

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**GUILHERME AUGUSTO OLIVEIRA DE SENA**

**EFEITO DO CISALHAMENTO NO ENVELHECIMENTO DO AÇO BH 180**

**BELO HORIZONTE  
2016**

**GUILHERME AUGUSTO OLIVEIRA DE SENA**

**EFEITO DO CISALHAMENTO NO ENVELHECIMENTO DO AÇO BH 180**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Wellington Lopes

Co-orientadora: Elaine Carballo Siqueira  
Corrêa

Belo Horizonte

2016

## RESUMO

A crescente busca da indústria automotiva em criar novos materiais cada vez mais leves e resistentes motiva vários campos de estudos. A economia de combustível além de diminuir o custo para o consumidor contribui para a preservação do meio ambiente. Nesse contexto surgiram os aços Bake Hardening, que por terem baixa concentração de carbono na sua composição apresentam boa conformabilidade, propriedade importante na indústria automobilística, pois diminui a energia gasta para a mudança de forma dos componentes dos veículos. Porém, ao passar pelo envelhecimento no processo de cura da pintura sofrem ganho de resistência mecânica por um mecanismo de ancoramento de discordâncias denominado Atmosfera de Cottrell. Essa elevação da resistência mecânica está relacionada a diversos fatores como temperatura de tratamento térmico, composição química, tamanho de grão, dentre outros aspectos. Considerando esses aspectos, este trabalho apresenta o estudo da influência da quantidade de pré-deformação efetiva em cisalhamento no envelhecimento do aço BH 180 utilizando métodos de medida de dureza, avaliação de curvas de fluxo e análise de microestrutura. Os resultados indicaram aumento significativo da resistência mecânica apenas para o valor de 4,88% de pré-deformação, sendo isso correlacionado com a influência do modo de deformação plástica, o cisalhamento.

Palavras chave: Efeito BH, Aço BH 180, Pré-deformação, Cisalhamento.

## ABSTRACT

The increasing search of the automotive industry to create new and increasingly light and resistant materials motivates several fields of study. Fuel economy in addition to lowering the cost to the consumer contributes to the preservation of the environment. In this context, Bake Hardening steels appeared, which, because they have low carbon concentration in their composition, have good conformability, an important property in the automobile industry, since it reduces the energy spent to change the shape of the vehicle components. However, as they pass through the aging process in the painting process, they gain mechanical resistance through a mechanism of anchoring discordance called Cottrell's Atmosphere. This increase in mechanical strength is related to several factors such as temperature of thermal treatment, chemical composition, grain size, among other aspects. Considering these aspects, this work presents the influence of the amount of effective pre-deformation on shear aging on BH 180 steel using methods of hardness measurement, flow curve evaluation and microstructure analysis. The results indicated a significant increase of the mechanical resistance only to the value of 4.88% of pre-deformation, being thus correlated with an influence of the mode of plastic deformation, or shear.

Keywords: BH effect, BH Steel 180, pre-deformation, Shear.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução do uso de materiais na indústria automobilística.....	8
Figura 2-Cálculo do efeito BH mediante sobreposição de curvas de fluxo. ....	15
Figura 3-Relação entre a quantidade de carbono em excesso com o Efeito BH. ....	16
Figura 4-Reações que ocorrem no material quando submetido a diferentes temperaturas de processamento .....	17
Figura 5-Efeito do tempo e temperatura de tratamento térmico com efeito BH. ....	20
Figura 6-Efeito da temperatura de recozimento de uma chapa no índice bake hardening .....	21
Figura 7: Exemplo de aplicação do Aço BH na indústria automobilística.....	22
Figura 8 Curva limite de conformabilidade para os principais aços BH usados na indústria ..	23
Figura 9 Geometria de um corpo de prova para o ensaio de cisalhamento .....	24
Figura 10: Dispositivo para o teste de cisalhamento .....	25
Figura 11-Etapas de tratamento das amostras .....	27
Figura 12 Equipamento utilizado para medida de dureza .....	29
Figura 13 Cálculo do Efeito BH a partir da sobreposição de curvas de fluxo .....	31
Figura 14 Cálculo do Valor de WH a partir da sobreposição de curvas de fluxo .....	31
Figura 15 Carregamento monotônico do aço BH 180 no estado como recebido a 0° de direção de laminação .....	34
Figura 16 Relação entre pré-deformação, Efeito BH e encruamento na direção 0° de laminação.....	35
Figura 17 Relação entre pré-deformação, Efeito BH e encruamento na direção 90° de laminação.....	37
Figura 18 Fotomicrografia do aço BH 180 no estado como recebido a 0° de laminação. Ataque Nital 2%. 200x ampliação .....	38

### Lista de Tabelas

Tabela 1 -Velocidade de resfriamento de meios em comparação com a água a 18 °C na faixa de temperatura 720 °C a 550 °C .....	10
Tabela 2Especificação de aços BH comumente usados na indústria automobilística.....	22
Tabela 3-Composição química média do aço BH (% em peso).....	28
Tabela 4 Resultados de dureza da amostra como recebido .....	33
Tabela 5: Propriedades mecânicas do Aço BH 180 .....	34
Tabela 6-Relação de ganho de resistência total para 0° de direção de laminação.....	36
Tabela 7-Relação de ganho de resistência total para 90° de direção de laminação.....	38

## Sumário

Sumário .....	6
1. Introdução .....	7
1.1 Evolução dos materiais usados nos automóveis .....	7
1.2 Tratamentos térmicos .....	9
1.2.1 Reozimento .....	10
1.2.2 Reozimento total .....	11
1.2.3 Reozimento para alívio de tensões .....	11
1.2.4 Reozimento em caixa .....	11
1.2.5 Reozimento contínuo .....	12
1.2.6 Tratamento térmico necessário ao envelhecimento do aço BH .....	12
1.3 Aço Bake Hardening .....	13
1.3.1 Efeito do Carbono e nitrogênio .....	15
1.3.2 Presença dos elementos Ti e ou Nb .....	16
1.3.3 Tempo de encharque .....	17
1.3.4 Quantidade de pré-deformação .....	18
1.3.5 Temperatura do Envelhecimento .....	19
1.4 Características dos aços BH usados na indústria automobilística .....	21
1.5 Ensaio de cisalhamento .....	23
2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
2.1 Material .....	27
2.2 Caracterização mecânica .....	28
2.2.1 Ensaio de tração .....	28
2.2.2 Ensaio de Dureza Vickers .....	29
2.2.3 Cisalhamento .....	29
2.3 Caracterização Microestrutural .....	31
2.4 Tratamento Térmico .....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	33
3.1 Ensaio de Dureza Vickers .....	33
3.2 Ensaio de cisalhamento .....	33
3.4 Caracterização microestrutural .....	38
Conclusão .....	40
Referências: .....	41

## 1. Introdução

### 1.1 Evolução dos materiais usados nos automóveis

Desde seu início, os automóveis eram compostos basicamente de materiais naturais, principalmente em madeira. Já nos primórdios do século XX, o compósito natural foi lentamente substituído por aços. Anos mais tarde, em 1910, com o advento de motores mais potentes, foi necessária a utilização de aços na parte estrutural do automóvel para garantir menor tolerância dimensional e conseqüentemente mais segurança aos usuários. Antes da primeira metade do século 20, aços laminados a quente foram desenvolvidos e o processo de recozimento em caixa foi aprimorado. Isso possibilitou a utilização de design mais curvo e também mais fino diminuindo a massa total do veículo e melhorando a aerodinâmica do mesmo (MARRA, 2008).

Com a segunda guerra mundial e a grande diminuição da produção de aço no mundo, o alumínio começa a ser um substituto por apresentar propriedades mecânicas comparáveis ao aço e com a vantagem de ser mais resistente a corrosão. Além disso, o alumínio apresenta menor densidade que todos os aços, o que significa um menor gasto de combustível. Por apresentarem boa conformabilidade os aços de baixo teor de carbono e aqueles acalmados com Mn tinham grande utilização principalmente em partes externas dos veículos (MARRA, 2008). O advento de duas crises do petróleo (1973 e 1979) forçou os produtores automobilísticos a procurarem soluções para que a massa do dispositivo diminua, reduzindo a quantidade de combustível utilizada. Nesse momento, a área de compósitos e polímeros começa a ter uma maior participação na composição geral do veículo, assim como a diminuição da espessura das chapas usadas.

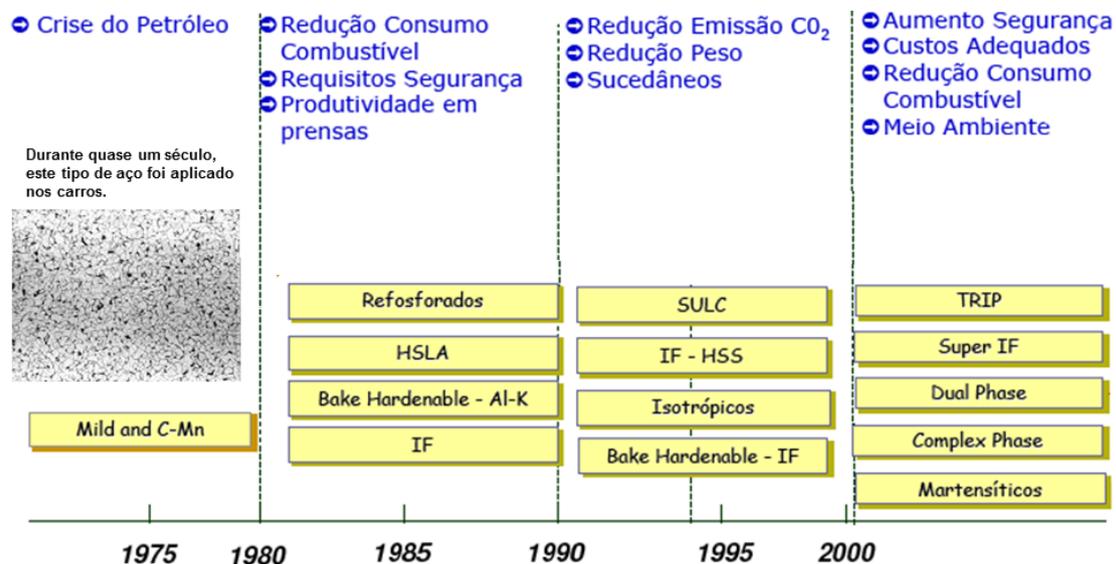
A crise do petróleo além de intensificar o desenvolvimento de novos materiais voltou os olhos da sociedade para a questão ambiental. Como o combustível fóssil utilizado tem grande impacto no ecossistema, a diminuição de peso se tornou imprescindível. Na década de 1980, novos tipos de aços surgiram como os laminados a quente microligados e refosforados e os laminados a frio utilizados principalmente para peças de reforço estrutural. É nesse contexto que surge também os aços de ultra baixo teor de carbono (IF) e os que sofrem o efeito Bake Hardening (aço BH 180 e 220) (MARRA, 2008).

