

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

**Otimização do ciclo de tratamento térmico visando o aumento da
vida útil em serviço do pinhão da máquina 120H da
CATERPILLAR**

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

GABRIEL FILIPE B.M.G. CARDOSO

PORTO ALEGRE, JULHO DE 2000

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial a Osmar dos Santos (Chefe da Produção da BRASIMET) que ajudou-me muito com seus conhecimentos em tratamento térmico e ao amigo Eduardo Tentardini, fundamental contribuinte para a execução desta obra.

RESUMO

Atualmente, os aços-carbono constituem um importante grupo de materiais usados na Engenharia e Indústria. Esses aços, em sua ampla maioria dos casos, são suficientes para atender as aplicações industriais na prática.

Neste trabalho realizou-se um estudo com o aço carbono SAE 1045, em um material utilizado na máquina de terraplanagem da CATERPILLAR na tentativa de aumentar a vida útil em serviço tratando termicamente. Para isso, realizaram-se ensaios de dureza, microdureza, metalografia, e temperabilidade com o material fornecido pela empresa, antes e depois do tratamento feito pela Empresa BRASIMET.

Através dos resultados obtidos, pode-se verificar que o material tratado pela Empresa BRASIMET apresentou um tempo de vida útil muito superior ao não tratado pela mesma empresa. Acarretando assim um desempenho superior e com isso melhorando a performance e desempenho do material.

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	6
2	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	8
2.1	<u>ACOS CARBONO</u>	8
2.1.1	<u>Diagrama Fe-C</u>	8
2.1.2	<u>Sistemas de Classificação de Aços</u>	16
2.1.3	<u>Impurezas dos aços- carbono</u>	17
2.1.4	<u>Propriedades mecânicas dos aços-carbono</u>	19
2.1.5	<u>Importância e limitações dos aços-carbono</u>	20
2.1.6	<u>Temperabilidade dos aços-carbono</u>	22
2.2	<u>PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO</u>	25
2.2.1	<u>Normalização</u>	25
2.2.2	<u>Cementação</u>	26
2.2.3	<u>Martêmpera</u>	30

2.2.4	<u>Revenido</u>	30
3	<u>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</u>	33
3.1	<u>MATERIAL</u>	33
3.2	<u>AMOSTRAS UTILIZADAS</u>	33
3.3	<u>ANÁLISE QUÍMICA</u>	34
3.4	<u>EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO</u>	34
3.5	<u>PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS</u>	35
3.6	<u>TÉCNICAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE</u>	35
3.6.1	<u>Medições de dureza</u>	35
3.6.2	<u>Análise Metalográfica</u>	36
3.6.3	<u>Temperabilidade Gráficos de Lamont</u>	36
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	37
4.1	<u>ANÁLISE QUÍMICA</u>	37
4.2	<u>MEDIÇÕES DE DUREZA</u>	38
4.3	<u>ANÁLISE METALOGRAFICA</u>	40
4.4	<u>TEMPERABILIDADE DO MATERIAL</u>	43
5	<u>CONCLUSÕES</u>	45
6	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	46
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	47
	<u>ANEXO 1</u>	49
	<u>ANEXO 2</u>	51

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho refere-se a análise de um material (pinhão) Anexo 2, utilizado nas máquinas da CATERPILLAR 120H, Anexo1. O objetivo desse material é a movimentação da lâmina de trabalho para a remoção de material. Uma de suas principais aplicações é o nivelamento de estradas.

A Empresa que produz essa peça abastece somente o mercado de reposição, dessa forma, as especificações com respeito ao material, resistência mecânica e tratamento térmico, entre outros, não está de acordo com as especificações exigidas pela CATERPILLAR. Através de dados levantados pela Empresa, o pinhão (material abordado) tem uma duração entre 10 e 12 meses quando é de revenda autorizada, ou seja, material com as especificações atendidas pela CATERPILLAR. O material vendido por essa empresa, que não tem as normas exigidas, tinha uma durabilidade de aproximadamente 40 dias, ou seja, um tempo de vida muito curto.

A partir de um contato com a Empresa BRASIMET (Empresa de tratamento térmico), houve uma preocupação por parte do cliente de aumentar a vida útil do material,

tratando a peça termicamente. Dessa forma o cliente poderia dar uma maior garantia de vida útil do material.

Como a Empresa que solicitou os serviços, é de pequeno porte, não havia por parte dela interesse em qualquer tipo de mudança de material, pois a peça para ganhar o mercado de reposição tem um custo muito baixo. Dessa forma, a Engenharia de Produto da BRASIMET, ciente das exigências e condições feitas pelo cliente, desenvolveu um ciclo de tratamento térmico com o objetivo de atingir uma máxima dureza superficial com um núcleo macio (mole) para que a peça agüentasse ao máximo os esforços mecânicos solicitados.

Para isso, a Engenharia Produto da BRASIMET levantou, através do cliente, materiais que sofreram colapso total para avaliar a possível causa do rompimento. O cliente antes de tratar com a BRASIMET havia feito tratamento térmico em outra Empresa.

Através das análises efetuadas, verificou-se que o material não tratado pela BRASIMET, ou seja não tinha sofrido tratamento térmico ou sofreram somente um processo de recozimento, justificando assim seu baixo desempenho. Com o tratamento térmico feito pela BRASIMET (objetivando as características já mencionadas) a peça acabou tendo uma vida útil de 5 meses, dessa forma aumentando consideravelmente a vida útil do material. Dessa forma, o cliente pode dar uma garantia de vida útil do material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Carbono

2.1.1 Diagrama Fe-C

As transformações em uma liga de Fe-C são influenciadas basicamente pela temperatura e pelo teor de carbono. Se considerarmos apenas estes dois fatores, poderemos montar um mapa das transformações que irão ocorrer, o qual será chamado de diagrama de equilíbrio da liga Fe-C. Nesta representação podemos ver as fases que estarão presentes para cada temperatura e composição (também os pontos que são fundamentais para a composição das transformações [1]).

O diagrama Fe-C utilizado na prática na realidade é um falso diagrama de equilíbrio, isto é, ele representa o equilíbrio metaestável entre o ferro e um carboneto de ferro

chamado cementita que tem fórmula mais estável da liga carbono seria ferro e grafita, mas como a grafita pode levar até mesmo anos para se formar. Na Figura 1, o diagrama estável ferro-grafita está representado pelas linhas tracejadas e o diagrama metaestável ferro-cementita está representado pelas linhas contínuas [1].

Observando-se o diagrama, nota-se que este apresenta vários pontos a serem destacados. O primeiro deles é o que corresponde a uma composição de 2,11% de carbono a 1148° . Este ponto representa uma fronteira entre as ligas de Fe-C que são caracterizadas como aços e as ligas que são caracterizadas como Ferro-Fundido. A escolha deste ponto deve-se ao fato que, quando resfriamos um aço desde o estado líquido, este sempre passará por uma faixa de temperatura em que a sua microestrutura será composta de uma única fase chamada austenita, o que não acontece para os ferros fundidos que possuem teores de carbono acima deste valor [1].

A austenita, também chamada fase γ , é uma fase derivada do ferro γ que como se sabe é formado por uma estrutura cúbica de fases centradas. Com o carbono forma-se uma solução sólida intersticial em que é mantida a estrutura cristalina original do ferro γ [1].

Para temperaturas inferiores, o fato de o ferro γ passar para ferro α produz o aparecimento de uma nova fase chamada fase α ou ferrita. A ferrita também é uma solução sólida intersticial de ferro e carbono e, a exemplo da fase γ , é mantida a estrutura cristalina cúbica de corpo centrado do ferro α [1].

Como pode ser observado no diagrama, a solubilidade do carbono não é fixa para estas fases, podendo variar com a temperatura. Por isso, são dados nomes especiais a alguns limites importantes desses campos de fases simples para facilitar o entendimento. São eles:

- A_1 : também chamado temperatura cutetoide, com um mínimo de temperatura para a austenita;
- A_3 : a fronteira de baixa temperatura da região austenística que contém baixo carbono, contendo as fronteiras de austenita e austenita + ferrita;
- A_{cm} : fronteira da parte correspondente ao alto carbono, contendo fases austenita + Fe_3C ;

Como existe um limite de solubilidade do carbono tanto na austenita quanto na ferrita, o excesso de carbono poderá propiciar a formação de uma terceira fase que é chamada de cementita. Isto acontece para teores de carbono maiores do que 0,77% acima de $727^{\circ}C$ e abaixo de $1148^{\circ}C$ e, para teores maiores do que 0,025% abaixo de $727^{\circ}C$. Desta maneira teremos no diafragma regiões em que o aço é monofásico e regiões em que é bifásico [1].

Quando tivermos outros elementos fazendo parte da composição de aço, o teor de carbono corresponde ao ponto eutetóide será deslocado mais para esquerda ou para a direita e a temperatura em que ocorre esta reação irá aumentar ou diminuir.

Esta é uma das influências dos elementos de liga dos aços que esta retratada na Figura 2.

