



ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMT-536 Trabalho de formatura II

Título: Uso de Diagramas de Resfriamento Controlado (CCT) para a retirada do tratamento térmico de uma engrenagem forjada a quente

Alexander Barboza 2238322

**Orientador :
Andre Paulo Tschippitschin**

Índice

Índice	1
Índice de Figuras.....	3
Índice de Tabelas.....	5
Agradecimentos	7
1. Introdução	8
1.1 Histórico das Curvas CCT	9
2. Objetivo	10
3. Revisão Bibliográfica:	10
3.1 Os Aços Ferríticos-Perlíticos	10
3.2 Efeito dos elementos de liga nos aços	11
3.2 Efeito dos elementos de liga na reação ferrítica	15
3.3 Efeito dos elementos de liga na reação perlítica	16
3.4 Efeito dos elementos de liga sobre as curvas CCT	19
4. Material Utilizado	20
5. Equipamento Utilizado	20
5.1 Durômetro e Microscopia	20
5.2 Gleeble	21
5.3 Corpos-de-Prova.....	22
5.4 Dilatômetro	23
6. Construção dos Diagramas CCT	28
6.1 Determinação das curvas Ac1 e Ac3	28
6.2 Método para construção dos diagramas CCT	29
6.2.1 Método da derivada:	29
6.2.2 Método da tangente:	30
7. Resultados.....	31
7.1 Diagramas CCT para os aços:.....	31
8. Escolha do aço a ser modificado	38
9. Determinação da composição química do aço.....	39
10. Curva CCT para o aço selecionado.....	41
11. Análise dos resultados da curva CCT GG 43332 - 5125 modificado	43
12. Resultados das peças forjadas	43

12.6 Microestruturas encontradas nas amostras	45
13. Conclusão.....	53
14. Bibliografia	54

Índice de Figuras

Fig 1: Principal distribuição dos elementos de liga nos aços.....	15
Fig 2: Efeito dos elementos de liga na reação perítica.....	17
Fig 3: Simulador Termomecânico Gleeble 3500	22
Fig 4: Corpo-de-prova utilizado no ensaio	22
Fig 5: Foto do corpo de prova utilizado, com uma caneta para referência de tamanho	22
Fig 6: Desenho do Dilatômetro	23
Fig 7: foto do dilatômetro utilizado	23
Fig 8: Extensômetro conectado.....	24
Fig 9: Dilatometer	25
Fig 10: Posicionamento do dilatômetro	27
Fig 11: Representação do ciclo realizado no teste	29
Fig 12: Método da derivada para determinação de temperaturas de transformação.....	30
Fig 13: Método da tangente para determinação de temperaturas de transformação.....	31
Figura 14: Diagrama CCT para o aço GG43200.	33
Figura 15: Diagrama CCT para o aço GG46232.	34
Figura 16: Diagrama CCT para o aço GG48137.	35
Figura 17: Diagrama CCT para o aço GG46332	36
Figura 18: Diagrama CCT para o aço GG46332	37
Fig 19: Curva CCT para o aço GG 4333	42
figura 20: Amostra 1 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x	45
Figura 21: Amostra 2 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	46
Figura 22: Amostra 3 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	46
Figura 23: Amostra 4 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	47
Figura 24: Amostra 5 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	47
Figura 25: Amostra 6 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	48
Figura 26: Amostra 7 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	48
Figura 27: Amostra 8 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	49
Figura 28: Amostra 9 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	49
Figura 29: Amostra 10 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	50
Figura 30: Amostra 11 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	50
Figura 31: Amostra 12 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	51
Figura 32: Amostra 13 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	51

Figura 33: Amostra 14 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	52
Figura 34: Amostra 15 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x.....	52

Índice de Tabelas

Tabela 1 Composição química dos aços utilizados.....	20
Tabela 2: Composição química do aço selecionado	39
Tabela 3: composição química do Novo aço GG 43332	41
Tabela 4: Resultado dos ensaios de forjamento	44

Aos meus Pais que sempre me apoiaram

Agradecimentos

Agradeço a todos da Gerdau Aços Finos Piratini, Krupp Metalurgica e Eaton Corporation do laboratório metalúrgico sem o qual este trabalho não seria possível.

Nestor Edgard-RTC

Valmor Carnino –EPP

Rodrigo Beloc-EPP

Mauro Valadão -RTC

Vicente Dagnoni-RTC

Elias Manna- Vendas

Eduardo Arruda –Krupp Metalurgica

Jão Bittar- Eaton Corporation

Agradecimento especial ao Eng Sérgio Domingos Junior, sem o qual este trabalho não aconteceria e ao professor André pela paciência em ensinar

1. Introdução

A partir de 1990, com a globalização, houve uma abertura de mercado na indústria automobilística, o que levou a uma corrida das montadoras nacionais para a atualização tecnológica, levando à indústria de autopeças e as siderúrgicas a acompanhar este desenvolvimento.

Hoje em dia as montadoras aqui instaladas possuem uma tecnologia comparável com as montadoras internacionais e o novo campo de atuação das montadoras junto aos fornecedores de autopeças e siderúrgicas é pela redução de custos.

A montadora General Motors fez uma solicitação por redução de custos na caixa de cambio dos automóveis corsa e astra. Atualmente a caixa de cambio é montada pela EATON, e esta recebe peças forjadas da KRUPP, dois clientes GERDAU-Aços Finos Piratini.

Foi verificada a possibilidade da eliminação do tratamento térmico em uma engrenagem pertencente a caixa de cambio, que atualmente em seu processo de fabricação é forjada e após é recozida para atender as especificações de dureza (195HB-225HB) e microestrutura (perlita e ferrita).

Em um trabalho de parceria, decidiu-se por construir diagramas de resfriamento contínuo - CCT (Continuous Cooling Transformation) para

verificação do comportamento destes materiais em diferentes velocidades de resfriamento e verificar a possibilidade de atender as especificações da engrenagem sem a necessidade de recozimento, somente controlando o resfriamento da peça após o forjamento, para isso decidiu-se criar uma nova qualidade de aço a partir de um aço já fornecido para Krupp.

1.1 Histórico das Curvas CCT

A mais de 60 anos a introdução e desenvolvimento das técnicas para estabelecer as transformações isotérmicas deu um valioso impulso no estudo e interpretação de nucleação e crescimento de fases e o efeito dos elementos de liga na transformação durante o tratamento térmico dos aços. Um numeroso esforço foi realizado para derivar, a partir destes testes isotérmicos, um procedimento para representar as transformações durante o resfriamento contínuo, como ocorre na prática.

Atualmente a maioria dos métodos de estudos de transformação, durante o resfriamento utiliza dados de variação da dilatação. O diagrama de resfriamento contínuo (Continuous Cooling Transformation - CCT), é um modo muito utilizado, para representação das transformações que ocorrem durante o resfriamento dos materiais. O diagrama é construído com o tempo no eixo horizontal, em escala logarítmica, e no eixo vertical a temperatura. Cada amostra de aço testada origina uma curva de temperatura vs. dilatação. Para cada taxa de resfriamento a dureza é fornecida. Os pontos de início/fim das

transformações de diversas curvas de resfriamento são unidas, formando “campos” de alteração microestrutural. Em algumas vezes percentuais de estruturas são apresentadas.

2. Objetivo

O objetivo foi construir diagramas CCT para as qualidades GG43200 (SAE 5120), GG46232 (CL18), GG48137(16MnCr5 Mod), GG 07064 (DinC70S6) e GG 46332 (CL23) obtendo assim, dados para a criação de uma nova qualidade, derivada de uma das qualidades acima, adicionando elementos de liga e criando um novo aço que possa eliminar a etapa de recozimento do processo de fabricação da engrenagem da caixa de cambio.

3. Revisão Bibliográfica:

3.1 Os Aços Ferríticos-Perlíticos

Um grande número de aços usados industrialmente tem sua estrutura ferrítico-perlítica. Neste grupo está incluída uma larga gama de aços carbono, nos quais a adição de elementos de liga é realizada e tem por objetivo fundamental melhorar as propriedades mecânicas do aço. Por exemplo, o manganês é adicionado para se combinar com o enxofre, silício é um desoxidante e o alumínio é usado como desoxidante e como refinador de

grão. Pode promover-se o refinamento de grão ainda, através de pequenas adições de elementos de liga como o titânio, vanádio e o nióbio, estes elementos como mostrado mais a frente, formam carbonetos muito estáveis que bloqueiam os limites do tamanho de grão da austenita, permitindo a obtenção de tamanhos de grão de ferrita menores depois da transformação da austenita.

Os aços ferríticos –perlíticos são muito utilizados na fabricação de peças forjadas em matrizes fechadas ou abertas, cobrindo um largo aspecto de aplicações, como por exemplo, veios e engrenagens.

3.2 Efeito dos elementos de liga nos aços

O estudo do efeito de elementos de liga nos aços seria interminável se tivéssemos que considerar em cada caso, os diagramas de fases ternários e quaternários que indicam as fases em equilíbrio nesses materiais.

Os elementos de liga encontrados nos aços podem, entretanto, ser agrupados em quatro categorias, de acordo com seu efeito sobre o domínio de estabilidade da ferrita e da austenita nos diagramas de fase binários Fe-X.

a) Grupo 1: campo gama aberto. A esse grupo pertence os elementos níquel, manganês e cobalto. Níquel e manganês quando adicionados em teores

elevados estabilizam a austenita na temperatura ambiente e por essa razão aparecem na formulação dos aços austeníticos.

b) Grupo 2: campo gama expandido. A esse grupo pertencem os elementos carbono e nitrogênio. O campo gama tem o seu domínio de estabilidade, aumentado, mas a partir de um certo teor de elemento adicionado forma-se um composto intermediário. O cobre, zinco e ouro fazem parte desse grupo.

c) Grupo 3: campo gama fechado. Nessa categoria se encontra um grande número de elementos. O campo gama contrai ocupando uma pequena área chamada de laço austenítico. Dessa forma os campos da ferrita delta e da ferrita alfa se fundem e tornam-se contínuos. Fazem parte desse grupo os elementos silício, alumínio, berílio e fósforo, bem como os elementos fortes formadores de carbonetos, titânio, vanádio, molibdênio, tungstênio e cromo. Além desses, os elementos estanho, antimônio e arsênico, responsáveis pela fragilização do revenido dos aços, fazem parte desse grupo.

d) Grupo 4: campo gama contraído. Nesse grupo se encontram os elementos nióbio, tântala, zircônio e boro. O campo gama é fortemente contraído, embora a partir de um certo teor formam-se compostos intermediários

Os aços, entretanto são ligas ternárias Fe-C-X e uma forma de se observar o efeito dos elementos de liga sobre o sistema Fe-C é o de projetar os sucessivos contornos do campo gama daquele sistema para teores crescentes do elemento de liga em questão.

Informações mais precisas somente podem ser conseguidas através da utilização das secções isotérmicas dos sistemas ternários Fe-C-X.

Se considerarmos que a austenita (com exceção dos aços austeníticos ou semi-austeníticos) se transforma em misturas de ferrita e carbonetos durante o resfriamento, podemos estudar a distribuição dos elementos de liga nessas fases e constatamos que podem ser classificados em tres grupos.

- a) elementos que somente se dissolvem na ferrita
- b) elementos que formam carbonetos estáveis e que também aparecem na ferrita
- c) elementos que se dissolvem somente nos carbonetos.

