

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Departamento de Engenharia de Materiais

ELLEN DOS SANTOS

**Determinação do tratamento térmico de revenimento do aço SAE 4130M3 após
forjamento em matriz aberta**

Belo Horizonte

2013

ELLEN DOS SANTOS

**Determinação do tratamento térmico de revenimento do aço SAE 4130M3 após
forjamento em matriz aberta**

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

Orientadora: Ivete Peixoto Pinheiro

Belo Horizonte

2013

ELLEN DOS SANTOS

**Determinação do tratamento térmico adequado após forjamento em matriz aberta do
aço 4130M3**

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

Aprovada em 29 de agosto de 2013.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ivete Peixoto Pinheiro - Orientadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Almir Gonçalves Vieira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof^a. Dr^a Rachel Mary Osthues
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

À Profª. Drª. Ivete Peixoto Pinheiro pela disponibilidade, ensinamentos e orientação realizada com muita eficiência, dedicação e carinho.

Ao Engenheiro Anderson Nogueira Vidal pelas oportunidades, apoio e incentivo profissional.

Aos colegas de trabalho: Adilson Costa, Alex Pereira, Diego Francisco e Rodolfo dos Santos pela ajuda na realização dos tratamentos térmicos e execução dos ensaios.

Aos colegas de trabalho do controle de qualidade, pelo apoio na realização dos ensaios de dureza.

Ao Édipo do Carmo pela paciência, ensinamentos e apoio nas realizações dos tratamentos térmicos e ensaios realizados neste trabalho.

Ao Adelmo Pedrosa pela colaboração para realização deste trabalho.

A AÇOFORJA Indústria de Forjados S.A pela disponibilização do material de estudo deste trabalho e oportunidade de aprendizado.

Ao Wagner Reis Costa Campos, do CDTN, pelos conhecimentos adquiridos.

RESUMO

O mercado de óleo e gás está em pleno crescimento. O desenvolvimento desse mercado depende de outros setores industriais tais como o setor de forjados, que vem utilizando aços de baixa liga na fabricação de tubulações e componentes da árvore de natal. Depois de forjados esses aços são submetidos aos tratamentos térmicos de normalização e de beneficiamento. Este trabalho tem como objetivo determinar os melhores parâmetros para o tratamento térmico de revenimento após forjamento em matriz aberta do aço 4130M3, a fim de reduzir o percentual de reprovações dos produtos beneficiados obtidos com este material. Três blocos de corpos de prova, com dimensões padronizadas, foram igualmente normalizados e temperados. O revenimento foi realizado nas temperaturas de 630°C, 650°C e 660°C. Após a realização do revenimento, os blocos foram cortados para realização de análise química, ensaio de impacto, tração e análise metalográfica. A composição química das diferentes amostras eram semelhantes. Os ensaios de impacto do bloco revenido a 630°C apresentaram os menores valores. A relação entre o limite de escoamento e o limite de resistência dos diferentes revenimentos foi próxima, mas o tratamento de 650°C apresentou o melhor valor. As análises micrográficas mostram a presença de martensita e bainita. O revenimento realizado a 650°C apresentou melhor conjunto de propriedades.

Palavras – chave: SAE-4130, tratamento térmico, forjamento, revenimento.

ABSTRACT

The market for oil and gas is growing. The development of this market depends on other sectors such as the industry forged, which has been using low alloy steels in the manufacture of pipes and components spool tree. After forging these steels are subjected to heat treatments: normalizing, quenching and tempering. This study aims to determine the best parameters for the tempering heat treatment after forging open die steel 4130M3 in order to reduce the percentage of failures of processed products obtained with this material. Three blocks of specimens with standardized dimensions were also normalized and quenched. The tempering was performed at temperatures of 630 ° C, 650 ° C and 660 ° C. After completion of the tempering, the blocks were cut to perform chemical analysis, impact testing, tensile and metallographic analysis. The chemical composition were be similar. Impact tests block tempering at 630 ° C showed the lowest values. The ratio of yield/strength of different tempering were nearby, but the treatment of 650 °C showed the best value. Micrographic analyzes shows the presence of martensite and bainite. The tempering performed at 650 ° C showed better set of properties.

Keywords: SAE-4130, heat treatment, forging, tempering.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representação do forjamento em matriz fechada. | 14 |
| Figura 2 - Representação do forjamento em matriz aberta..... | 15 |
| Figura 3 - Microestrutura da martensítica | 25 |
| Figura 4 - Processo de beneficiamento - têmpera seguida de revenimento..... | 25 |
| Figura 5 - Resistência utilizável em função da espessura para o aço SAE 4130 | 28 |
| Figura 6 - Barras normalizadas a 870°C com sobremetal, temperadas de 860°C em água, nas bitolas indicadas e revenidas a 480°C. | 29 |
| Figura 7 - Barras normalizadas a 870°C com sobremetal, temperadas de 860°C em água, nas bitolas indicadas e revenidas a 590°C. | 29 |
| Figura 8 - Curvas obtidas com corpos de prova tipo ABNT L= 50mm, D=10mm. Usinados de barras com 25mm de diâmetro, normalizadas a 900°C, temperadas de 870°C em água e revenidas nas temperaturas indicadas..... | 31 |
| Figura 9 - Faixa de Temperabilidade do Aço SAE-4130 | 31 |
| Figura 10 - Curva TTT para as diferentes composições do SAE 4130. | 32 |
| Figura 11 - Curva Jominy para o Aço 4130M3. 33 | |
| Figura 12 - Dimensional do bloco. | 35 |
| Figura 13 - Espectrômetro de emissão óptica da Espectromaxx | 36 |
| Figura 14 - Controlador de temperatura Novus..... | 38 |
| Figura 15 - Durômetro portátil para ensaio de dureza Brinell..... | 38 |
| Figura 16 - Local onde foram tirados os corpos de prova. | 39 |
| Figura 17- Dimensões dos Corpos de prova de Tração..... | 39 |
| Figura 18 - Máquina de ensaio universal Kratos IKCL 3. | 40 |
| Figura 19 - Pêndulo de Impacto Wolpert PW 30/15 | 40 |
| Figura 20 - Dimensões do Corpo de Prova de Impacto..... | 41 |
| Figura 21 – Fluxograma da metodologia..... | 42 |
| Figura 22 – Forno utilizado na realização da têmpera em laboratório. | 46 |
| Figura 23 - Gráfico comparativo dos resultados encontrados no ensaio de dureza Brinell. | 47 |
| Figura 24 - Gráfico comparativo dos resultados encontrados no ensaio de Impacto. | 49 |
| Figura 25 - Influência da temperatura de revenimento nas propriedades mecânicas..... | 50 |
| Figura 26 - LE/LR encontrada nas nos ensaios de tração dos diferentes revenimento. | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 - Relação entre resistência à tração e resistência ao escoamento para aços temperados e revenidos. | 52 |
| Figura 28 - Análise microestrutural do bloco revenido a 630°C..... | 52 |
| Figura 29- Análise microestrutural do bloco revenido a 650°C..... | 53 |
| Figura 30 - Análise microestrutural do bloco revenido a 660°C..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Severidade de têmpera de diferentes meios. | 22 |
| Tabela 2 - Composições químicas do SAE 4130. | 32 |
| Tabela 3 - Composição química do SAE-4130 M3 (% em peso). | 33 |
| Tabela 4 - Parâmetros de Normalização..... | 36 |
| Tabela 5 - Parâmetros de Têmpera..... | 37 |
| Tabela 6 - Parâmetros de revenimento | 37 |
| Tabela 7 - Relação dos resultados dos ensaios mecânicos de acordo com as especificações solicitadas. | 43 |
| Tabela 8 - Resultados dos corpos de prova reprovados da especificação. | 44 |
| Tabela 9 - Resultados da Análise Química realizada nos blocos de prova revenidos a 630°C, 650°C e 660°C..... | 45 |
| Tabela 10 - Dados de execução do tratamento térmico de normalização. | 45 |
| Tabela 11 - Dados de execução do tratamento térmico de Têmpera..... | 46 |
| Tabela 12 - Dados de execução do tratamento térmico de normalização. | 46 |
| Tabela 13 - Resultados dos ensaios de Dureza Brinell realizado nos blocos de prova revenidos a 630°C, 650°C e 660°C..... | 47 |
| Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Impacto realizados nos Corpos de prova dos blocos revenidos a 630°C, 650°C e 660°C. | 48 |
| Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Tração realizados nos Corpos de prova dos blocos revenidos a 630°C, 650°C e 660°C. | 49 |

