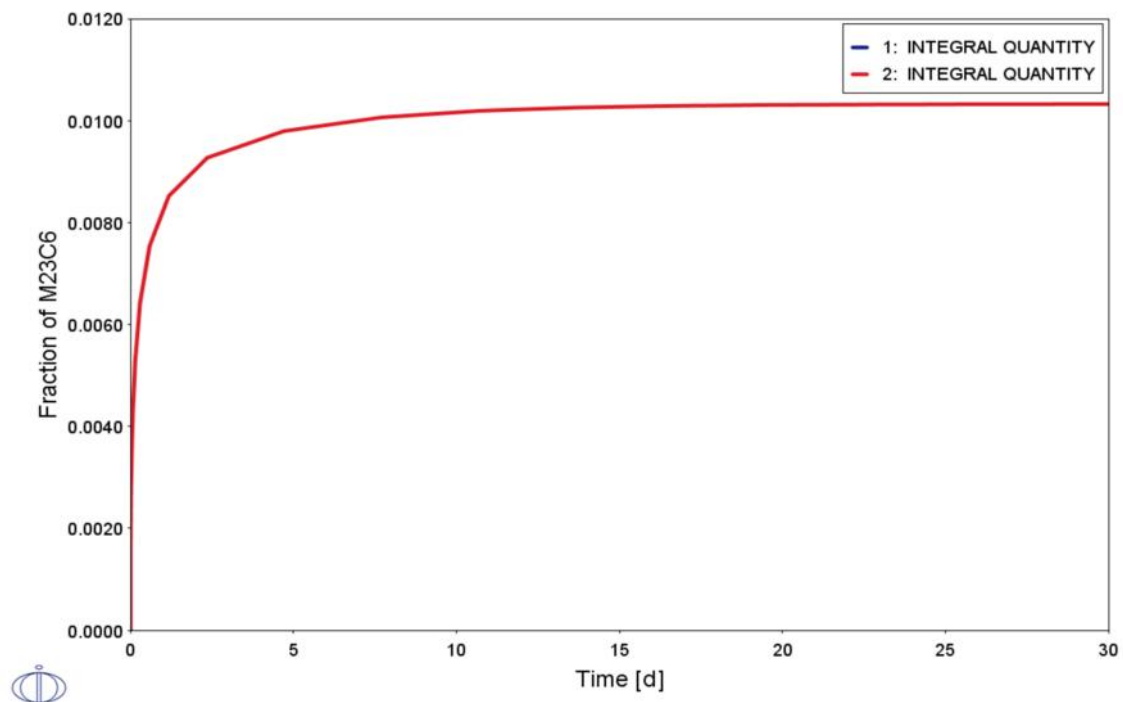
Fonte: Autor.

Figura 86- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 875°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

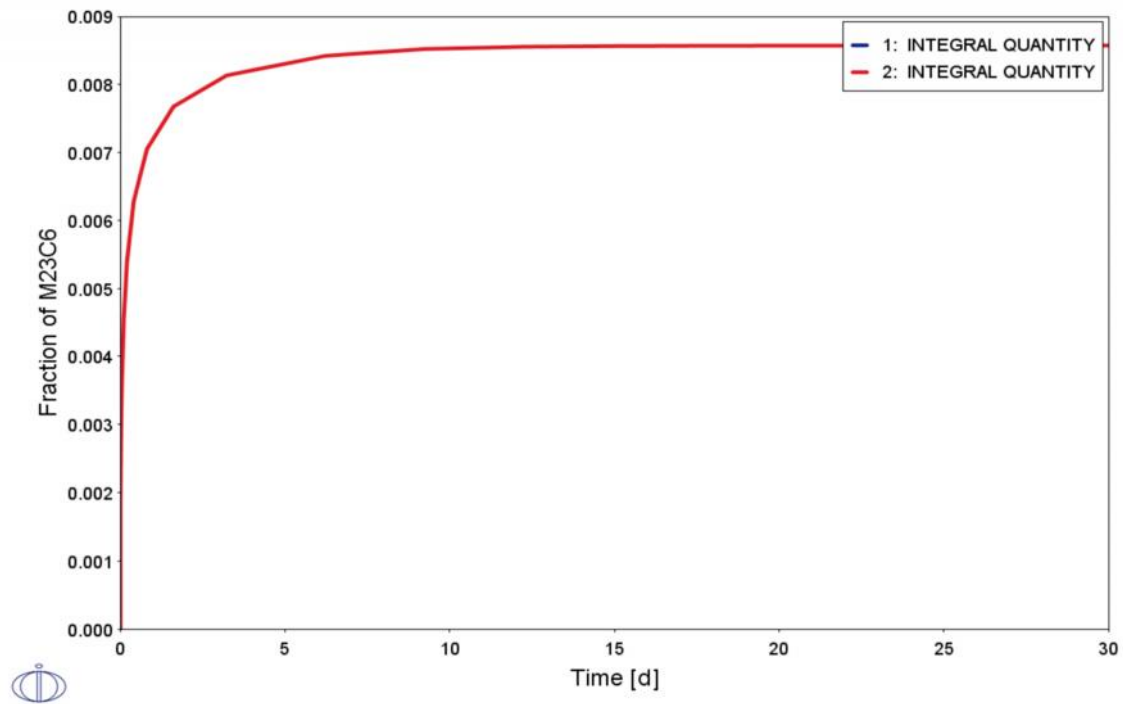
Figura 87- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 900°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

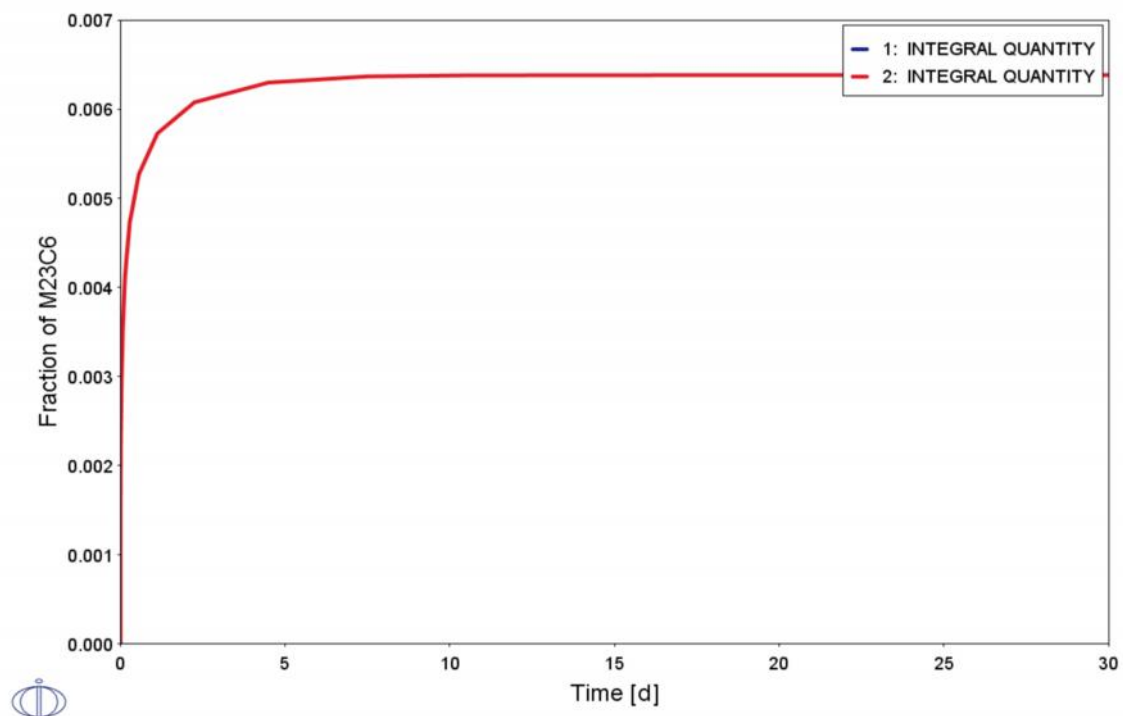


Figura 88- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 925°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