À primeira categoria pertencem elementos como o níquel, o cobre, o fósforo e o silício, que, nos aços transformáveis, se encontram normalmente em solução sólida na ferrita, sendo a sua solubilidade na cementita ou em carbonetos de liga bastante baixa.

A maioria dos elementos de liga usados nos aços cai na segunda categoria; uma vez que formam carbonetos podem, em pequenas concentrações, entrar em solução sólida na cementita, embora entrem também em solução sólida na ferrita. Em concentrações mais elevadas, a maioria formará carbonetos de liga que são termodinamicamente mais estáveis que a cementita. Os principais tipos são:

- Carboneto tipo Fe_xC_y . São carbonetos de ferro livre de soluto que se formam nos aços que contém elementos de liga não formadores de carbonetos. Fazem parte desta categoria a cementita de estrutura ortorrômbica Fe_3C , bem como carbonetos de ferro metaestáveis tipo epsilon de estrutura hexagonal e composição próxima a $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$.
- Carbonetos de ferro contendo elementos de liga em solução sólida tipo $(\text{Fe},\text{X})_x\text{C}_y$. Os elementos de liga entram em solução sólida no carboneto, ocupando as posições dos átomos de ferro, sem que haja uma relação definida. Nesse grupo, temos a cementita Fe_3C que pode dissolver em sua estrutura principalmente o manganês.
- Carbonetos mistos de ferro e elementos de liga tipo $[\text{Fe}_x\text{X}_z]\text{C}_y$. Nesse caso existe uma relação definida entre soluto e solvente no reticulado. Fazem parte deste grupo os carbonetos tipo M_6C e M_7C_3 , tais como: $[\text{Fe}_4\text{W}_2]\text{C}$, $[\text{Fe}_4(\text{Mo.W})_2]\text{C}$, $[\text{Fe}_{21}\text{W}_2]\text{C}_6$, etc.
- Carbonetos livres de ferro tipo X_xC_y . São carbonetos puros de elementos de liga. Fazem parte desse grupo os carbonetos dos elementos fortes formadores de carbonetos NbC , VC , MO_2C , TiC etc.

Na terceira categoria há um pequeno número de elementos que entram predominantemente na fase carboneto. O azoto é o mais importante destes elementos e forma carbonitreto com o ferro e com muitos elementos de liga.

Na tabela a seguir construída por Bain, verificou-se a distribuição dos principais elementos de liga nos aços.

ELEMENTO	FERRITA	CARBONETO	INCLUSÕES	INTERMETÁLICOS	EST. ELEMENTAR
Níquel	Ni			Ni ₃ Al	
Silício	Si		SiO ₂ .MxOy		
Alumínio	Al		Al ₂ O ₃	AlxNy	
Zircônio	Zr		ZrO ₂	ZrxNy	
Manganês	Mn	Mn	MnS/MnO.SiO ₂		
Cromo	Cr	Cr	Cr ₂ O ₃		
Tungstênio	W	W			
Molibdênio	Mo	Mo			
Vanádio	V	V	VxOy	VxNy	
Titânio	Ti	Ti	TixOy	TixNy/TixNyCz	
Nióbio	Nb	Nb		NbxCy/NbxNyCz	
Fósforo	P				
Enxofre	S		(MnFe)S/ZrS		
Cobre	Cu				Cu
Chumbo	Pb				Pb

Fig 1: Principal distribuição dos elementos de liga nos aços

3.2 Efeito dos elementos de liga na reação ferrítica

Nas ligas Fe-C-X há dois modos, basicamente de crescimento da ferrita pró-eutetóide na austenita. O modo realmente observado depende da

composição da liga, embora os dois modos possam ocorrer a diferentes temperaturas na mesma liga.

Os modos de crescimento são:

- Crescimento com partição do elemento de liga entre as fases alfa e gama, em condições de equilíbrio local.
- Crescimento sem partição de elementos de ligas entre as fases.

No primeiro modo a ferrita cresce a uma baixa velocidade determinada pela difusibilidade do elemento de liga na fase gama. Este comportamento é afetado pela composição química da liga.

O modo de crescimento em que não ocorre partição é mais frequente. Neste caso dependendo do elemento de liga ser estabilizador gama ou alfa, forma-se uma estreita zona de enriquecimento ou empobrecimento que se movimenta a frente da interface alfa/gama. Aronson e Domian observaram este fenômeno em elementos de liga como silício, molibdênio, alumínio, cromo e cobre, para todas as temperaturas investigadas. Os fortes estabilizadores de gama como Ni e Mn, são os únicos elementos que apresentam partição em relação à fase gama. No regime de não partição, as velocidades de crescimentos observadas são relativamente elevadas, sendo determinadas pela difusibilidade do carbono.

3.3 Efeito dos elementos de liga na reação perlítica

A reação perlítica é um caso típico de transformação por nucleação e

crescimento. Os trabalhos de Mehl e colaboradores mostraram que muitos elementos de liga reduzem tanto a velocidade de nucleação como a velocidade de crescimento da perlita, como vemos na figura a seguir:

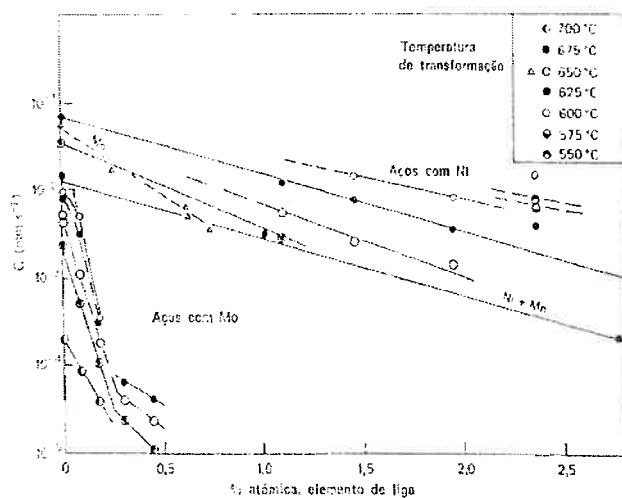


Fig 2: Efeito dos elementos de liga na reação perlítica

A observação da interface entre perlita e austenita, durante a transformação, sugere que na reação perlítica é fundamental a questão da

partição de carbono entre a cementita e a ferrita. Contudo, na presença de elementos de liga metálicos não é obvio, à princípio, que haja partição desses elementos. Esta partição deve ser entendida como uma partição na interface perlita/ austenita, que provoca a partição do elemento de liga entre a cementita e a ferrita, à medida que estas se formam. Em um estado mais adiantado da reação, e após a sua conclusão, os elementos de liga podem ser repartidos pelas duas fases de perlita em uma larga faixa de temperaturas.

Na reação perlítica é possível distinguir dois modos de crescimento: num deles há equilíbrio local com partição e no outro há equilíbrio local sem partição. Os dois modos dependem tanto da temperatura como da composição. Os elementos que favorecem a formação da austenita, portanto diminuem a temperatura eutetóide, e que, além disso, tem baixa solubilidade na cementita, como é o caso do Níquel, favorecem a reação sem partição. Os elementos fortemente estabilizadores da ferrita e que conseqüentemente, elevam a temperatura eutetóide e que, são solúveis na cementita, tem tendência a favorecer a reação com partição às temperaturas mais elevadas; exemplos cromo, molibdênio e silício. O crescimento da perlita no caso de não partição é controlado pela difusão. Esta difusão, no entanto, é retardada pela presença de outros elementos de liga, o que explica o efeito de certos elementos como o níquel, na velocidade de crescimento da perlita. Quando

ocorre partição de elementos de liga, a difusibilidade do elemento de liga na austenita torna-se um fator limitativo.

Seja qual for a distribuição do elemento de liga na interface de crescimento, haverá uma subsequente redistribuição entre a ferrita e a cementita; os elementos com grande solubilidade na cementita (formadores de carbonetos) difundir-se-ão para esta fase, ao contrário do que acontece com os não formadores de carbonetos. Deste modo a composição da cementita pode variar entre largos limites.

Quando a concentração do elemento de liga atinge um nível crítico, a cementita é distribuída por outro carboneto. O fato de o carboneto ser diferente não altera necessariamente a morfologia básica da perlita; assim formam-se “perlitas de liga” nas quais o carboneto está associado a ferrita. Quanto maior for o coeficiente de partição do elemento de liga entre ferrita e o carboneto mais difícil será a transformação, pois a partição depende da difusão de elementos substitucionais com coeficientes de difusão muito menores que o do carbono.

3.4 Efeito dos elementos de liga sobre as curvas CCT

A adição de elementos não formadores de carbonetos níquel, silício e manganês tende a deslocar uniformemente a curva para a direita, enquanto

A região correspondente a bainita é menos afetada que a curva da perlita, seja porque a bainita é uma transformação que ocorre em temperaturas em que não há mais partição de soluto, seja porque é um constituinte que não necessariamente nucleia nos contornos de grão, sendo portanto menos afetada pela segregação de elementos que possam atrasar a nucleação.

4. Material Utilizado

As amostras de aço GG43200 (SAE 5120), GG46232 (CL18), GG48137(16MnCr5 Mod), GG 07064 (DinC70S6) e GG 46332 (CL23) foram obtidas de amostra da Usina Gerdau Aços Finos Piratini. As composições químicas, dos materiais estudados são apresentadas na tabela a seguir.

Piratini	Usual	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	AL	Cu
GG43200	SAE 5120	0,17	0,22	0,79	0,018	0,026	0,81	0,22	0,04	0,003	0,02	0,12
GG46232	CL18	0,18	0,27	1,15	0,014	0,017	0,48	0,14	0,15	0,003	0,018	0,19
GG48137	16MnCr5	0,19	0,11	1,25	0,026	0,025	1,05	0,13	0,04	0,005	0,047	0,17
GG07064	C70S6	0,70	0,20	0,46	0,028	0,066	0,139	0,076	0,02	0,036	0,015	0,10
GG46332	CL23	0,38	0,56	1,33	0,013	0,013	0,16	0,16	0,02	0,12	0,013	0,12

Tabela 1 Composição química dos aços utilizados

5. Equipamento Utilizado

5.1 Durômetro e Microscopia

5. Equipamento Utilizado

5.1 Durômetro e Microscopia

Para todas as amostras eram realizadas ensaios de dureza e microestrutura para confirmação da estrutura obtida, estes ensaios foram realizados no laboratório metalúrgico da Aços Finos Piratini.

5.2 Gleeble

Para a execução deste trabalho, utilizou-se o módulo de tração do simulador termo-mecânico Gleeble (figura 1).

- Módulo fixo – módulo ao qual acopla-se um dos outros dois módulos, de acordo com o ensaio a ser realizado. Abriga os atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos, sendo controlado a partir do painel de controle digital;
- Módulo de tração – módulo capaz de abrigar montagens e ferramentas voltadas para testes que envolvem esforço de tração ou tratamentos térmicos;

Quanto ao sistema de aquecimento das amostras, o simulador Gleeble trabalha com a passagem de corrente elétrica no corpo-de-prova.



Fig 3: Simulador Termomecânico Gleeble 3500

5.3Corpos-de-Prova

O corpo-de-prova, bem como suas dimensões, utilizado no ensaio é apresentado na figura 2.