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A%- Alongamento Percentual

CP- Corpo de Prova

LE- Limite de Escoamento

LR- Limite de Resistência

R.A – Redução de Área

TCC- Tetragonal de Corpo Centrado

SUMÁRIO

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVOS | 13 |
| 3 | PROCESSO DE FORJAMENTO..... | 14 |
| 3.1 | Defeitos comuns | 15 |
| 4 | TRATAMENTO TÉRMICO | 19 |
| 4.1 | Normalização | 20 |
| 4.2 | Têmpera..... | 21 |
| 4.3 | Temperabilidade..... | 22 |
| 4.4 | Revenimento..... | 23 |
| 4.5 | Fragilização por revenimento..... | 26 |
| 4.6 | Eficiência do tratamento térmico..... | 26 |
| 5 | SAE 4130 | 28 |
| 5.1 | Comportamento das propriedades mecânicas..... | 28 |
| 5.2 | Tratamento Térmico do aço SAE-4130 | 30 |
| 5.3 | Aço SAE-4130M3..... | 33 |
| 6 | METODOLOGIA..... | 34 |
| 6.1 | Levantamento de dados | 34 |
| 6.2 | Materiais..... | 34 |
| 6.3 | Análise química..... | 35 |
| 6.4 | Normalização | 36 |
| 6.5 | Têmpera..... | 36 |
| 6.6 | Revenimento..... | 37 |
| 6.7 | Ensaio de Dureza Brinell | 38 |
| 6.8 | Ensaio de tração..... | 39 |
| 6.9 | Ensaio de Impacto Charpy | 40 |
| 6.10 | Análise metalográfica | 41 |
| 7 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 43 |
| 7.1 | Levantamento de dados | 43 |
| 7.2 | Análise química..... | 45 |
| 7.3 | Tratamento Térmico | 45 |
| 7.4 | Ensaio de Dureza Brinell | 47 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 7.5 | Ensaio de Impacto Charpy | 48 |
| 7.6 | Ensaio de Tração | 49 |
| 7.2 | Análises Metalográficas | 52 |
| 8 | CONCLUSÃO..... | 55 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 56 |

1 INTRODUÇÃO

O mercado de óleo e gás está aquecido. Especialmente no Brasil, esta é uma área que recebe grande atenção do governo, de empresas privadas nacionais e internacionais que investem muito dinheiro, pois esse setor vem crescendo a cada mês com novas descobertas de fontes de extração.

A expansão e desenvolvimento desse mercado dependem de outros setores industriais para obter sucesso em seu funcionamento. As novas tendências de fabricação do setor de forjados estão diretamente relacionadas a essa realidade. É cada vez mais comum o uso de aços baixa liga como o SAE-8620, SAE-8630, SAE-4140 e SAE-4130 na fabricação de peças tais como rodas, tubulações, eixos manivela para bomba de lama e componentes da árvore de natal.

Esses aços depois de forjados são submetidos aos tratamentos térmicos de normalização para o refino de grão, e posteriormente, ao beneficiamento, que consiste na têmpera, realizada para elevar a dureza através da transformação martensítica, seguida do revenimento, que aumenta a tenacidade da microestrutura frágil obtida na têmpera. Sendo possível, dessa forma, alcançar as propriedades mecânicas tais como dureza, resistência mecânica e tenacidade, adequadas para que tais peças possam ser colocadas em uso.

O presente trabalho aborda o forjamento do aço SAE-4130 usado na confecção de peças do setor petrolífero e os tratamentos térmicos realizados no mesmo após sua conformação.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo determinar o tratamento térmico de revenimento mais adequados após forjamento em matriz aberta do aço 4130M3, a fim de reduzir o percentual de reprovações dos produtos beneficiados produzidos com este material.

3 PROCESSO DE FORJAMENTO

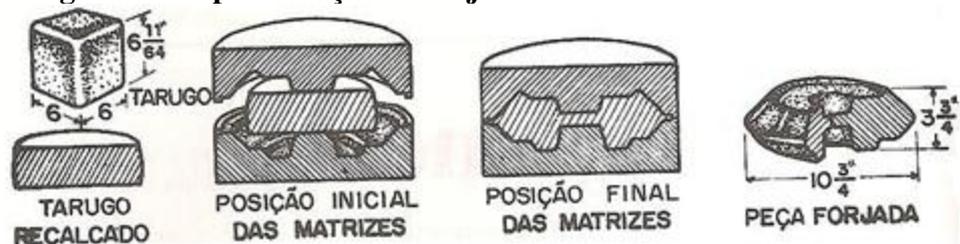
Desde a era medieval até os dias atuais o forjamento é um dos principais métodos de conformação mecânica utilizado pelo homem. Esse processo consiste na deformação de um metal por meio de martelamento ou prensagem. Usualmente o forjamento é realizado a quente, mas também pode ser realizado a frio. (COLPAERT, 2008; CHIAVERINI, 1998)

Dois tipos de equipamento podem ser utilizados no processo. Os martelos de forja aplicam golpes rápidos, sucessivamente, de forma que a força máxima ocorre no momento em que o mesmo toca o metal. Essa força decresce à medida que a energia é absorvida durante a deformação do metal. Já as prensas aplicam uma força de compressão a baixas velocidades. A pressão máxima ocorre instante antes da prensa ser retirada.

A experiência na fabricação de forjado permite a escolha do equipamento mais adequado. Contudo, há métodos teóricos para a escolha da prensa que avaliam fatores tais como: complexidade do forjado, velocidade de deformação, temperatura de forjamento.

As forjas podem ser divididas em dois grupos, as de matriz fechada ou as de matriz aberta. No caso de uma matriz fechada, uma força atua sobre duas ou mais partes de uma matriz que possui forma acabada, de tal modo que o metal é deformado dentro da cavidade entre as partes da matriz (CHIAVERINI, 1998). O forjamento em matriz fechada, exemplificado na figura 1, tem como vantagem economia de material, além de possibilitar maior controle da anisotropia do material de modo a orientá-lo favoravelmente em relação às solicitações esperadas na utilização da peça (CALLISTER, 2008).

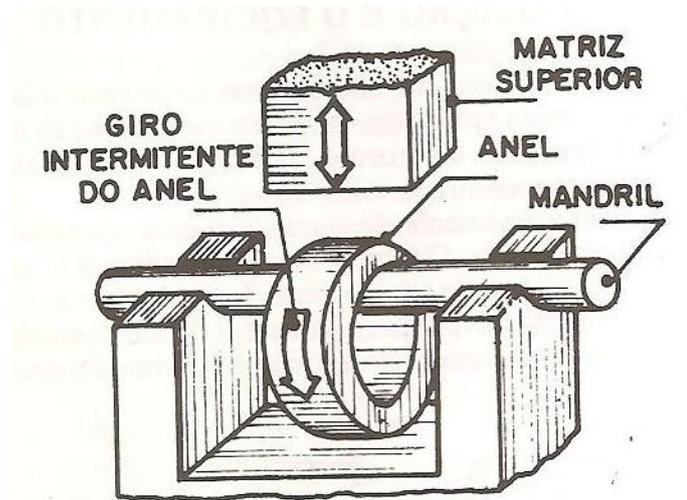
Figura 1 - Representação do forjamento em matriz fechada.



Fonte: CHIAVERINI, 1998.

O forjamento com matriz aberta (simples ou livre) é normalmente utilizado quando o número de peças a produzir é relativamente pequeno e o tamanho das peças é grande (COLPAERT, 2008). As matrizes não se tocam, permitindo maior movimento lateral do metal a ser conformado, e são, geralmente, planas ou possuem um formato simples. (Figura 2).

Figura 2 - Representação do forjamento em matriz aberta.



Fonte: CHIAVERINI, 1998.

O pré-aquecimento (por indução, combustão ou resistivo direto) de peças forjadas ocorre em uma temperatura que permite o amolecimento do material sem fundir, com a finalidade de diminuir a resistência ao escoamento. Fatores como o percentual de carbono, a composição da liga e a faixa na qual ocorre o processo de recristalização devem ser levados em conta na determinação de tal temperatura. Para garantir a homogeneidade do aquecimento na peça, deve-se manter a mesma no forno meia hora para cada polegada de espessura.

3.1 Defeitos comuns

O número de discontinuidades que podem aparecer durante o processo de forjamento é muito grande e suas causas somente podem ser determinadas com precisão, quando se faz uma análise crítica do processo completo, desde o recebimento da matéria-prima até a operação de acabamento da peça (CARVALHO, 2001).