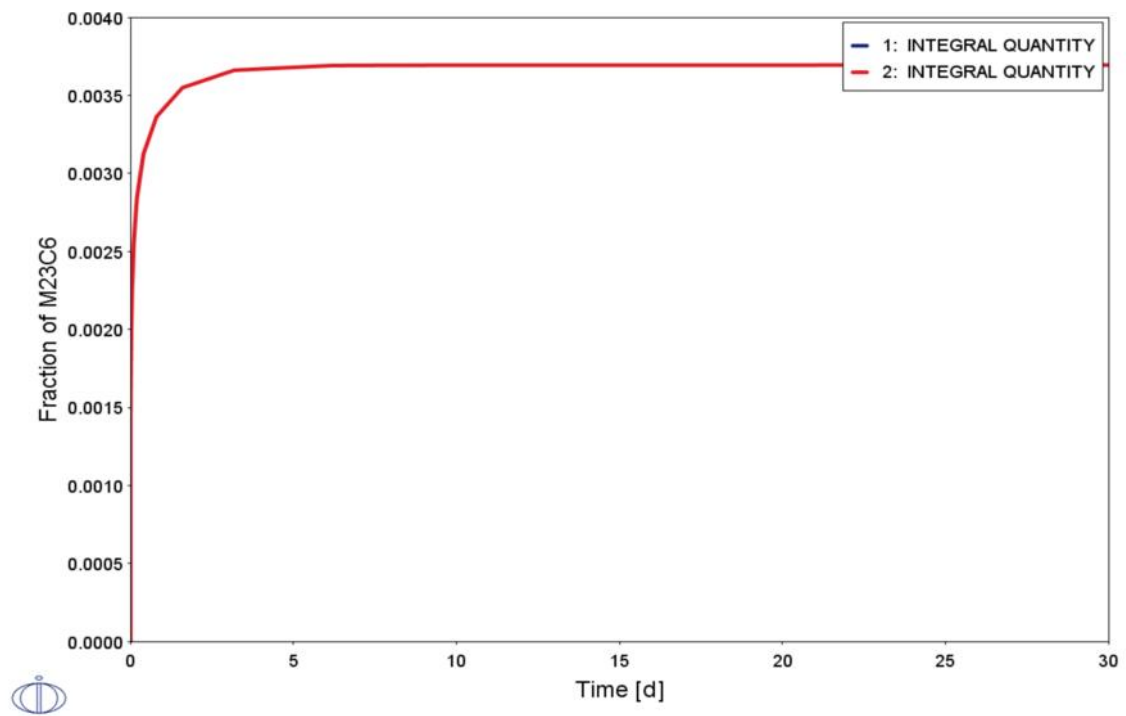
Fonte: Autor.

Figura 89- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 950°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



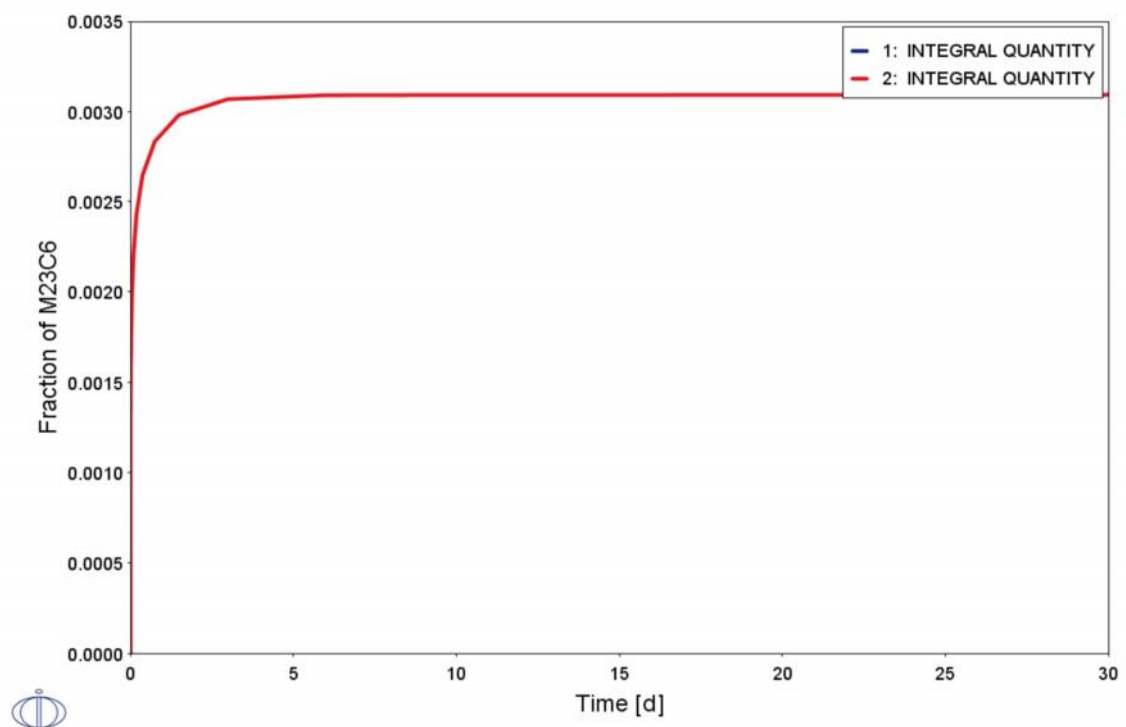
Fonte: Autor.

Figura 90- Liga 01: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 975°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



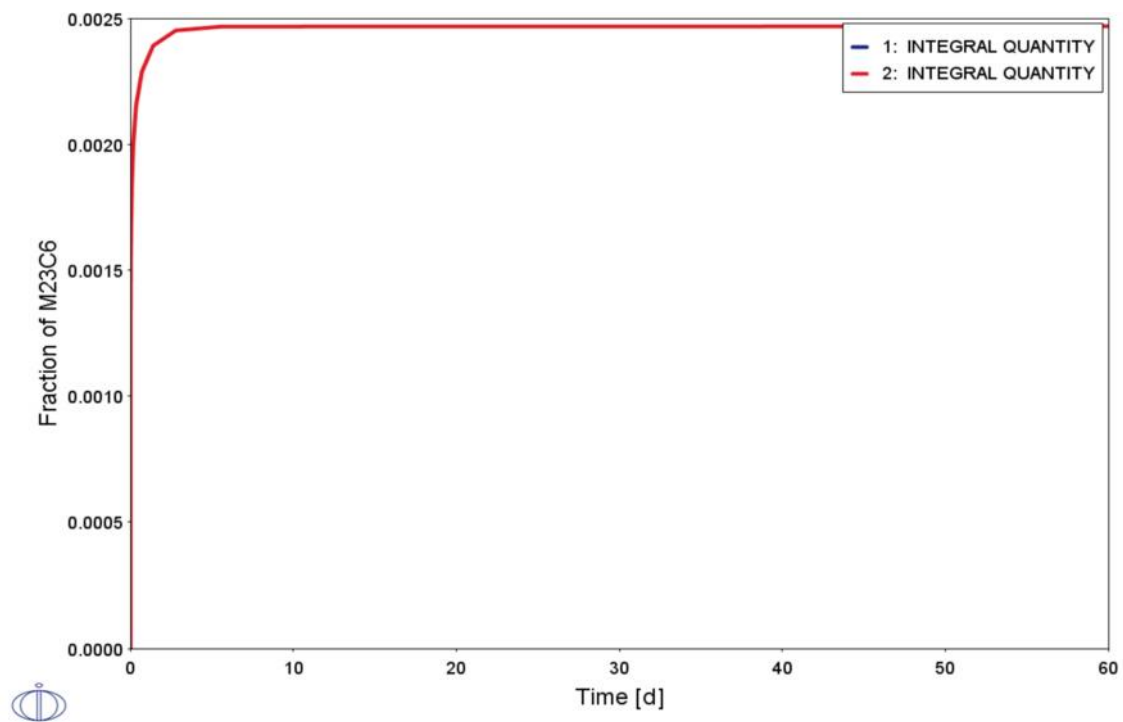
Fonte: Autor.

Figura 91- Liga 01: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 980°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



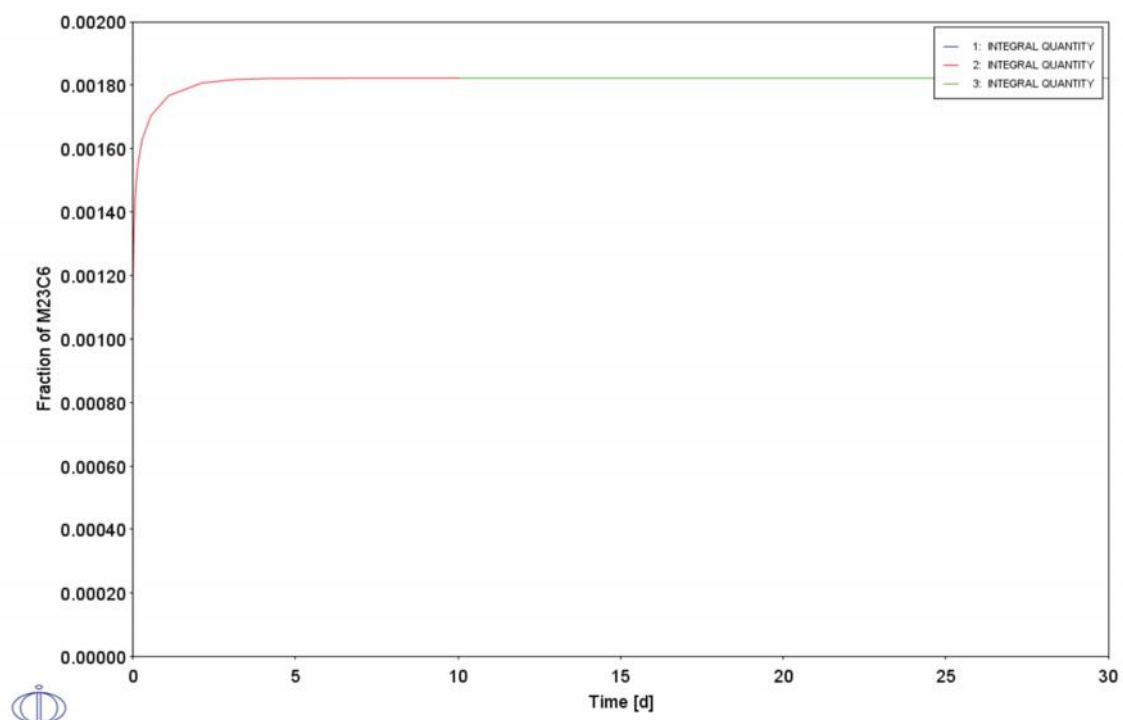
Fonte: Autor.