O problema de se produzir aços de alta resistência para utilização em automóveis é que, ao mesmo tempo em que ele supre a necessidade de suportar altas cargas, essa propriedade

aumenta a energia necessária para que ocorra a conformação do material. Por isso, atualmente, aços de alta resistência e boa plasticidade vem sendo produzidos mudando não só parâmetros de tratamento térmico, mas também composição química e deformação prévia para que o custo de produção não se eleve tanto e o fator de segurança de um automóvel seja maximizado. A Figura 1 ilustra a evolução do uso dos aços na indústria automobilística.

Antes de 1980 o principal material usado na composição dos veículos era o aço a base de manganês. Na década de 1980 entram em cena os aços refosforados, HSLA (Aço de alta resistência e baixa liga), Bake Hardenable (endurecível pela cura da pintura) e aços IF (aço livre de interstícios). Eles trouxeram as vantagens de reduzir o consumo de combustível e aumentou a produtividade em prensas por terem boa conformabilidade e relação resistência vs peso alta. Na década de 1990, para alcançar uma maior redução da emissão de gás carbônico e peso começaram a ser usados os aços SULC (Aço de ultrabaixo teor de carbono), dentre outros. Já atualmente os principais materiais usados na composição dos veículos são os aços TRIP (Aço com transformação induzida por deformação), Dual Phase (caracterizado por possuir ferrita e martensita em sua microestrutura) e aços martensíticos que aumentaram o nível de segurança e reduziram o consumo de combustível não prejudicando tanto o meio ambiente.

**Figura 1 - Evolução do uso de materiais na indústria automobilística.**



Fonte: MARRA,2008.

## 1.2 Tratamentos térmicos

Tratamento térmico tem por objetivo mudar as propriedades de metais em geral e controlar determinadas características. Ele é realizado em forno em um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento controlando-se parâmetros como tempo, temperatura, atmosfera e taxa de resfriamento. As propriedades dos aços dependem da organização de sua estrutura cristalina. Cada tipo de tratamento térmico causa determinadas variações na microestrutura que ao serem transferidas ao aço podem mudar suas propriedades(CHIAVERINI, 1998).

Geralmente, o aumento em algumas propriedades ocorre em detrimento de outras. Um exemplo desse fenômeno é o aumento da ductilidade acarretar um abaixamento de dureza e resistência à tração. Os principais fatores que influenciam este tipo de fenômeno são temperatura, o tempo de permanência na mesma e a taxa de **resfriamento**. Na maioria dos **casos**, os tratamentos **térmicos** ocorrem acima da temperatura **crítica** do aço, isto é, a temperatura na qual ocorre mudança na microestrutura para a formação de austenita. As mudanças subsequentes ocorrem a partir dessa estrutura cristalina. Um aquecimento homogêneo e sempre desejável para evitar que haja empenamento ou surgimento de tensões internas que comprometem as propriedades. Quanto maior for a temperatura acima da zona crítica, maior será a certeza de que houve dissolução **completa** dos carbonetos que porventura estiverem formando uma outra fase. Porém, pode ocorrer também um aumento do grão austenítico. Esse aumento de grão, apesar de diminuir a resistência a tração de aços, por exemplo, é suplantado pela vantagem de se ter maior segurança que houve completa dissolução de carbonetos. (CHIAVERINI,1998)

A contribuição do tempo de permanência no forno é mais ou menos igual ao da temperatura, quanto maior o tempo, maior será o tamanho de grão da austenita. Isso ocorre pois tempo e temperatura são fatores que influenciam diretamente a difusão dos átomos da estrutura interna dos aços. Mesmo assim, é necessário evitar tempos muitos longos para reduzir o custo do processo utilizando menor energia para manter o aquecimento do forno e evitar a oxidação e decarbonetação excessiva do material.

O resfriamento para aços é o fator mais importante a se considerar no processamento via tratamento térmico. Variadas estruturas internas podem ser obtidas aliando-se tempo de permanência no forno e taxa de resfriamento que acarretarão aumento da resistência à tração e aumento da dureza, por exemplo (GASSE, 1991). A escolha do meio de resfriamento é uma tarefa que exige atenção, pois a utilização de meios drásticos como água pode gerar

empenamento tensões internas e por outro lado meios que promovem taxa de resfriamento baixa, pode impedir as modificações de interesse na estrutura interna. Os meios mais comuns para o resfriamento de aços e suas respectivas velocidades estão representados na Tabela 1.

**Tabela 1 -Velocidade de resfriamento de meios em comparação com a água a 18 °C na faixa de temperatura 720 °C a 550 °C**

Meio de resfriamento	Velocidade de resfriamento relativas à da água a 18 °C na faixa de temperatura 720°C a 550°C
Solução aquosa a 10 % NaOH	2,060
Água a 0 °C	1,060
Água a 25 °C	0,720
Ar	0,028
Vácuo	0,011

Fonte: CHIAVERINI,1991.

A atmosfera do forno é outro ponto a ser considerado visando evitar dois tipos de fenômenos: a descarbonetação que diminui a dureza da superfície e a oxidação que gera formação da casca de óxido. Esses fenômenos ocorrem basicamente quando oxigênio, anidrido carbônico ou vapor de água estão presentes no meio sozinhos ou em conjunto. Para evitar que esses dois fenômenos ocorram podem ser utilizadas atmosferas inertes como hidrogênio e amônia dissociada (**fonte** barata de H<sub>2</sub>). Outra opção é a utilização de aquecimento via banhos de sal fundido, como ocorre com os aços rápidos por exemplo (CHIAVERINI, 1991). Dentre os principais tratamentos térmicos existentes podemos destacar o recozimento como sendo um dos mais importantes para o processamento dos aços BH.

### 1.2.1 Recozimento

É o tratamento térmico utilizado quando é necessário aliviar as tensões de tratamentos termomecânicos anteriores feitos nos aços, ajustar o tamanho de grão, remover gases, alterar a ductilidade, resistência à tração, produzir uma microestrutura bem definida dentre outras. Esse processo pode ser classificado em vários tipos de acordo principalmente com a temperatura em que o tratamento ocorre, dentre outras diferenças (CHIAVERINI, 1991).

### **1.2.2 Recozimento total**

Ocorre com o aquecimento do aço acima da zona crítica (zona na qual ocorre a austenitização) e depois de deixar o tempo necessário para que ocorra a completa dissolução de carbonetos, há o resfriamento lento do material. Os constituintes principais desse tratamento são a perlita e ferrita quando o aço é hipoeutetóide ou hipereutetóide e somente perlita quando o aço é eutetóide.

### **1.2.3 Recozimento para alívio de tensões**

Este tipo de tratamento térmico ocorre com o aquecimento a temperaturas abaixo da zona crítica com o objetivo de aliviar as tensões de processamentos termomecânicos a que os aços foram submetidos. Logo acima da temperatura ambiente essas tensões já são aliviadas, mas é aconselhável um aquecimento lento até 500 °C para que melhores resultados sejam alcançados (CHIAVERINI, 1991).

### **1.2.4 Recozimento em caixa**

Usado para a proteção de uma grande quantidade de peças de aço impedindo que elas tenham contato com uma atmosfera oxidante. No caso de chapas de aço tem por objetivo produzir uma estrutura ferrítica recristalizada depois da laminação a frio (CHIAVERINI, 1991). Na fabricação de um aço BH laminado a frio, logo depois da conformação, o material está totalmente encruado. Assim um processo de tratamento térmico deve ser efetuado para que ocorra um alívio de tensões e recristalização da microestrutura tomando-se o cuidado de o proteger da oxidação. O recozimento em caixa surge como uma solução para alcançar esses dois objetivos (GASSE, 1991) Nesse processo as bobinas são submetidas a uma temperatura acima da temperatura de recristalização e mantidas nessa por tempo suficiente para que ocorra o aquecimento homogêneo da estrutura. A atmosfera é controlada utilizando um fluxo constante de hidrogênio. No resfriamento, aquecimento é retirado, mas o fluxo de hidrogênio continua sendo utilizado até que atinja a temperatura de 400 °C, quando água é utilizada para o abaixamento da temperatura até a ambiente (LEMOS, 2011).

A recristalização que ocorre nesse tipo de tratamento favorece a formação de uma estrutura policristalina com orientação cristalográfica paralela à direção de laminação. Esse tipo de

arranjo faz com que a chapa apresente propriedades mecânicas em todas as direções o que melhora o coeficiente de anisotropia (valor  $r$ ). Assim com o tratamento térmico não só a recristalização do material para melhoria das propriedades mecânicas é alcançada mas também busca-se um aumento do valor  $r$  que irá ditar a estampabilidade da chapa formada (LEMOS,2011).

### **1.2.5 Recozimento contínuo**

O processo de recozimento contínuo abrange um conjunto de atividades realizadas após a laminação a frio do aço. Nela efetua-se processos de limpeza eletrolítica, recozimento, encruamento e aparado de borda (SOUSA, 2006). Devido à realização de diversos processos em um único equipamento, ele apresenta algumas vantagens em relação ao recozimento em caixa. Diminuição da perda de material, alta produtividade e automatização são alguns exemplos.

Devido a sua alta taxa de resfriamento, esse processo possibilita um grande ganho no valor do efeito BH pelo aumento na quantidade de carbono em solução, além de melhorar características dimensionais, planicidade e limpeza superficial. Parâmetros muito procurados pelas indústrias automobilísticas atualmente (JUNIOR,2010).

### **1.2.6 Tratamento térmico necessário ao envelhecimento do aço BH**

Os tratamentos mencionados até agora são realizados geralmente na etapa de produção do aço BH. Dependendo da sua função final, os tratamentos térmicos acima podem ser escolhidos separadamente. Mas um outro tratamento ocorre na parte de finalização do produto que irá possibilitar o endurecimento por precipitação característico do aço BH. O grande objetivo desse tratamento posterior é garantir a energia necessária para que os átomos de carbono e nitrogênio, principalmente, migrem para as discordâncias garantindo que haja o ancoramento das mesmas.