Podem ser mencionados os seguintes defeitos típicos de peças forjadas, decorrentes de falhas na matéria-prima ou da técnica de operação: redução insuficiente, trincas, gotas, incrustações de óxidos, queimas, dobras e descarbonetação (BRESCIANI FILHO, 2011; CARVALHO, 2001).

As trincas podem ser classificadas em função de sua localização como superficiais, internas ou nas rebarbas. No primeiro caso, a origem da trinca é um esforço excessivo quando o processo de forjamento ocorre em baixas temperaturas ou alguma fragilidade a quente. Já as internas são originadas no interior da peça devido a uma operação de forjamento inadequada. No caso das trincas nas rebarbas, a causa é a presença de impurezas nos metais forjados ou as rebarbas pequenas. Nesse caso, o problema é o fato de as trincas que se iniciam nas rebarbas podem se propagar para a peça durante a operação de rebarbação (MORO; AURAS, 2007).

As trincas podem também ser decorrentes de causas térmicas, isto é, por fadiga térmica, e assim, relacionada à transmissão inadequada de calor entre as partes da peça. Isso provoca uma mudança brusca da forma do material durante o aquecimento ou resfriamento na operação de forjamento, provocando o aparecimento de contrações irregulares na peça, que conduzem a rupturas inevitáveis (CARVALHO, 2001).

As trincas podem também ser originadas pelo fenômeno de fragilização de hidrogênio. Isso deve ao fato de a absorção de H_2 fragilizar o material. Essas trincas são comuns em aço liga, decorrentes da difusão rápida de átomos de hidrogênio na estrutura, e que se recombina e voltam à forma molecular, criando grandes pressões. (BLAIR, 2000; MONROE, 2000; CARVALHO, 2001).

Outro defeito comum no forjamento é o preenchimento incompleto da matriz. O preenchimento incompleto do metal na cavidade da ferramenta pode ser decorrente de falha de projeto ou do desalinhamento da matriz, alterando o formato final da peça. Uma falta de preenchimento da cavidade implica na quantidade insuficiente de material e falha no volume da peça. Já o defeito conhecido como falta de redução é comum em forjamento livre quando ocorrem golpes rápidos e leves do martelo (UDOMPHOL, 2007; MORO; AURAS, 2007).

As gotas podem ser causadas por fluxos anormais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas, colocação inadequada do material na matriz (MORO; AURAS, 2007).

As dobras podem aparecer durante a operação de forjamento devido à ausência de escoamento do material. Uma dobra típica do forjamento, com matriz fechada, forma-se quando o metal escoar e passa por uma parte da cavidade da matriz já preenchida. Essa ocorrência deve-se a um projeto deficiente da matriz (raios muito pequenos), a um resfriamento excessivo ou ainda a um atrito muito grande (CARVALHO, 2001).

Devido às altas temperaturas utilizadas, reações na superfície de contato entre o metal e a atmosfera do forno causam problemas de oxidação e descarbonetação, além de perda considerável de quantidade de material (rebarba). As expansões e contrações dimensionais das peças, decorrentes de aquecimento e resfriamento, provocam um aumento significativo da faixa de tolerância da peça forjada a quente quando comparada ao forjamento a frio. Além disso, a estrutura e propriedades do metal forjado a quente geralmente não são uniformes e variam através da seção, podendo variar, por exemplo, de uma superfície com grãos finos para um núcleo com grãos grossos (BRAGA, 2005). Peça com estrutura grosseira pode ser relacionada a superaquecimento, dimensão inadequada do lingote e projeto de ferramental inadequado, pois podem criar uma estrutura mais susceptível à falha por fadiga e à anisotropia (BLAIR 2000; MONROE, 2000).

Defeitos como incrustações de óxidos podem ser causados pela camada de óxidos que se forma durante o aquecimento e ficam presas nas peças. Já as inclusões, correspondem a partículas presentes no metal proveniente do lingote (MORO, 2007; AURAS 2007; CARVALHO, 2001), que atuam como concentradores de tensão e dificultam a usinagem. No caso da segregação, distribuição não uniforme de elementos de liga no metal, pode gerar diferenças microestruturais resultando em variação pronunciada de propriedades, a exemplo de valores de dureza heterogêneos (UDOMPHOL, 2007; BLAIR; MONROE, 2000).

A descarbonetação é caracterizada pela perda de carbono na superfície do aço devido ao aquecimento do material (MORO; AURAS, 2007).

A queima se refere ao processo em que gases oxidantes penetram nos limites dos contornos de grãos formando películas de óxidos, causada pelo aquecimento muito próximo do ponto de fusão do material (MORO; AURAS, 2007).

A eficiência do processo de forjamento está relacionada com a vida útil das matrizes, que é limitada pelo desgaste, fratura por fadiga e deformação plástica. No processo de deformação a quente, o desgaste é o mecanismo de falha dominante, sendo responsável por aproximadamente 70% das falhas. Os principais fatores que influenciam a vida útil das matrizes são: propriedades do material da matriz, como dureza, resistência mecânica e ao desgaste; lubrificação do contato matriz-material; tratamentos térmicos e revestimentos; geometria das matrizes, como raios, ângulos de saída e qualidade superficial; projeto das matrizes; manufatura das matrizes; propriedades mecânicas e térmicas do material; tolerância do material e rugosidade superficial (FLAUSINO, 2010).

Fadiga térmica ocorre devido à distribuição não uniforme de temperatura entre a superfície da matriz e o seu interior. Os processos de forjamento a quente e a morno possuem ciclos típicos que levam ao aquecimento e resfriamento da matriz. O tarugo aquecido à temperatura “elevada” é comprimido entre as cavidades da matriz levando a um aumento drástico de temperatura na superfície desta, que sofre uma expansão superficial. Ao mesmo tempo, a menor temperatura do seu interior restringe a expansão, gerando tensões de compressão. Depois de forjada, a peça é ejetada e a matriz é lubrificada. Durante a lubrificação ou resfriamento, o processo é revertido dando origem a tensões de tração. Quando a tensão resultante na superfície excede o limite de escoamento do material, ocorre deformação plástica nas camadas superficiais. Ciclos repetitivos resultarão em nucleação e subsequente crescimento de trincas térmicas, dando origem à fadiga térmica (FLAUSINO, 2010).

4 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamentos térmicos são sequências de operações de aquecimento e resfriamento que alteram a microestrutura dos materiais visando alterar as propriedades tais como dureza, resistência mecânica, tenacidade, ductilidade e outras. A temperatura, o tempo, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento são fatores determinantes no sucesso do processo (CHIAVERINI, 1978).

A escolha do tratamento a ser realizado depende das solicitações que o material sofrerá em serviço. Nos aços, os tratamentos térmicos mais realizados são os de recozimento, normalização, têmpera e revenimento.

Normalmente as transformações nos tratamentos térmicos envolve aquecimento a uma temperatura acima da crítica, ou seja, tal aquecimento promove a austenitização completa. A peça a ser tratada deve permanecer no forno durante um tempo a uma temperatura suficiente para o aquecimento ocorra de modo uniforme. Ambos os fatores não devem ser excedidos a fim de se evitar o crescimento de grão acima do desejado (CHIAVERINI, 1978).

A temperatura e o aquecimento estão diretamente relacionados com a composição química e com as propriedades finais desejadas. Quanto maior a temperatura, acima da zona crítica, maior a garantia da solubilização do carbono no ferro (austenitização) (CHIAVERINI, 1998)

A velocidade de aquecimento deve ser levada em consideração, pois em alguns aços previamente tensionados ou com estrutura inteiramente martensítica, uma elevada taxa de aquecimento leva a formação de trincas (CHIAVERINI, 1998).

Um dos fatores mais decisivos no que diz respeito aos tratamentos térmicos é o resfriamento, pois é ele, que de fato, determinará a microestrutura presente no material, e conseqüentemente as propriedades que o mesmo apresentará. Vale ressaltar que a composição química também é determinante na formação da microestrutura.

No resfriamento deve-se levar em conta aspectos como velocidade, meio, geometria e temperatura da peça no momento em que começa e termina o processo.

A velocidade de resfriamento tem que permitir a transformação microestrutural adequada a uma profundidade da peça que satisfaça as exigências requeridas quando a mesma estiver em serviço.