Figura 92- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 985°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



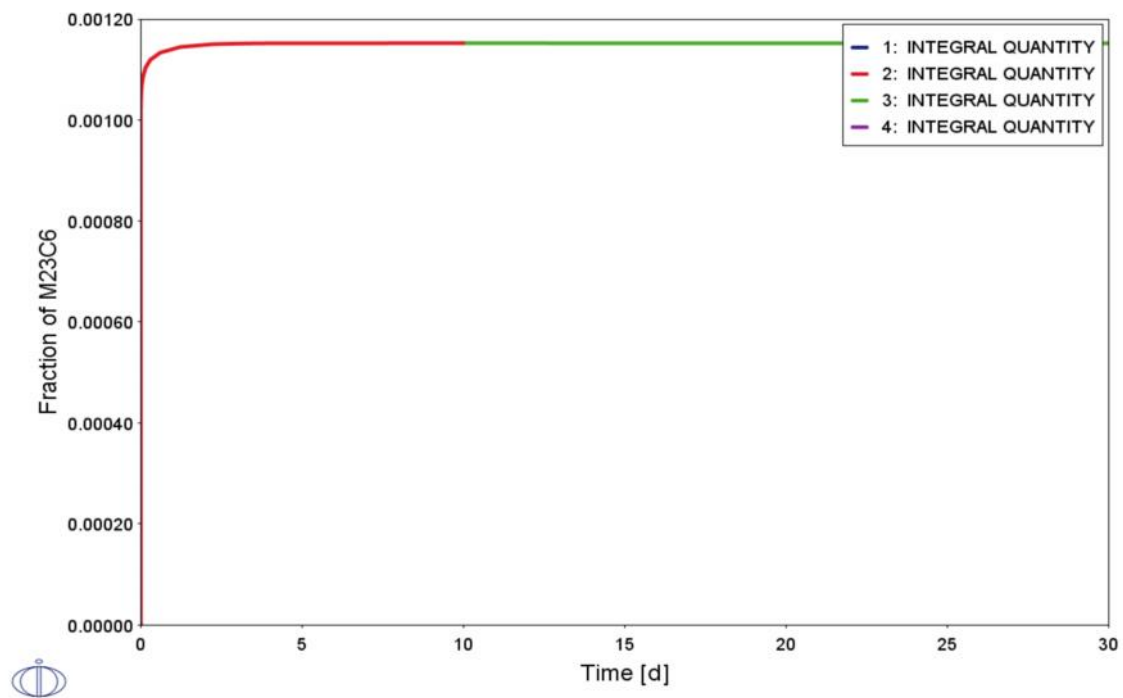
Fonte: Autor.

Figura 93- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 990°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



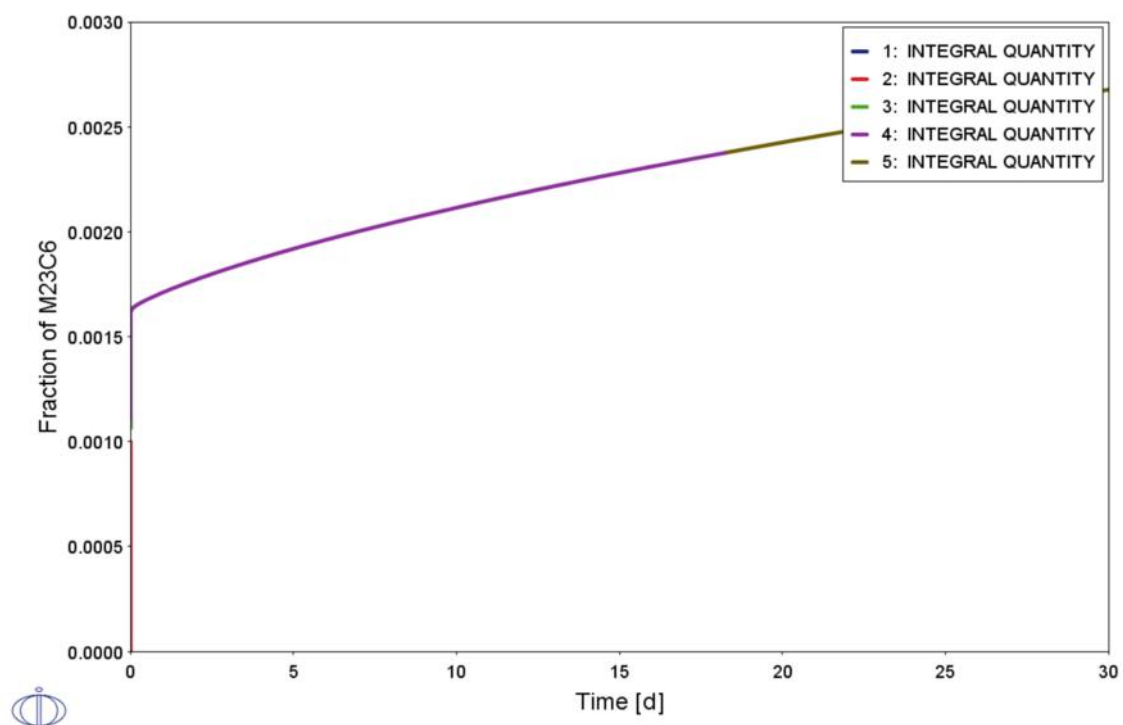
Fonte: Autor.

Figura 94- Liga 01: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 995°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



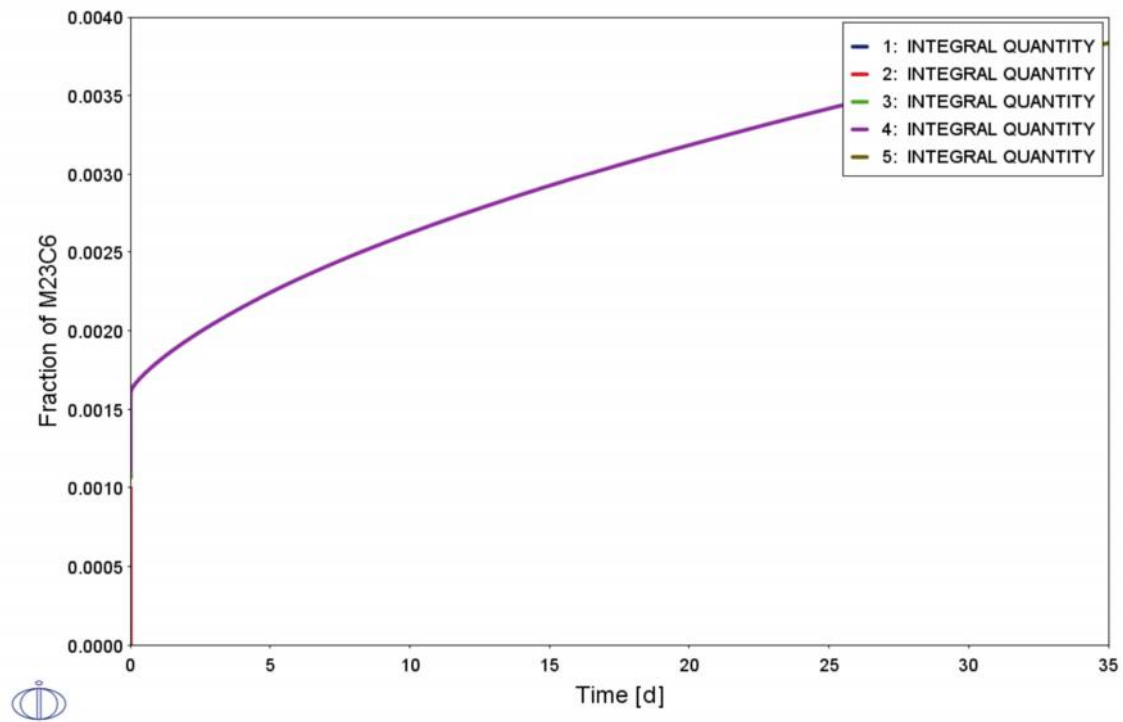
Fonte: Autor.