2.1.1.1 Reação Martensítica e Bainítica

Se tomarmos um aço de composição eutetóide e o resfriarmos lentamente, haverá a formação de ferrita e de cementita a partir da austenita original. Sob condições de resfriamento lento ou moderado, os átomos podem difundir para fora da austenita. Os átomos de ferro podem, então, em um rearranjo em nível atômico, passar para uma estrutura cúbica de corpo centrado. Esta reação ocorre por um processo de nucleação e crescimento, com uma

intensa difusão de carbono no reticulado do ferro. Porém, através de um resfriamento rápido, não daremos tempo para a difusão do carbono, obrigando que ele se mantenha em solução. A medida que tivermos a austenita a uma temperatura menor que a eutetóide haverá uma força eletromotriz no sentido do ferro passar da estrutura CFC para a estrutura CCC, o excesso de carbono fará com que ocorra uma distorção no reticulado cristalino. A supersaturação de carbono fará com que o ferro passe a apresentar uma estrutura cristalina distorcida tetragonal de corpo centrado [1].

Esta distorção do reticulado devido à supersaturação de carbono faz com que o aço tenha aumentado substancialmente a sua resistência mecânica. O tratamento de resfriamento recebe o nome de estrutura tetragonal de corpo centrado, sendo esta a razão da dureza dessa estrutura, pois o reticulado cristalino sofre uma severa distorção [1].

A dureza alcançada pela estrutura martensítica irá depender diretamente do teor de carbono. Normalmente um aço para ser temperado deve apresentar um mínimo de 0,3% de carbono, sendo que uma dureza máxima já pode ser encontrada com 0,6% de carbono. Um valor mínimo de carbono é necessário exatamente para poder ocorrer a distorção do reticulado cristalino fazendo com que a estrutura passe para tetragonal de corpo centrado [1].

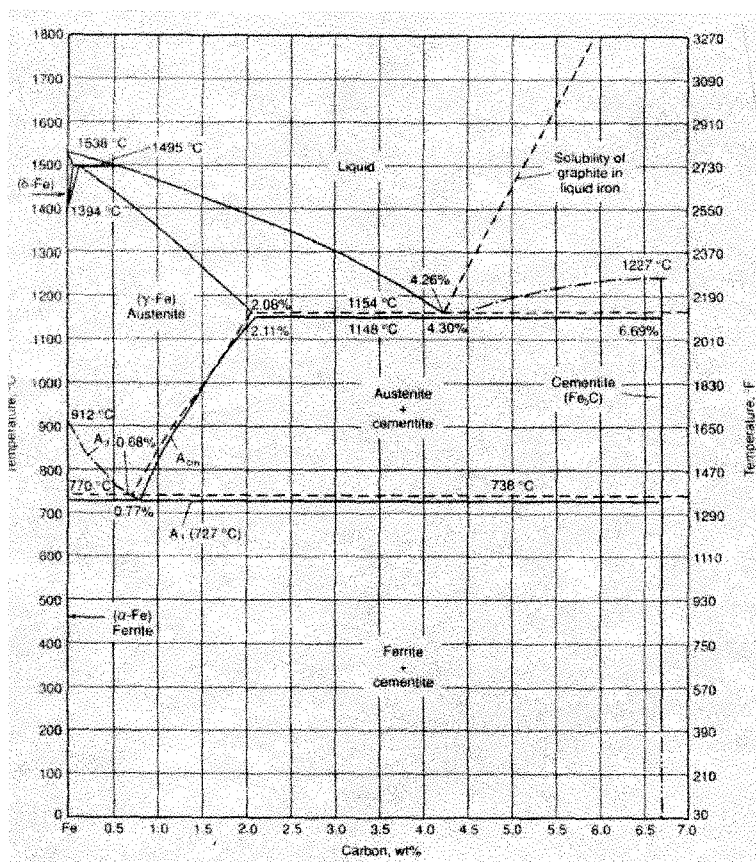


Figura 1: Diagrama de equilíbrio do Fe-C [2].

Tabela 1: Importância das fases metalúrgicas e microconstituintes [2].

Fase (microconstituente)	Estrutura Cristalina	Características
Ferrita (Fe α)	ccc	fase de equilíbrio estável (fase de baixa temperatura)
Ferrita δ (Fe δ)	ccc	fase de alta temperatura (fase de equilíbrio estável)
Austenita (ferro γ)	cfc	fase de equilíbrio estável a média temperatura
Cementita	ortorrômbica	fase dura meta estável
Grafita	hexagonal	fase estável de equilíbrio
Perlita		microconstituente meta estável (mistura lamelar de ferrita e cementita)
Martensita	tetragonal compacta	fase dura metaestável
Baianita		Microconstituente de fase dura metaestável

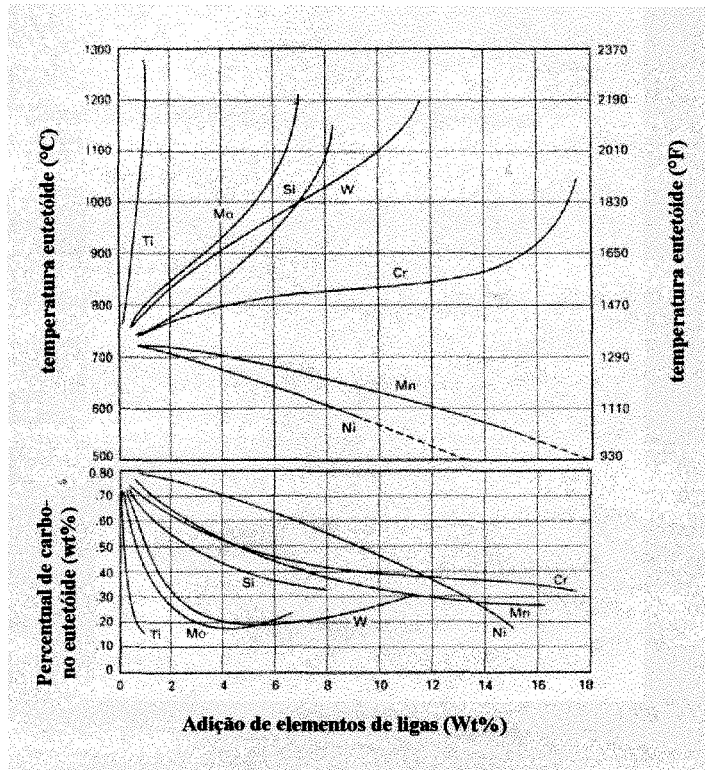


Figura 2: Influência dos elementos de liga [2].

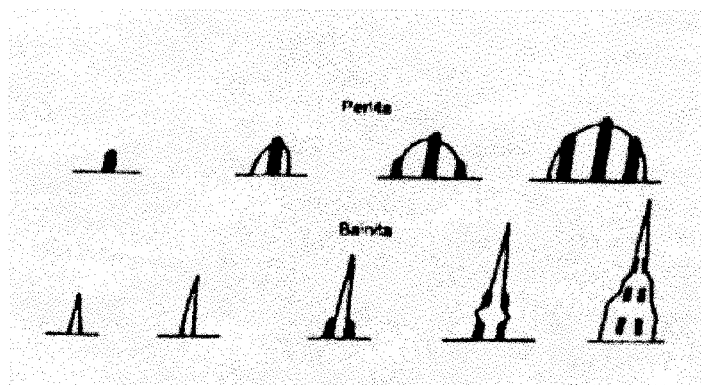


Figura 3: Diferença entre os mecanismos de formação da perlita e da bainita. A dificuldade de difusão do carbono faz com que os carbonetos fiquem dispersos na bainita [2].

Esta distorção do reticulado e as tensões geradas fazem com que, na prática, um aço nunca deva ser usado no estado temperado. A fragilidade associada obriga que seja realizado um tratamento térmico de alívio de tensões (tratamento térmico de revenido) que

pode variar desde 180°C até 600°C. Adicionalmente, quanto maior o teor de carbono, maior a resistência alcançada pela estrutura martensítica com sacrifício da tenacidade [1].

Para aplicações mecânicas limita-se o teor de carbono de aços a serem temperados na faixa de 0,3 a 0,4% de carbono, visando preservar a tenacidade do componente. A estrutura martensítica lembra o aspecto de agulhas aplicada pelo mecanismo de formação de cisalhamento da estrutura [1].

Enquanto que a transformação eutetóide (austenita + cementita) depende de intensa difusão de carbono, a transformação martensítica ao contrário é adifusional. Quanto maior a taxa de resfriamento, maior a quantidade de martensita formada [1].

Ao resfriarmos rapidamente a estrutura austenítica até a faixa de 300°C, por exemplo, não daríamos condições para que fosse formada a estrutura perlítica uma vez que a difusão do carbono a esta temperatura seria extremamente prejudicada. Na tentativa do ferro passar de CFC para CCC ocorre a nucleação de cristais de ferrita com plaquetas descontínuas de cementita. Esta estrutura denominada bainítica concorre em dureza e resistência mecânica com a martensita revenida. A Figura 3 ilustra a diferença entre os mecanismos de formação da perlita e da bainita [1].

2.1.1.2 Diagramas Isotérmicos

O processo de martêmpera ou tempera interrompida é um processo utilizado em substituição a tempera quando se deseja diminuir o risco de trincas, empenamentos e tensões residuais excessivas. O tratamento consiste basicamente em se retardar o resfriamento logo acima da temperatura de transformação martensítica, permitindo a equalização da temperatura ao longo de toda a peça, completando-se após o resfriamento. A estrutura formada, a exemplo da tempera, será martensítica, dura e frágil [1].

Na Figura 4 temos a representação desse tratamento sobre o diagrama TTT de um aço hipotético. Como pode ser visto, este tratamento consiste no resfriamento rápido, desde a temperatura austenítica, em um meio aquecido, que pode ser óleo aquecido, sal fundido ou leito fluidizado, até uma temperatura logo acima da temperatura de transformação martensítica. A peça é mantida nesta temperatura até que seja uniformizada a temperatura entre a periferia e o centro e então é resfriado, geralmente ao ar, até a temperatura ambiente. Segue-se um revenido que é feito nos mesmos moldes do processo de tempera convencional [1].