O resfriamento pode ser feito ao ar, em óleo ou em água. A água é um meio muito drástico, resfria rapidamente formando, geralmente, a estrutura martensítica por meio de transformação displaciva, tensionando o material. Em alguns casos a tensão gerada é tão grande que provoca distorção e trincas na peça. Uma alternativa para evitar tais acontecimentos é a utilização do óleo como meio de resfriamento, pois o mesmo reduz o gradiente de temperatura, contudo, a extensão da modificação pode não ser adequada. Transformações ao ar ocorrem por meio de difusão e por isso originam outros tipos de microconstituintes tais como a perlita, ferrita, cementita.

4.1 Normalização

O tratamento de normalização tem a finalidade de homogeneizar a estrutura, bem como refinar os grãos da mesma proporcionando, conseqüentemente, uma melhora nas propriedades do material tais como a resistência mecânica e a tenacidade. Este tratamento consiste no aquecimento para austenitização (até uma temperatura acima da zona crítica) seguida de resfriamento ao ar. Além disso, reduz o empenamento, facilita a solução de carbonetos e elementos de liga (CALLISTER; COLPAERT, 2008).

Para obter uma resposta ideal aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento é necessário partir de uma estrutura uniforme. Sendo assim, a normalização é amplamente empregada antes desses processos (COLPAERT, 2008; CHIAVERINI, 1998).

Os aços submetidos ao forjamento apresentam ao final desse processo de conformação mecânica a quente, estruturas heterogêneas em relação ao formato e com tamanho de grãos grosseiros (COLPAERT, 2008).

Aços baixa liga como o SAE 4130 devem ser submetido ao tratamento de normalização previamente ao beneficiamento (têmpera seguido de revenimento).

4.2 Têmpera

Tratamento térmico que visa à obtenção de componentes com elevada dureza que é obtida através da formação de martensita na estrutura.

A têmpera consiste no aquecimento do aço a uma temperatura onde ocorra austenitização completa seguida de um resfriamento brusco que permita a formação da microestrutura desejada. A obtenção da microestrutura martensítica depende diretamente do tipo de aço, da forma e das dimensões da peça bem como do meio no qual ocorre o resfriamento (COLPAERT, 2008).

O resfriamento de aços em meios líquidos é um processo complexo que ocorre em três etapas:

- 1ª etapa: primeiro contato entre a superfície da peça a ser temperada e o meio de resfriamento. O calor da peça faz com que o líquido se transforme em uma película de vapor contínua que circunda toda a estrutura, atuando como isolante, retardando o resfriamento.
- 2ª etapa: estágio em que a velocidade de resfriamento em água é máxima. Ocorre em uma faixa de temperatura abaixo do ponto onde as transformações difusionais seriam mais rápidas, contribuindo para o surgimento de tensões residuais. Há formação e separação de bolhas na superfície da peça que se desprendem rapidamente.
- 3ª etapa: o resfriamento passa a ocorrer apenas por convecção e condução. Não há formação de vapor nesta etapa.

Para garantir que o meio de resfriamento atue de forma adequada deve-se garantir algumas condições básicas estabelecidas conforme normas estabelecidas na engenharia (ASTM, NAF). O tanque em que a peça será resfriada deve conter volume suficiente para que durante o resfriamento a temperatura do meio não se eleve a ponto de promover uma queda inadequada na troca de calor. Caso o volume não seja suficiente, sistemas de arrefecimento devem ser utilizados a fim de garantir uma taxa de resfriamento adequada. Outro fator que se deve levar em consideração é a agitação do meio. Quando esta é insuficiente, a película formada no primeiro estágio de resfriamento possui maior espessura e se mantém por tempo prolongado podendo levar a formação de produtos dúcteis. A agitação heterogênea eleva o índice de ocorrência de distorções e trincas levando, possivelmente, a perda da peça.

As trincas geradas na têmpera são atribuídas à expansão volumétrica gerada pela formação de martensita. Ao entrar em contato com o meio de resfriamento, a austenita da superfície se transforma em martensita aumentando de volume e conseqüentemente contraindo o núcleo que ainda se encontra no estado austenítico. Com o passar do tempo, ocorre o resfriamento do núcleo e, conseqüentemente, a transformação martensítica do mesmo. A expansão da parte central pressiona a camada superficial já transformada levando a formação de trincas.

A rapidez com que um meio consegue promover o resfriamento é denominada severidade de têmpera (H). Quanto maior o valor da severidade, maior a velocidade de resfriamento e também maior a probabilidade de ocorrer distorção e trincas no material. A tabela 1 apresenta diferentes meios de têmpera comparados com a água.

Tabela 1 - Severidade de têmpera de diferentes meios.

| Meio de Têmpera | Severidade de Têmpera (H) |
|-----------------------------|---------------------------|
| Óleo sem agitação | 0,2 |
| Óleo moderadamente agitado | 0,5 |
| Óleo violentamente agitado | 0,7 |
| Água sem agitação | 1,0 |
| Água fortemente agitada | 1,5 |
| Salmoura sem agitação | 2,0 |
| Salmoura fortemente agitada | 5,0 |

Fonte: COLPAERT, 2008.

4.3 Temperabilidade

Ao submeter à peça ao resfriamento brusco, seja em água ou em óleo, haverá um gradiente de temperatura ao longo da peça. Esse gradiente que ocorre da superfície para o meio, promove uma diferença na dureza obtida ao longo da seção (CHIAVERINI, 1998).

A variação de dureza pode ser avaliada através de uma característica denominada temperabilidade, que está associada à capacidade específica de um determinado aço em formar estrutura martensítica. Fatores tais como composição química, tamanho e homogeneidade do grão austenítico, temperatura de austenitização, bem como o meio de resfriamento têm influência sobre o valor da temperabilidade (COLPAERT, 2008)

Com o intuito de alcançar as propriedades mecânicas desejáveis, deve-se evitar a formação de produtos dúcteis. A quantidade de carbono influencia diretamente na dureza da martensita, quanto maior seu teor, maior a dureza obtida (CHIAVERINI, 1998).

A velocidade de resfriamento que promove uma alteração 100% martensítica é chamada de velocidade crítica de resfriamento. Os elementos de liga adicionados ao aço alteram os campos do diagrama ferro carbono retardando o processo de decomposição austenítico por meio de difusão. Dessa forma, a velocidade de crítica de resfriamento é menor quanto maior for o teor dos elementos de liga.

Devido ao fato da temperatura de resfriamento crítica não ser constante ao longo da peça, a temperabilidade é normalmente expressa por meio de profundidade de endurecimento determinada através de ensaios padronizados: método Jominy ou pelo método de Grossmann.

4.4 Revenimento

A martensita, além de possuir elevada dureza é extremamente frágil, tornando impossível sua utilização para a grande maioria das aplicações. A fragilidade decorrente da microestrutura é agravada pelas tensões internas decorrentes do próprio tratamento.

Com o intuito de se obter aços com estrutura martensítica de elevada dureza, boa tenacidade e boa ductilidade os materiais submetidos ao tratamento de têmpera são posteriormente submetidos ao revenimento (CALLISTER, 2008).

O revenimento é um tratamento térmico no qual um material previamente endurecido por têmpera é aquecido a temperaturas inferiores à temperatura eutetóide, durante um período de tempo específico, com o objetivo de aumentar a sua ductilidade e tenacidade. Os aços são

revenidos por reaquecimento, logo após o endurecimento por têmpera, para que se obtenham valores específicos de propriedades mecânicas, alívio de tensões e para que se assegurem as tolerâncias dimensionais (CASTRO, 2007).

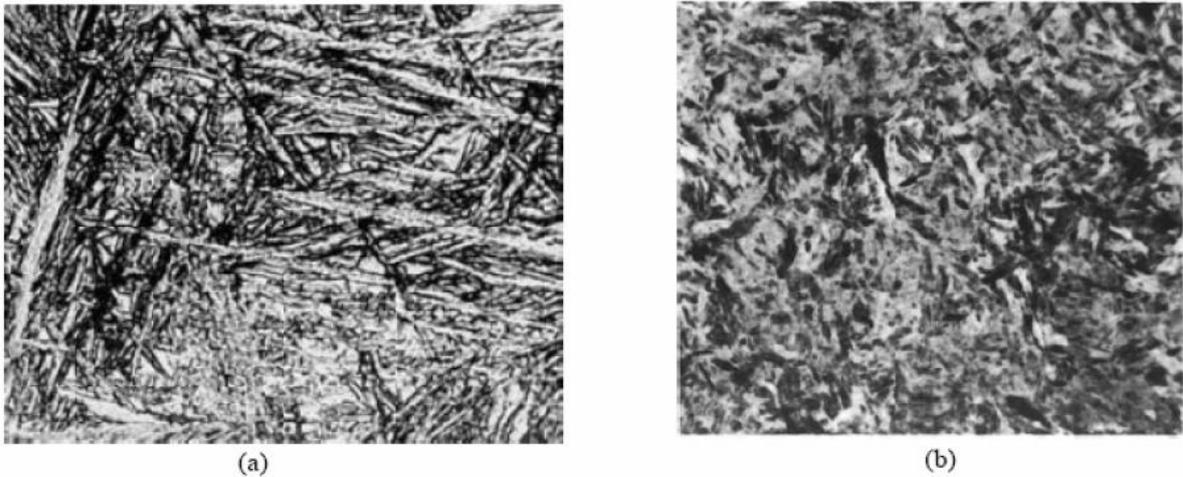
Em alguns casos a dureza do aço revenido pode aumentar devido ao endurecimento por precipitação, também chamado de endurecimento secundário. Em relação à tenacidade, a tendência do comportamento do material é de quanto maior a temperatura de aquecimento do revenimento, maior a tenacidade. Contudo essa relação não segue uma linha uniforme. Em determinadas faixas de temperatura pode ocorrer à fragilização do revenido (COLPAERT, 2008).