Figura 95- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 550°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



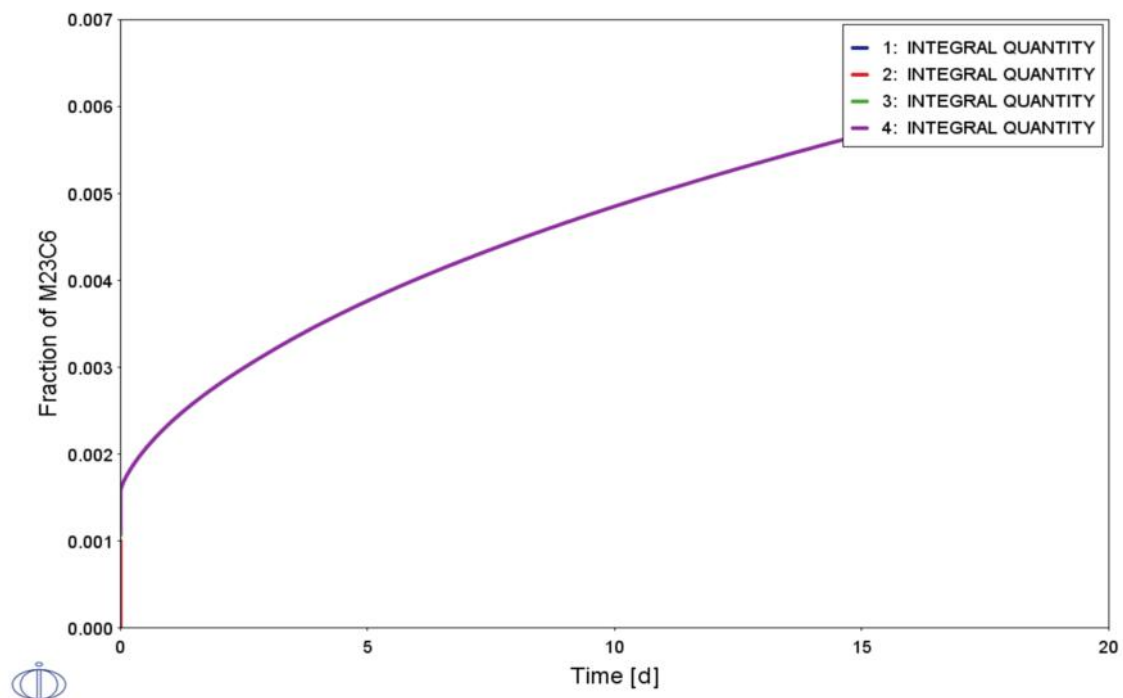
Fonte: Autor.

Figura 96- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 600°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



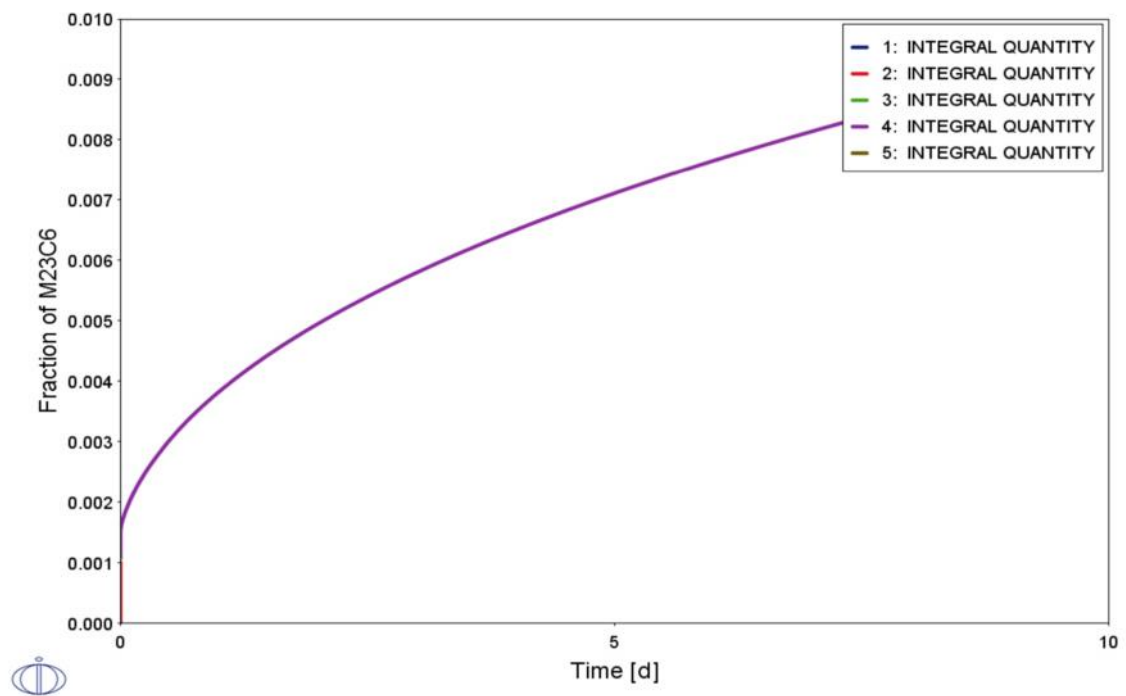
Fonte: Autor.

Figura 97- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 650°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



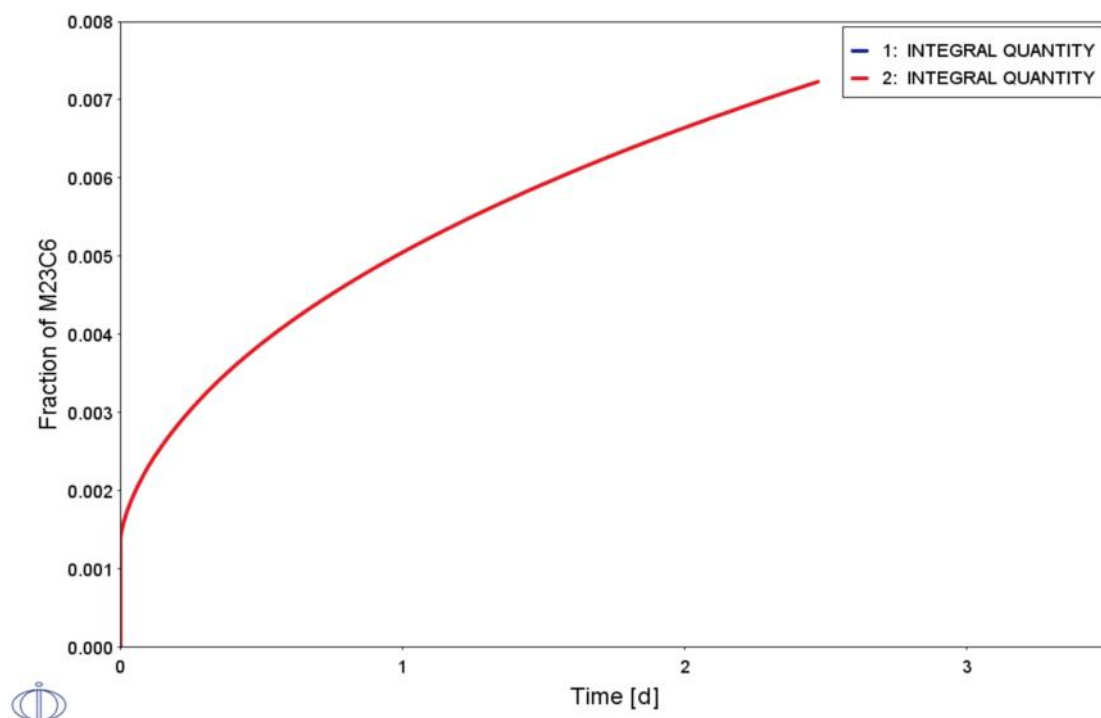
Fonte: Autor.

Figura 98- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 700°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



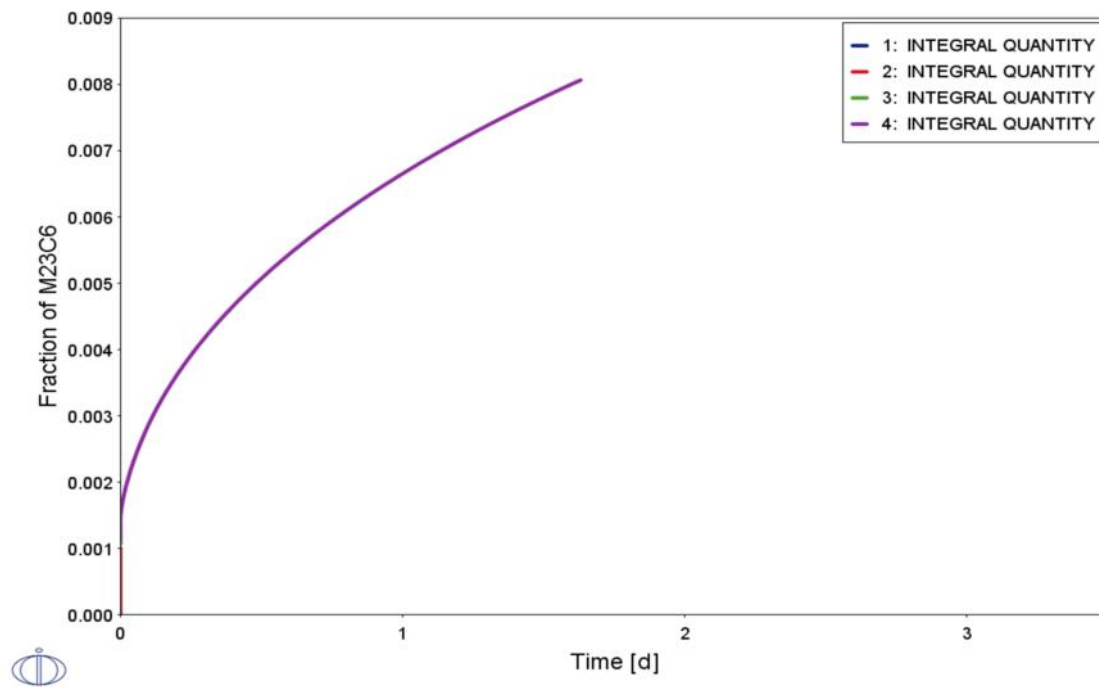
Fonte: Autor.