O envelhecimento é a mudança de propriedades que ocorre com o tempo. Essas mudanças podem ser prejudiciais, porém com o correto ajuste de fatores, pode-se gerar propriedades interessantes, como o aumento do limite de escoamento para os aços BH. No processo de cura da pintura da parte externa do veículo (entre 170 °C e 180 °C), ocorre a migração de átomos de carbono e nitrogênio da solução sólida para as discordâncias causando uma perturbação na rede cristalina. Essa variação de energia nas discordâncias causa o aumento do limite de escoamento do aço. (DIAS, 2011)

Esse aumento de propriedade é função da quantidade de carbono em solução sólida e é bem compreendido em escala atômica. Porém a relação de quantidade de carbono e nitrogênio em solução e o aumento de propriedades e o efeito BH não é muito bem entendido. Ele é complexo, pois o mesmo fenômeno que causa aumento das propriedades, causa a deterioração do aço, caso esse seja estocado durante muito tempo (DIAS, 2011).

### **1.3 Aço Bake Hardening**

Aço Bake Hardening é o nome dado a um aço com quantidade de carbono e nitrogênio em solução suficiente para causar envelhecimento por deformação. Chapas feitas com esse material com aplicação principal na indústria automobilística, apresentam alta conformabilidade e ganho de resistência mecânica após o processo da cura da pintura, no qual ocorre envelhecimento e consequente aumento da resistência à indetação (JEONG, 1998).

Ele é produzido com diferentes níveis de estampabilidade e sua classificação é dada conforme o limite de escoamento mínimo que ele terá após o processo de cura pela pintura. Assim o aço BH 180, terá no mínimo 180 MPa de limite de escoamento; o aço BH 220 terá, no mínimo 220 MPa de limite de escoamento e assim por diante.

Existem basicamente duas formas pelas quais os aços BH podem ser fabricados: quando o C e N são adicionados na composição química da liga em quantidade estequiométrica superior a de Ti e Nb; e a outra forma é quando a quantidade de C e N é menor que a estequiométrica. No primeiro caso, a presença dos átomos C e N pode impedir a formação de uma textura cristalina condizente com um bom valor de  $r$ . No segundo caso, é necessário permitir que uma quantidade adequada de carbono esteja em solução sólida no produto final depois que ocorrer a solubilização dos carbonetos no recozimento (TAKAHASHI,2003).

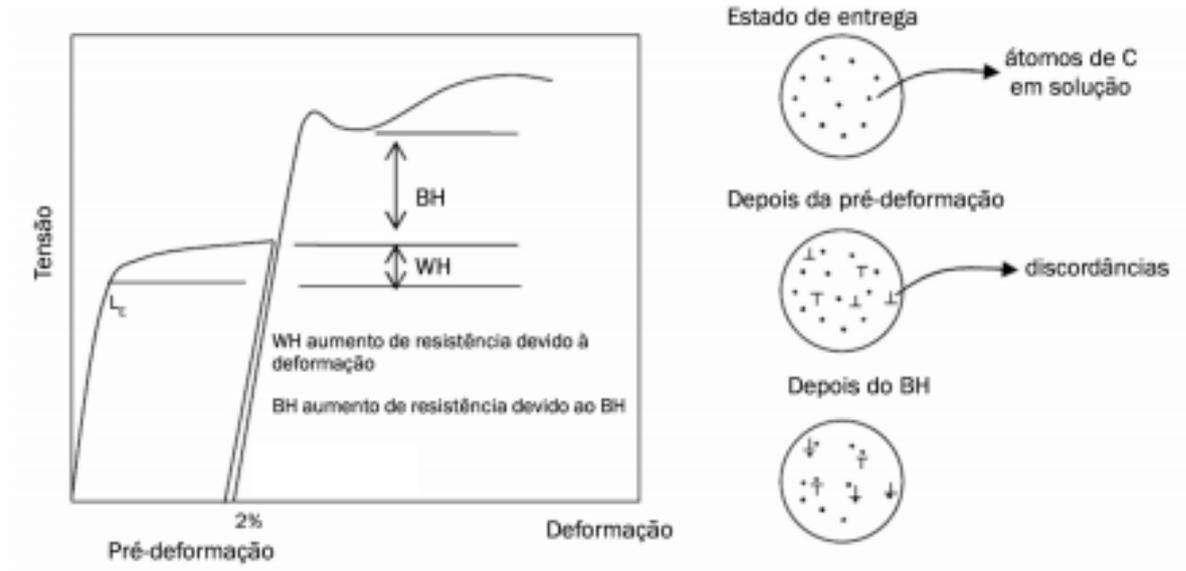
#### 1.4 O efeito BH

O efeito BH é o nome dado ao aumento da resistência mecânica do aço depois do processo de pintura. Depois de ser estampado, a peça é colocada em um forno para ser pintada. A cura da pintura ocorre geralmente em 170 °C durante 20 minutos. Com isso os átomos de carbono e nitrogênio que formavam solução sólida se difundem para as discordâncias formadas pela estampagem anterior e as seguram resultando em um aumento da resistência mecânica (TAKAHASHI,2003).

Esse movimento de átomos da solução para as discordâncias e ancoramento das mesmas é denominado atmosfera de Cottrell. Com o tempo, mais átomos de carbono e nitrogênio são atraídos para essa atmosfera e eventualmente ela pode agir como uma área de nucleação de precipitados. Esses precipitados também vão servir de obstáculo para o movimento das discordâncias aumentando propriedades como o limite de escoamento do material (SOURAV, 2012).

Para realizar o cálculo do efeito BH para o aço é feita uma sobreposição de dados de curva de fluxo antes e depois de um tratamento térmico. Esse método consiste em subtrair a resistência mecânica do aço quando submetido a um determinado valor de pré-deformação do menor patamar de limite de escoamento depois do tratamento térmico de envelhecimento. A Figura 2 exemplifica como é feito esse processo para um valor de pré-deformação em tração de 2 %. É importante salientar que o aumento da resistência apresentado pelo aço vem de duas fontes: o efeito BH (BH) e o encruamento (WH). A esse último efeito é relacionado o aumento da densidade de discordâncias na microestrutura dificultando a deformação plástica.

**Figura 2-Cálculo do efeito BH mediante sobreposição de curvas de fluxo.**



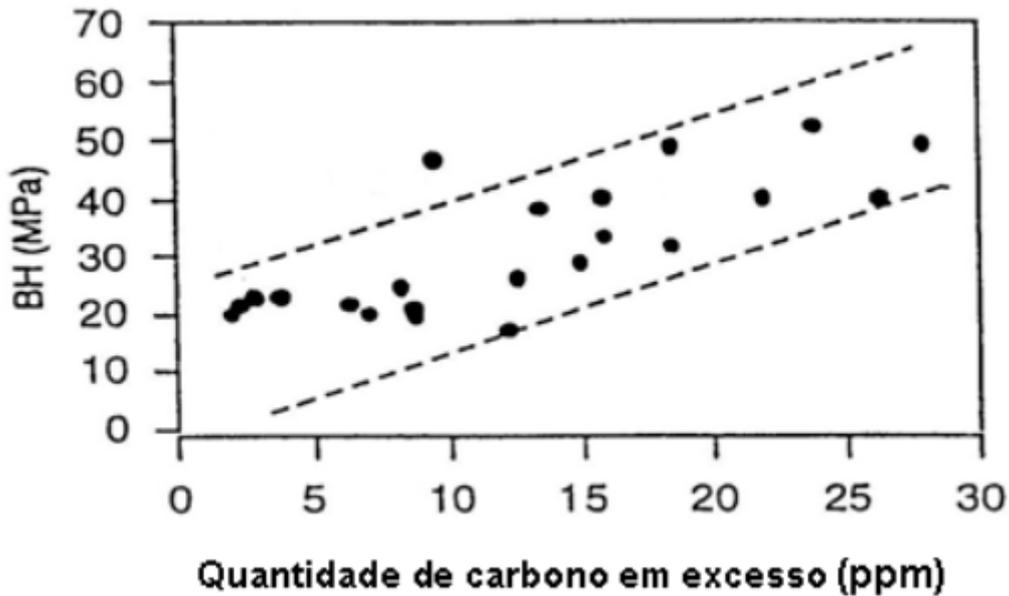
Fonte: (DIAS, 2011)

### 1.3.1 Efeito do Carbono e nitrogênio

As quantidades de carbono e nitrogênio no aço vão influenciar principalmente a estrutura cristalográfica que o material vai apresentar. Baixos valores de C e N vão contribuir para que a estrutura {1,1,1} esteja presente, o que vai aumentar a estampabilidade do material. O nitrogênio será removido na forma de nitreto de titânio, enquanto o C será removido mediante reação com Ti. Esses precipitados quando presentes na estrutura vão dificultar o movimento das discordâncias aumentando propriedades como limite de escoamento do aço, por exemplo. A explicação para essa maior dificuldade no movimento das discordâncias quando em contato com precipitados está relacionado à energia associada a cada sistema. O sistema formado pelo carboneto em solução sólida junto à discordância possui menor energia livre, portanto é mais estável que o carboneto separado da discordância (DIAS, 2009).

O efeito BH é muito sensível à quantidade de átomos presentes nos interstícios do material. Para maximizar o aumento do limite de escoamento com esse efeito, é necessário ter a maior quantidade de carbono livre possível (RITESH, 2006). A Figura 3 ilustra o efeito do carbono livre no Efeito BH:

**Figura 3-Relação entre a quantidade de carbono em excesso com o Efeito BH.**



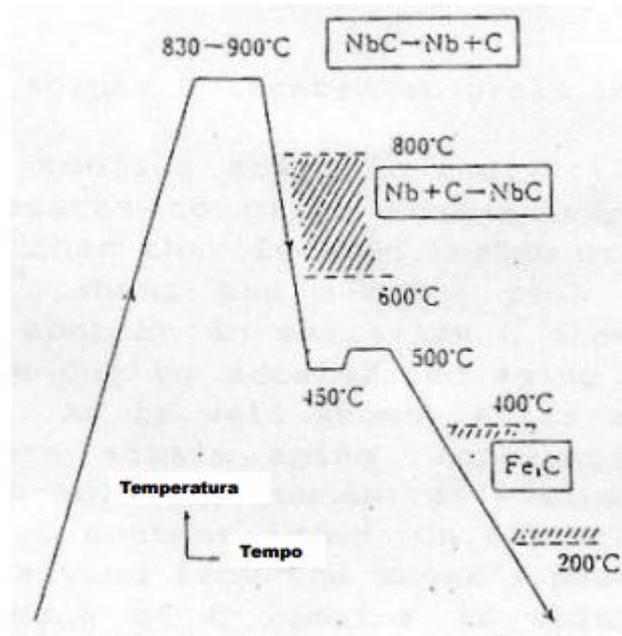
Fonte: (DIAS,2011)

Pode-se perceber que o aumento da quantidade de carbono livre até 30 ppm aumenta o efeito BH diretamente.