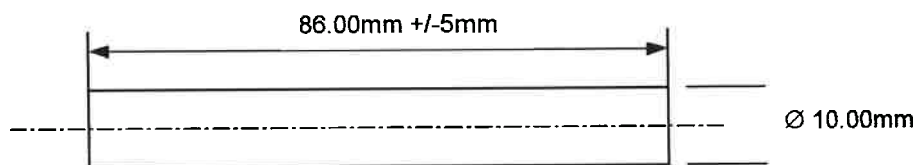


Fig 4: Corpo-de-prova utilizado no ensaio

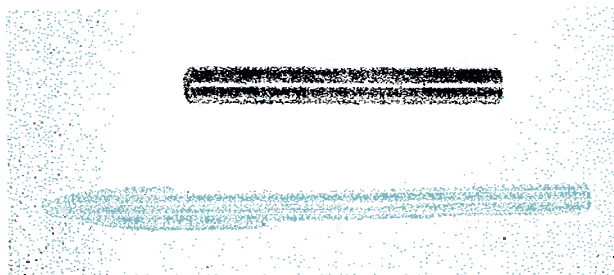


Fig 5: Foto do corpo de prova utilizado, com uma caneta para referência de tamanho

5.4 Dilatômetro

Dilatômetro é um extensômetro utilizado para medir pequenas variações no diâmetro de materiais quando este é aquecido e/ou resfriado. Pode auxiliar na determinação de temperaturas A_{c1} e A_{c3} , mudanças microestruturais, construção de diagramas CTT, etc. O Dilatômetro tem escala de $\pm 0,63\text{mm}$.

A figura 6 nos mostra o dilatômetro e seus componentes.

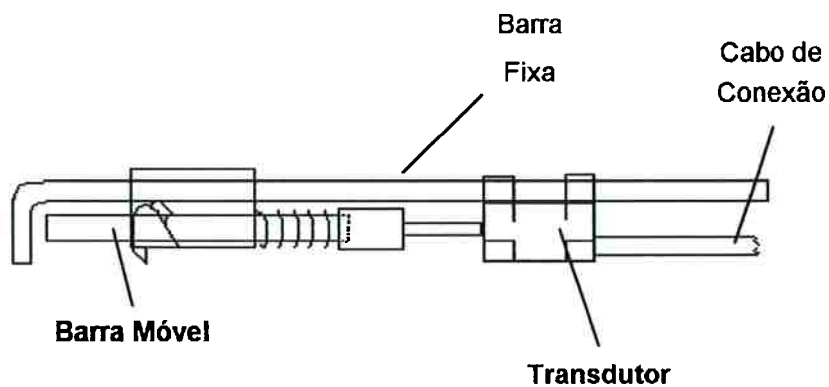


Fig 6: Desenho do Dilatômetro

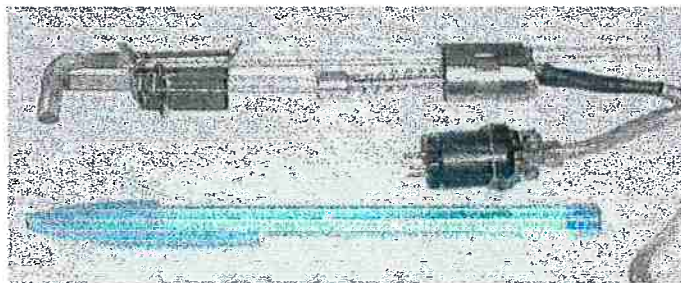


Fig 7: foto do dilatômetro utilizado

Para a montagem do extensômetro há um conjunto de acessórios guardado em uma maleta. Na maleta encontra-se um par de suportes compridos que devem ser parafusados nas garras. Na montagem básica para o ensaio de tração existem dois furos na superfície frontal das garras, estão localizados na parte superior externa das garras. Engatada nesses suportes coloca-se uma borracha que servirá de apoio ao extensômetro (foto abaixo)

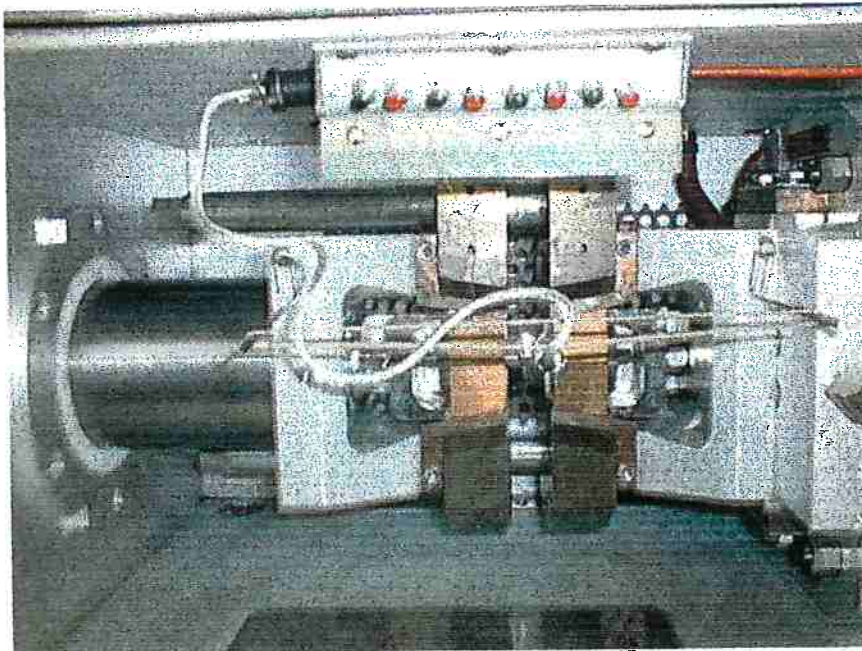


Fig 8: Extensômetro conectado

O extensômetro se apoiará no corpo de prova com a parte frontal e na borracha com a saída do cabo de conexão.

Na parte traseira do extensômetro há um cabo que deverá ser conectado no lado esquerdo da caixa de aquisição de dados dos termopares

(foto acima). Esta caixa está localizada no interior do tanque de vácuo, na parte superior.

No painel de controle deve-se observar a placa de aquisição de dados, para cada extensômetro há uma placa. Para o dilatômetro utiliza-se a placa DILATOMETER (foto abaixo). Quando ocorrer a troca destas placas com a Gleeble ligada deve-se resetar o computador da Gleeble no painel de controle.

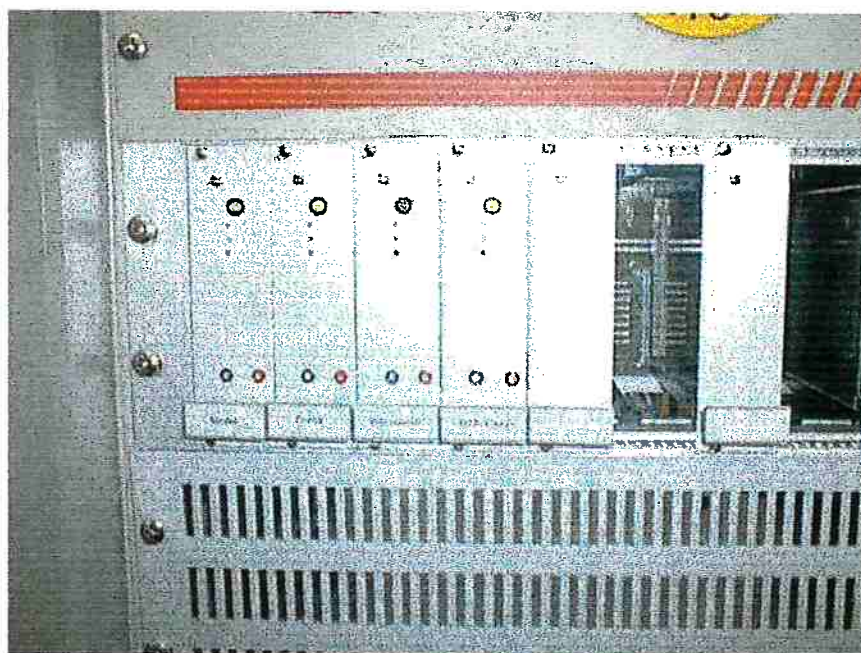


Fig 9: Dilatometer

Também no painel de controle, antes dos ensaios, devemos tomar cuidado com a escala do extensômetro. Isto é visualizado na janela da tela de controle onde estará localizado o valor adquirido do extensômetro especificado. Abaixo deste valor há uma escala com um traço vermelho que

indica em que posição está o extensômetro. No início dos ensaios, o traço vermelho deve estar aproximadamente na região central da escala.

No início de cada ensaio, após vácuo, deve-se zerar o dilatômetro, pressionando o botão no painel de controle, ao lado da configuração do dilatômetro.

Para ensaios a altas temperaturas (em torno de 1100°C), recomenda-se não deixar por mais de 5 minutos.

O dilatômetro se apoia no corpo de prova com a parte frontal e no suporte com a saída do cabo de conexão conforme a figura abaixo.

A medida da dilatação é realizada pelo movimento da barra móvel, este movimento é captado pelo transdutor que por sua vez transmite os dados ao computador.

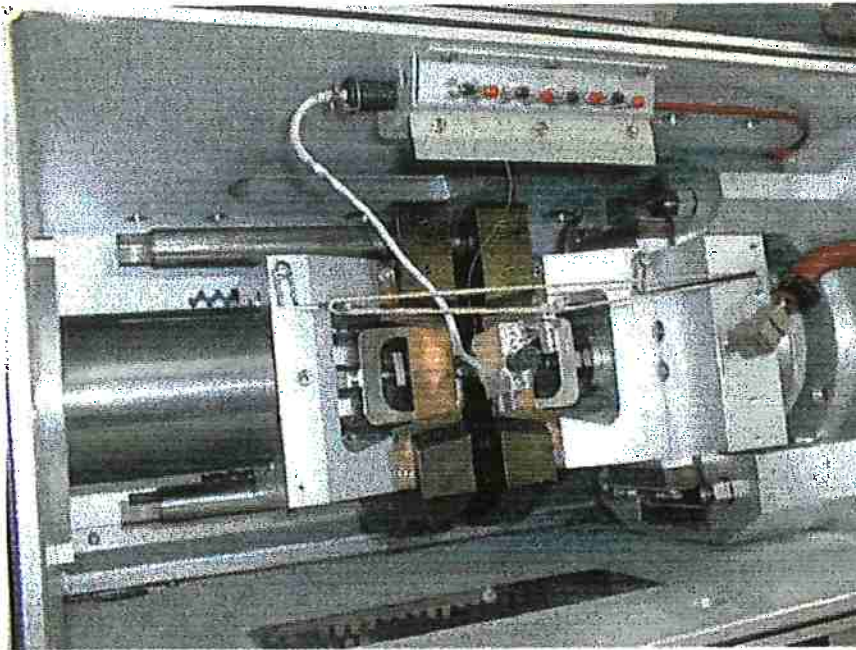


Fig 10: Posicionamento do dilatômetro

Na colocação da amostra na câmara de vácuo deve-se ter cuidado para que a amostra esteja bem presa e que seja mínima a força aplicada sobre a amostra, para que não haja distorções na leitura da dilatação.

Para não termos influências externas (Forças), na amostra o interessante é utilizarmos a configuração de baixa força, mas esta configuração tem algumas limitações, como taxa de aquecimento/resfriamento e tempo de realização do ensaio.

Na colocação do dilatômetro deve-se ter o cuidado de posicioná-lo na região central da amostra e que ele fique fixo a amostra para não ocorrer um deslocamento.

Na colocação do dilatômetro deve-se ter o cuidado de posicioná-lo na região central da amostra e que ele fique fixo a amostra para não ocorrer um deslocamento.