Figura 99- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 725°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



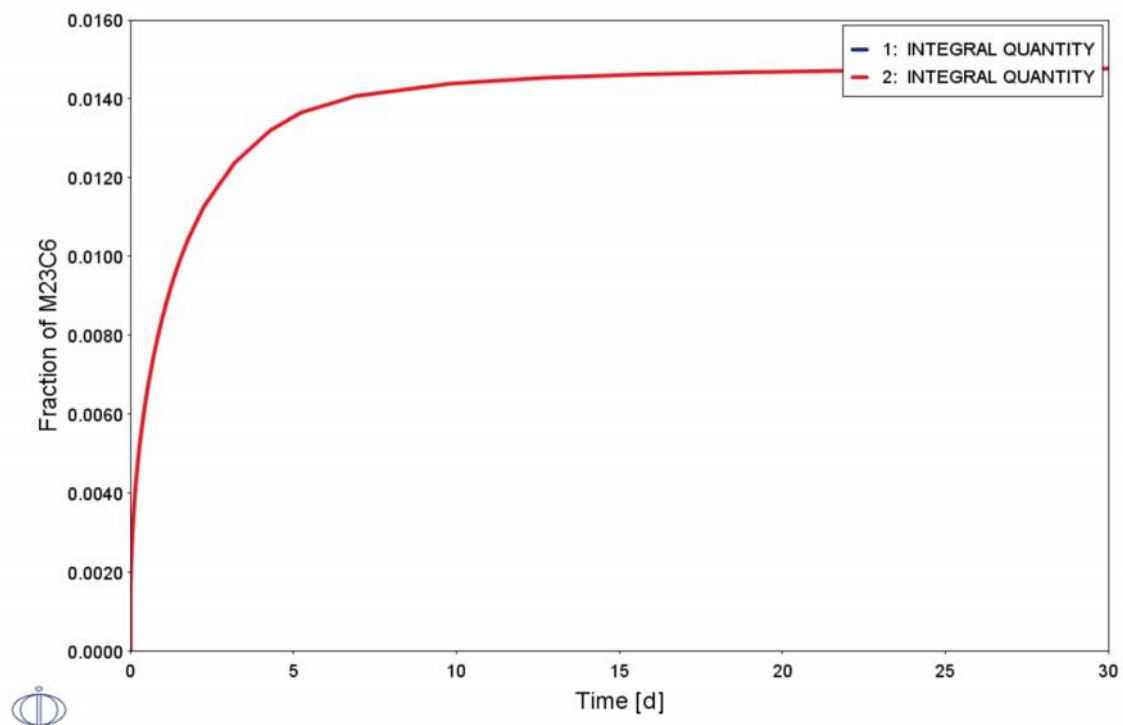
Fonte: Autor.

Figura 100- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 750°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



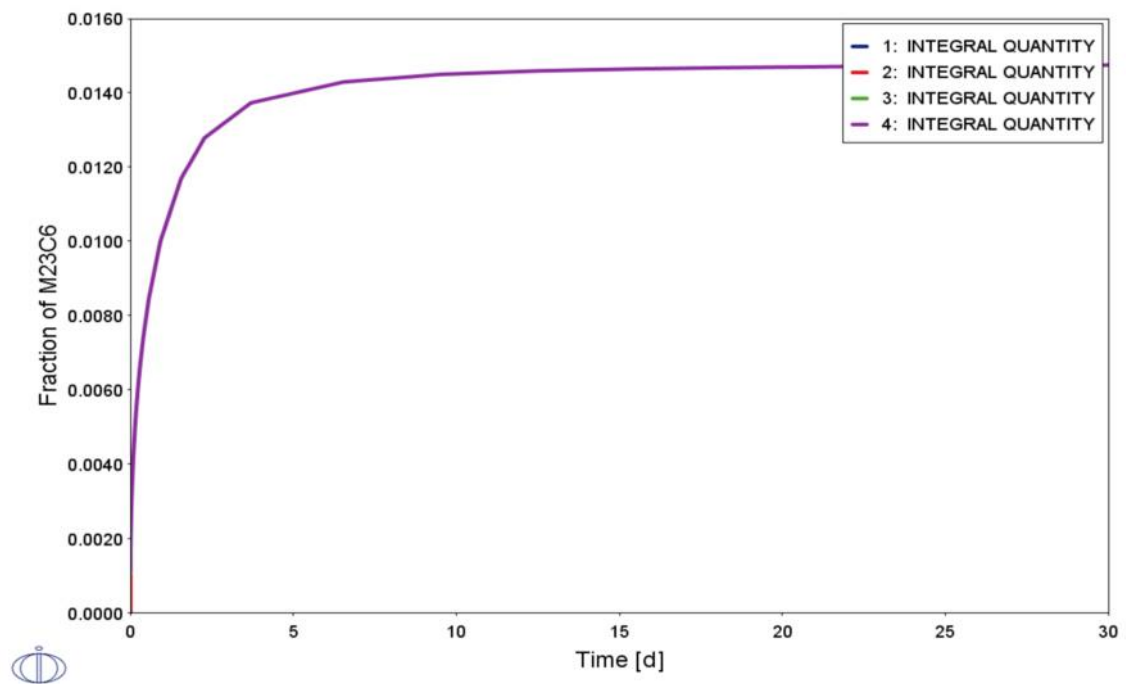
Fonte: Autor.

Figura 101- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 775°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



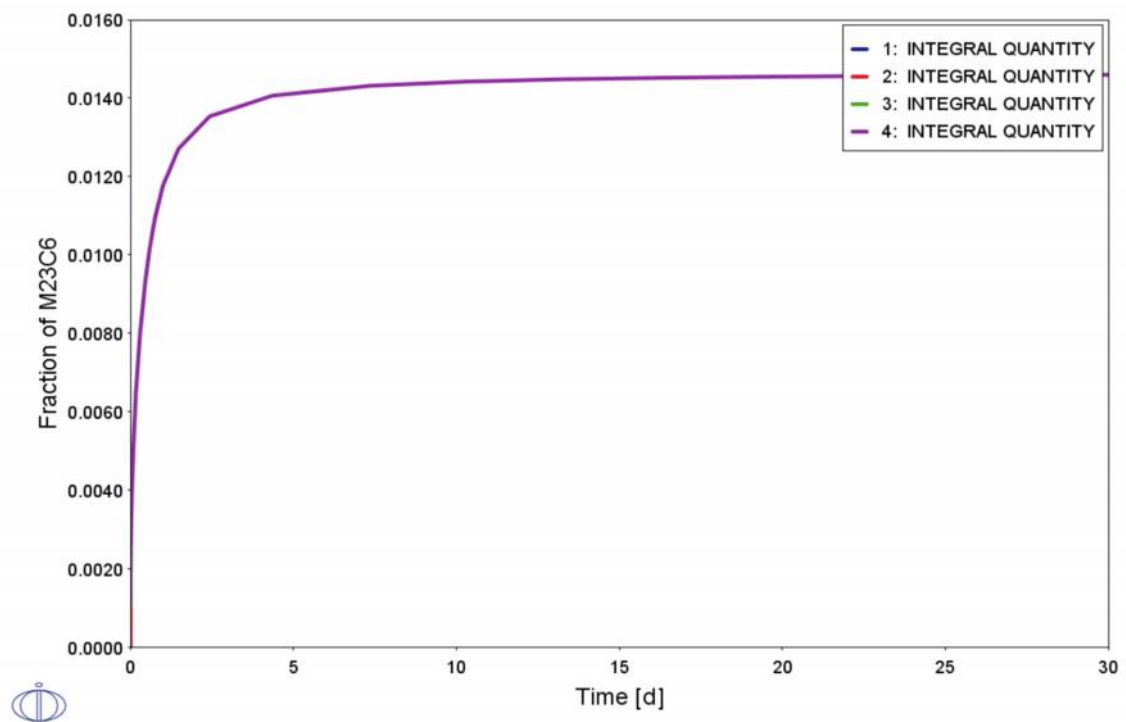
Fonte: Autor.