### 1.3.2 Presença dos elementos Ti e ou Nb.

A presença de Titânio ou Nióbio no aço pode formar precipitados que diminuem a quantidade de carbono na estrutura do aço. Dependendo da temperatura do recozimento ao qual o aço é submetido, variações no efeito Bake Hardening são observadas. Segundo Dias (2011), observa-se uma considerável queda no valor do BH em temperaturas entre 700 °C e 800 °C e a isso ele relaciona à precipitação de TiC e NbC. A Figura 4 mostra esquematicamente as reações que ocorrem na microestrutura do material quando submetidos a diferentes temperaturas de recozimento em seu processamento.

**Figura 4-Reações que ocorrem no material quando submetido a diferentes temperaturas de processamento**



Fonte: (DIAS, 2011)

Entre 830 e 900 °C ocorre a reação de dissolução dos carbonetos de nióbio que vão aumentar a quantidade de carbono em solução sólida. Entre 600 °C e 800 °C ocorre a precipitação de carbonetos que podem afetar o efeito BH. Já em temperaturas abaixo de 400 °C, não é observada grande mudança metalúrgica que vá influenciar o efeito BH (DIAS, 2011).

### 1.3.3 Tempo de encharque

Tempo de encharque pode ser entendido como tempo que o material permanece no forno durante o tratamento térmico (CHIAVERINI,1996). Como o processo de envelhecimento envolve a difusão de átomos, duas principais variáveis envolvidas no processo são tempo e temperatura.

Dias (2011) estudou a influencia de diferentes tempos de encharque no aumento do limite de escoamento do aço BH 180. Ele observou que até 4 % de pré-deformação em tração há um aumento do efeito BH relacionado ao aumento do tempo de encharque que obteve um valor máximo em 40 min. Isso pode ser explicado pelo aumento da quantidade de carbono que migra até as discordâncias para contribuir para a atmosfera de Cottrell.

Türkmen e Gündüz (2014) estudaram, dentre outros fatores, a influência do tempo de encharque no efeito BH de aços dual fase. Apesar de ser outro tipo de composição química, pode-se realizar uma relação, pois um dos modos de endurecimento do aço utilizado também ocorre com o material usado no presente trabalho. Foi possível perceber que em diferentes tempos de envelhecimento, o acréscimo no limite de escoamento apresentou um comportamento parecido mesmo com diferentes formas de martensita formadas. Eles encontraram para 20 minutos de tratamento o maior efeito BH. Para explicar esse resultado o autor relata que o aumento de propriedade nesse tempo ocorre pelo movimento de átomos para as discordâncias ancorando as mesmas, porém eles não chegaram a uma conclusão para o comportamento diferente com o tempo.

Jeong (1998) estudou o efeito do tempo de envelhecimento no efeito BH em chapas de aço. Apesar de o teste ser realizado a temperatura ambiente é interessante relatar seus resultados nessa seção, pois ele explica como o tempo influencia no envelhecimento de aços BH. Seus resultados mostraram que quanto maior o tempo de envelhecimento, menor é o efeito BH a temperatura ambiente para as amostras com pré-deformação. Ele conclui que os aços sem pré-deformação são mais resistentes a ação do tempo que aqueles que sofreram esse tipo de processamento.

#### **1.3.4 Quantidade de pré-deformação**

Um efeito a ser considerado é o da deformação tanto no processamento do aço quanto na conformação deste para a fabricação dos produtos que o utilizam como matéria-prima. Esses processos geram discordâncias na microestrutura do aço e afetam diretamente o efeito BH.

Souza (2010) Estudou o efeito da pré-deformação plástica no envelhecimento do aço BH 180. Sua análise mostrou que à medida que ocorre o aumento da porcentagem de pré-deformação, existe também um aumento na resistência mecânica do material após o envelhecimento. Esse ganho é significativo para até 2% de pré-deformação, obtendo melhores resultados com 1% de pré-deformação. Esse ganho de resistência mecânica relacionado ao efeito BH tende a se estabilizar mesmo que os valores de pré-deformação aumentem antes do envelhecimento.

Dias (2011) também estudou o efeito da pré-deformação plástica em tração no envelhecimento do aço BH 180. Utilizando 0 %, 1 %, 2 %, 4 % e 8 % ele demonstrou que existe o maior aumento no limite de escoamento do aço BH 180 na pré-deformação plásticas em tração de 8 % entre 10

minutos e 20 minutos. Em outras condições testadas a interação entre discordâncias contribuiria pela diminuição do número de discordâncias afetadas pela atmosfera de Cottrell.

Ritesh (2006) analisando a influência da pré-deformação em tração, encontrou que 2 % de pré-deformação em tração e 20 minutos de tempo de encharque eram as melhores condições para garantir um aumento no efeito BH do aço. Mas analisando pré-deformações maiores para a mesma temperatura e tempo, ele observou que ocorre uma diminuição do efeito BH.

Para explicar a diminuição do efeito BH com o aumento da pré-deformação ele analisa a difusão de átomos durante o envelhecimento. A taxa com que os átomos se movem para as discordâncias dependem tanto da mobilidade dos átomos na estrutura quanto da força que permitem o deslocamento desses. Essa força aumenta com o envelhecimento do aço. A pré-deformação serve para aumentar a força que dá origem à migração dos átomos. Quando pequenas pré-deformações são aplicadas ao material, elas dá origem a essa força de migração e se dados o tempo e temperatura corretas, os átomos vão para essas discordâncias promovendo o ancoramento das mesmas. Quando a pré-deformação é aumentada, a densidade de discordâncias também aumentará. Só que como a concentração de carbono solúvel continua constante durante o processo, chega um ponto que os átomos de carbono presentes não são suficientes para promover o ancoramento de novas discordâncias originadas. Assim, como não haverá ancoramento das discordâncias, o mecanismo de endurecimento a partir desse ponto não é controlado mais pelo efeito BH e sim por outros efeitos como o encruamento, por exemplo. (RITESH, 2006)

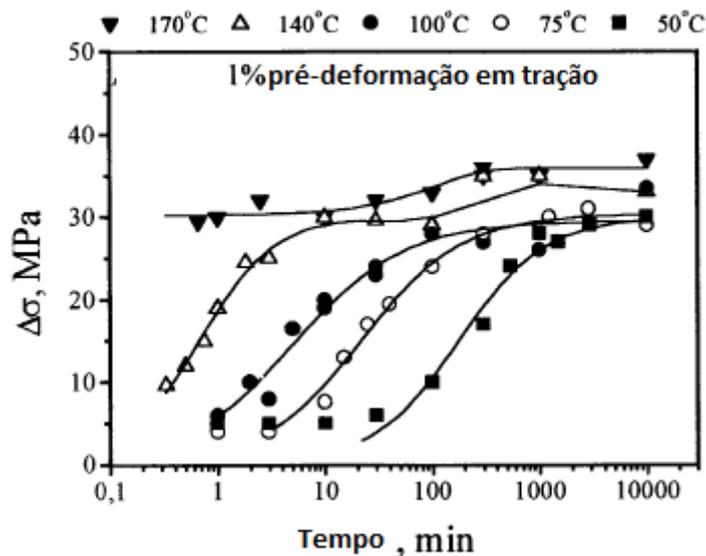
### **1.3.5 Temperatura do Envelhecimento**

A temperatura do tratamento térmico tanto na produção do aço (recozimento) quanto como uma das últimas etapas no processamento do produto é importante para as características finais do material. A temperatura do recozimento influencia a quantidade de carbono que entrará em solução sólida e por consequência contribuirá para o efeito BH depois desse processo. Já a temperatura no tratamento posterior realizado no aço para proporcionar o efeito BH, chamada de temperatura de envelhecimento, também é importante, pois, influenciará o movimento dos átomos para as discordâncias.

De e Coolman (1999) estudaram a relação entre a temperatura de tratamento térmico com o aumento de limite de escoamento (LE) devido ao efeito BH. Eles relataram que existe um patamar máximo de aumento de LE e este é atingido mais rapidamente com o aumento da

temperatura de tratamento. Para exemplificar, a Figura 5 mostra que em 170 °C esse patamar é atingido com menos de 1 minuto de tratamento, enquanto que a 50 °C ele só é atingido com 1000 min de processo. Percebe-se então que o máximo valor de incremento de LE conseguido por efeito BH independe da temperatura de tratamento se o processo ocorrer em um tempo suficientemente grande (DE; B.C., 1999).

**Figura 5-Efeito do tempo e temperatura de tratamento térmico com efeito BH.**



Fonte: (DE; B.C., 1999, modificada)

Dehghani e Jonas (2000) tiveram resultados interessantes estudando a relação da temperatura de tratamento térmico com o efeito BH. Eles utilizaram as temperaturas de 100 °C e de 200 °C para realizar a pré-deformação e depois submeteram essas amostras ao tratamento de 170 °C e 20min para avaliarem o efeito BH. Em temperaturas de envelhecimento maiores que as utilizadas para fazer a pré-deformação o efeito BH apresentou valores acima de 35 MPa. O que não aconteceu para as outras condições. Os autores explicam que ao alcançar a temperatura de 200°C aparentemente o mecanismo de envelhecimento começa a mudar e o superenvelhecimento se inicia causado principalmente pela coalescência dos precipitados. Com uma quantidade maior de precipitado dissolvido antes do tratamento a 170 °C, uma maior quantidade deles estará disponível para migrarem às discordâncias para gerar o efeito BH (DEHGHANI; JONAS, 2000).

Para analisar a influência da temperatura de recozimento, isto é, na etapa de produção do aço BH, SAKATAH e SATOH (2001) estudaram diferentes processamentos dos aços e depois mediram o efeito BH. Eles concluíram que em temperaturas entre 600 °C e 800 °C ocorre uma

queda no efeito BH o que é atribuído a uma precipitação de carbonetos que deixariam de influenciar nesse efeito logo depois, no tratamento de envelhecimento. Seus resultados podem ser vistos na figura 6.