Utiliza-se vácuo na câmara, para evitar formação de carepa, que pode ocasionar em erro na leitura da temperatura, como na leitura da dilatação.

Para determinação da linha A_{c3} devemos subir a temperatura a uma taxa entre 1,5 a 3 °C.

Quando o ensaio requerer um tempo longo, acima de 1 hora, devemos utilizar uma frequência de aquisição de dados menor que 5 Hz.

Quando desejarmos construir um diagrama de equilíbrio devemos ter cuidado em adquirir o "Ptemp", pois ele auxiliará na montagem do diagrama.

6. Construção dos Diagramas CCT

6.1 Determinação das curvas A_{c1} e A_{c3}

Primeiramente realizou-se testes para determinação das temperaturas A_{c1} e A_{c3} . Com estas temperaturas, define-se o seguinte ciclo: aquecimento da amostra 100°C acima da temperatura A_{c3} , a uma taxa de 20°C/s, permanência por 1 minuto na temperatura, para homogeneização, em seguida resfria-se com uma taxa de resfriamento constante até a

temperatura ambiente. Repete-se o ciclo para diversas taxas de resfriamento.

Os ciclos são apresentados na figura 11.

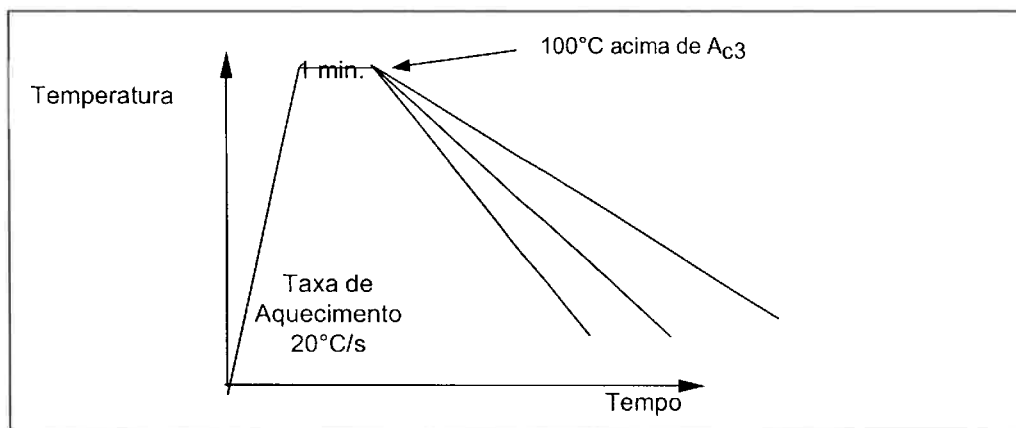


Fig11: Representação do ciclo realizado no teste

As taxas de resfriamento destes testes foram compreendida entre 0,10°C/s e 60°C/s.

Em cada ciclo foram adquiridos parâmetros de dilatométrica, que foram utilizados na construção do diagrama CCT, também foram realizadas análise de microestrutura e dureza em cada corpo de prova ensaiado.

6.2 Método para construção dos diagramas CCT

O software calcula a 2ª derivada da curva de dilatação vs. temperatura e os pontos onde ocorrem inflexão na curva da derivada são os pontos onde ocorrem as mudanças microestruturais. Este modo é o de mais fácil visualização das alterações microestruturais.

Uma amostra de análise pelo método da derivada é apresentada na figura 12.

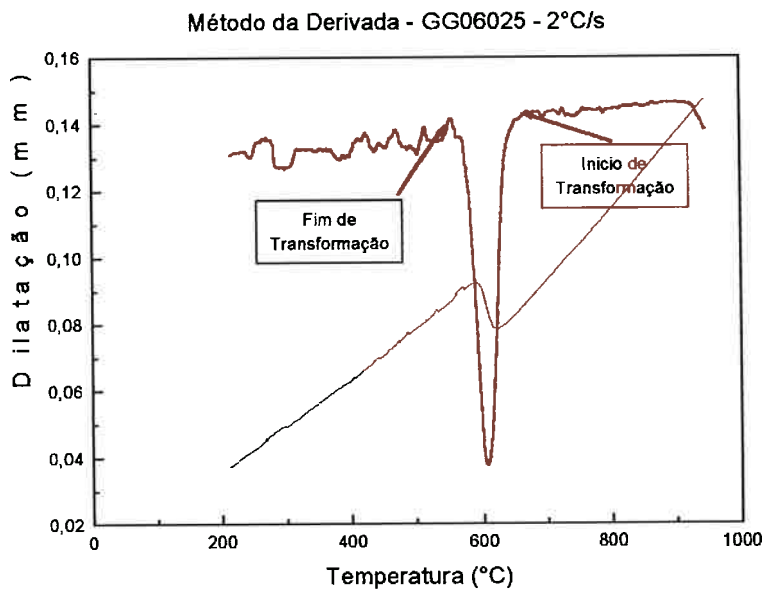


Fig12: Método da derivada para determinação de temperaturas de transformação.

6.2.2 Método da tangente:

Em determinados ensaios não é possível ser realizada a análise pelo método da derivada principalmente devido a ruídos, passa-se, então, a utilizar o método da tangente.

Para a análise neste método marca-se um ponto na curva de dilatação vs. temperatura, próximo ao ponto onde esteja ocorrendo a transformação e o software construirá uma reta tangente a este ponto, a mudança microestrutural estará iniciando/terminando quando a reta tangente coincidir com os valores da curva de dilatação vs. temperatura. Uma amostra de análise pelo método da tangente é apresentada na figura 13.

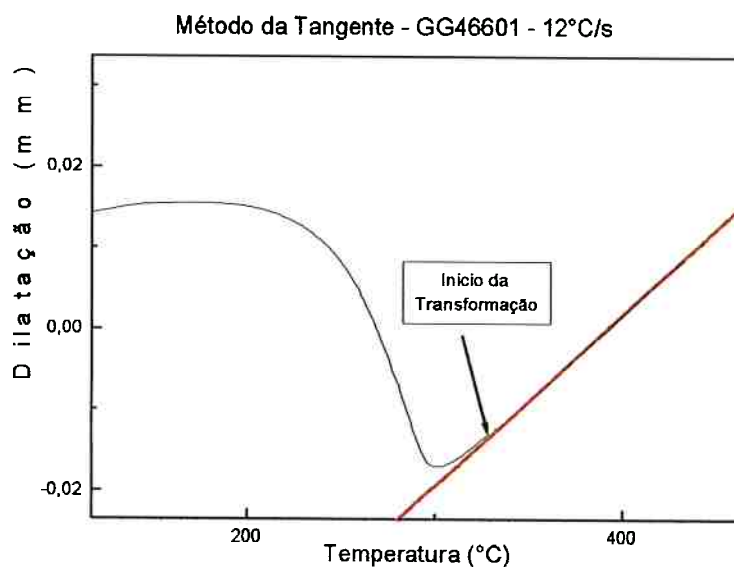


Fig 13: Método da tangente para determinação de temperaturas de transformação

7. Resultados

7.1 Diagramas CCT para os aços:

7.1 Diagramas CCT para os aços:

Nas figuras 14 a 18 são apresentados os diagramas CCT construídos para os cinco aços já citados onde foram utilizados os dois métodos de análise (derivada e tangente).

Também estão indicados, no diagrama, os valores de dureza obtidos em cada uma das taxas de resfriamento.

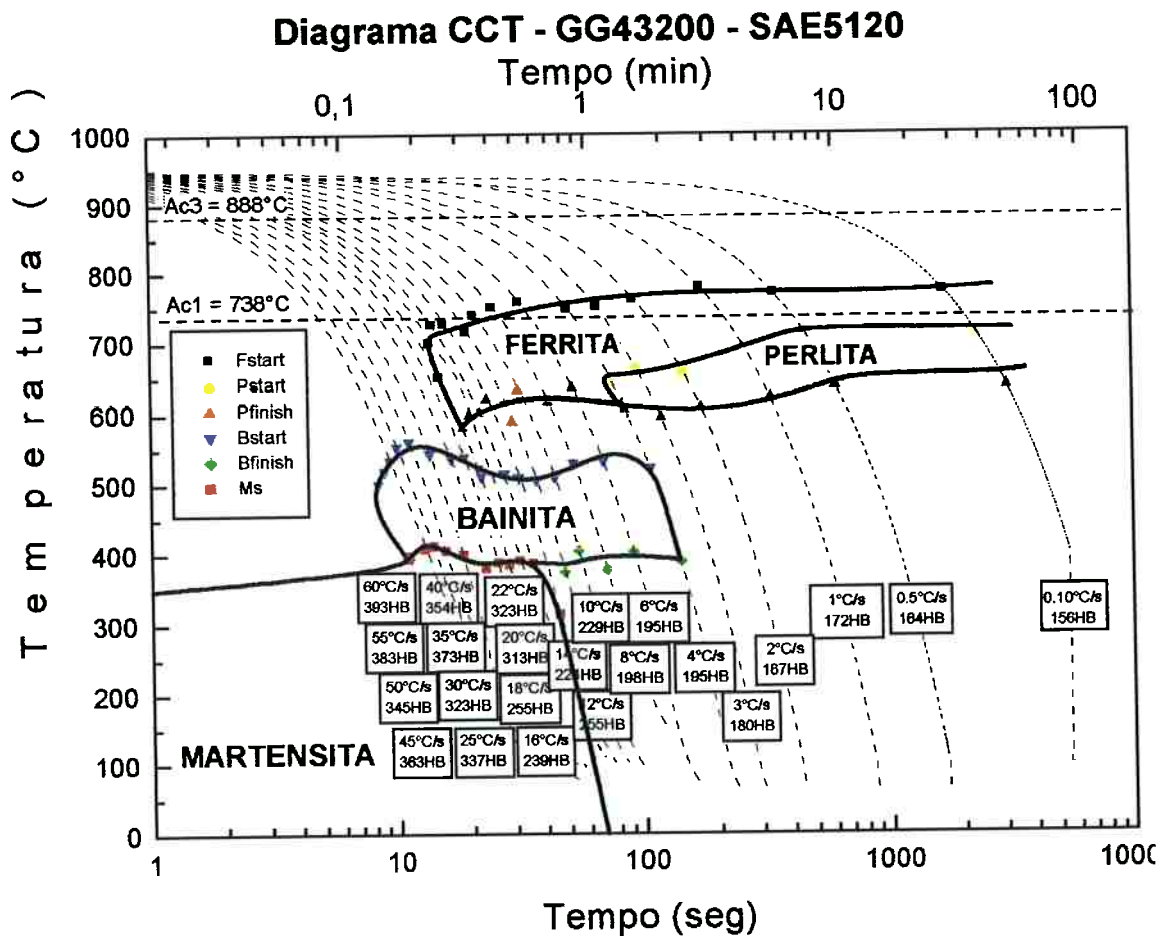


Figura 14: Diagrama CCT para o aço GG43200.