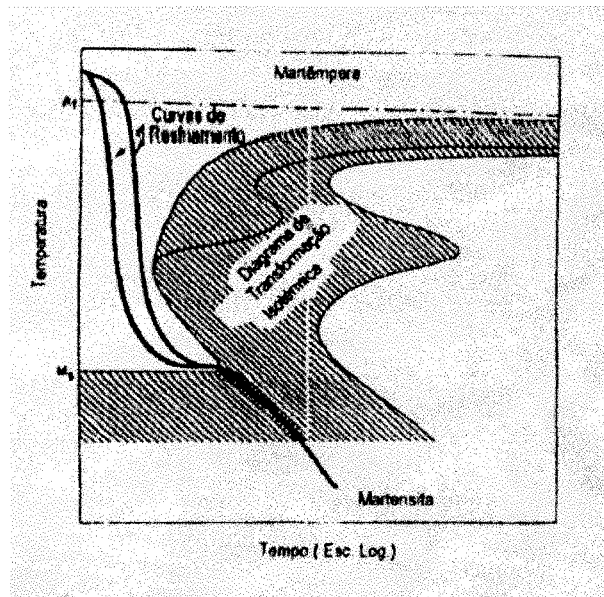


Figura 4: Curva de transformação para o processo de martêmpera de um aço [1].

O principal objetivo da martêmpera é reduzir a possibilidade de trincas e empenamentos oriundos da transformação martensítica em tempos diferentes ao longo da peça.

2.1.2 Sistemas de Classificação de Aços

Dada a grande variedade de tipos de aços, foram criados sistemas para sua classificação, os quais periodicamente são submetidos a revisões. Uma das classificações mais generalizadas e que inclusive serviu de base para o sistema adotado no Brasil é que considera a composição química dos aços e, dentre os sistemas conhecidos, são muito usados os da “American Iron and Steel Institute – AISI” e da “Society of Automotive Engineers – SAE” [5].

A Tabela 2, adaptada do DATABOOK-1980, editado pela American Society for Metals mostra designação adotada pela AISI e SAE. Nesse sistema, as letras XX ou XXX correspondem a cifras indicadoras dos teores de carbono. Assim, por exemplo, nas designações AISI-SAE, a classe 1023 significa aço-carbono com 0,23% de carbono em média [3].

Por outro lado, os dois primeiros algarismos diferenciam os vários tipos de aços entre si, pela presença ou somente de carbonos como principal elemento da liga, ou de outros elementos de liga como níquel, cromo, etc. Assim, quando os dois primeiros algarismos são 10, os aços são simplesmente ao carbono, quando são 11, os aços são de usinagem fácil com alto enxofre e assim em seguida [5].

Tabela 2: Classificação dos aços [5].

Designação		Tipos de Aço
AISI-SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aços-carbono comuns
11XX	G11XXX	Aços de usinagem fácil, com alto S
12XX	G12XXX	Aços de usinagem fácil, com altos P e S
15XX	G15XXX	Aços-Mn com manganês acima de 1,00%
13XX	G13XXX	Aços-Mn com 1,75% de Mn médio
40XX	G40XXX	Aços-Mo com 0,25% de Mo médio
41XX	G41XXX	Aços-Cr-Mo com 0,40 a 1,10% de Cr e 0,05 a 0,35% de Mo
43XX	G43XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,65 a 2,00 de Ni, 0,40 a 0,90% de Cr e 0,20 a 0,30% de Mo
46XX	G46XXX	Aços-Ni-Mo com 0,70 a 2,00% de Ni e 0,15 a 0,30% de Mo
47XX	G47XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	G48XXX	Aços-Ni-Mo com 3,25 a 3,75% de Ni e 0,20 a 0,30% de Mo
51XX	G51XXX	Aços-Cr com 0,70 a 1,10% de Cr
E51100	G51986	Aços-cromo (forno elétrico) com 1,00% de Cr
E52100	G52986	Aços-cromo (forno elétrico) com 1,45% de Cr
61XX	G61XXX	Aços-Cr-V com 0,60 ou 0,95% de Cr e 0,10 ou 0,15% de V min.
86XX	G86XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,50% de Cr e 0,20% de Mo
87XX	G87XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,50% de Cr e 0,25% de Mo
88XX	G88XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,50% de Cr e 0,30 a 0,40% de Mo
9260	G92XXX	Aços-Si com 1,80% a 2,20% de Si
50BXX	G50XXX	Aços-Cr com 0,20 a 0,60% de Cr e 0,0005 a 0,003% de boro
51B60	G51601	Aços-Cr com 0,80% de Cr e 0,0005 a 0,003% de boro
81B45	G81451	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,30% de Ni, 0,45% de Cr, 0,12% Mo e 0,0005 a 0,003% de boro
94BXX	G94XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,45% de Ni, 0,40% de Cr, 0,12% Mo e 0,0005 a 0,003% de boro

2.1.3 Impurezas dos aços-carbono

Os elementos normalmente encontrados nos aços-carbono, além do carbono, são fósforo, enxofre, manganês e silício.

O fósforo por muito tempo foi considerado um elemento nocivo a “fragilidade a frio” que confere aos aços. Por essa razão, as especificações são rigorosas a seu respeito. Certas especializações restringem os teores máximos admissíveis aos valores abaixo [5].

Tabela 3: Influência no teor de fósforo em materiais [5].

Trilhos	Eixos	Estruturas (pontes)	Estrutura de construção
0,04%	0,05%	0,06%	0,1%

De certo modo, o fósforo apresenta alguns aspectos favoráveis, pois aumenta a resistência à tração e a dureza dos aços, fato esse que se pode lançar mão dos aços de baixo carbono, onde o seu efeito nocivo é menor, juntamente com outros elementos como cobre, níquel e cromo em baixos teores. Além disso, o fósforo melhora a resistência à corrosão e a usinabilidade dos aços, principalmente, neste último caso, quando adicionado juntamente com o enxofre.

O enxofre é um elemento considerado mais prejudicial que útil. Combina-se com o manganês e com o ferro, formando sulfuretos. O MnS solidifica-se em torno de 1600°C e o FeS a 1000°C aproximadamente, no eutético do ferro [6]. O enxofre tem maior afinidade pelo manganês do que o ferro, de modo que, se houver suficiente quantidade pelo manganês, forma-se de preferência o MnS. Deve-se evitar a formação do enxofre com o ferro, pois esse trabalhado a uma temperatura acima do ponto de fusão do eutético Fe-FeS, este rompe-se com grande facilidade, originando o fenômeno de fragilidade quente.

O efeito do enxofre sobre as propriedades mecânicas do aço é mínimo, quando o teor de carbono é muito baixo, [7] tornando-se mais sensível –no sentido negativo- quando aumentada a quantidade de carbono. As propriedades mais afetadas são a resistência a tração, ductilidade e tenacidade.

O silício contido nos aços comuns dissolve-se na ferrita do mesmo modo que o fósforo, sem afetar apreciavelmente a sua ductilidade, embora aumente ligeiramente a sua dureza e a sua resistência mecânica. A função principal do silício é a de agente desoxidante.

O manganês, além de atuar como agente dessulfurante, atua também como agente desoxidante; de fato, o manganês, ao reagir com o oxigênio forma compostos sólidos MnO , de preferência ao CO e CO_2 , evitando assim o desprendimento de bolhas. O Mn pode atuar de várias maneiras: quando o teor de carbono é baixo, ele se dissolve na ferrita, aumentando sua dureza e resistência, com carbono teor de carbono mais elevado, admite-se que forme o composto Mn_3C [8] que se associaria com o Fe_3C , aumentando ainda mais a dureza e resistência do aço.

Alumínio, adicionado como desoxidante, formando com o oxigênio inclusões em partículas muito finas de Al_2O_3 . Atua como controlador de crescimento de grãos de aços.

2.1.4 Propriedades mecânicas dos aços-carbono

As propriedades mecânicas dos aços-carbono são afetadas, em princípio, pelos dois fatores seguintes:

- composição química
- microestrutura

No que se refere à composição química, nos aços esfriados normalmente, isto é, em condições tais que se processe transformação total da austenita, o elemento predominante é o carbono que, como se viu, à medida que aumenta, melhora as propriedades relativas à resistência mecânica, isto é, limite de escoamento, o limite de resistência à tração e a dureza e

piora as propriedades relativas a ductilidade e à tenacidade, isto é, o alongamento a estrição e a resistência ao choque [5].

No que se refere à microestrutura, inicialmente afetada pela composição química, pois se sabe que os constituintes presentes são ferrita e perlita, ou perlita e cementita ou somente perlita, conforme se trate de aço hipoeutetóide ou eutetóide, por outro lado, a microestrutura dos aços depende do estado do aço:

- se fundido, o aço apresenta uma granulação grosseira, tipo dendrita [5].
- trabalhado a quente: devido as operações de conformação a quente, a estrutura apresenta uma apreciável homogeneização, pela tendência a eliminar as inclusões e segregações que ocorrem durante a solidificação, recristalização com acentuada influência no tamanho de grão e destruição da estrutura dendrítica.
- no estado encruado, onde vemos um aumento da resistência mecânica, aumento de dureza e diminuição da ductilidade, representada por um decréscimo de alongamento e estrição [5].