**Figura 6-Efeito da temperatura de recozimento de uma chapa no índice bake hardening**



Fonte: (SAKATAH; SATOH, 2001)

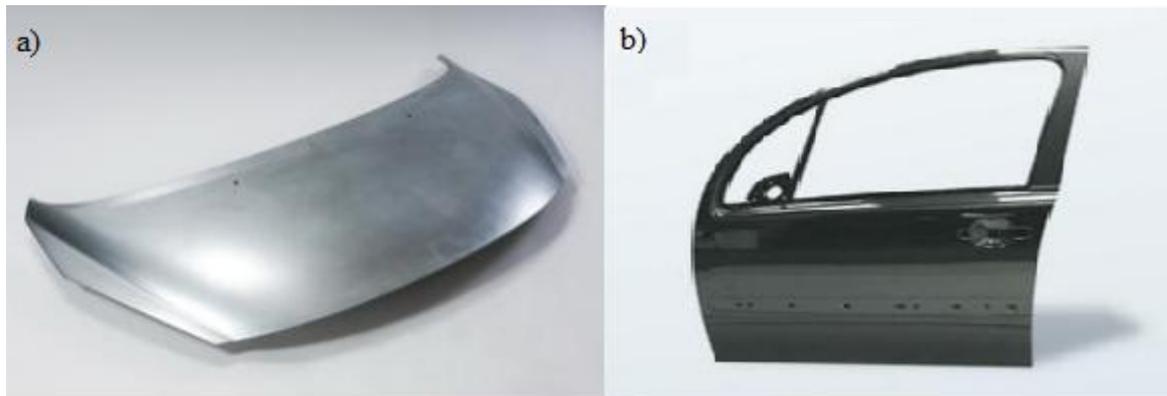
#### 1.4 Características dos aços BH usados na indústria automobilística

Os aços BH produzidos pelas mais diversas siderúrgicas tem seu aumento na resistência mecânica girando em torno de 40 MPa. Graças ao efeito BH, esse tipo de aço oferece duas principais vantagens:

- Aumento da resistência à indetação em chapas usadas para componentes externos (capô, portas e teto)
- Diminuição de peso dos componentes causado pela utilização de chapas mais finas.

A Figura 7 mostra alguns exemplos de partes do automóvel onde são usados aços BH.

**Figura 7: Exemplo de aplicação do Aço BH na indústria automobilística**



- a) Capô de veículo fabricado com aço BH 180. B) Porta de veículo fabricado com aço BH 260

Fonte: Bake... (2016)

A Figura 8 apresenta a especificação de alguns aços BH usados na indústria automobilística. Sendo encontrados os valores de tensão limite de escoamento (LE), tensão limite de resistência em tração (LRT), fator  $r$  ( medida de estampabilidade) e efeito BH. A fim de conhecimento, encontra-se a especificação de efeito BH do aço estudado nesse trabalho como sendo de no mínimo 35 MPa.

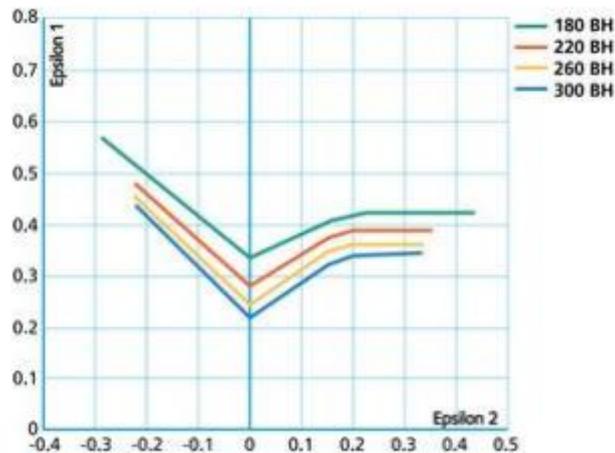
**Tabela 2** Especificação de aços BH comumente usados na indústria automobilística

	LE(MPa)	LRT(MPa)	$r$	BH ( MPa)
180 BH	180-230	300-360	$\geq 1,6$	$\geq 35$
195 BH	195-270	340-400	$\geq 1,3$	$\geq 35$
220 BH	220-270	340-400	$\geq 1,5$	$\geq 35$
260 BH	260-300	370-430		$\geq 35$
300 BH	300-360	420-480		$\geq 40$

Fonte: Bake... (2016)

Um fator importante ao se trabalhar com aço BH é a conformabilidade, pois esses materiais muitas vezes passam por processos de conformação mecânica para darem origem as formas desejadas. Uma forma de medir essa capacidade é por meio de curvas limite de conformação. A figura 9 exhibe as principais famílias dos aços BH usados na indústria de veículos e seu comportamento na conformação. No eixo  $y$  desse gráfico encontra-se a maior deformação e no  $x$ , a menor. Eles apresentam comportamento semelhante aos aços IF (livre de interstícios) com a mesma faixa de limite de escoamento.

**Figura 8 Curva limite de conformabilidade para os principais aços BH usados na indústria**



Fonte: Bake... (2016)

### 1.5 Ensaio de cisalhamento

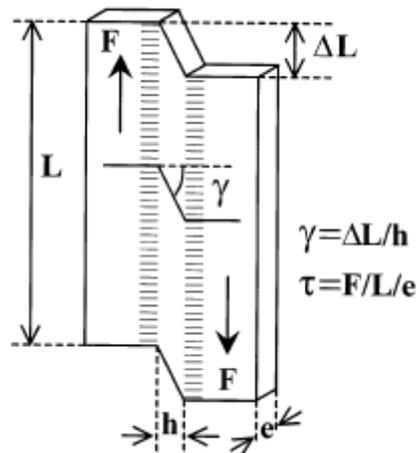
As chapas de aço usadas na indústria automobilística sofrem vários processos de conformação que envolvem grande valores de deformação. Conhecer bem o comportamento desses materiais prevendo a tensão, a deformação e principalmente a ocorrência de defeitos causados pela conformação é muito importante para desenvolver materiais que respondem cada vez melhor a esses tipos de esforços. Esse conhecimento gerou a necessidade do desenvolvimento de ensaios mais complexos e sofisticados para substituir ou complementar os já conhecidos ensaios de tração uniaxiais (BOUVIER et al., 2006).

Nesse cenário surge o ensaio de cisalhamento que tem se mostrado muito útil quando é necessário descobrir propriedades de amostras planas. Os dispositivos são construídos de modo a impor uma força na mesma direção mas em sentidos opostos em grampos colocados lateralmente ao corpo de prova. Ele apresenta as vantagens de não formar o “pescoço” (região de alta deformação que materiais podem apresentar dependendo da deformação no teste de tração uniaxial), simplificação da geometria da amostra e a possibilidade de inverter a carga (RAUCH, 1997).

Um teste muito conhecido que esse método de estudo pode realizar é o teste de Bauschinger. Nesse teste o material é altamente deformado em uma direção e depois recarregado na direção oposta. Alguns materiais ao sofrer esse processo apresentam uma diminuição na tensão (YOON

et al., 2005). A Figura 9 mostra a geometria e as principais variáveis que um corpo de prova construído para esse teste apresenta:

**Figura 9 Geometria de um corpo de prova para o ensaio de cisalhamento**

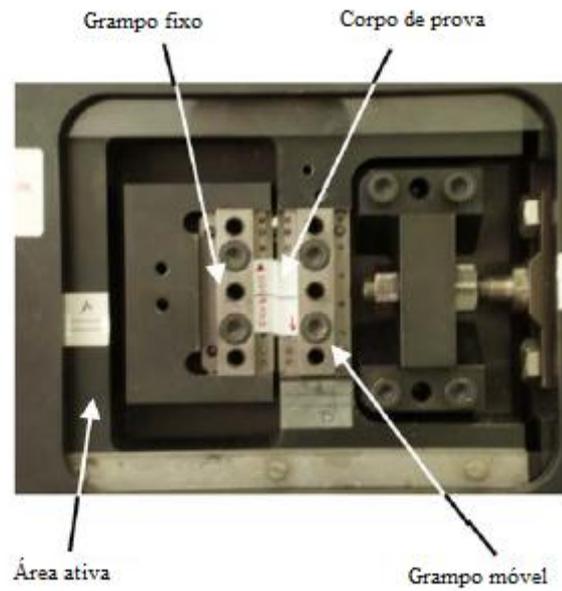


Fonte: (RAUCH, 1997)

Para a realização do ensaio, geralmente uma adaptação da máquina universal de ensaios é utilizada. Essa adaptação baseia-se nos estudos realizados por Genvois (1992). No seu equipamento, exemplificado na Figura 10, a rotação da amostra que está sob cisalhamento é impedida pela instalação de um aparato metálico rígido. O corpo de prova é retangular e como visto na Figura 10, é de fácil preparo. A amostra é presa no meio das placas metálicas e a tensão é aplicada em sentidos opostos. O teste não é sensível para imperfeições superficiais na amostra, excluindo aquelas que são originadas do processo de laminação, como por exemplo variações na espessura, por exemplo.

Os grampos que mantem a amostra fixa podem se mover simultaneamente ou apenas um deles exibe movimento enquanto o outro permanece fixo mantendo  $h$  constante. (BOUVIER et al., 2006)

**Figura 10: Dispositivo para o teste de cisalhamento**



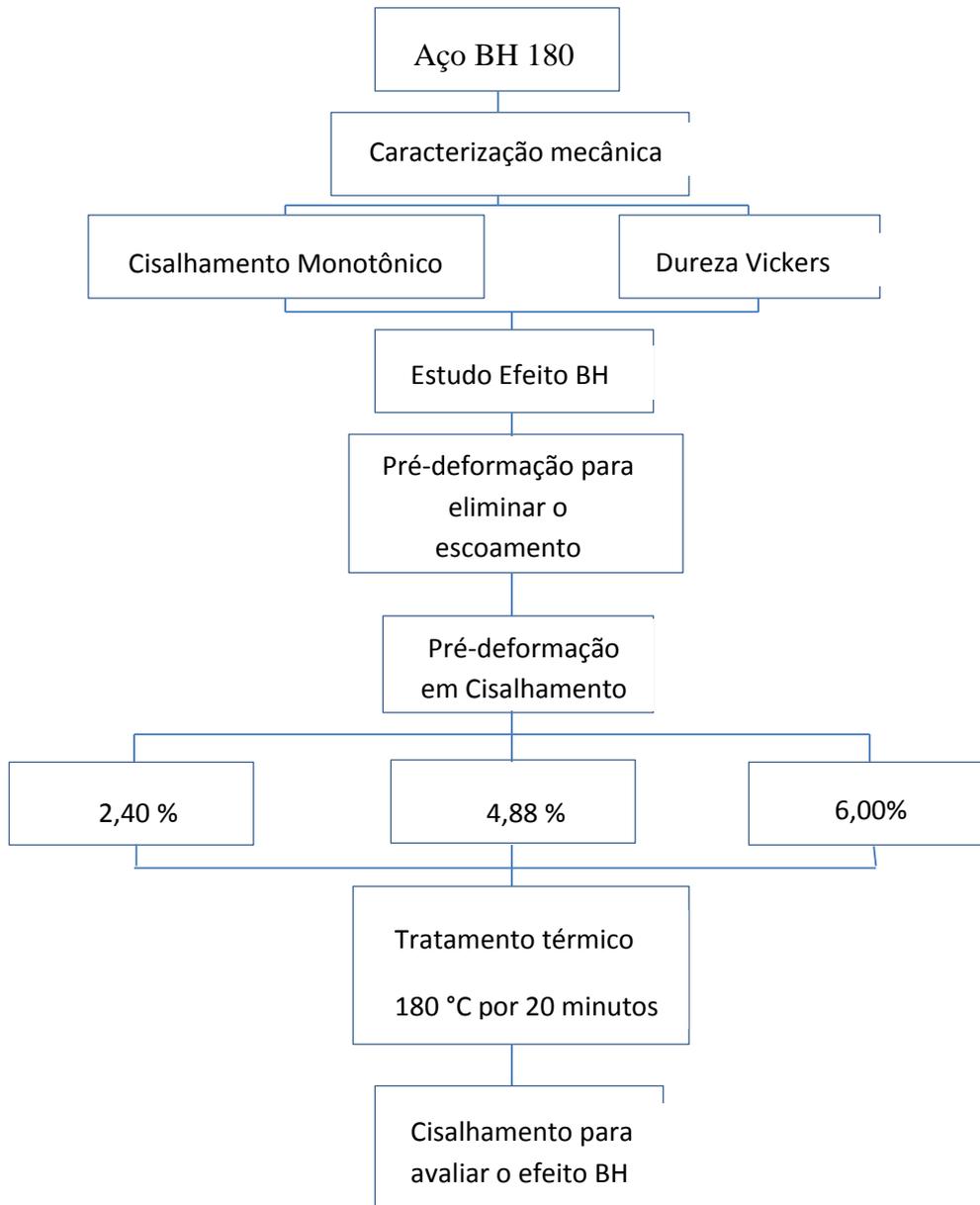
Fonte: (BOUVIER et al., 2006)