Figura 102- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 800°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

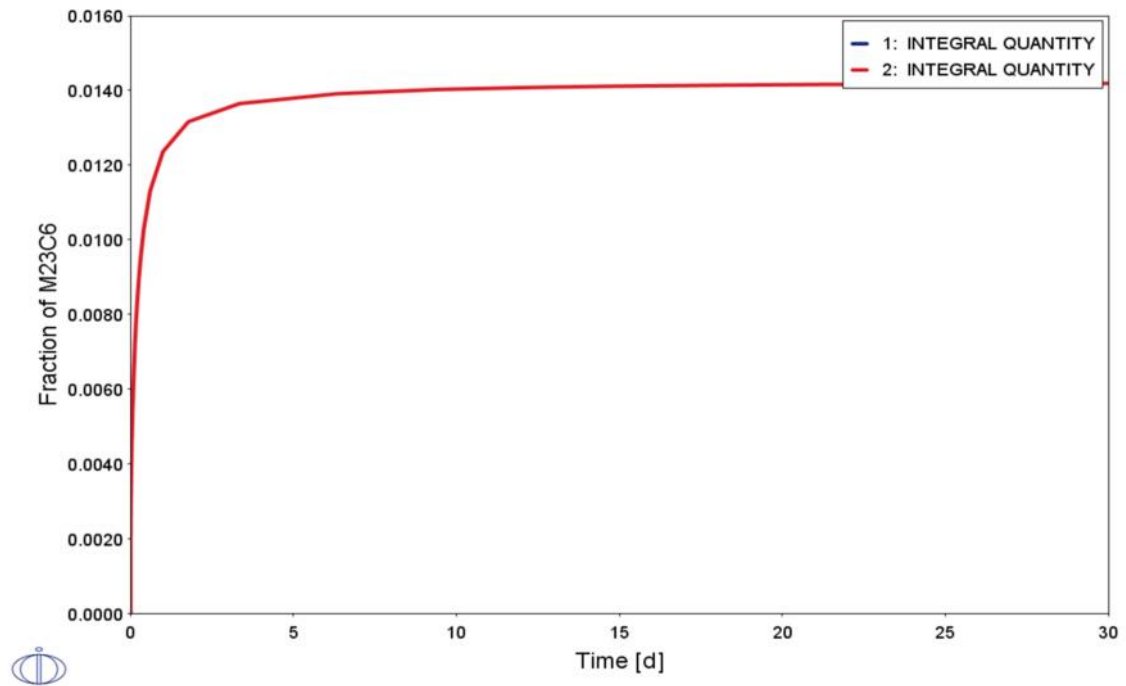
Figura 103- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 825°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

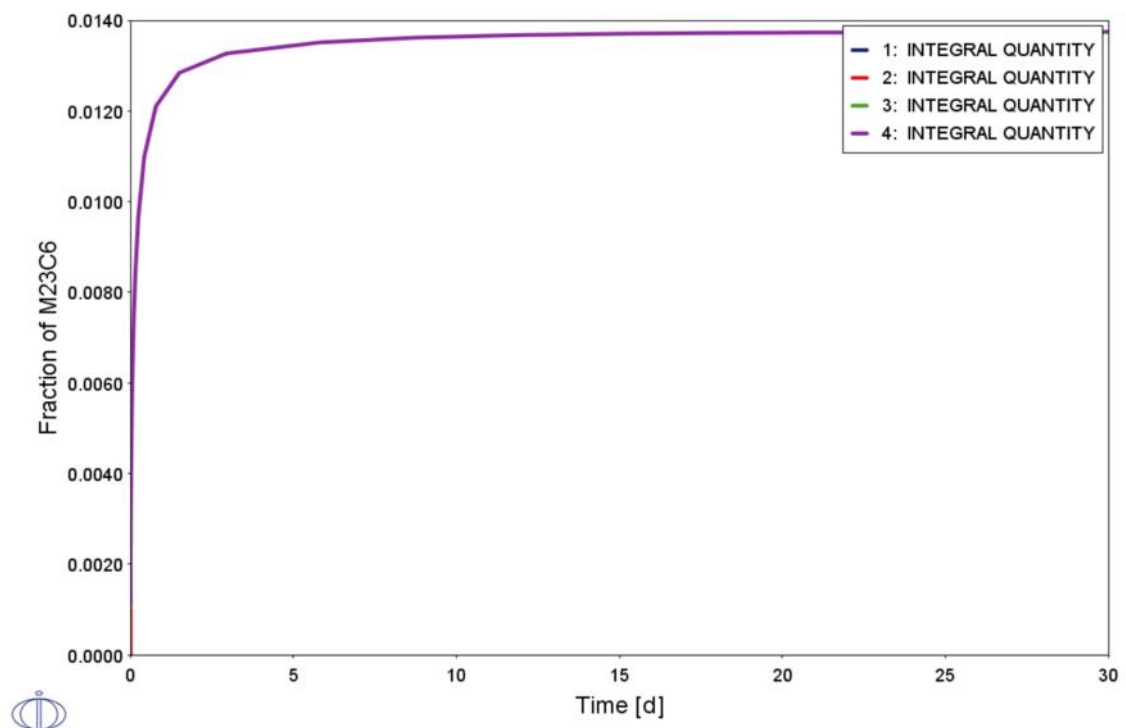


Figura 104- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 850°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



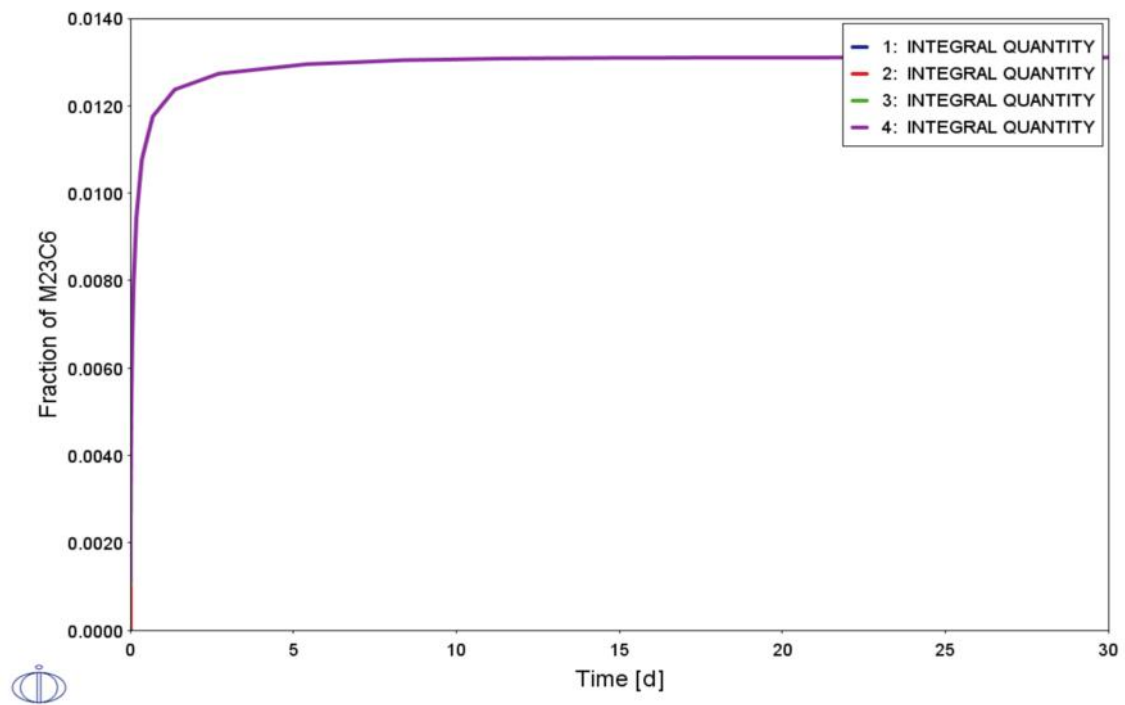
Fonte: Autor.