2.1.5 Importância e limitações dos aços-carbono

Os aços carbono constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. De fato, as propriedades mecânicas desses aços ao carbono, sem qualquer elemento de liga e na maioria dos casos também sem qualquer tratamento térmico, são suficientes para atender à maioria das aplicações da prática. Como se sabe, os estados normais de utilização desses materiais são o fundido e o trabalhado. As peças fundidas geralmente requerem um tratamento térmico de recozimento ou normalização para alívio das

tensões originadas na solidificação e para homogeneização da microestrutura. O aço trabalhado por forjamento, laminação, estiramento, trefilação, etc, é utilizado diretamente na forma de perfis obtidos através desses processos, sem necessidade de tratamentos térmicos complexos, a não ser nos casos de trabalho final frio, quando é necessário eliminar o efeito do encruamento [5].

Por outro lado, em secções pequenas, os aços carbono podem, dentro de certos limites, ser esfriados a velocidades que sejam suficientes para produzir qualquer uma das possíveis distribuições de cementita na ferrita, inclusive a formação da martensita. Sabe-se que, para cada tipo particular de distribuição de carbonetos, o teor de carbono é o principal fator de influência na dureza e na resistência mecânica do aço. Mantendo-se constante o teor de carbono, ao passo que a ductilidade e propriedades semelhantes diminuem [9].

Pequenas secções de aço-carbono podem de fato ser submetidas a tratamentos térmicos que podem produzir excelentes propriedades a temperatura ambiente.

Tabela 4: Efeito de estrutura sobre as propriedades de tração do aço [10].

Propriedades	Ferro comercialmente puro	Aço com 1% de carbono		
		Perlítico	Coalescido	Temperado e Revenido
Limite de escoamento kgf/mm ²	18,2	59,5	28,0	-
Limite de resistência à tração, kgf/mm ²	29,4	105,0	54,6	182,0
Alongamento, %	40-44	10	31	13
Estricção, %	70-75	12-15	57	45
Dureza Brinell	80-85	300	156	540

Nota-se, pelo exame das duas primeiras colunas, que somente a presença de carbono já é suficiente para dar ao aço laminado por exemplo, maior resistência, com

prejuízo da ductilidade. A terceira coluna indica a restauração de certa ductilidade pela presença da estrutura esferiodita.

2.1.6 Temperabilidade dos aços-carbono

Há muito tempo o estabelecimento de formas de avaliação da temperabilidade de aços, de forma prática, tem sido a preocupação de vários pesquisadores. Um dos testes mais correntes na prática industrial atualmente é o chamado Ensaio de Jominy. Na Figura 5 podemos ver a forma e as dimensões do corpo de prova utilizado neste ensaio bem como o aparato de suporte e resfriamentos do mesmo [1].

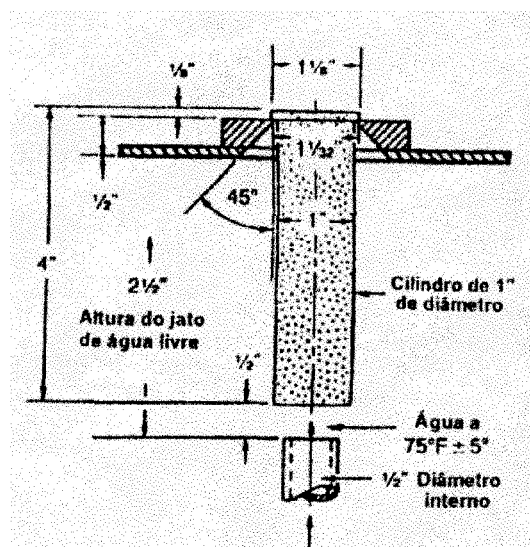


Figura 5: Corpo-de-prova para ensaio de Jominy [11]

O corpo de prova é resfriado a partir de uma de suas extremidades por um jato de água, fazendo com que o mesmo experimente uma gama de velocidades de resfriamento ao ar. Se fizermos após o resfriamento medidas de dureza ao longo de uma geratriz da peça a

cada 1/16 avos de polegada teremos um gráfico de dureza por distância que será característico do aço testado. Na Figura 6 temos a representação de um gráfico desse tipo [1].

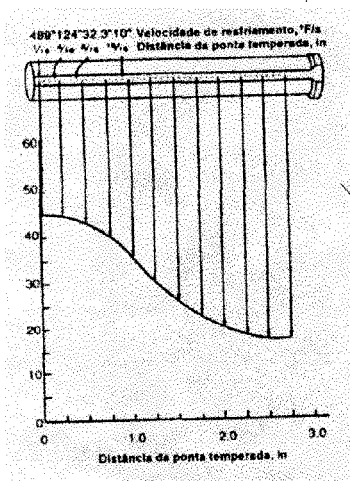


Figura 6: Gráfico dos resultados de um ensaio de Jominy mostrando os pontos de medida na barra ensaiada [12].

O ensaio de Jominy é um ensaio útil para a comparação entre os diversos aços pois, uma vez que as velocidades de resfriamento em cada ponto são bem conhecidas e praticamente imutáveis com a composição, a forma da curva nos dará uma idéia da temperabilidade do aço. Abaixo, podemos ver a faixa de temperabilidade Jominy para o aço SAE 1045 [13].

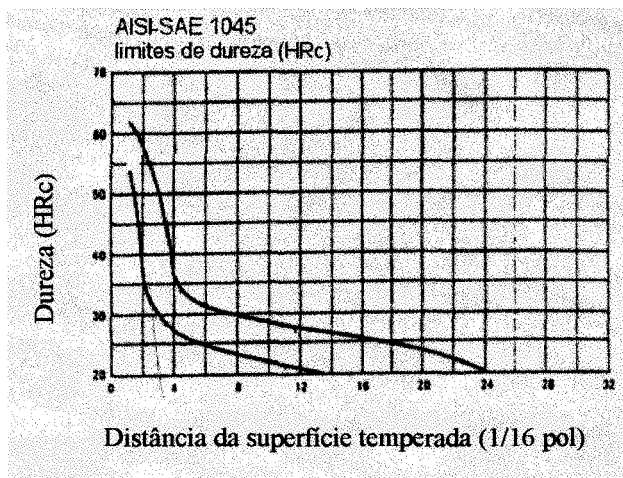


Figura 7: Curva de temperabilidade Jominy do aço SAE1045 [13].

A severidade de tempera é um índice que dá uma medida da influência dos meios de tempera sobre a profundidade e a distribuição da dureza em uma peça de aço temperada, sob diferentes condições de agitação [14].

A Tabela 5 indica a severidade dos meios de tempera usuais sob diferentes condições de agitação [14].

Tabela 5: Severidade dos meios de tempera sob diversas condições de agitação [14].

agitação	Severidade de tempera H			
	Ar	Óleo	Água	Salmoura
Nenhuma	0,02	0,25 – 0,30	0,9 – 1,0	2,0
Fraca	-	0,30 – 0,35	1,0 – 1,1	2,0 – 2,2
Moderada	-	0,35 – 0,40	1,2 – 1,3	-
Boa	-	0,40 – 0,50	1,4 – 1,5	-
Forte	-	0,50 – 0,80	1,6 – 2,0	-
Violenta	0,08	0,80 – 1,10	4,0	5,0

Os gráficos de Lamont, correlacionam as temperabilidades dos aços sob diferentes valores de severidade de tempera e permitem uma previsão estimativa da faixa de temperabilidade Jominy do aço e a severidade da tempera utilizada. O cálculo é feito por meio da relação r/R , onde r é a distância do ponto ao eixo da barra e R é o raio da barra, e procura-se o gráfico correspondente [14].

Encontrado o gráfico, entra-se com o diâmetro da barra na escala vertical, segue-se pela curva correspondente a severidade de tempera utilizada; do ponto de intersecção segue-se pela vertical “distância da ponta temperada” e anota-se a distância encontrada. Leva-se essa distância ao gráfico da faixa de temperabilidade do aço considerado e lê-se a faixa de dureza correspondente. Abaixo estão alguns gráficos de Lamond utilizados [14].

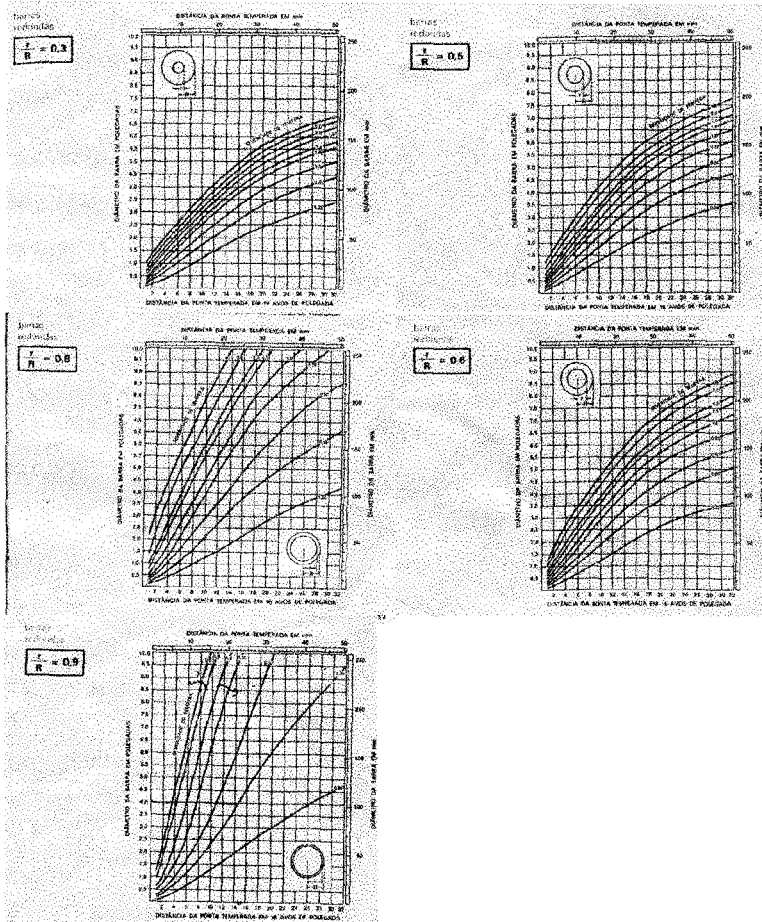


Figura 8: Gráficos de Lamont [14].