No revenimento, a martensita tetragonal de corpo centrado (TCC), monofásica, que se encontra supersaturada com carbono, se transforma em martensita revenida. A nova microestrutura formada é constituída por partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas, encerradas no interior de uma matriz contínua de ferrita. No caso de altas temperaturas, a martensita TCC pode se transformar nas fases estáveis de ferrita α e cementita (CALLISTER, 2008; CASTRO, 2007) (Figura 3).

A transformação da martensita em martensita revenida ocorre da seguinte forma:

- até 100°C ocorre redistribuição dos átomos de carbono.
- de 100 a 300°C além dos carbonetos ϵ , pode ocorrer a precipitação de cementita, ou ainda de cementita combinada a carbonetos χ . Na faixa de 200 a 300°C a austenita retida em aços de médio teor de carbono se decompõe, viabilizando a formação de martensita.
- em temperaturas superiores a 300°C inicia-se o processo de recuperação da martensita combinado ao processo de esferoidização das partículas de cementita, gerando queda de dureza e de resistência mecânica.
- de 500 a 700°C, nos aços que contem elementos de liga, ocorre a precipitação de carbonetos aumentando a resistência e a dureza.

Figura 3 - Microestrutura da martensítica

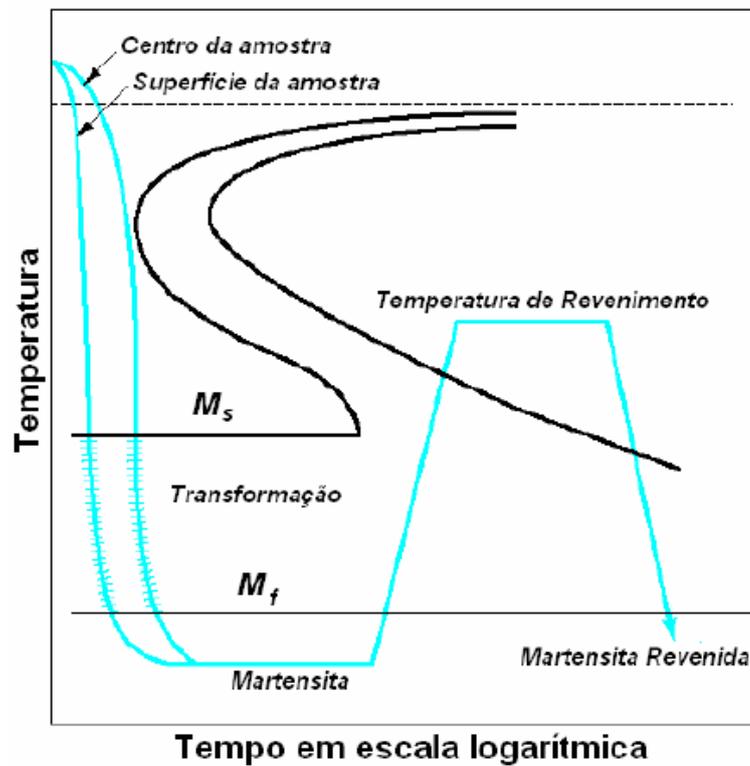


(a) microestrutura da martensita TCC obtida após tratamento de Têmpera e (b) microestrutura da martensita revenida.

Fonte: LIMA, 2006.

O diagrama apresentado na figura 4 representa o tratamento térmico de beneficiamento que consiste na realização da têmpera seguida do revenimento.

Figura 4 - Processo de beneficiamento - têmpera seguida de revenimento.



Fonte: CASTRO, 2007.

4.5 Fragilização por revenimento

Diversos fenômenos de fragilização podem ocorrer no revenimento. Normalmente ocorrem com os aços ferríticos ligados quando resfriados lentamente ou quando tratados isotermicamente em faixas de temperatura entre 400°C e 600°C. Esse fenômeno é detectado, principalmente, pelo aumento na temperatura de transição frágil – dúctil, através de ensaio Charpy e está associado à falha intercrystalina ao longo do contorno de grão austenítico prévio. Ocorre preferencialmente em aços ligados de pureza comercial, não se manifestando em aços de alta pureza.

Alguns aços temperados e revenidos em uma temperatura na faixa de 250°C a 400°C podem apresentar fragilização da martensita revenida que está relacionada à fragilização intergranular causada pela combinação da segregação de impurezas (P, S, N, Sb e Sn) em contornos de grão, durante austenitização e a precipitação da cementita em contorno de grão de austenita primária durante o revenimento (MARCOMINI, 2008).

A presença de Mn e Si presentes no SAE 4130 favorecem a fragilização. As temperaturas de austenitização bem como o crescimento de grão austenítico também influenciam o fenômeno.

Em temperaturas abaixo de 250°C a quantidade de carbonetos que precipitam em contorno de grão é insuficiente para causar a fragilização. Acima de 400°C, os carbonetos se esferoidizam e ocupam uma fração volumétrica menor do contorno de grão (COLPAERT, 2008). Estes carbonetos dificultam o deslocamento das linhas de discordância, proporcionando a formação de empilhamentos de discordâncias nos contornos de grão já fragilizados pela segregação de impurezas. Esses empilhamentos levam ao início de um micromecanismo de fratura intergranular (MARCOMINI, 2008).

4.6 Eficiência do tratamento térmico

A quantidade de martensita formada na têmpera influencia no comportamento do material durante o revenimento. Quanto maior a quantidade de martensita formada na têmpera, maior o decréscimo da dureza durante o revenimento. A baixa dureza após revenimento pode ser atribuída a dois fatores:

- revenimento efetivo que proporciona o aumento da tenacidade;
- têmpera não efetiva, formando produtos dúcteis ao invés de formar martensita.

Uma maneira de prever microestrutura é avaliar a relação entre o limite de escoamento e o limite de resistência (LE/LR). Aços martensíticos possuem uma relação LE/LR igual ou superior a 90%.

5 SAE 4130

O SAE 4130 é um aço martensítico, de baixa temperabilidade, amplamente utilizado na fabricação de peças automotivas, siderúrgicas e em industriais de exploração de petróleo tais como rodas, tubulações, eixo manivela para bomba de lama, componentes para a árvore de natal, virabrequins e outros.

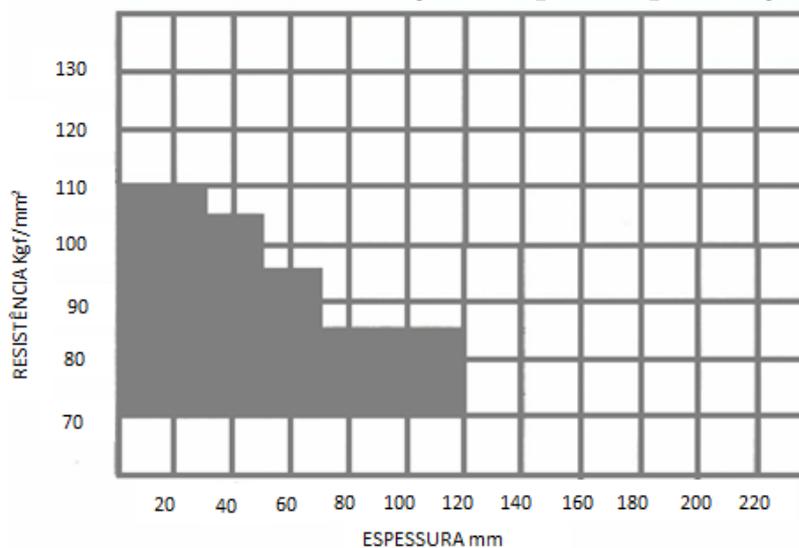
Apresentam boa resistência mecânica, soldabilidade e tenacidade, podendo ser fornecidas de três maneiras:

1. bruto de forja, sem tratamento térmico;
2. bruto de forja ou usinado desbastado, no estado normalizado;
3. usinado desbastado com superfície escurecida, no estado beneficiado (normalizado, temperado e revenido).