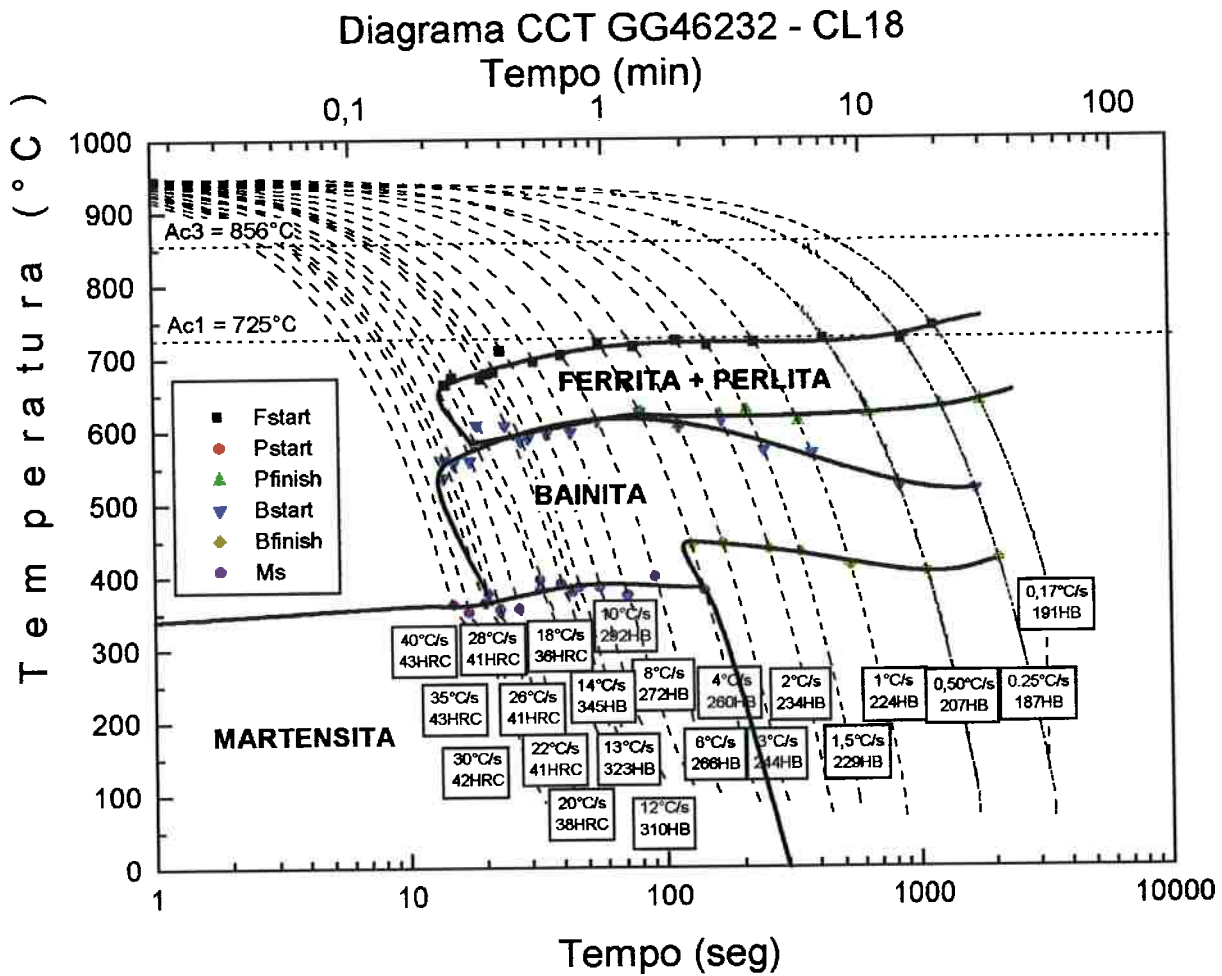


Figura 15: Diagrama CCT para o aço GG46232.

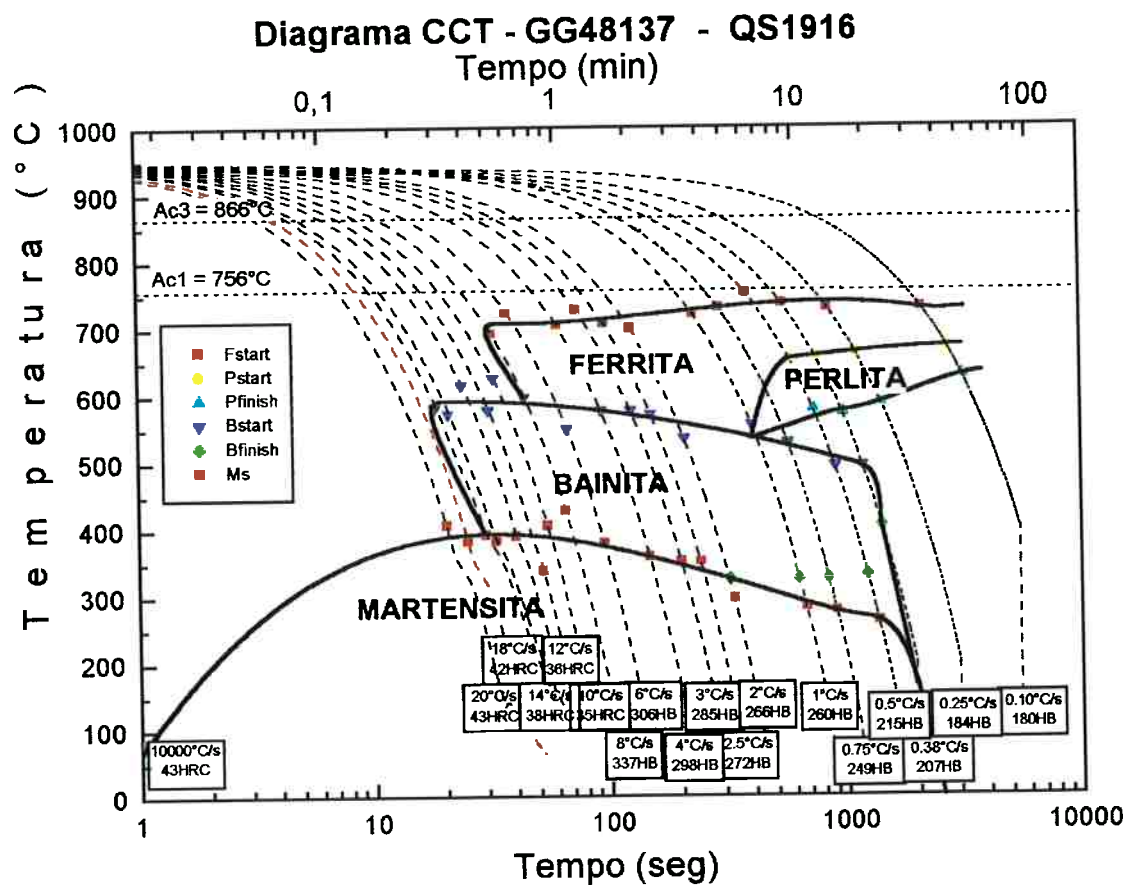


Figura 16: Diagrama CCT para o aço GG48137.