2.2 Processos de Tratamento Térmico

2.2.1 Normalização

O processo de normalização produz propriedades semelhantes às obtidas no recozimento. E em virtude disto muitas vezes os dois podem ser usados alternativamente para obter baixa dureza, boa ductilidade e para eliminar estruturas provenientes de tratamentos anteriores [1]. A normalização é feita geralmente com resfriamento das peças ao ar e isto conduz a uma velocidade de resfriamento mais alta do que aquela do recozimento, dando com

o resultado uma estrutura formada por perlita mais fina. Em consequência, a ductilidade será menor do que no material recozido, sua dureza e resistência mecânica serão maiores.

Outra vantagem da normalização reside no fato de que se pode utilizar temperaturas mais altas de austenitização, permitindo uma maior dissolução dos carbonetos dos elementos de liga. Na Figura 9 vemos uma curvas de resfriamento de normalização sobre o diagrama isotérmico.

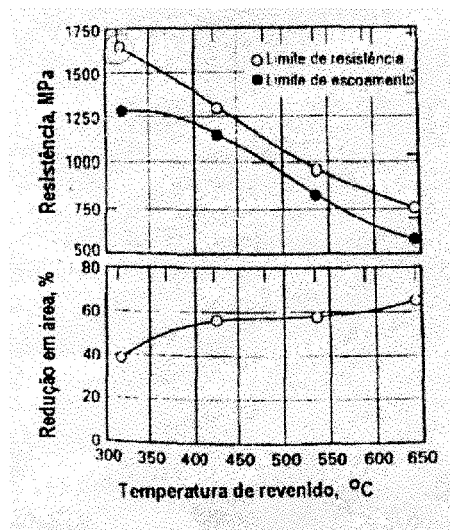


Figura 9: Efeito da temperatura de revenido das propriedades do aço [2].

2.2.2 Cementação

Processo que consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de convenientemente temperado, apresente uma superfície muito mais dura. É necessário que o aço em contato com a substância capaz de fornecer carbono, seja aquecido a uma temperatura em que a solução de carbono no ferro seja fácil. Para isso, a temperatura deve ser superior à da zona crítica, (850°C a 950°C) onde o ferro se encontrará na forma alotrópica gama.

A profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo, sendo rápida a princípio, decrescendo depois, o que pode ser comprovado pelo exame das curvas da Figura 10. Essas curvas permitem verificar também que as temperaturas mais elevadas favorecem a penetração do carbono [5].

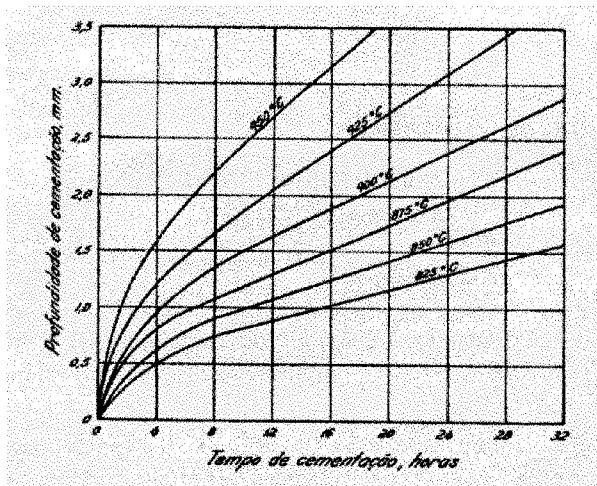


Figura 10: Curvas mostrando a influência do tempo e da temperatura na penetração superficial do carbono.

Dessa maneira, os fatores que influem sobre a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície dos aços são os seguintes [2,15]:

- teor inicial de carbono no aço: quanto menor o teor inicial de carbono no aço, maior a velocidade de carbonetação;
- coeficiente de difusão do carbono no aço: o enriquecimento superficial de carbono no aço é um fenômeno de difusão, movimento relativo de carbono no interior do aço. O que visa a cementação é a solução de carbono no ferro γ , fenômeno que é determinado pela velocidade do fluxo de carbono no ferro γ . Esse coeficiente de difusão é uma função da temperatura e da concentração de carbono;

- temperatura: é o fator mais importante, pois além de afetar a difusão - acelerando-a com sua elevação- influi também na concentração de carbono na austenita e na velocidade de reação de carbonetação na superfície do aço [5].

Dentre os vários processos de cementação, vamos nos deter em especial na cementação líquida, por este ter sido utilizado pelo autor no tratamento térmico do material.

Cementação líquida: é realizada mantendo o aço à temperatura acima de A_1 num banho de sal fundido, com composição adequada para promover o enriquecimento superficial do carbono. Os banhos carburizantes líquidos apresentam as com posições indicadas na Tabela 6 [2].

Tabela 6: Composições de banhos de sal para cementação líquida

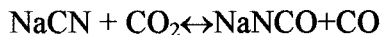
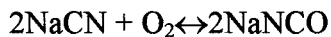
Constituinte	Composição do banho, %	
	Camada de pequena espessura baixa temperatura (840° a 900°C)	Camada de grande espessura alta temperatura (900° a 955°C)
Cianeto de sódio	10 a 23	6 a 16
Cloreto de bário	0 a 40	30 a 55
Outros sais alcalinos de metais terrosos	0 a 10	0 a 10
Cloreto de potássio	0 a 25	0 a 20
Cloreto de sódio	20 a 40	0 a 20
Carbonatos de sódio	30 max.	30 max.
Aceleradores outros que compostos de metais alcalinos terrosos*	0 a 5	0 a 2
Cianato de sódio	1,0 max	0,5 max

*dentre esses aceleradores, incluem-se dióxido de manganês, óxido de boro, flureto de sódio e carboneto de silício

Como se vê pela análise da Tabela 6, consideram-se dois tipos de banhos para a cementação líquida: aqueles para camadas de pequena profundidade e aqueles para camadas de grande profundidade. Há uma superposição de composições do banho para os dois tipos de camadas. Em geral um tipo de banho se distingue do outro pela temperatura de operação do que pela composição [5].

Os banhos de baixas temperaturas são comumente operados entre as temperaturas de 840°C a 900°C, a espessura das camadas comentadas varia de 0,08 a 0,8 mm [2].

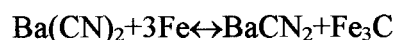
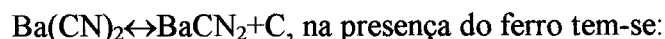
O mecanismo de cementação a baixas temperaturas envolve as seguintes reações:



As reações que produzem CO ou C são bem benéficas para obtenção da desejada camada cementada, como exemplo:



Os banhos a altas temperaturas trabalham entre 900°C a 950°C e promovem camadas de maior profundidade, entre 0,5 a 30 mm. A principal reação é a seguinte:



2.2.3 Martêmpera

O processo de martêmpera é utilizado em substituição a tempera quando se deseja diminuir o risco de trincas, empenamentos e tensões residuais excessivas. O tratamento consiste basicamente em se retardar o resfriamento logo acima da temperatura de transformação martensítica, permitindo a equalização da temperatura ao longo de toda a peça, completando-se após o resfriamento. A estrutura formada será martensítica [1].

Na Figura 4 temos a representação deste tratamento sobre o diagrama TTT de um aço hipotético. Como pode ser visto, este tratamento consiste no resfriamento rápido, desde a temperatura austenítica, em um meio aquecido, que pode ser óleo aquecido ou sal fundido, até uma temperatura logo acima da temperatura de transformação martensítica. A peça é mantida nesta temperatura até que seja uniformizada a temperatura entre a periferia e o centro e então é resfriado, geralmente ao ar até temperatura ambiente [1].

2.2.4 Revenido

O revenido é um tratamento em que se faz um aquecimento da peça temperada dentro de uma faixa de temperatura entre 150°C e 600°C. as peças são aquecidas e permanecem durante um intervalo de tempo suficiente para que ocorram as transformações necessárias à recuperação de parte da ductilidade e tenacidade perdidas. Como consequência teremos uma perda na resistência mecânica e na dureza. Quanto mais alta for a temperatura de revenido utilizada ou quanto maior for tempo de tratamento maior será o ganho em ductilidade e tenacidade e maior será a perda de resistência e dureza [1]. A Figura 11 representa esta situação.

Durante o revenido, podemos ter 3 diferentes tipos de estágio em que as transformações da martensita, que são dependentes da temperatura e irão influir nas propriedades finais dos aços. No primeiro estágio que vai até 200°C, o carbono contido na martensita se precipita formando um carboneto chamado ϵ , que não tem a composição da cementita. Em consequência temos uma redução no teor de carbono da martensita. As transformações nas propriedades não são muito significativas, apenas uma pequena redução na dureza e na resistência e um pequeno aumento na ductilidade e na tenacidade [1].