Figura 105- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 875°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



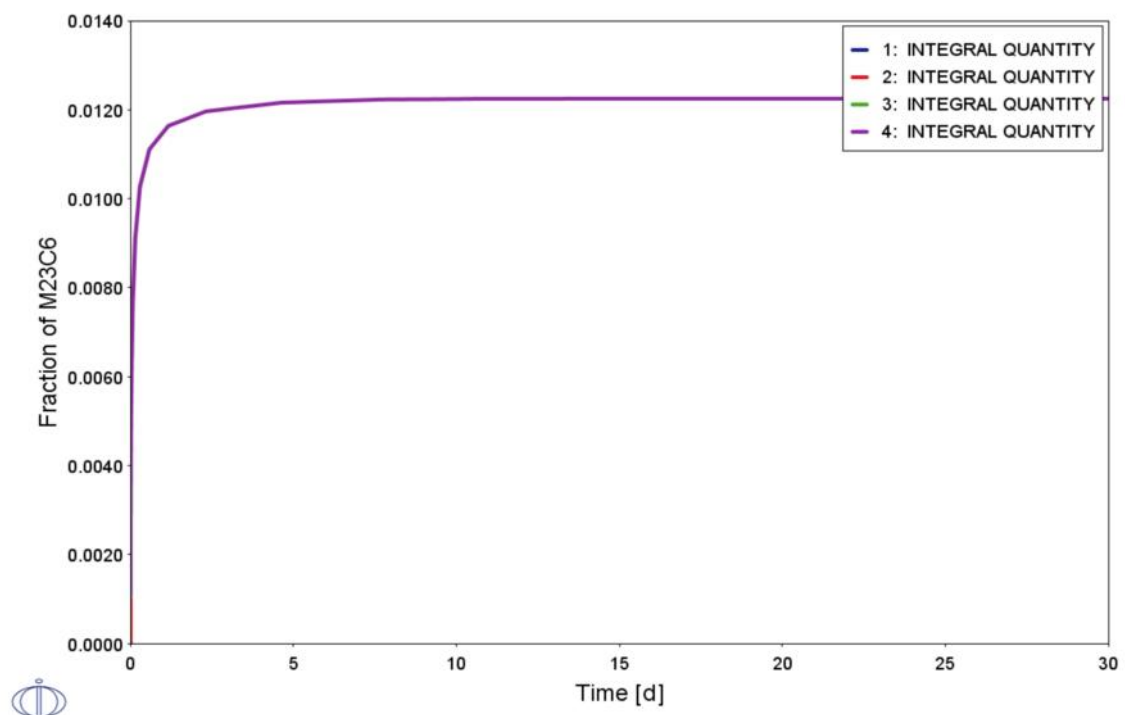
Fonte: Autor.

Figura 106- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 900°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



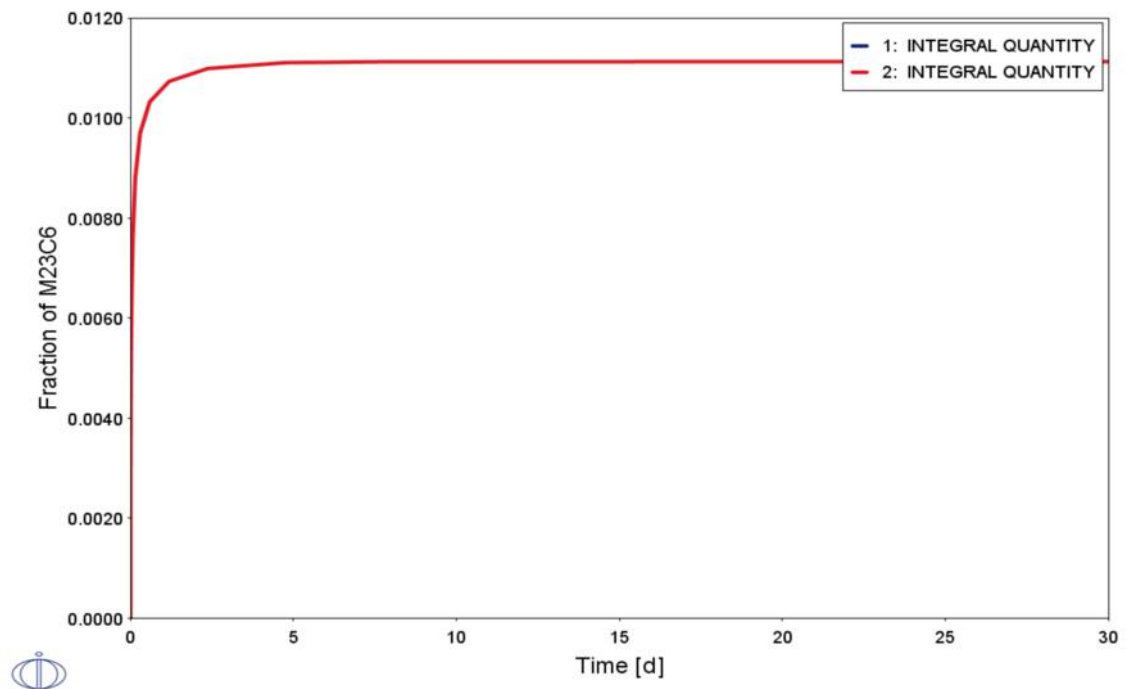
Fonte: Autor.

Figura 107- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 925°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



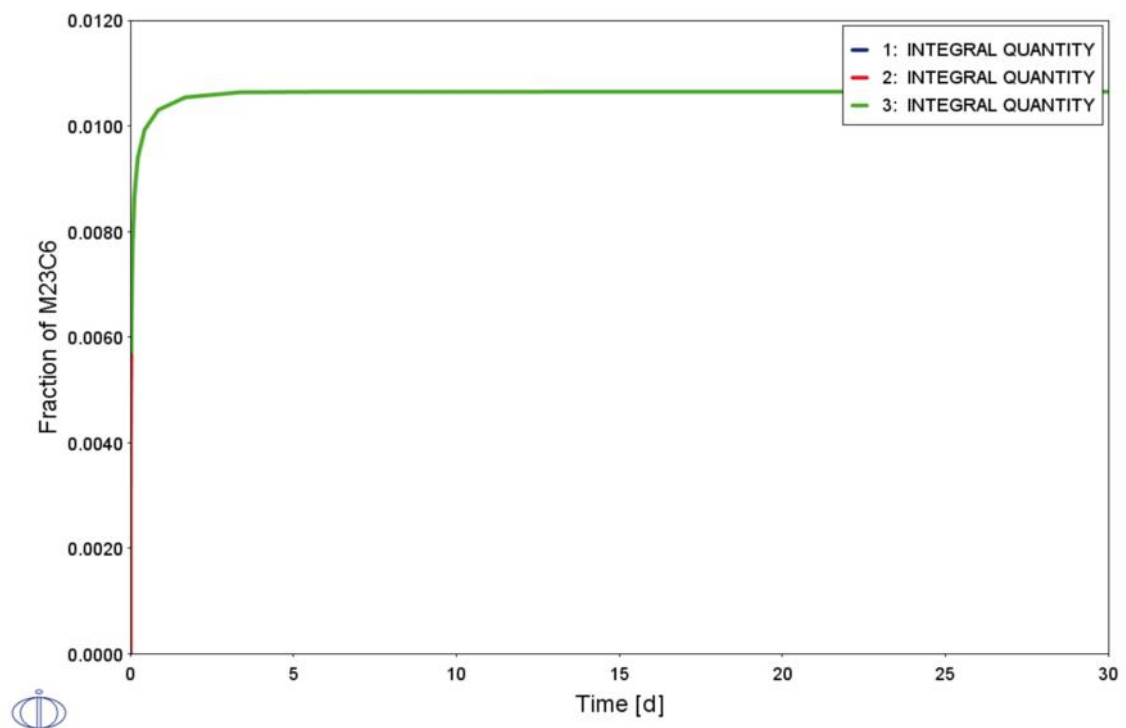
Fonte: Autor.

Figura 108- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 950°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



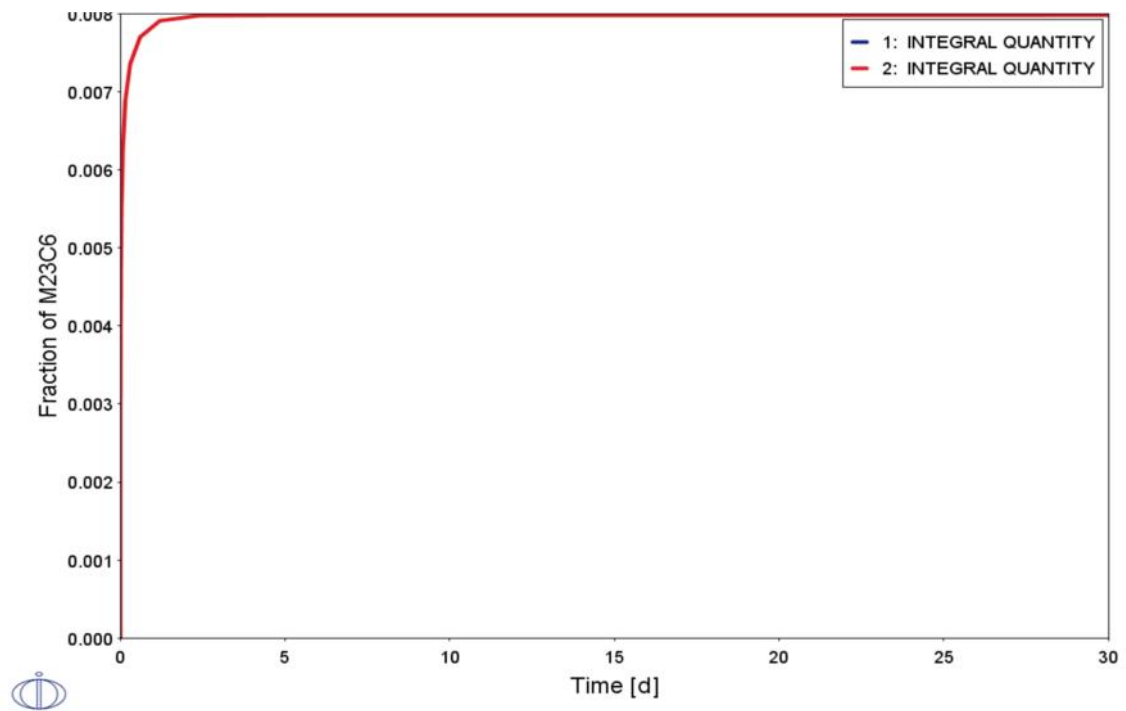
Fonte: Autor.