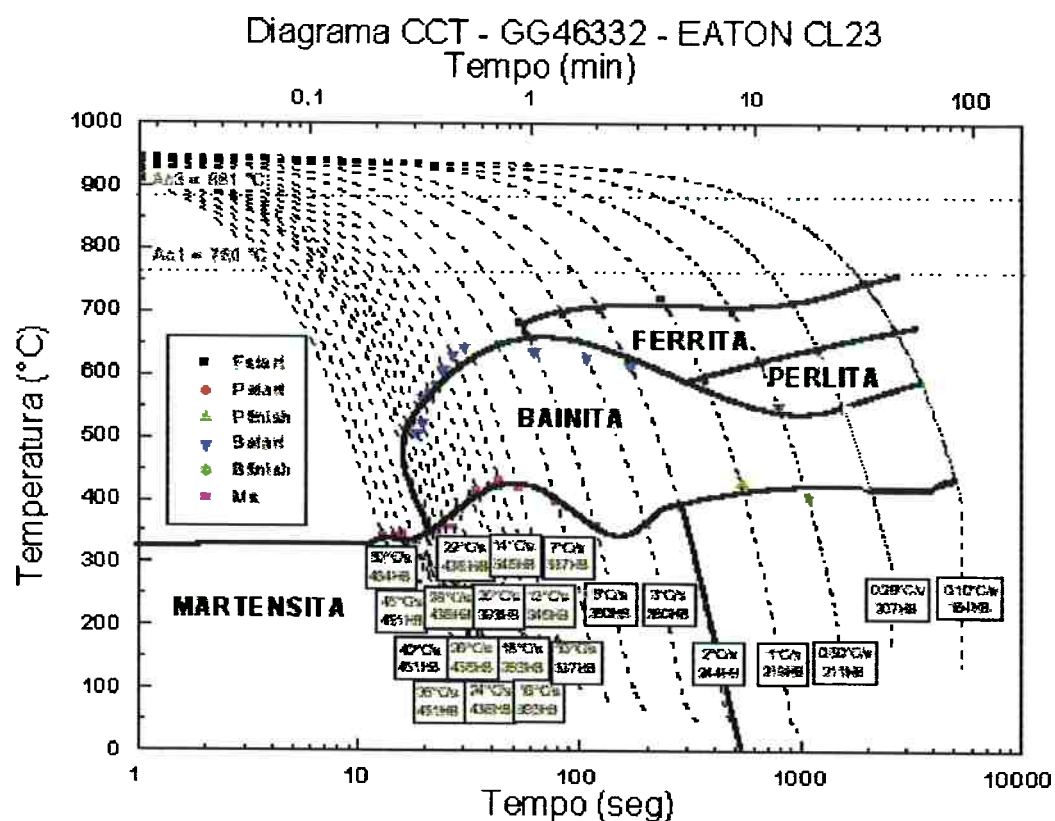


Figura 17: Diagrama CCT para o aço GG46332

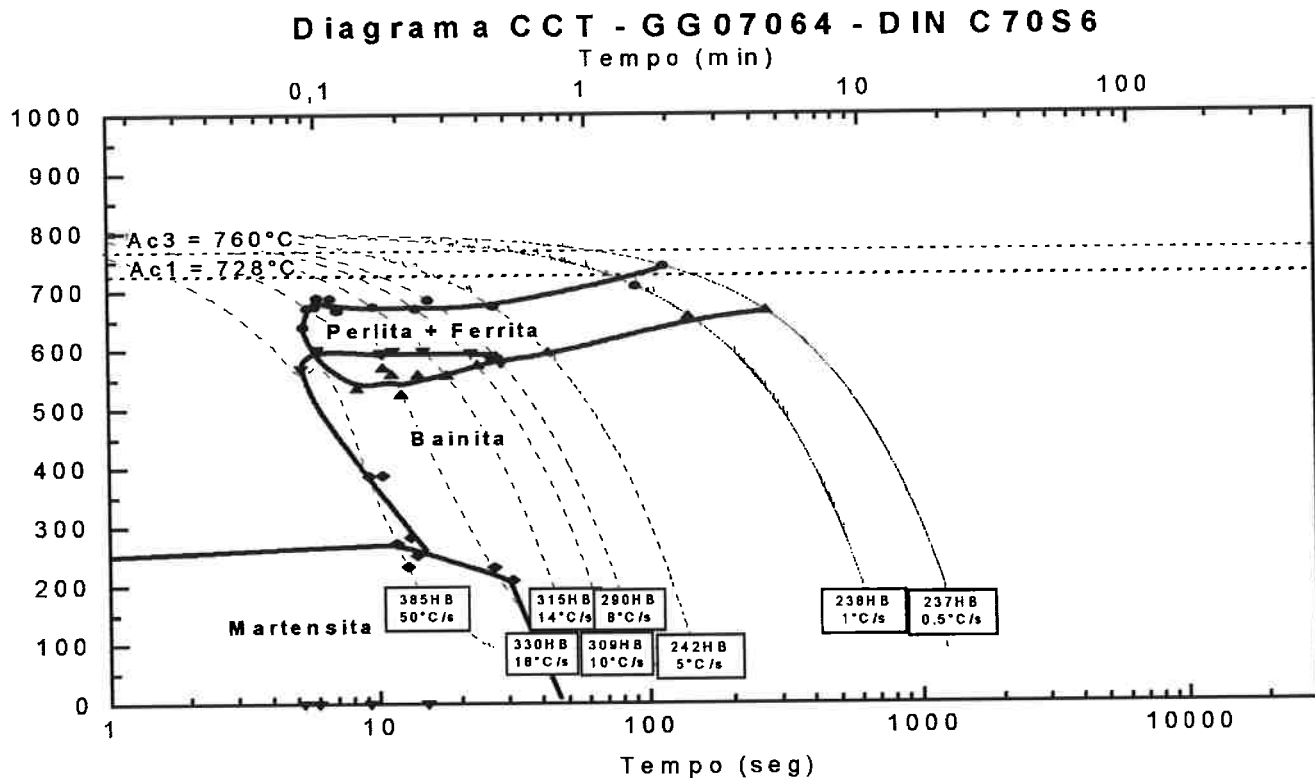


Figura 18: Diagrama CCT para o aço GG46332

8. Escolha do aço a ser modificado

A escolha do aço a ser modificado para a criação de uma nova qualidade foi feita analisando-se as cinco curvas CCT mostradas anteriormente. O aço escolhido, analisando-se a curva CCT, deveria ter a bainita deslocada para a direita a fim de que uma curva de resfriamento contínuo "cortasse" somente os campos da ferrita e da perlita, (a adição de elementos de liga vai deslocar com maior intensidade a curva da perlita e ferrita, mas este fato não irá interferir na escolha do aço) evitando a bainita e a martensita, na dureza mencionada de 195 a 225 HRC. Outro fator analisado foi à taxa de resfriamento, deu-se prioridade a taxas de resfriamento maiores nas curvas para o deslocamento da curva CCT. A análise de cada curva de resfriamento contínuo segue a seguir:

- O aço GG 48137 (Din 16MnCr5 mod); Mostrou-se inadequado, pois o deslocamento da região da bainita para a esquerda, poderia passar pela região da martensita, gerando uma microestrutura com agulhas de martensita.
- O aço GG 07064 (Din C70S6); Mostrou-se inadequado, pois não apresenta uma região definida de bainita para ser deslocada, a curva de resfriamento contínuo sempre cortaria uma região de bainita e a estrutura final apresentaria bainita com consequente dureza elevada, além de não haver separação distinta entre a curva da perlita e da bainita, fato este devido a falta de

- O aço GG 46232 (CL18); Mostrou-se inadequado, como o aço anterior, não apresentando uma região definida de bainita e sim uma faixa que se situa abaixo da perlita e ferrita.
- O aço GG 46332 (CL23); Mostrou-se, como os dois aços acima, inadequado, pois não tem uma região de bainita definida, sendo impossível seu deslocamento para a esquerda.
- O aço GG 43200 (SAE 5120); foi o aço que apresentou uma região de bainita ideal para ser deslocada para a esquerda, além de apresentar uma menor temperabilidade que a dos quatro aços antes apresentados. Esta menor temperabilidade facilita a retirada do tratamento térmico, pois se pode alcançar as propriedades mecânicas e metalúrgicas, exigidas na engrenagem, com taxas de resfriamento mais rápidas.

Portanto o aço a ser modificado será o GG 43200 (SAE 5120).

9. Determinação da composição química do aço

O aço a ser modificado possui a sua composição química conforme a tabela a seguir:

GG 43200 SAE 5120										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu
0,17	0,15	0,70	-	-	0,70	-	-	-	0,025	0,10
0,22	0,35	0,90	0,030	0,040	0,90	0,25	0,60	0,05	0,030	0,25

Tabela 2: Composição química do aço selecionado

Como mencionado anteriormente, o objetivo é o deslocamento da região de bainita para a esquerda, então os elementos que tiveram suas faixas de composição química alterados foram os não formadores de carbonetos e os fortes formadores de carbonetos⁽²⁾.

- Entre os não formadores de carbonetos foi alterada a faixa do silício, baixando a faixa deste elemento para no máximo 0,12% ,deslocando a curva para a esquerda ⁽¹⁾.
- Entre os elementos fortemente formadores de carbonetos foi aumentada a faixa de cromo do aço para o intervalo de 0,80-1,00%, pois este elemento forma um carboneto, (Cr_{23}C_6), que desloca as regiões perlíticas e bainitas para a esquerda ⁽²⁾ . Foi adicionado também ao aço um elemento de liga novo, o titânio, que é um grande desoxidante e formador de carbonetos e quando o titânio está dissolvido na austenita, ele aumenta a sua temperabilidade, porém na forma de carboneto, ele tem o efeito de reduzir a temperabilidade do aço, deslocando a região bainítica para a esquerda⁽²⁾. A faixa de composição química deste elemento é 0,005 a 0,015%.
- Para o novo aço, foi alterada também a faixa de carbono, já que foram adicionados mais elementos formadores de carbonetos, foi fornecido mais carbono para que esta reação pudesse acontecer, logo a faixa de carbono do aço foi aumentada para 0,23-0,25%

Segue a seguir a tabela de composição química completa para esta nova qualidade que recebeu a designação GG 43332 ou SAE 5125 modificado.

GG 43332 SAE 5125 modificado													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	V	Al	Cu	N	H
0,23	-	0,60	-	-	0,80	-	-	0,005	-	0,025	0,10	0,010	-
0,25	0,12	0,90	0,030	0,040	1,00	0,20	0,60	0,015	0,05	0,040	0,25	0,014	2,500

Tabela 3: composição química do Novo aço GG 43332

10. Curva CCT para o aço selecionado

11. Análise dos resultados da curva CCT GG 43332 - 5125 modificado

Os resultados alcançados acima foram satisfatórios, a região de bainita foi deslocada para a esquerda, menor temperabilidade, atingindo uma região de dureza de 195 a 206 HB controlando o seu resfriamento com taxas próximas de 1°C/s atingindo somente a estrutura de perlita de forja.

Com base neste resultado foi enviado para forjamento aproximadamente 1 corrida deste aço (60 toneladas) para forjamento.

12. Resultados das peças forjadas

Foram forjadas diversas engrenagens para avaliação do novo aço, as taxas de resfriamento controlado utilizadas foram de 0.25 °C /s, 0.5 ° C/ s e 1 °C/s. segue a tabela com as amostras enviadas de volta do forjamento para análise na Gerdau Aços Finos Piratini.

Título: Uso de Diagramas de Resfriamento Controlado (CCT) para a retirada do tratamento térmico de uma engrenagem forjada a quente

Amostra	Taxa de resfriamento C/S	Microestrutura	Dureza (HB)
1	0,25	Ferrita e Perlita	166
2		Ferrita e Perlita	167
3		Ferrita e Perlita	170
4		Ferrita e Perlita	173
5		Ferrita e Perlita	164
6	0,5	Ferrita e Perlita	186
7		Ferrita e Perlita	195
8		Ferrita e Perlita	190
9		Ferrita e Perlita	193
10		Ferrita e Perlita	189
11	1	Ferrita e Perlita	204
12		Ferrita e Perlita	192
13		Ferrita e Perlita	209
14		Ferrita e Perlita	210
15		Ferrita e Perlita	195

Tabela 4: Resultado dos ensaios de forjamento

12.6 Microestruturas encontradas nas amostras

A seguir apresentamos as microestruturas encontradas nas amostras ensaiadas:

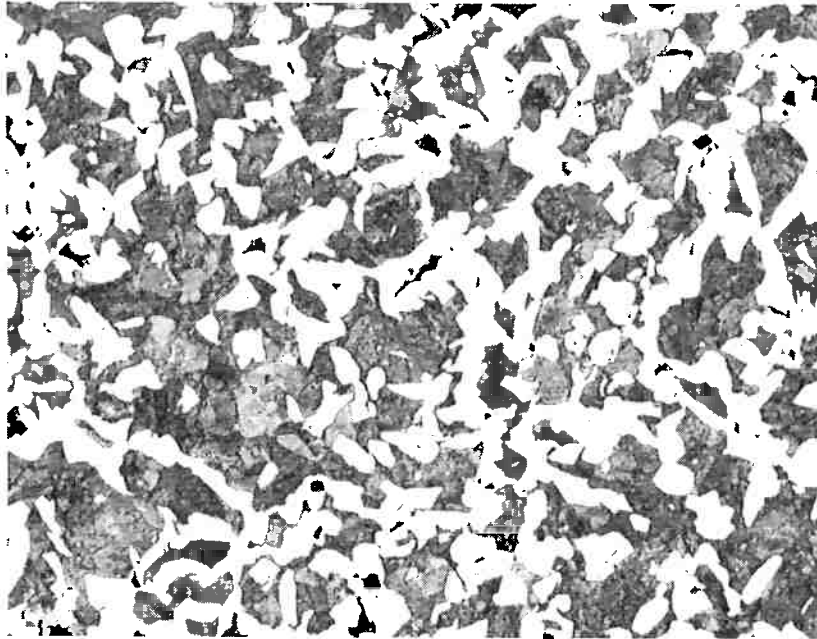


figura 20: Amostra 1 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

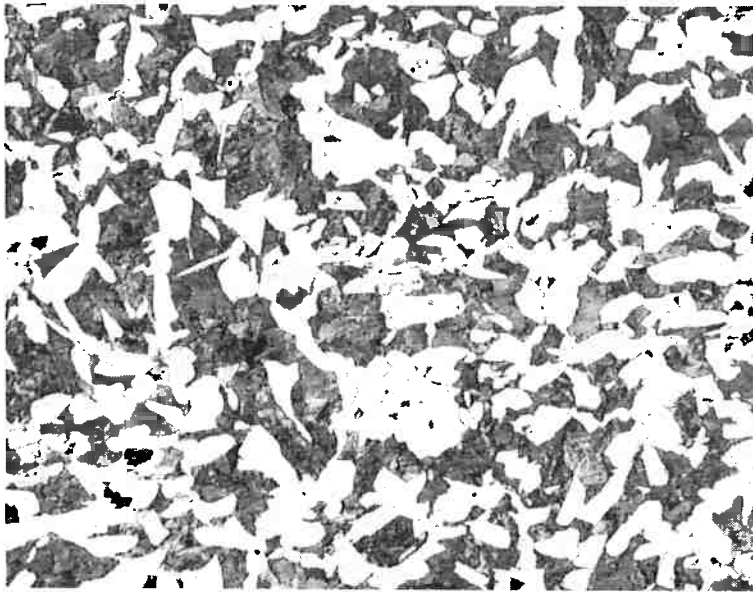


Figura 21: Amostra 2 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

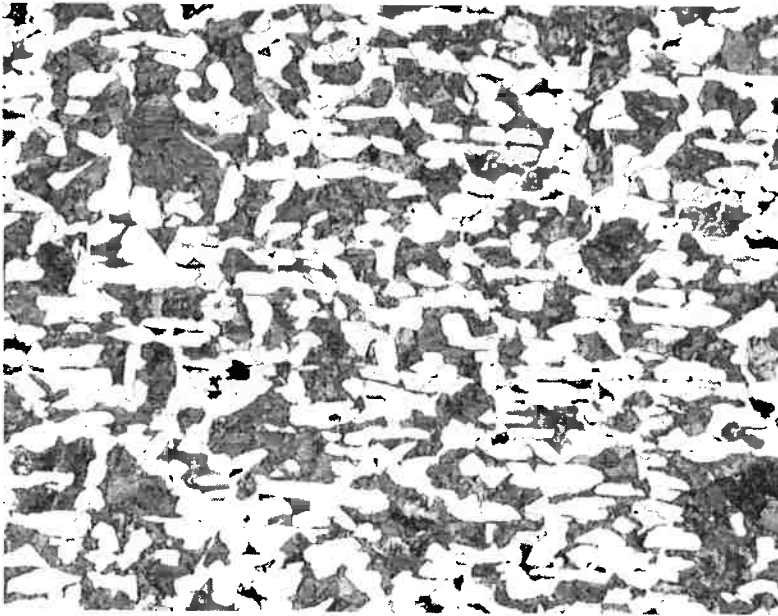


Figura 22: Amostra 3 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

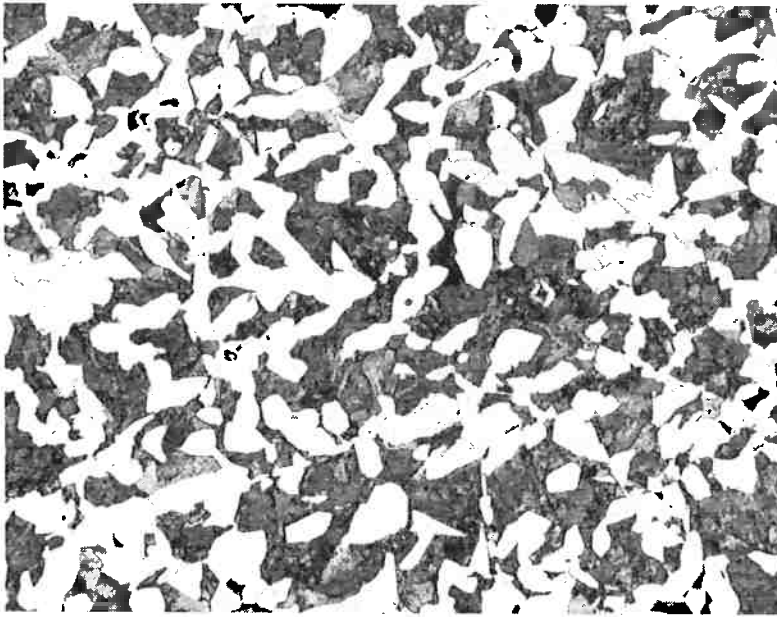


Figura 23: Amostra 4 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

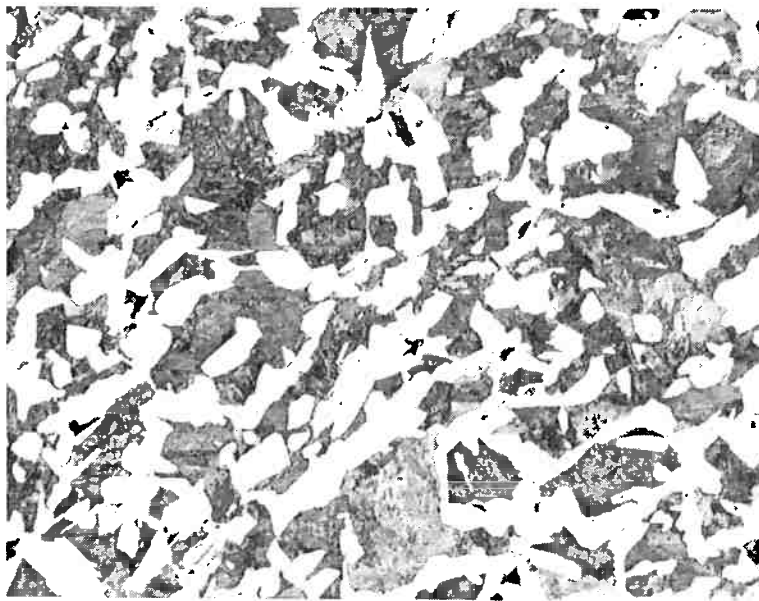


Figura 24: Amostra 5 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

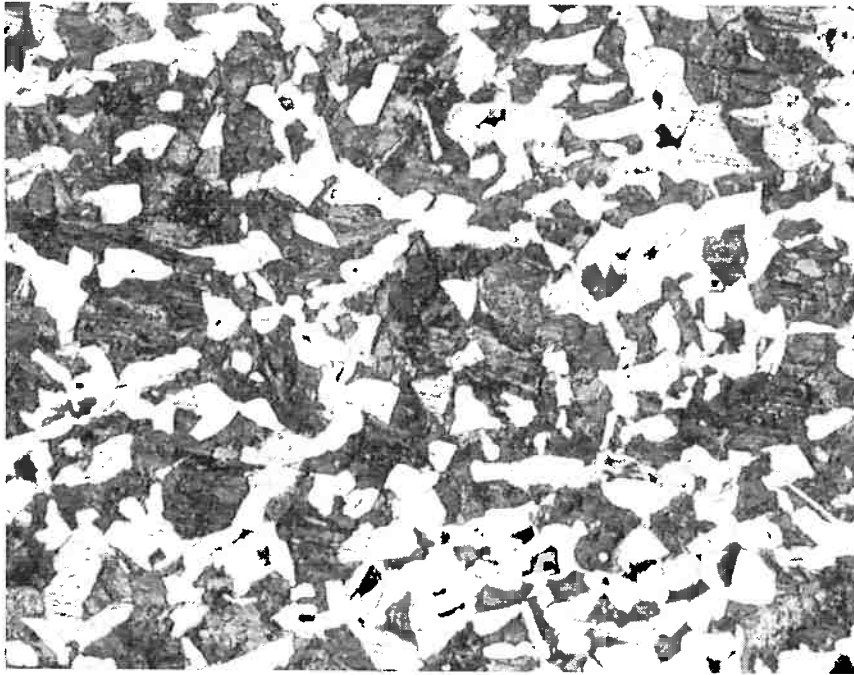


Figura 25: Amostra 6 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

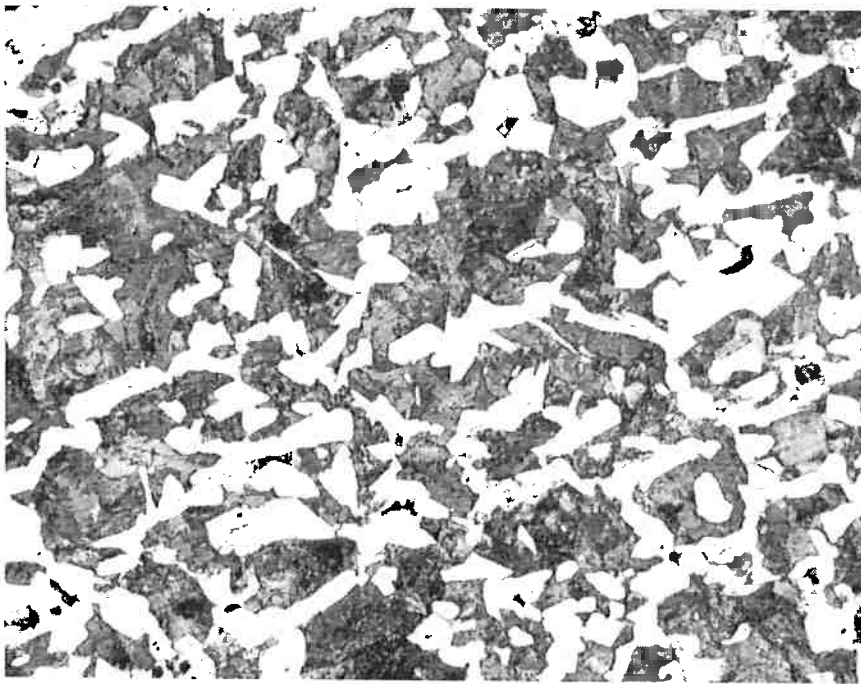


Figura 26: Amostra 7 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

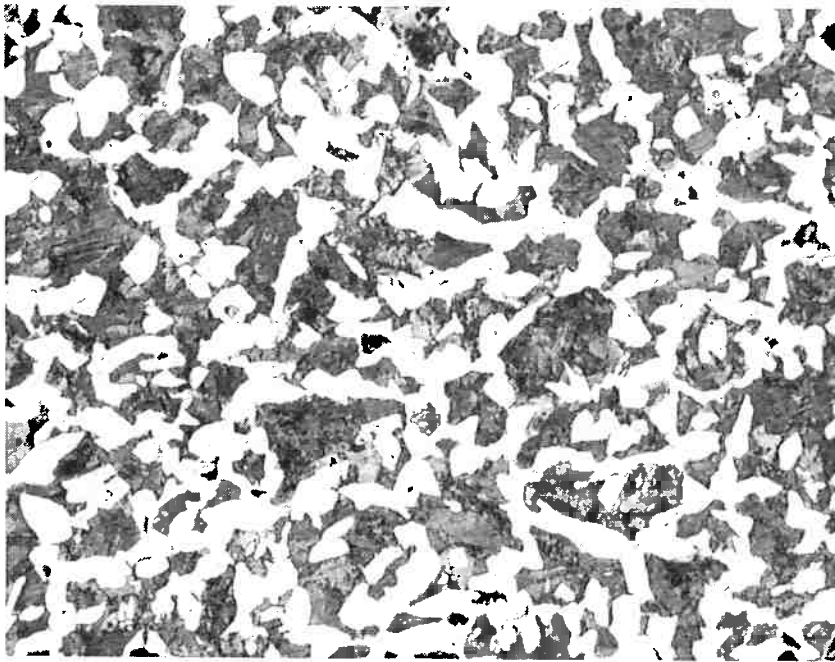


Figura 27: Amostra 8 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

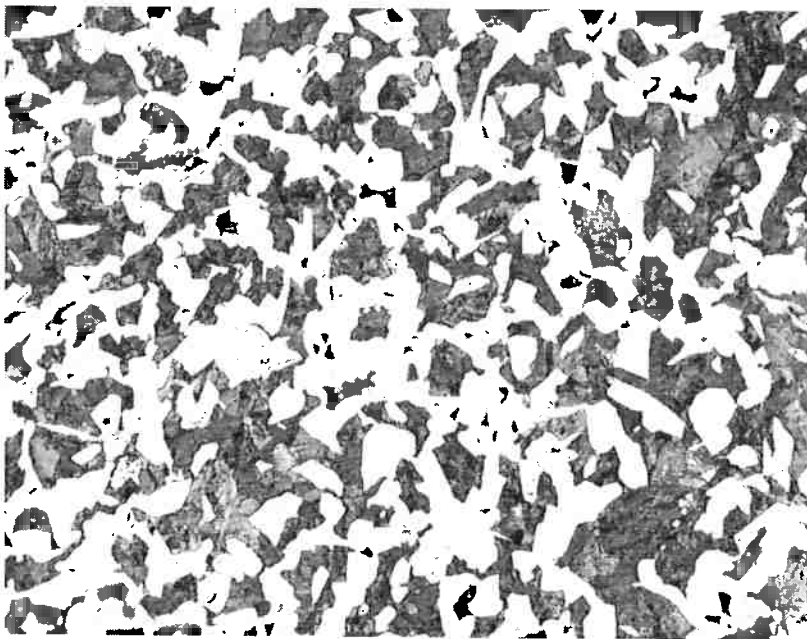


Figura 28: Amostra 9 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

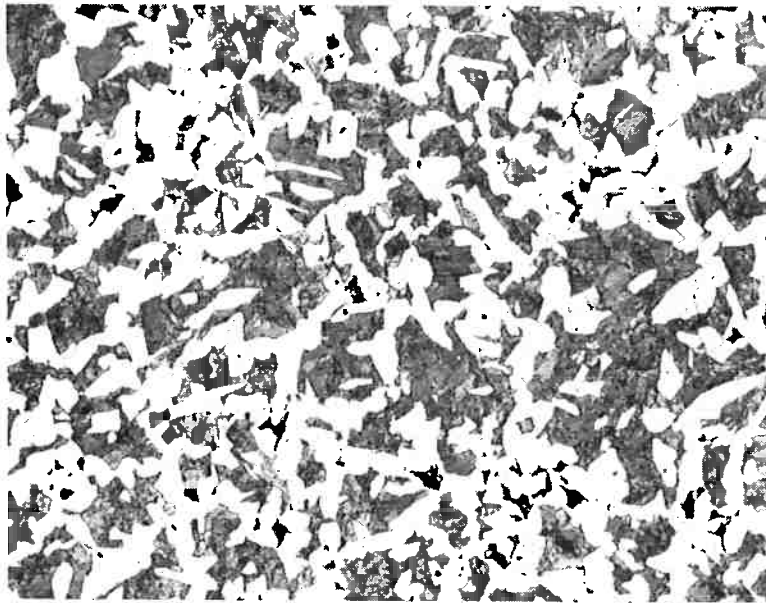


Figura 29: Amostra 10 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

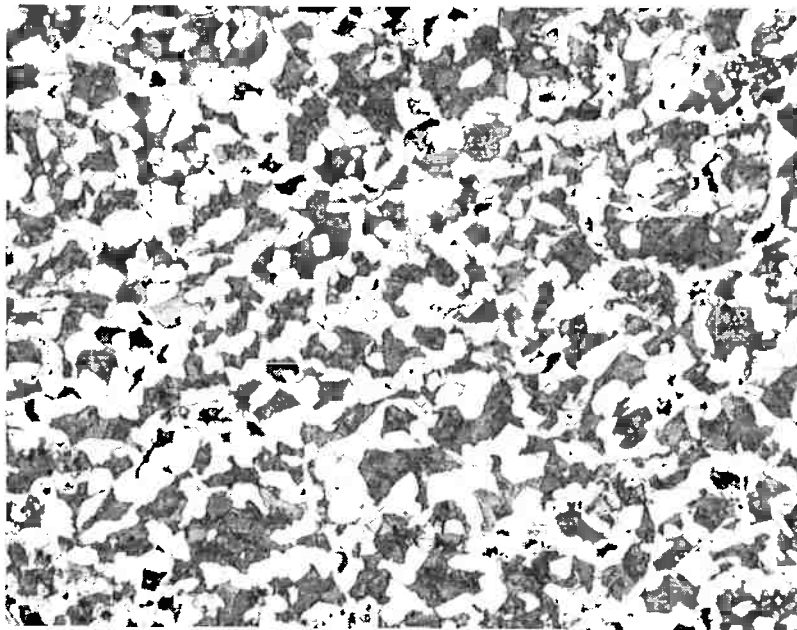


Figura 30: Amostra 11 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

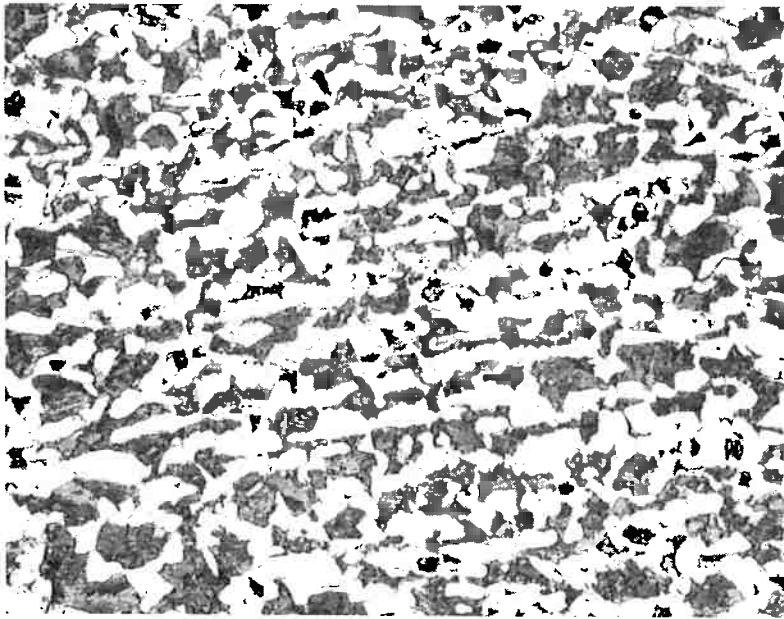


Figura 31: Amostra 12 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

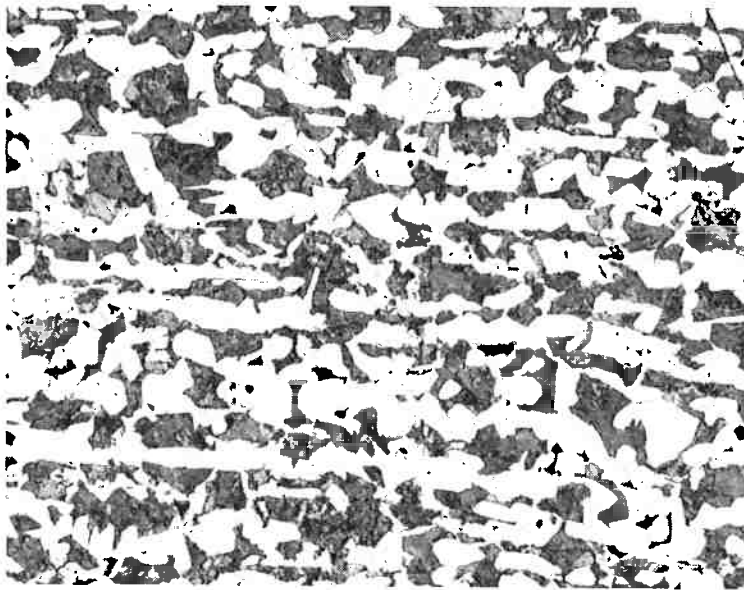


Figura 32: Amostra 13 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

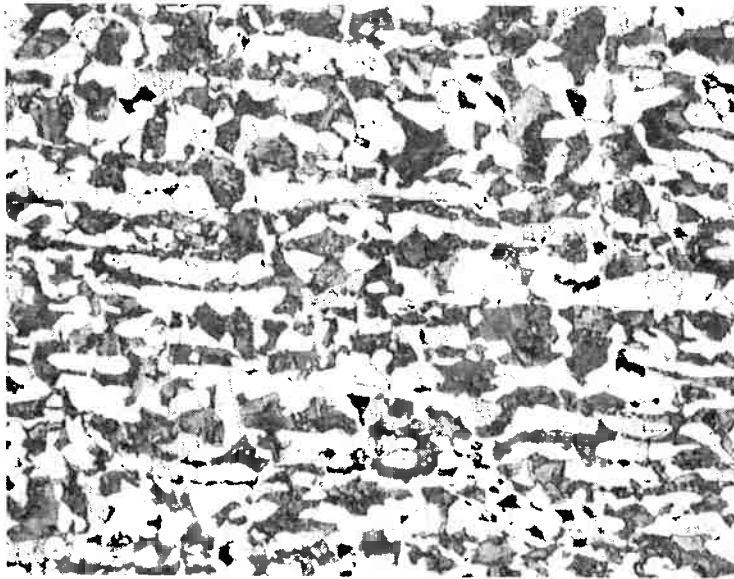


Figura 33: Amostra 14 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

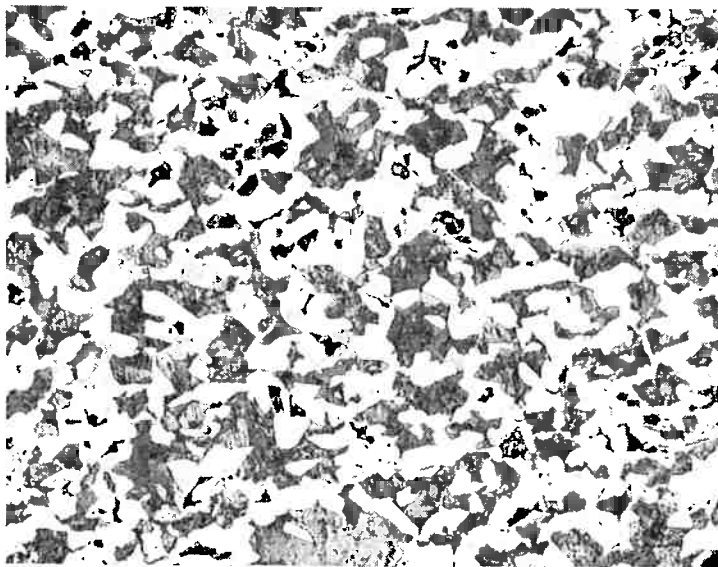


Figura 34: Amostra 15 microestrutura de Ferrita e Perlita aumento 150x

13. Conclusão