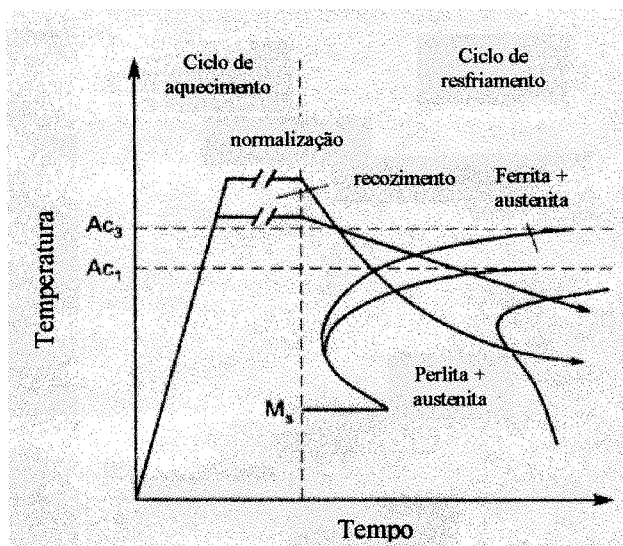


Figura 11: Comparação de ciclos tempo/temperatura para normalização e recozimento total [2].

Em um segundo estágio, entre 200 e 400°C, ocorre a precipitação de cementita no contorno das agulhas de martensita. Em decorrência disso teremos uma continuação da queda na dureza e resistência, porém a tenacidade não é aumentada. Isto é o que se chama de fragilidade de revenido. Na faixa (200 a 350°C) não é conveniente que seja feita um revenido pois não teremos um aumento de tenacidade [1].

Em uma terceira etapa, que se inicia em torno de 400°C temos um precipitado esferoidal de cementita que irá fazer com que a tenacidade e a ductilidade voltem a crescer, e portanto estaremos em uma faixa de temperatura em que temos benefício com o revenido [1].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material

O material utilizado pelo cliente, para fabricação dos eixos da motoniveladora 120H da CATERPILLAR (figura 18) foi o aço ao carbono SAE1045. Este aço não segue as especificações da norma CATERPILLAR. Pois o material foi feito por uma empresa que abastece somente o mercado de reposição, vide Anexo 1.

3.2 Amostras Utilizadas

Para efeitos de trabalho, foram utilizadas duas amostras sendo uma fornecida pelo cliente (material rompido) e não tratado pela BRASIMET ($\varnothing 56\text{mm}$ X 60mm), e outra desenvolvida com fins de avaliar o processo de tratamento térmico feito nas demais peças que

obtiveram um aumento de vida útil, seguindo os mesmos critérios. Corpo de prova SAE 1045 ($\varnothing 56 \times 90\text{mm}$), vide anexo 1.

3.3 Análise Química

Tanto o material fornecido pelo cliente, como o usinado por uma empresa terceirizada, foram submetidos a análise química para a comprovação do aço em questão.

3.4 Equipamentos Utilizados no Processo de Tratamento Térmico

Para o tratamento térmico do corpo de prova foram utilizados os seguintes fornos:

- Forno de aquecimento: forno elétrico sem atmosfera controlada com dimensões internas de $\varnothing 700 \times 1300\text{mm}$, com o objetivo de pré-aquecer o material, retirar a umidade e queimar o óleo do mesmo;
- Forno de banho de sais: forno elétrico com dimensões internas de $\varnothing 700 \times 1800$ com a finalidade de promover o enriquecimento superficial de carbono. Os sais utilizados são da divisão química da BRASIMET (sais Durferrit) com a marca Ceconstant 110;
- Tanque de Martêmpera: equipamento utilizado para o resfriamento (tempera) de peças. Possui dimensões ($1100\text{mm} \times 900\text{mm} \times 1700\text{mm}$) pode ser utilizado com agitação mecânica para um melhor resfriamento. Os sais presentes são da divisão da BRASIMET com a marca patenteada AS-140.

- Fornos de Revenimento e alívio de tensões: Fornos elétricos sem atmosfera controlada com dimensões $\varnothing 700 \times 1800$, cuja finalidade é minimizar as tensões internas dos materiais temperados.

3.5 Preparação das Amostras

Inicialmente retirou-se da barra tratada termicamente na BRASIMET ($\varnothing 56 \times 90$ mm) um corpo de prova com dimensões $\varnothing 56 \times 15$ mm, através de um disco de corte. Este para obter um aspecto especular da superfície utilizou-se lixas com granulometria 100, 240, 400, 500 e 600. o polimento foi feito com uma solução abrasiva (alumina). O desengraxe foi feito com álcool etílico.

3.6 Técnicas Utilizadas para Análise

Para caracterização das amostras desenvolvidas foram utilizadas as seguintes técnicas de análise: medições de dureza, análise metalográfica, comparação entre temperabilidade alcançada no material e a descrita nos gráficos de Lamont.

3.6.1 Medições de dureza

Os equipamentos utilizados para a medição de dureza foram um durômetro com esfera de 2,5mm e carga de 187,5 Kg medidos em escala BRINNEL (HB), utilizado pela empresa BRASIMET. O outro equipamento foi um microdurômetro medindo em escala

Vickers utilizando carga de 3 Kg. através desses aparelhos, pede-se trazer um perfil de durezas nos materiais analisados.

3.6.2 Análise Metalográfica

Para a análise metalográfica, além da preparação superficial descrita anteriormente, os corpos de prova foram atacados com Nital 2%. Sua microestrutura foi observada no microscópio óptico do laboratório de metalurgia física-UFRGS.

3.6.3 Temperabilidade Gráficos de Lamont

A finalidade dos gráficos de Lamont é a verificação da temperabilidade do material, ou seja, se a temperabilidade avaliada teoricamente com o aço SAE1045 constata-se na prática desse processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Química

A Tabela 7 apresenta os valores de comparação química do aço utilizado SAE1045.

Elemento	C	Mn	P	S
Padrão *	0,46	0,75	0,040	0,050
Analizado **	0,452	0,746	0,00918	0,0218

* Fornecido pela Gerdau.

** Analisado pelo espectrômetro de queima da UFRGS – centro de tecnologia.

Tabela 7: Composição química do material SAE1045.

Caracterizando assim o material SAE1045.

4.2 Medições de dureza

Através das amostras fornecidas, verificou-se a seguinte situação:

Peça rompida, fornecida pela empresa e não tratada pela BRASIMET.

Posição (mm)	HB
4	172
9	172
14	169
18	172
24	175
29	172
34	172
40	172
45	175
52	172

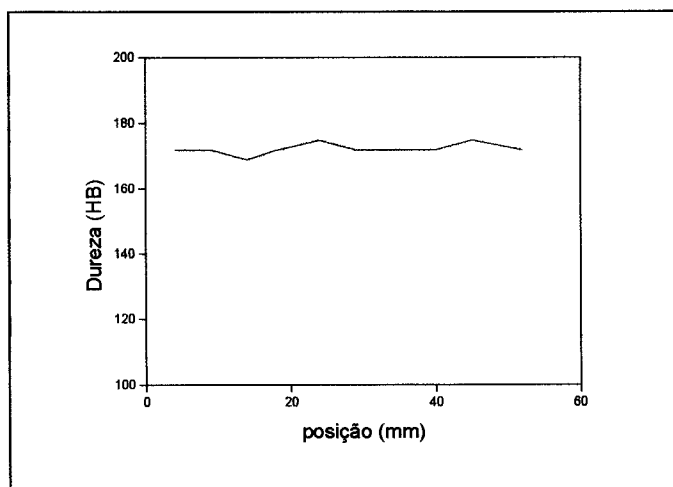


Figura 12: Gráfico da peça rompida.

Peça tratada pela BRASIMET para simular o perfil de dureza nas peças tratadas.

Posição (mm)	HV3	Posição (mm)	HV3
0,5	386	8,0	261
1,0	301	9,0	257
1,5	280	10,0	251
2,0	280	11,0	232
2,5	280	13,0	232
3,0	280	14,0	232
3,5	280	14,0	232
4,0	280	16,0	232
5,0	272	17,0	217
6,0	272	18,0	214
7,0	268	19,0	212
		20,0	212

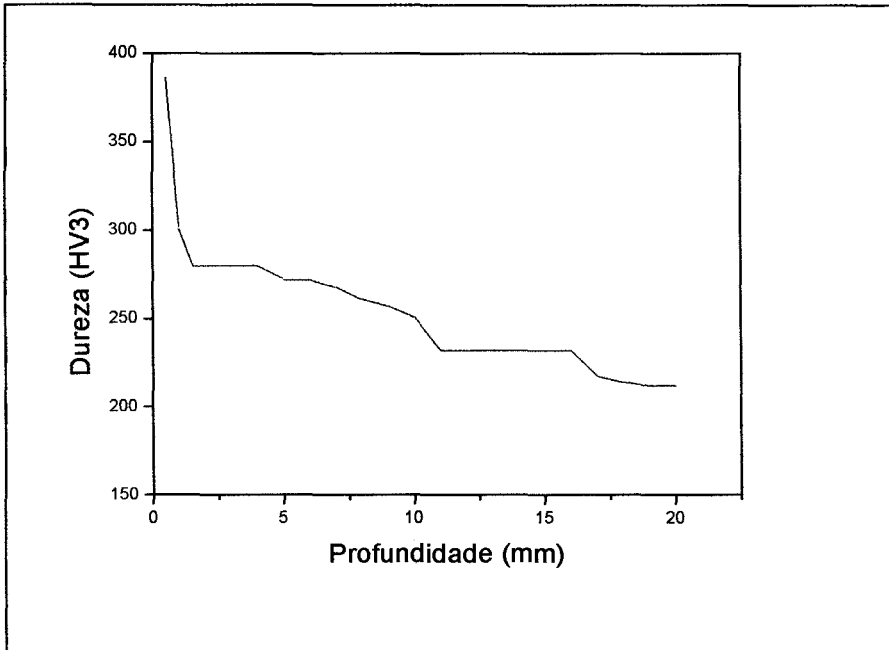


Figura 13: Gráfico da peça tratada pela BRASIMET.