Figura 109- Liga 20: Diagrama de formação de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> em função do tempo a 975°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



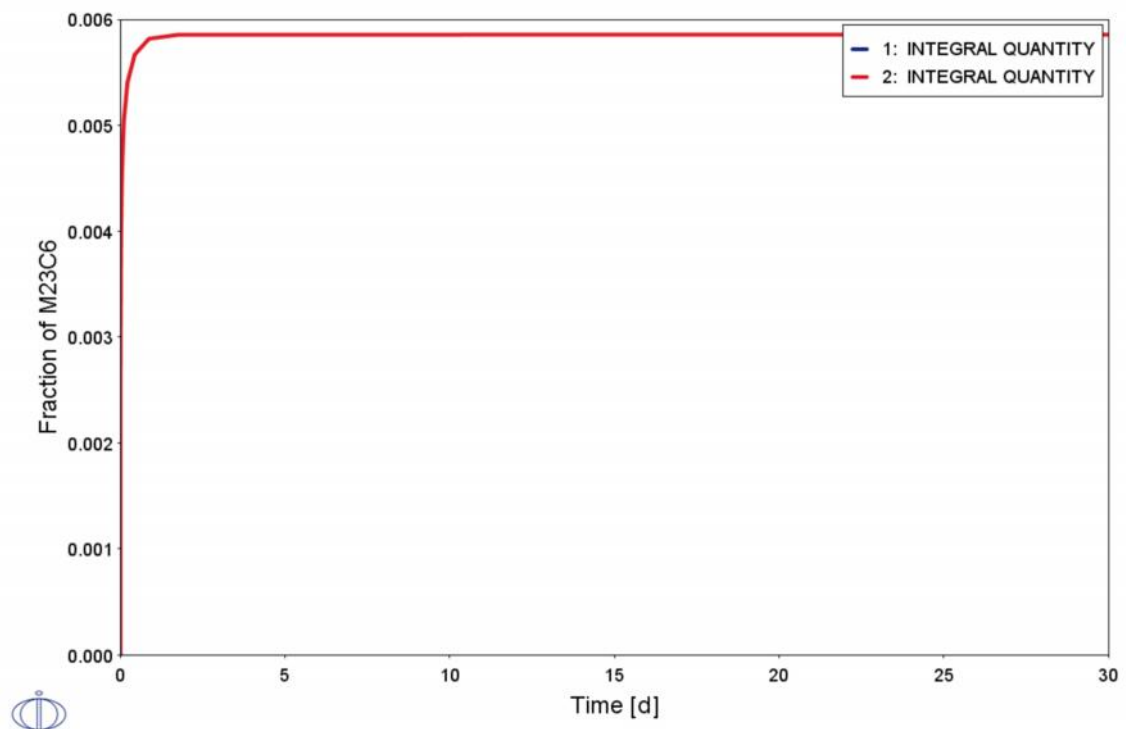
Fonte: Autor.

Figura 110- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 1000°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



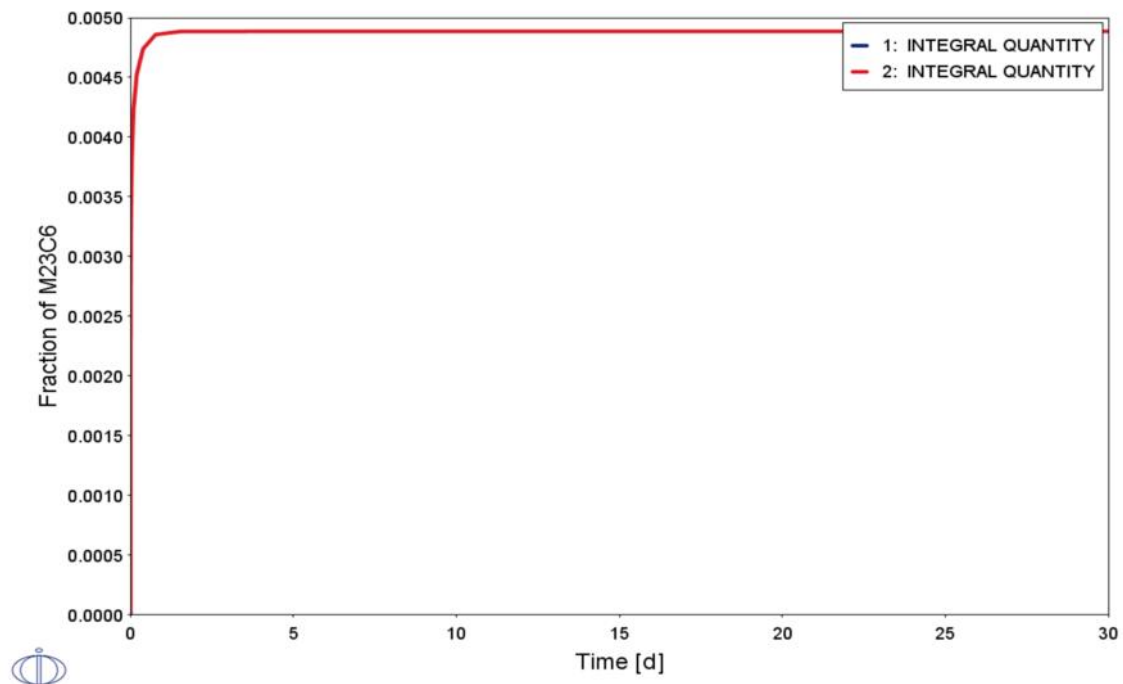
Fonte: Autor.

Figura 111- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 1025°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



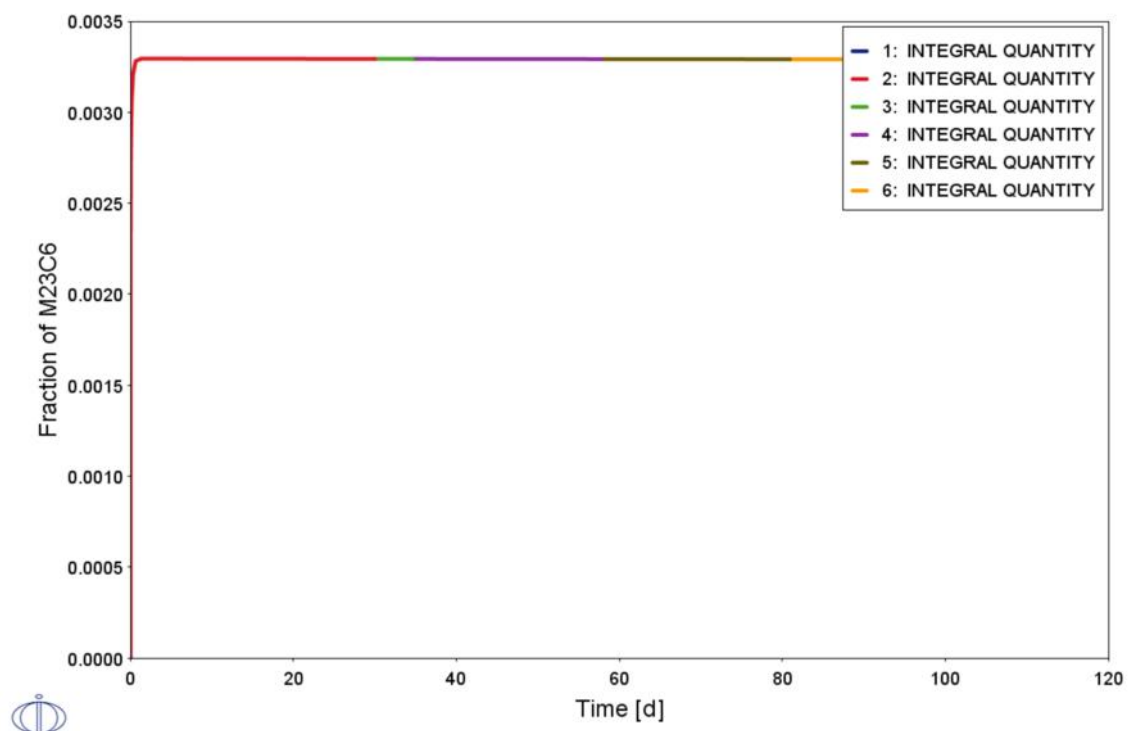
Fonte: Autor.

Figura 112- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 1035°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.

Figura 113- Liga 20: Diagrama de formação de M23C6 em função do tempo a 1050°C utilizando a base de dados TCFE9 e MOBFE4.



Fonte: Autor.