O teste de cisalhamento foi realizado nesse trabalho para quantificar o efeito BH, pois este é tradicionalmente feito com uso do ensaio de tração.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram usadas chapas do aço BH 180 fornecidas pela empresa USIMINAS. A técnica de carregamento mecânico utilizada neste trabalho foi o cisalhamento, utilizando corpos de prova com dimensões de 50mm x 15mm x 0,7mm (comprimento x largura x espessura). Parte das amostras sofreram carregamento monotônico e outras sofreram pré-deformação em cisalhamento de 2,40 %, 4,88 % e 6,00 % (deformação efetiva) para em seguida serem tratadas termicamente a 180°C por 20 min em forno tipo mufla da marca Magnus para investigar o endurecimento pelo efeito BH. Importante salientar que todas as amostras sofreram uma pré-deformação inicial de 1% em tração para diminuir o efeito do envelhecimento sofrido com o tempo de armazenamento do aço BH 180.

A Figura 11 apresenta o fluxograma que descreve a rotina de procedimentos experimentais adotada neste trabalho. O aço no estado como recebido foi analisado mediante uma caracterização mecânica que envolveu o cisalhamento. Um ensaio de dureza também foi realizado. Esse ensaio foi feito para se ter uma prévia da mudança de propriedade do aço depois do tratamento térmico. Uma pré-deformação em tração foi realizada para desancorar as discordâncias que por envelhecimento já se apresentavam ancoradas. Pré-deformações em cisalhamento nos valores de 2,40 % , 4,88 % e 6,00% foram feitas para avaliar o efeito do cisalhamento no endurecimento do aço BH 180. Um tratamento térmico a 180 °C e 20 minutos foi realizado com amostras desses 3 valores de pré-deformação e um ensaio de cisalhamento foi realizado para verificar possíveis mudanças de propriedades.

**Figura 11-Etapas de tratamento das amostras**

Fonte: Próprio autor

## 2.1 Material

Aço BH 180 com espessura inicial de 0,7mm e composição química conforme apresentado na Tabela 3:

**Tabela 3-Composição química média do aço BH (% em peso)**

<b>Elemento</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Al</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
<b>% em peso</b>	0,040 máx.	0,700 máx.	0,020 min	0,060 máx.	0,030 máx.

Santos et al. (2016)

## 2.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica das amostras no estado inicial foi feita a partir da medição da dureza Vickers com um de um microdurômetro e do ensaio monotônico de cisalhamento, o qual também foi utilizado para pré-deformar as amostras do aço BH 180 antes da execução do tratamento térmico assim como para quantificar o efeito BH.

### 2.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração uniaxial foi realizado em uma máquina de ensaios universais Instron 5982 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 3 e extensômetro mecânico (tipo agulhas) com 25mm de abertura, sendo utilizadas amostras com 80mm de comprimento útil, espessura de 0,7mm e comprimento total de 100mm. Foi realizado esse ensaio para a caracterização mecânica do aço BH 180 no estado como recebido a partir do cálculo da tensão limite de escoamento (LE), tensão limite de resistência à tração (LRT) e alongamento uniforme (AU) com uso do ensaio de tração.

O limite de escoamento foi calculado traçando-se uma reta paralela à inclinação no modo elástico do material. Essa reta foi transladada para que sua base cruzasse o eixo axial no valor de 0,002 de deformação. Observou-se onde a reta cruzou a curva representativa da tensão de fluxo e registrou o valor de tensão que esse ponto representava.

A tensão limite de resistência foi calculada tomando como referência o ponto de maior tensão experimentada pelo material durante o ensaio. O alongamento uniforme foi obtido traçando-se uma reta paralela à reta de deformação elástica a partir do ponto em que ocorre a máxima tensão no gráfico, onde se estima o valor de deformação.

### 2.2.2 Ensaio de Dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi realizado em um microdurômetro HMV Micro Hardness Tester Shimadzu® com carga de indetação igual a 0,2 Kgf e tempo de indetação de 15 segundos, ilustrado na Figura 12.

**Figura 12 Equipamento utilizado para medida de dureza**



Fonte: Próprio autor

### 2.2.3 Cisalhamento

Para a geração das curvas de fluxo foi utilizado um dispositivo acoplado à máquina universal de ensaios Instron 5582, usando extensômetro mecânico tipo agulha com abertura máxima de 25 mm. Para aquisição dos dados um software denominado Blue Hill 2.

O cisalhamento foi feito sob taxa de deformação igual a 0,001/s, sendo utilizado para quatro funções: a) obtenção das curvas de tensão cisalhante – deformação cisalhante sob carregamento monotônico nas amostras do aço BH 180 no estado como recebido, b) pré-deformação em cisalhamento de 1% para permitir a movimentação das linhas de discordâncias devido ao envelhecimento do material que foi entregue, c) pré-deformação em cisalhamento de 2,40 %, 4,88 % e 6,00 % de deformação cisalhante e d) cisalhamento monotônico após a realização de tratamento térmico com o objetivo de quantificar o endurecimento e/ou amaciamento provocados pelo efeito BH.

O cálculo da tensão e deformação cisalhantes foi feito com uso da Equações (1) e Equação (2)

$$\tau = F / A_{\text{cis}} \quad (1)$$

Sendo:  $\tau$  a tensão cisalhante (MPa),  $F$  a força (N) e  $A_{\text{cis}}$  a área cisalhada (comprimento x espessura).

$$\gamma = \Delta L / \Delta X \quad (2)$$

Sendo:  $\gamma$  a deformação cisalhante,  $\Delta L$  o deslocamento sofrido pelo corpo de prova de cisalhamento que variou de acordo com a quantidade de pré-deformação adotada nos ensaios (mm) e  $\Delta X$  a largura efetiva da amostra submetida ao cisalhamento, valor constante e igual a 5,03mm.

Para medir o endurecimento/amaciamento do aço BH devido ao efeito BH adotou-se a equação 3 a partir do cálculo da tensão limite de escoamento depois do tratamento de envelhecimento.

$$\text{Efeito BH} = \text{LE2} - \text{Tensão de fluxo ao término da pré deformação.} \quad (3)$$

Já o valor do endurecimento por deformação (WH) foi calculado a partir da diferença de tensão de fluxo antes da pré-deformação e limite de escoamento antes do envelhecimento(LE1), como está exemplificado na Equação 4.

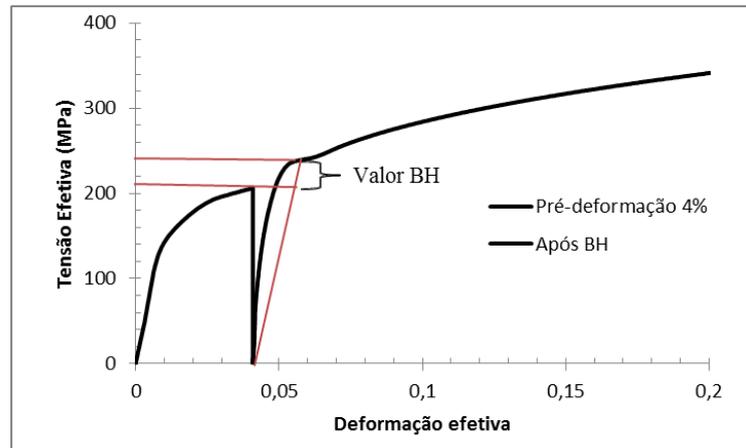
$$\text{WH} = \text{tensão de fluxo ao término da pré deformação} - \text{LE1} \quad (4)$$

E o Cálculo do ganho de resistência total foi realizada como está representado na Equação 5:

$$\text{Ganho Total} = \text{BH} + \text{WH} \quad (5)$$

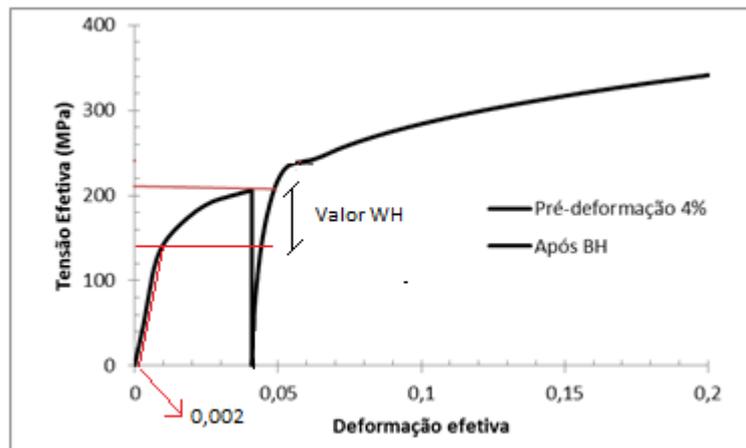
As Figuras 13 e 14 mostram como foi feito esse processo:

**Figura 13 Cálculo do Efeito BH a partir da sobreposição de curvas de fluxo**



Fonte: Próprio autor

**Figura 14 Cálculo do Valor de WH a partir da sobreposição de curvas de fluxo**



Fonte: Próprio autor

### 2.3 Caracterização Microestrutural

Os corpos de prova tanto no estado como recebido quanto depois do tratamento térmico e cisalhado a 4,88% de deformação cisalhante foram caracterizados microestruturalmente. Neste caso, fez-se o embutimento a frio com uso de resina do tipo acrílico autopolimerizante, em seguida as amostras com dimensão de 10mmx10mm x 0,7mm (comprimento x largura x espessura) foram lixadas manualmente com lixas d'água de #240, #320, #400 e # 600, polidas manualmente com pasta de diamante de granulometria igual a 9 $\mu$ m e 3 $\mu$ m e por fim, atacadas com reativo químico de Nital 3% (3mL de ácido nítrico e 97mL de álcool etílico).