4.3 Análise Metalográfica

Abaixo temos as micrografias tiradas dos dois materiais analisados.

Peça estourada não tratada pela BRASIMET

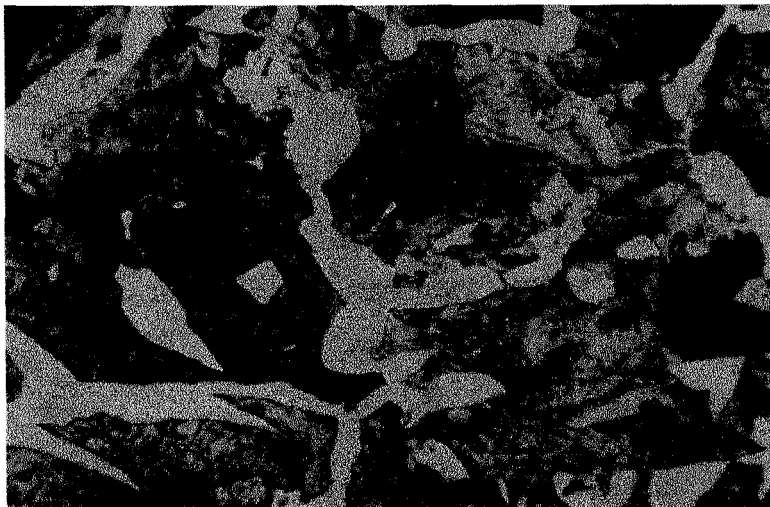


Figura 14: Ataque NiTal 2% 400X
TG: 2-1 ASTM.
Periferia da peça

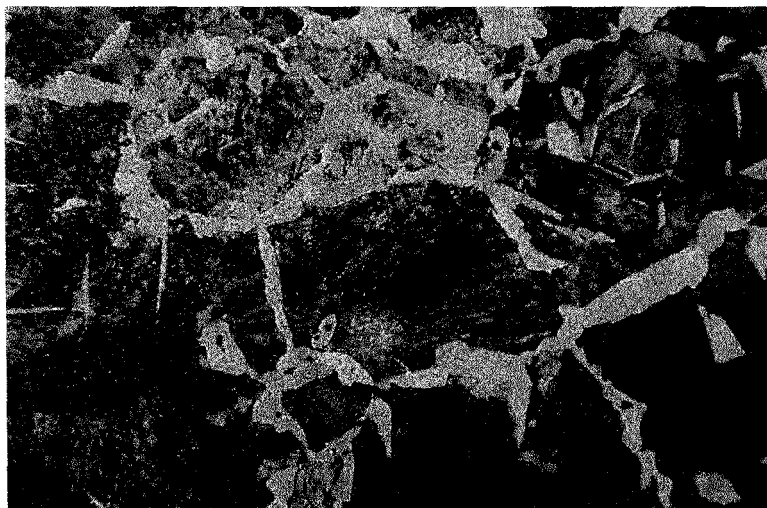


Figura 15: Ataque NiTal 2% 400X
TG: 2-1 ASTM.
Centro da Peça

Peça tratada pela BRASIMET

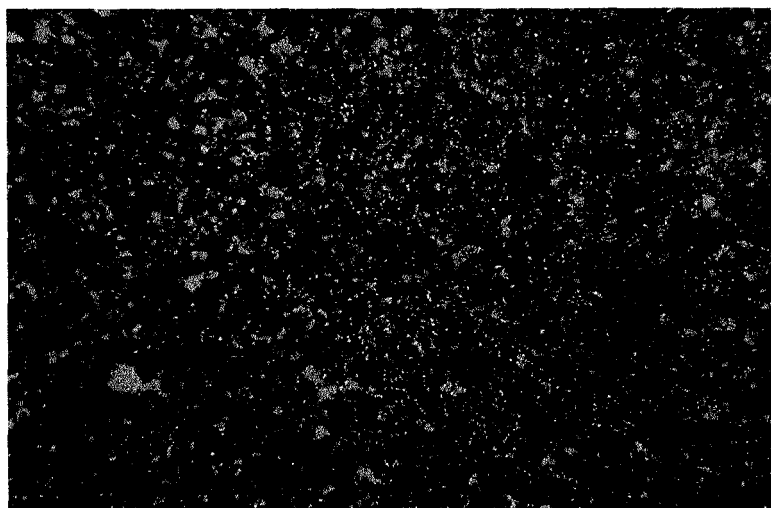


Figura 16: Ataque NiTal 2% 400X
TG: 7-8 ASTM.
Periferia da peça.

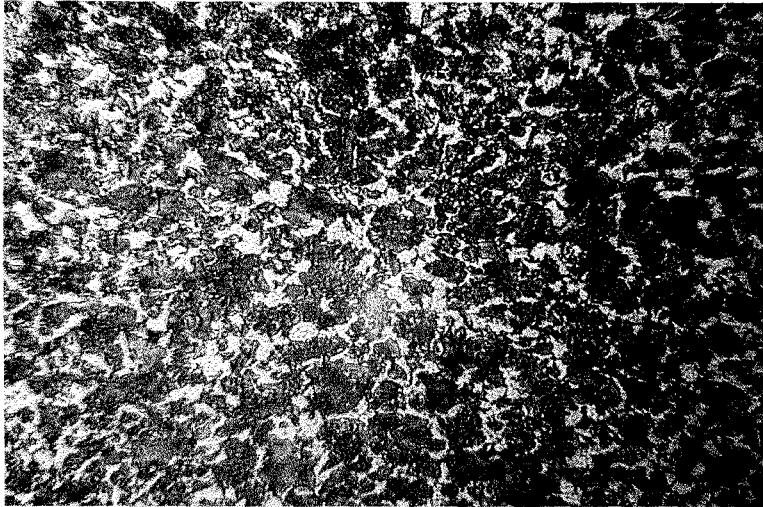


Figura 17: Ataque NiTal 2% 400X
TG: 7-8 ASTM.
Centro da peça.

O material fornecido, além de um perfil baixo de dureza, apresenta uma estrutura de granulação grosseira (tamanho de grão 7 a 8 ASTM) com uma matriz ferrítica-perlítica, caracterizando um material que não sofreu tratamento térmico ou apenas um processo de recozimento.

O material tratado pela BRASIMET possui uma granulação mais refinada (tamanho de grão de 1 a 2 ASTM), apresentando uma camada cementada de 0,8 a 1,0 mm com uma matriz de núcleo ferrítica-perlítica, caracterizando um processo de cementação seguido de uma normalização. O perfil de dureza analisado caracteriza o tipo de tratamento.

4.4 Temperabilidade do material

Através do gráfico de Lamont, podemos avaliar se a temperabilidade do material que descreve um perfil de durezas semelhantes aos da prática.

Levantamento dos gráficos de Lamont utilizando as medidas de dureza em Vickers feitas no corpo de prova tratado na BRASIMET.

Tabela 8: Levantamento dos gráficos de Lamont.

R (raio da peça em mm)	r (distância do ponto ao eixo da barra)	r/R
28	8	0,28 (0,3)
28	13	0,46 (0,5)
28	18	0,64 (0,6)
28	23	0,82 (0,8)
28	26	0,92 (0,9)

Severidade de tempera $H=0,30$ com base de dados fornecidos pela empresa BRASIMET, vide Anexo 2.

Tabela 9: Comparação de valores de temperabilidade
Curva Jominy X verificado

Distância da ponta temperada em mm	Curva Jominy (HRC)	Verificado (HRC)
22	26	13,4
22	26	18,0
21	20-27	22,2
19	22-28	25,8
18	23-28	27,1

Através de curvas de Lamont Levantadas. Verifica-se que o material está na faixa de temperabilidade prevista, sendo somente desconsiderado a faixa da camada cementada (0,8 a 1,0mm) pois esta não está caracterizando o processo de temperabilidade do material, já que o diagrama Jommy não considera temperabilidade com camadas cementadas e sim temperadas.