5.1 Comportamento das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas e microestruturais variam de acordo com diversos fatores tais como espessura do material, temperatura de tratamento. O diagrama da figura 5 mostra a relação entre espessura e resistência utilizável.

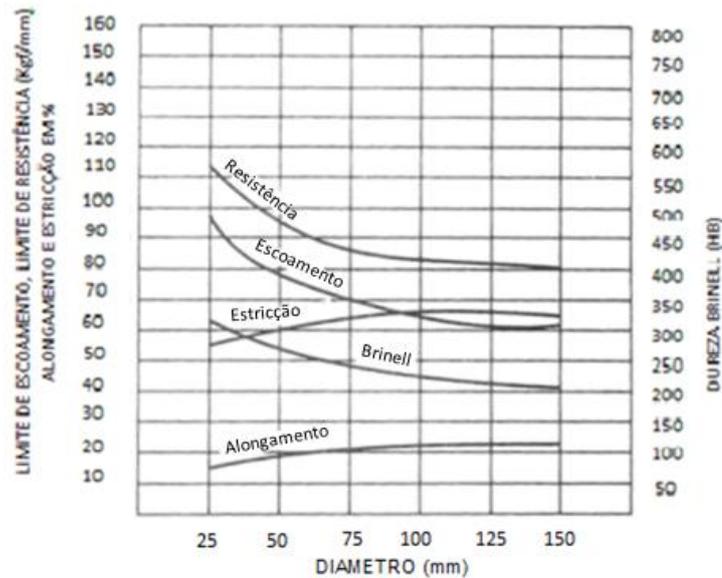
Figura 5 - Resistência utilizável em função da espessura para o aço SAE 4130



Fonte: VILLARES Metals,2005; modificado.

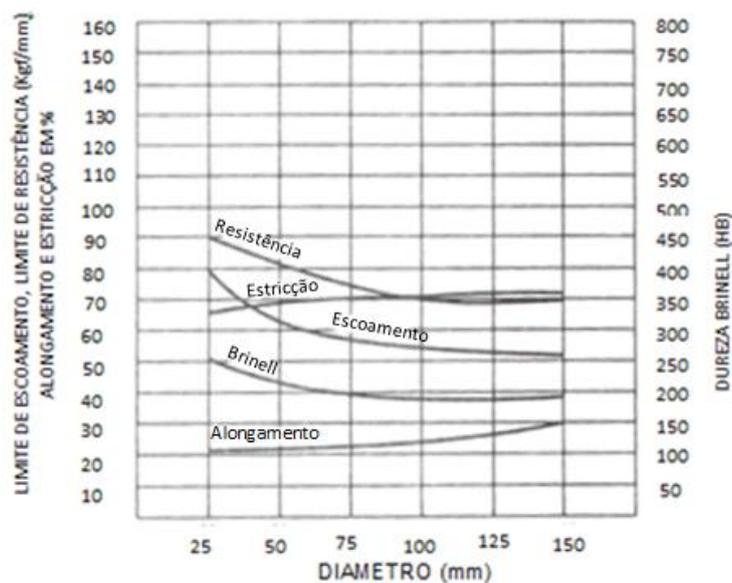
A massa do objeto a ser tratado também influencia nas propriedades mecânicas. Cada propriedade varia ao seu próprio modo à medida que aumenta a bitola da peça. As figuras 6 e figura 7 mostram o efeito da massa.

Figura 6 - Barras normalizadas a 870°C com sobremetal, temperadas de 860°C em água, nas bitolas indicadas e revenidas a 480°C.



Fonte: VILLARES Metals, 2005.

Figura 7 - Barras normalizadas a 870°C com sobremetal, temperadas de 860°C em água, nas bitolas indicadas e revenidas a 590°C.



Fonte: VILLARES Metals, 2005.

5.2 Tratamento Térmico do aço SAE-4130

Recozimento: Quando for necessário recozer, o aquecimento deve ser lento e uniforme entre 680 e 700°C, manter em temperatura por aproximadamente 1 hora por polegada de espessura e resfriar lentamente dentro do forno (LIMA, 2005; VILLARES 2005).

Normalização: aquecimento lento e uniforme entre 890 e 910°C, manter em temperatura durante um período de meia hora para cada polegada de espessura e resfriar ao ar. (LIMA, 2005; VILLARES 2005).

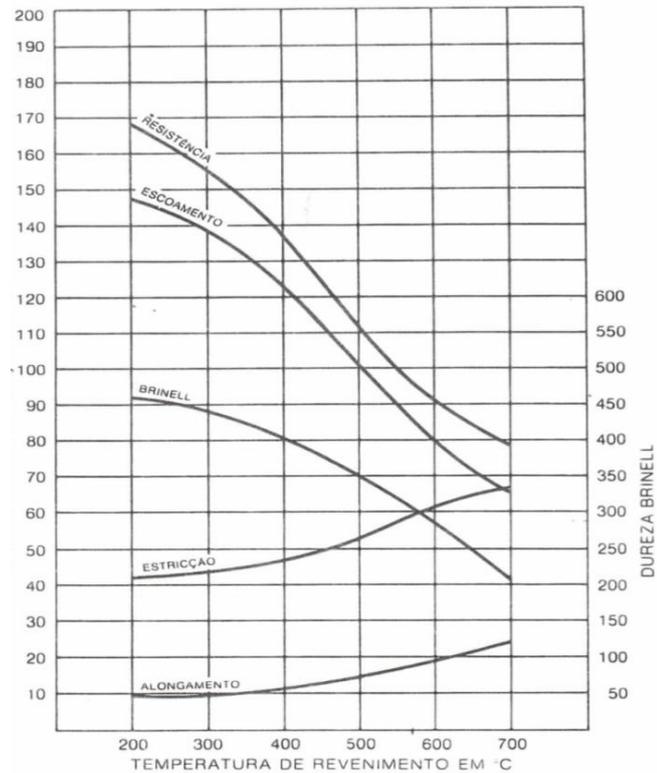
Têmpera: a temperatura de têmpera deve ser entre 860 e 880°C. Após chegar ao valor desejado, deve-se manter em temperatura durante um período de meia hora para cada polegada de espessura. O resfriamento de peças médias deve ser realizado em água, ao passo que, para peças pequenas o óleo deve ser utilizado. (LIMA, 2005; VILLARES 2005).

Revenimento: Esse tratamento deve ser realizado em uma temperatura inferior a 640°C, deve-se manter em temperatura durante um período de meia hora para cada polegada de espessura. O resfriamento é realizado ao ar (LIMA, 2005; VILLARES 2005).

A figura 8 apresenta o comportamento das propriedades mecânicas tais como, limite de resistência, limite de escoamento, alongamento percentual, redução de área e dureza Brinell para diferentes temperaturas de revenimento.

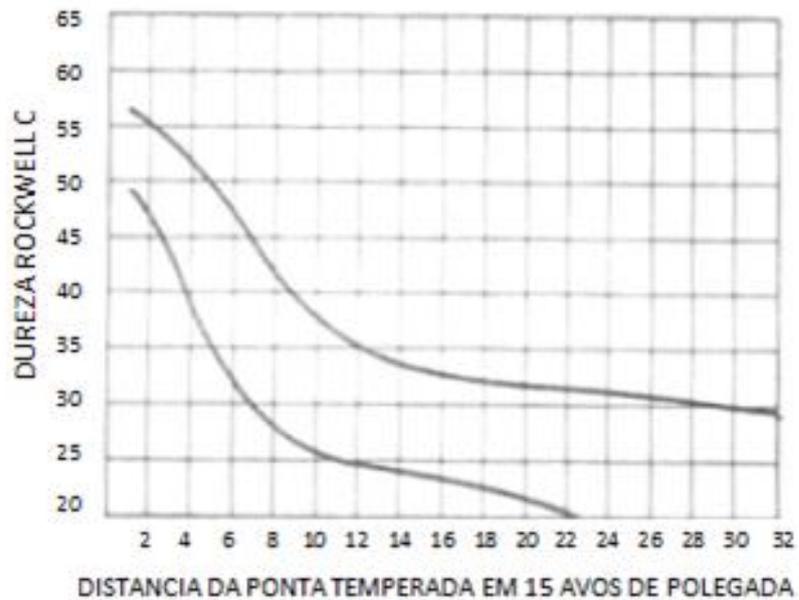
A temperabilidade do SAE 4130 (figura 9) pode variar dentro dos limites da sua especificação, ou seja, para diferentes corridas realizadas nas siderúrgicas podem-se esperar diferentes comportamentos, mesmo que se apliquem ciclos idênticos de tratamento térmico. A tabela 2 mostra três composições diferentes, uma que atende ao limite inferior da especificação, a composição média, e uma composição que se refere ao limite superior da especificação.