Por fim, fez-se a digitalização das imagens com uso do microscópio óptico de marca Kontrol com sistema de aquisição de imagens.

#### **2.4 Tratamento Térmico**

Foi usado forno tipo mufla Magnus sendo escolhida a temperatura de 180° e tempo de encharque de 20 minutos com posterior resfriamento ao ar, deve-se destacar que antes e após a condução dos tratamentos térmicos as amostras permaneceram refrigeradas em refrigerador combinado Marca Consul Modelo CRM55.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Ensaio de Dureza Vickers

Após excluir o maior e menor valor encontrado no equipamento, o resultado da caracterização mecânica via dureza Vickers se deu pelo cálculo da média amostral e está representado na tabela abaixo:

**Tabela 4 Resultados de dureza da amostra como recebido**

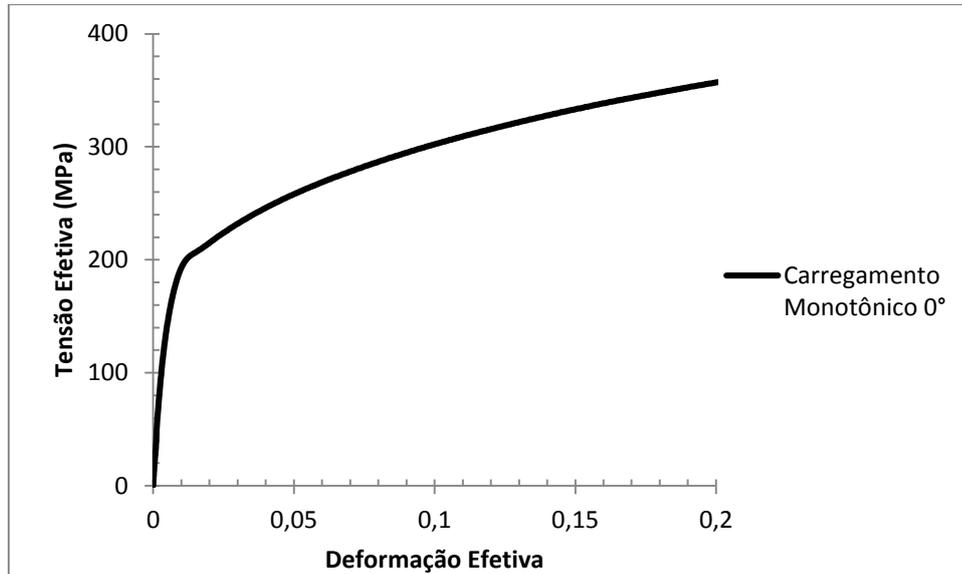
MEDIDA	ANTES DO TT	DEPOIS DO TT
1	115	114
2	115	113
3	118	110
4	117	115
5	118	115
6	117	116
7	116	112
8	112	113
9	114	111
10	118	110
<b>MÉDIA AMOSTRAL</b>	116	113
<b>DPR (%)</b>	2%	2,1%

Fonte: Próprio autor

#### 3.2 Ensaio de cisalhamento

Devido ao longo tempo em que o material foi estocado antes de realizar os testes foi realizada uma pré-deformação efetiva de 1% em cisalhamento nas amostras. Em seguida realizou-se a deformação monotônica mostrada na Figura 15 para eliminar a ocorrência de patamar de escoamento nas amostras do aço como recebido.

**Figura 15** Carregamento monotônico do aço BH 180 no estado como recebido a 0° de direção de laminação



Santos et al. (2016)

A Tabela 5 resume as propriedades do aço BH 180 usado no trabalho juntamente com a comparação da faixa esperada para esses valores.

**Tabela 5: Propriedades mecânicas do Aço BH 180**

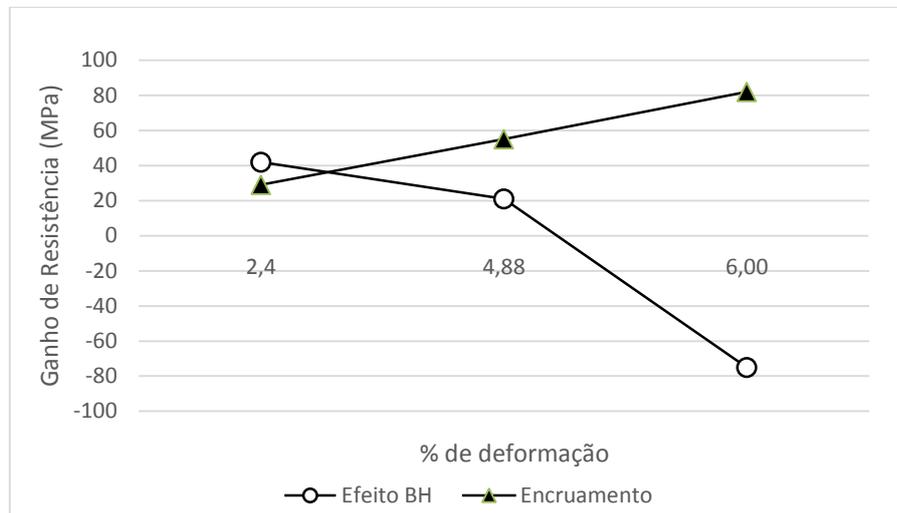
Resumo Propriedades Mecânicas Aço BH 180		
Parâmetro	Valor medido	Faixa
<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	200,00	180,00 – 240,00
<b>Limite de Resistência a Tração (MPa)</b>	310,75	300,00 – 360,00
<b>Alongamento Uniforme (%)</b>	24,00	-
<b>Alongamento Total (%)</b>	-	34 (L <sub>0</sub> = 50mm)

Santos et al. (2016)

A partir da análise dos gráficos de fluxo gerados no ensaio de cisalhamento e cálculo do efeito BH, as Equações 1, 2 e 3 foram usadas para organizar os resultados mostrados na figuras 16 e 17 abaixo. Nelas estão presentes os valores de pré-deformação efetiva em cisalhamento, do

Efeito BH e do encruamento. A Figura 16 apresenta a medida desses valores para corpos de prova retirados a 0° da direção de laminação da chapa:

**Figura 16 Relação entre pré-deformação, Efeito BH e encruamento na direção 0° de laminação**



Fonte: Produzido pelo autor

Pode-se perceber que o ganho de resistência pela contribuição do efeito BH tem seu valor máximo para a pré-deformação de 2,4% chegando a 42 MPa e sofre um decréscimo para as demais pré-deformações. Segundo a norma DIN BS EN 10325, o valor mínimo de ganho de resistência que um aço BH deve apresentar é de 30 MPa, isto é, apenas para essa pré-deformação, esse aço estaria de acordo com a especificação da norma. O contrário ocorre com o valor do encruamento, quanto maior a pré-deformação, maior o ganho de resistência ocasionado por esse mecanismo de endurecimento.

Esse comportamento do efeito BH pode ser explicado segundo Ritesh (2006). Tomando-se em conta que a difusão dos átomos para o contorno de grão é controlada tanto pela mobilidade dos mesmos quanto pela força que os movimentam, sabe-se que esta é função do tempo e temperatura do tratamento térmico. Como foram as mesmas condições nos três casos de pré-deformação, conclui-se que essa força será a mesma. A baixas deformações, os átomos começam a se deslocar para as discordâncias ocasionando seu ancoramento. Com o aumento dessa deformação, mais átomos de carbono vão difundir para as discordâncias, só que como a concentração de carbono solúvel é constante, chega um ponto que um limite de ancoramento é alcançado e o mecanismo de endurecimento via efeito BH deixa de ser efetivo. Esse ponto de queda de eficiência, segundo a figura 16, ocorre após a deformação de 2,40 %. Ou seja,

deformações acima desse valor deixam de contribuir efetivamente para o aumento do efeito BH para o aço BH 180.

O comportamento do encruamento teve uma tendência de aumento com o acréscimo da quantidade de pré-deformação. Isso se deve ao fato de o aumento da deformação causar também o ganho no número de discordâncias na microestrutura. O aumento da densidade de discordâncias funciona como uma barreira à dissipação de energia via deformação. Isso aumenta a resistência e conseqüentemente dificulta a deformação plástica do material, exemplificado no aumento do limite de escoamento.

A Tabela 6 mostra o ganho total de resistência experimentado pela chapa com esforço atuando na direção 0° de laminação. Pode-se perceber que existe uma proximidade nos valores totais de ganho de resistência quando se compara as pré-deformações efetivas em cisalhamento de 2,4 % e 4,88%. Porém, maiores valores de deformação ocasionam uma queda brusca no ganho de resistência. Pode-se afirmar que não é interessante aplicar deformações acima de 4,88 % com o objetivo de aumentar a resistência do aço BH 180.

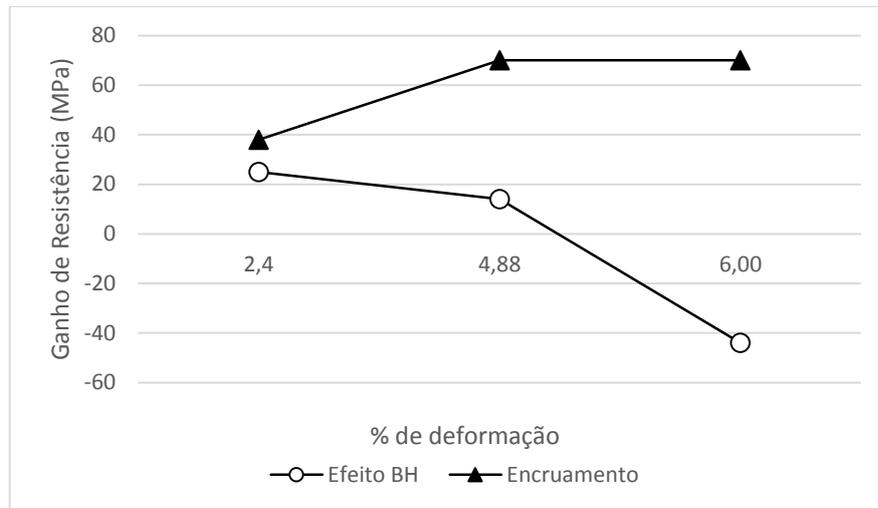
**Tabela 6-Relação de ganho de resistência total para 0° de direção de laminação**

<b>Pré-deformação (%)</b>	<b>Efeito BH(MPa)</b>	<b>Encruamento (MPa)</b>	<b>BH+WH (MPa)</b>
<b>2,40</b>	42	29	71
<b>4,88</b>	21	55	76
<b>6,00</b>	-75	82	7

Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 17 mostra a relação entre a pré deformação efetiva em cisalhamento, o Efeito BH e o encruamento usando os corpos de prova retirados na direção 90° de laminação.