5 CONCLUSÕES

Após os resultados e discussões apresentados, conclui-se que:

- 1) O material fornecido pelo cliente, por ser uma peça de mercado de reposição, não apresentava a especificação correta de material bem como para tratamento térmico encontrado não foi o mais adequado. Sendo estão sugerido uma mudança de matéria prima;
- 2) O material antes do tratamento, apresentava uma vida útil de 40 dias em média. Com o material tratado pela BRASIMET, a vida útil do material apresentou um tempo de 5 meses em média;
- 3) Através da análise de microdureza e microestrutura, o material tratado pela BRASIMET possui um tempo de vida útil superior ao do material não tratado pela empresa;
- 4) Para a empresa que solicitou o tratamento térmico pela BRASIMET, a peça em si sofreu um aumento de custo de 30% em relação ao seu valor. Em contrapartida, a mesma pode agora garantir um tempo maior de vida útil melhorando a qualidade do material fabricado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma idéia para baratear o custo, seria a tentativa de tratar termicamente a peça pelo processo de indução. Dessa maneira, haveria uma redução de custos em 35% em relação ao processo atual. Caberia somente manter o mesmo tipo de material (SAE1045) e um estudo de análise crítica de processo por indução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FRAINER, V.J; STRHAECKER, T.R. **Princípios de tratamentos térmicos.**
- [2] **Metal Handbbok** (Revised vol 4), 1995.
- [3] DURFERRIT-HANDBUCH
- [4] LESLIE, W.C. **The physical metallurgy of steels**, No. 329S, (1996) S69-S77.
- [5] MÜLLER, M.E. **The benefits of metal-on-metal total hip replacements.** *McGraw-Hill International Book Co*, London, 1982.
- [6] CALPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**, 2ª ed.
- [7] GUZZONI, G. **Structure e Proprietá** – Ed. Ulrico, 1996.
- [8] HEYER, R.H. **Engineering physical metallurgy.**
- [9] BULLENS, D.K. **Steel and its Heat Treatment**, *Jonh Wiley & Sons. Inc, Vol III.*
- [10] BAIN, E.C; PAXTON, H.W. **Alloyng Elements in Steel** – *American Society fpr Metals 2ª Ed.*
- [11] KRAUS, G. **Principles Heat Treatment of Steels**, *ASM, Metals Park, Ohio*, 1980
- [12] TELNING, K. **Steel and Heat Treatment**, *Butherworths*, London, 1975
- [13] BROOKS, C.R. **Materials Science and Engineering Departament.**

[14] APOSTILA VILLARES – Aços para construção mecânica, catálogos técnicos.

[15] BEN BOW, W.E. **Steel in Modern Industry**, *Wiley & Sons ltd.*

ANEXO 1

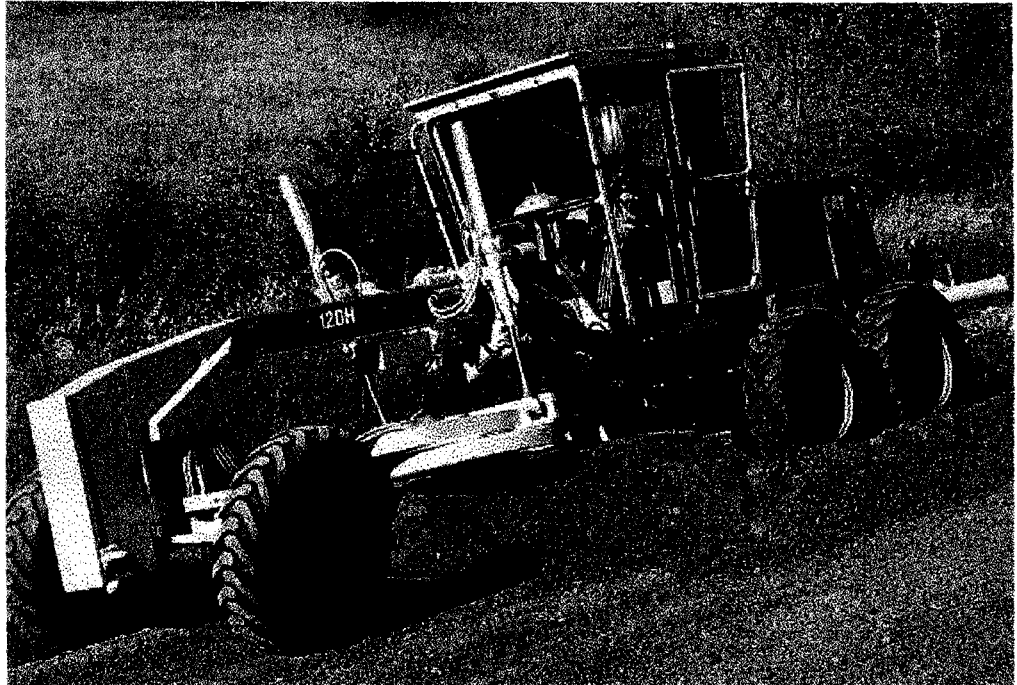


Figura 18: Fotografia do Motoniveladora 120H da CATERPILLAR.

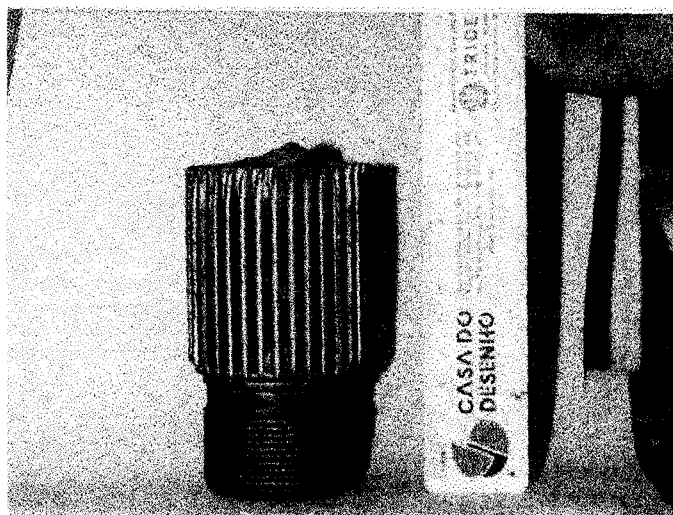


Figura 19: Fotografia da peça rompida não tratada pela BRASIMET.

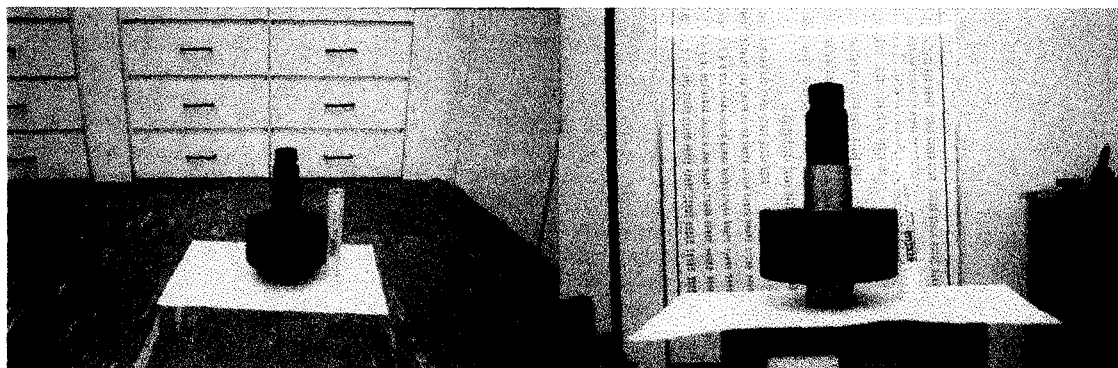


Figura 20: Fotografia da peça tratada pela BRASIMET.

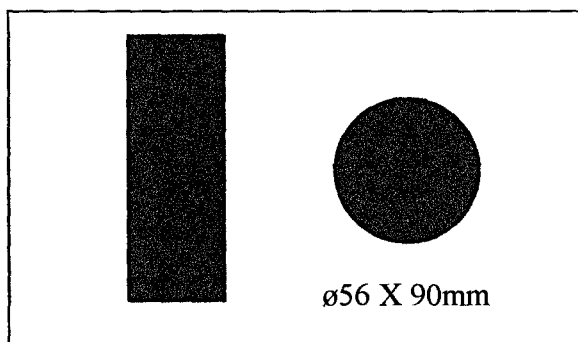


Figura 21: Desenho esquemático do corpo de prova tratado pela BRASIMET.

ANEXO 2

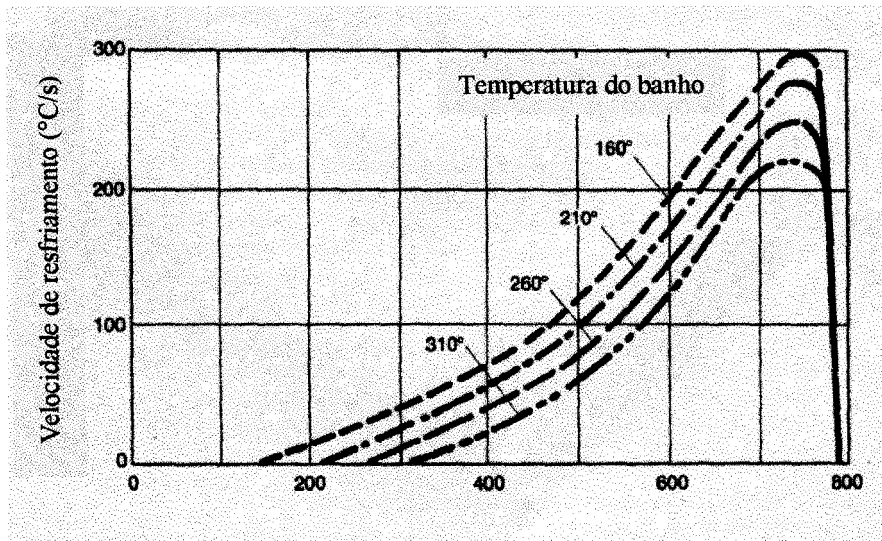


Figura 22: Gráfico com valores teóricos para a obtenção do índice de severidade de tempera (H) utilizando o meio de resfriamento AS140 [3].