Figura 8 - Curvas obtidas com corpos de prova tipo ABNT L= 50mm, D=10mm. Usinados de barras com 25mm de diâmetro, normalizadas a 900°C, temperadas de 870°C em água e revenidas nas temperaturas indicadas.



Fonte: VILLARES Metals, 2005

Figura 9 - Faixa de Temperabilidade do Aço SAE-4130



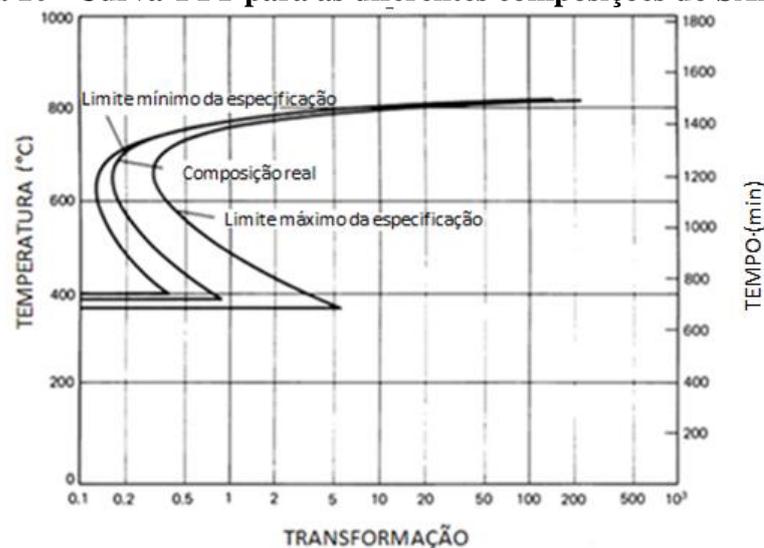
Fonte: VILLARES Metals, 2005.

Tabela 2 - Composições químicas do SAE 4130 (% em peso).

| C | Mn | P (max) | S (max) | Si | Ni | Cr | Mo |
|------|------|------------|------------|------|------|------|------|
| 0,28 | 0,40 | 0,030 | 0,040 | 0,15 | 0,16 | 0,80 | 0,15 |
| 0,29 | 0,55 | 0,030 | 0,040 | 0,24 | 0,16 | 1,02 | 0,15 |
| 0,33 | 0,60 | 0,030 | 0,040 | 0,30 | 0,16 | 1,1 | 0,25 |

Fonte: LIMA,2005.

Na figura 10, o diagrama tempo-temperatura-transformação para as três composições tabeladas, explicita temperabilidades muito diferentes, ou seja, para mesma velocidade de resfriamento é possível formar diferentes microconstituintes (LIMA, 2006).

Figura 10 - Curva TTT para as diferentes composições do SAE 4130.

Fonte: LIMA. 2006

As alterações promovidas pelos elementos de ligas presentes no SAE 4130 estão descritas abaixo:

- Mn e Ni: estabilizam a austenita e retardam o início de formação da perlita. Deslocam a curva TRC para a direita, mas não modificam o seu formato.
- P: aumenta a temperabilidade.
- Cr e Mo: são formadores de ferrita. Causam distorções na rede cristalina do ferro. A interação dos campos de tensões mantém os átomos de carbono afastados uns dos outros em solução sólida, impedindo sua precipitação. Ao

resfriar o aço, as condições de migração do C para formação de carbonetos tornam-se desfavoráveis aumentando o tempo necessário para formação da perlita.

- S: diminui a temperabilidade.
- Si: possui insignificante influência sobre a temperabilidade. (CRUZ, 2005).

5.3 Aço SAE-4130M3

O aço modificado SAE-4130M3 foi desenvolvido pela AÇOFORJA Indústria de Forjados S.A. Sua faixa de composição química está presente na tabela 3. Nela é possível visualizar que este aço se diferencia do SAE-4130 pelo aumento do limite inferior, de 0,4 para 0,6, do manganês. A faixa de níquel também foi alterada, com um aumento de mais de 100% para o limite inferior e 300% para o limite superior.

Tabela 3 - Composição química do SAE-4130 M3 (% em peso).

| | | SAE - 4130M3 (% em peso) | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
| ELEMENTOS | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | Pb | Fe |
| Especificado | Minímo | 0,280 | 0,150 | 0,500 | N.I | N.I | 0,800 | 0,150 | 0,350 | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I |
| | Máximo | 0,330 | 0,350 | 0,600 | 0,025 | 0,025 | 1,100 | 0,250 | 0,500 | N.I | N.I | 0,350 | N.I | N.I | 0,035 | N.I | N.I |

Fonte: GERDAU, 2013

A temperabilidade do SAE-4130M3 pode ser prevista através da curva Jominy (Figura 11).

Figura 11 - Curva Jominy para o Aço 4130M3.



Fonte: AÇOFORJA, 2012.

6 METODOLOGIA

Realizou-se um estudo sobre os aços utilizados na fabricação de forjados para o setor petrolífero a fim de melhorar a qualidade de atendimento e dos produtos fornecidos a esses clientes, que se transformaram no foco das produções da AÇOFORJA Indústria de Forjados S.A devido ao crescente número de pedidos.

6.1 Levantamento de dados

A empresa possui catalogados todos os resultados dos ensaios de tração e impacto realizados ao longo dos últimos anos, a partir do qual foram selecionados os dados dos materiais SAE-8620, SAE-8630, SAE-4140, SAE-4130M2, SAE-4130M3 e SAE 4130M5 no período de janeiro de 2012 a junho de 2013. Dentre os aços selecionado o 4130M3 se destaca pela quantidade de vezes em que aparece nos pedidos, sendo por esse motivo escolhido como tema do presente trabalho.

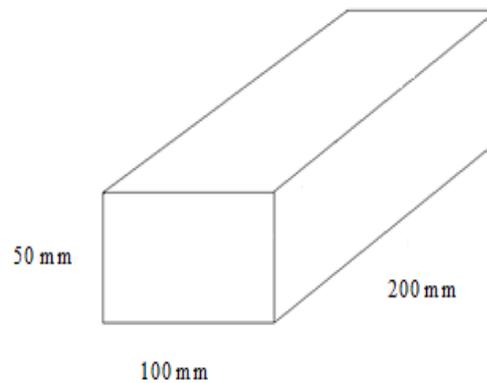
Como há diferentes especificações das propriedades mecânicas solicitadas para o mesmo material, realizou-se o levantamento de todos os conjuntos de propriedades mecânicas exigidas para o 4130M3, verificando o percentual de aprovação, o percentual de reprovação e a frequência de cada especificação.

Após determinar a especificação com maior percentual de refugo, verificou-se qual a origem do problema.

6.2 Materiais

Foram selecionados três blocos forjados e pré-usinados do aço SAE 4130M3, fabricados pela GERDAU Aço Minas, cujas dimensões foram de 50 mm X 100 mm X 200 mm. A figura 12 mostra o esquema representativo dos blocos.

Figura 12 - Dimensional do bloco.



Fonte: Autora

Segundo especificações do cliente, corpos de prova retirados de blocos de 100 mm X 100 mm X 200 mm podem ser usados como representantes das propriedades mecânicas da peça, desde que ambos sejam enfiados em conjunto e submetidos ao mesmo tratamento térmico. Deve-se realizar um descarte de 25 mm em todas as extremidades a fim de evitar que os corpos de prova sejam retirados em região descarbonetada .

As dimensões dos blocos tratados em laboratório foram alteradas em relação aos blocos utilizados no cotidiano, devido ao tamanho da mufla disponível e para melhor manuseio durante os testes. Realizou-se descarte de 25 mm em todas as extremidades do bloco, exceto nas duas extremidades perpendiculares ao lado que possui 50 mm. Neste, dois lados o descarte foi de 12,5 mm para possibilitar a retirada das amostras.