O uso do simulador termo mecânico Gleeble, para construção das curvas de resfriamento controlado CCT mostrou-se um método eficaz para análises da estrutura final das peças forjadas com seu resfriamento controlado.

A adição dos elementos de liga no aço selecionado seguiu o que a teoria mencionava, mas a dureza máxima alcançada sem a formação de bainita, foi de 206HB, quando a Krupp, deixava a dureza atingir níveis de 225HB.

As taxas de resfriamento utilizadas no ensaio não ultrapassaram o patamar de 1°C/s pois não era interessante para a empresa um resfriamento controlado com taxas mais altas, por motivos de falta de equipamento em escala industrial, para efetuar este resfriamento em taxas mais altas.

O grande problema da estrutura bainítica é sua dureza elevada, o que durante o forjamento da engrenagem ocasiona as chamadas “trincas de topo” no material, fato este que foi inteiramente resolvido com a microestrutura de perlita e ferrita obtida pelo resfriamento controlado.

14. Bibliografia

- (1) Metalografia dos Aços- Tschipptschin, Andre Paulo ABM,1988
- (2) R.W.K Honeycombe; Aços Microestruturas e propriedades, 1981
5ª edição Edward Arnold Ltda p 82-103.
- (3) Andre luiz da Costa e Silva et al. Aços e Ligas Especiais, 1988 2^a edição Sumaré, Eletrometal, metais especiais p 48 –65.
- (4) Sergio Augusto de Souza, Composição química dos Aços, 1989
editora Edgard Blucher 3 edição p 24-49.
- (5) Zhuyao Zhang, An Atlas of Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagrams Applicable to low Carbon Low Alloy Weld Metals, 1995 The institute of materials 1 edição p 3-10.
- (6) H.K.D.H Bradeshia Bainite in Steels,1992 The institute of materials_p 31 – 39.
- (7) Mehl,RF e Hagel W.C The austenite- perlite reaction. Prog metal physics ed B chalmers e R.King, Pergamon Press, 1956