**Figura 17 Relação entre pré-deformação, Efeito BH e encruamento na direção 90° de laminação**



Fonte : Produzido pelo autor

Pode-se perceber um comportamento semelhante do Efeito BH nesse caso com aquele encontrado para o material a 0° da direção de laminação. Há uma tendência de diminuição desse efeito com o aumento da pré-deformação. O valor máximo encontrado para o efeito BH nesse caso ocorreu para 2,40% de pré-deformação e foi de 25 MPa.

O encruamento teve um comportamento crescente quando se relaciona a pré-deformação de 2,40 e 4,88%. Os valores de encruamento de 4,88% e 6% encontrados foram iguais, 70 Mpa. Esse fenômeno de aumento era esperado, já que com o aumento da pré-deformação, ocorre o aumento da densidade de discordâncias. Só que esperava-se que o acréscimo de pré-deformação gerasse um valor ainda maior de encruamento.

A Tabela 7 relaciona o ganho total de resistência que o aço BH 180 na direção 90° de laminação experimentou somando os ganhos causados pelo Efeito BH e pelo encruamento. O maior aumento de resistência foi encontrado quando se pré-deformou efetivamente em cisalhamento no valor de 4,88%. Resultado parecido com o teste realizado a 0° da direção de laminação. A contribuição do Efeito BH só foi significativa para o valor de pré-deformação. De 2,40%. Sob essa direção de laminação, essa amostra não atende à especificação da norma. Houve uma diminuição de resistência quando se pré-deformou em 6,00%.

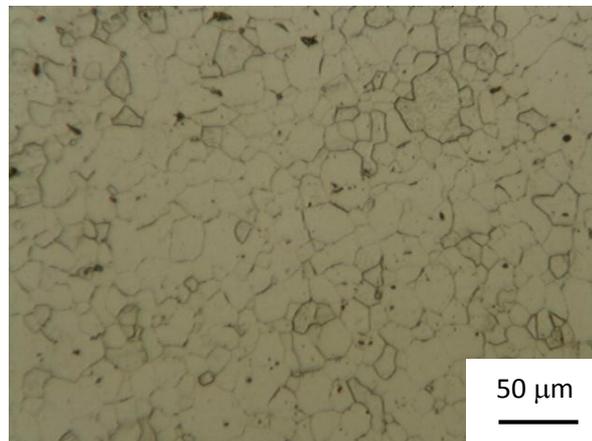
**Tabela 7-Relação de ganho de resistência total para 90° de direção de laminação**

<b>Pré-deformação (%)</b>	<b>Efeito BH(MPa)</b>	<b>Encruamento (MPa)</b>	<b>BH+WH (MPa)</b>
<b>2,40</b>	25	38	63
<b>4,88</b>	14	70	84
<b>6,00</b>	-44	70	26

### 3.4 Caracterização microestrutural

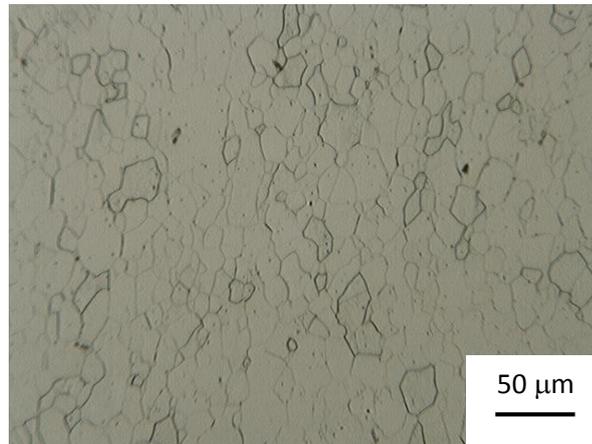
Foram analisadas imagens da microestrutura dos aços na forma como recebido e depois do tratamento de envelhecimento com 2,40% de pré-deformação. Esse pré-deformação foi escolhida dentre as demais por apresentar os maiores valores de Efeito BH nas duas direções de laminação. A figura 18 ilustra a imagem do aço no estado como recebido e a figura 20 mostra a imagem do aço depois de tratado. Como é possível observar os grãos são equiaxiais e levemente alongados, para o caso da figura 19, não foi possível identificar mudança quantitativa depois do tratamento térmico.

**Figura 18 Fotomicrografia do aço BH 180 no estado como recebido a 0° de laminação. Ataque Nital 2%. 200x ampliação**



Fonte: Produzido pelo autor

**Figura 19-Fotomicrografia do aço BH 180 no estado tratado. Pré-deformação 2,4%. Tratamento térmico 180 °C 20 minutos. Ataque Nital 2%. 200x ampliação**



Fonte: Produzido pelo autor

## Conclusão

As principais conclusões retiradas desse trabalho são:

- a) O cisalhamento teve influência no envelhecimento do aço BH, pois quanto maior o valor da pré-deformação efetiva em cisalhamento, menor era o ganho de resistência ocasionada pelo efeito BH. Chegou a ocorrer amaciamento do material quando a pré-deformação foi de 6,00% a 90° da direção de laminação.
- b) Após realizadas as pré-deformações efetivas em cisalhamento foi possível perceber que o maior ganho de resistência via Efeito BH ocorreu para o valor de 2,4% na direção 0° de laminação.
- c) O encruamento aumentou com o aumento da pré-deformação em cisalhamento e compensou a baixa influência do efeito BH a altas deformações. Isso contribuiu para que o aumento da pré-deformação incrementasse a resistência do aço em ambas as direções de laminação.
- d) O ganho total de resistência (somando efeito BH e encruamento) teve comportamento diferente quando analisados na direção de laminação 0° e 90°. No primeiro caso uma relativa constância foi observada para 2,4 e 4,8% de pré-deformação e abrupta queda para 6,00%. Essa queda teve grande contribuição da diminuição do efeito BH a alta deformação. No segundo caso, o ganho de resistência foi maior para a pré-deformação de 4,88%. Devido a essa diferença de propriedades nas duas direções, evidencia-se a anisotropia do material.
- e) Não foi possível observar diferença de microestrutura do material antes de depois do tratamento de envelhecimento.

## Referências:

BAKE hardening steels: High yield and tensile strength steels. 2016. Extraído do Catálogo de Produtos - Versão Europeia da ArcelorMittal. Disponível em: <<http://automotive.arcelormittal.com/>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

BOUVIER, S. et al. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 172, n. 1, p.96-103, fev. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.003>.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos. 9.ed. São Paulo: Editora ABM,1998.

DE, A.k et al. Static strain aging behavior of ultra low carbon bake hardening steel. *Scripta Materialia*, [s.l.], v. 41, n. 8, p.831-837, set. 1999. Elsevier BV. DEHGHANI, K.; JONAS, J. J... Dynamic bake hardening of interstitial-free steels. *Metall And Mat Trans A*, [s.l.], v. 31, n. 5, p.1375-1384, maio 2000.

DIAS, Giuliano Castelo Branco. Estudo do Efeito “Bake Hardening” nos Aços BH 180 E BH 220 Galvanizados pelo Processo de Imersão a Quente. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: [http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94446/dias\\_gcb\\_me\\_guara.pdf?sequence=1](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94446/dias_gcb_me_guara.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 25 nov. 2015.

GASSE, W. F.; THOMAS, S. J. Experience with high convection hydrogen batch annealing at DOFASCO. *Development in the Annealing of Sheet Steels*. Cincinnati: TMS. 1991.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. BS EN 10325: Steel. Determination of yield strength increase by the effect of heat treatment (Bake-Hardening-Index). Alemanha: Din, 2006. Disponível em: <<http://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=920942>>. Acesso em: 25 jun. 2016.

JEONG, Woo Chang. Effect of prestrain on aging and bake hardening of cold-rolled, continuously annealed steel sheets. *Metall And Mat Trans A*, [s.l.], v. 29, n. 2, p.463-467, fev. 1998. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-998-0126-x>.

LEMOS, Georges. Efeito do recozimento em caixa e do passe de encruamento nas propriedades mecânicas de um aço bake hardening laminado a frio. 2011. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <[http://www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/geral/arquivo\\_357-Georges\\_Lemos.pdf](http://www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/geral/arquivo_357-Georges_Lemos.pdf)>. Acesso em: 31 maio 2015.

MARRA, Kline Marques. Aços dual phase da usiminas: características e potencial de aplicação em veículos automotores São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2008. 39 slides, color.

RAUCH, E.f. Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. *Materials Science And Engineering, France*, v. 97, n. 241, p.179-183, June 1997.

RITESTH, K. New ultra-low carbon high strength steels with improved bake hardenability for enhanced stretch formability and dent resistance, 2006.

SANTOS, Luis Cesar dos; SENA Guilherme Augusto Oliveira de; CORREA, Elaine Carballo Siqueira; DUMONT Marcello Rosa; AGUILAR, Maria Tereza Paulino; CETLIN, Paulo Roberto; LOPES Wellington. Investigação do efeito BH mediante cisalhamento do aço BH 180. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8. 2016, Fortaleza. Congresso. Fortaleza: Comem, 2016.

SOUSA, Gustavo de. Influência do tratamento térmico de recozimento de recristalização em aço sae 1010 deformado plasticamente a frio. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais (Ouro Preto), 2010.

TAKAHASHI, M. Development of High Strength Steels for Automobiles. Nippon Steel Technical Report n. 88, July 2003.

TÜRKMEN, Mustafa; GÜNDÜZ, Suleiman. Bake-Hardening Response of High Martensite Dual-Phase Steel with Different Morphologies and Volume Fractions. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, [s.l.], v. 27, n. 2, p.279-289, 26 mar. 2014. Springer Science + Business Media.

YOON, J.w. et al. Anisotropic strain hardening behavior in simple shear for cube textured aluminum alloy sheets. *International Journal of Plasticity*, [s.l.], v. 21, n. 12, p.2426-2447, dez. 2005. Elsevier BV.