6.3 Análise química

Para análise química de cada bloco utilizou-se o espectrômetro de bancada da Espectromaxx, Antes de realizar a queima, a superfície das amostras foram uniformizadas utilizando-se uma lixa com granulometria de 80 mesh (Figura 13).

Figura 13 - Espectrômetro de emissão óptica da Espectromaxx



Fonte: Autora

6.4 Normalização

Os parâmetros do tratamento térmico especificados pelo cliente são mostrados na Tabela 4. Com o intuito de minimizar as variáveis no processo, os parâmetros da normalização foram padronizados.

Tabela 4 - Parâmetros de Normalização

| Parâmetros | Especificado | Proposto |
|-----------------------------|--------------|----------|
| Temperatura de patamar (°C) | 870 a 910 | 870 |
| Tempo de encharque (h) | 2 | 2 |
| Meio de refrigerante | Ar | Ar |

Fonte: Autora

6.5 Têmpera

Os parâmetros de têmpera do SAE 4130M3, especificados pelo cliente, são mostrados na Tabela 5. Assim como na normalização, os parâmetros da têmpera foram padronizados.

O resfriamento foi feito em água, com agitação manual. A temperatura do meio de resfriamento foi controlada com termômetro elétrico de imersão, Minipa MT-510. A temperatura da peça, ao final do tratamento, foi obtida com o pirômetro óptico Instrumenterm TI-920.

Tabela 5 - Parâmetros de Têmpera

| Parâmetros | Especificado | Proposto |
|---|---|---|
| Temperatura de Patamar (°C) | 870 a 910 | 870 |
| Tempo de Encharque (h) | 2 | 2 |
| Meio de Refrigerante | Água | Água |
| Temperatura do meio antes da imersão (°C) | <40 | <40 |
| Temperatura do meio após imersão (°C) | <50 | <50 |
| Temperatura da peça após imersão (°C) | <150 | <150 |
| Velocidade de aquecimento (°C/h) | Livre até 600°C Acima de 600°C máximo de 80°C/h | Livre até 600°C Acima de 600°C máximo de 80°C/h |

Fonte: Autora

6.6 Revenimento

Visando determinar qual tratamento possibilitaria atingir as melhores propriedades mecânicas (dureza, limite de resistência, limite de escoamento, alongamento percentual, redução de área e impacto) definiu-se, com base no “know-how” da empresa, três temperaturas de encharque para o revenimento: 630°C, 650°C, 660°C. Os parâmetros para a realização deste tratamento são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de revenimento

| Parâmetros | Especificado | Padrão A | Padrão B | Padrão C |
|----------------------------------|---|---|---|---|
| Temperatura de Patamar (°C) | >650 | 660 | 650 | 630 |
| Tempo de Encharque (h) | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Meio de Refrigerante | Ar | Ar | Ar | Ar |
| Velocidade de aquecimento (°C/h) | Livre até 400°C Acima de 400°C máximo de 80°C/h |

Fonte: Autora

Durante os tratamentos de normalização, têmpera e revenimento, a temperatura do forno foi monitorada, a cada 2 minutos, com o aparelho de termometria, fieldlogger Novus mostrado na figura 14.

Figura 14 - Controlador de temperatura Novus.



Fonte: Autora

6.7 Ensaio de Dureza Brinell

Para a realização do ensaio de dureza Brinell, os blocos de prova foram lixados e posteriormente polidos com a lixadeira da marca Bosh, obtendo-se uma profundidade entre 3 a 4 mm da superfície. Realizou-se o ensaio de dureza com o durômetro portátil King da marca Wolpert (Figura 15), segundo a norma ASTM E10/12. Foi aplicada uma pré-carga, seguida da aplicação de uma carga de 3000 Kg durante 10 s. O diâmetro da calota impressa no metal foi medida com uma lupa graduada IDC-092, em mm, e transformada em dureza Brinell por meio da tabela de conversão. Todos os instrumentos utilizados no procedimento se encontravam devidamente calibrados.

Figura 15 - Durômetro portátil para ensaio de dureza Brinell.



Fonte: MECALUX, 2013

6.8 Ensaio de tração

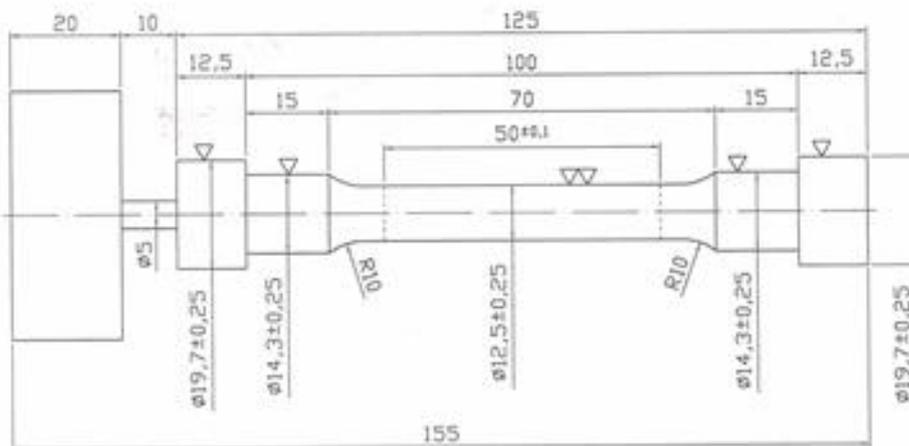
A figura 16 mostra o local de onde foram retirados os corpos de prova (CP) dos ensaios de tração e impacto. Os blocos tratados foram retalhados e posteriormente seguiram para a usinagem, onde foram torneadas conforme o croqui da figura 17.

Figura 16 - Local onde foram tirados os corpos de prova.



Fonte: Autora

Figura 17- Dimensões dos Corpos de prova de Tração



Fonte: Autora

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, na máquina de ensaio universal Kratos IKCL 3, com célula de carga de 20000Kgf, segundo a norma ASTM A 370/12 Revisão 10. (Figura 18).

Figura 18 - Máquina de ensaio universal Kratos IKCL 3.

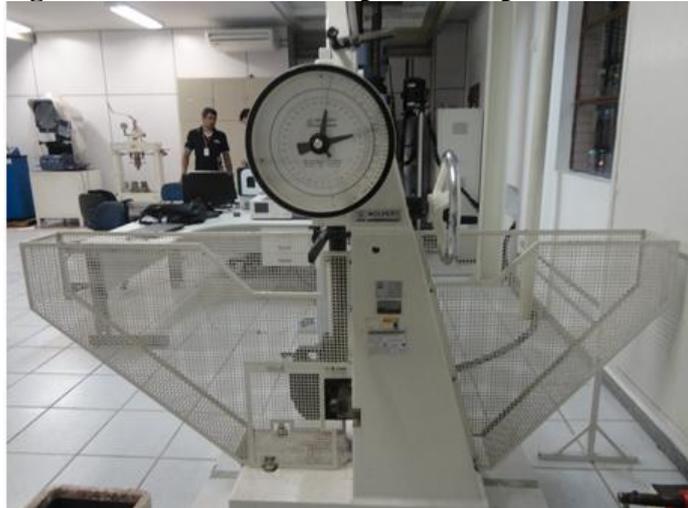


Fonte: Autora

6.9 Ensaio de Impacto Charpy

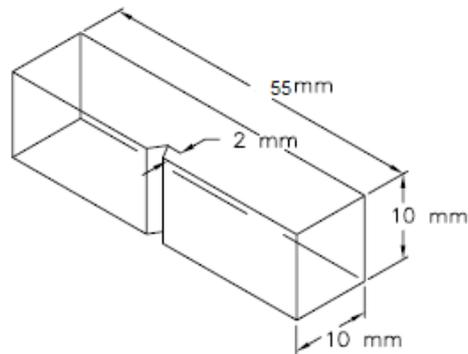
Em cada bloco retirou-se três CP para a realização do ensaio de impacto, conforme a norma ASTM A 370. Para a execução utilizou-se o pêndulo de Impacto da marca Wolpert modelo PW 30/15, mostrado na Figura 19. Todos os corpos de prova foram fresados e posteriormente retificados de acordo com croqui da figura 20.

Figura 19 - Pêndulo de Impacto Wolpert PW 30/15



Fonte: Autora

Figura 20 - Dimensões do Corpo de Prova de Impacto

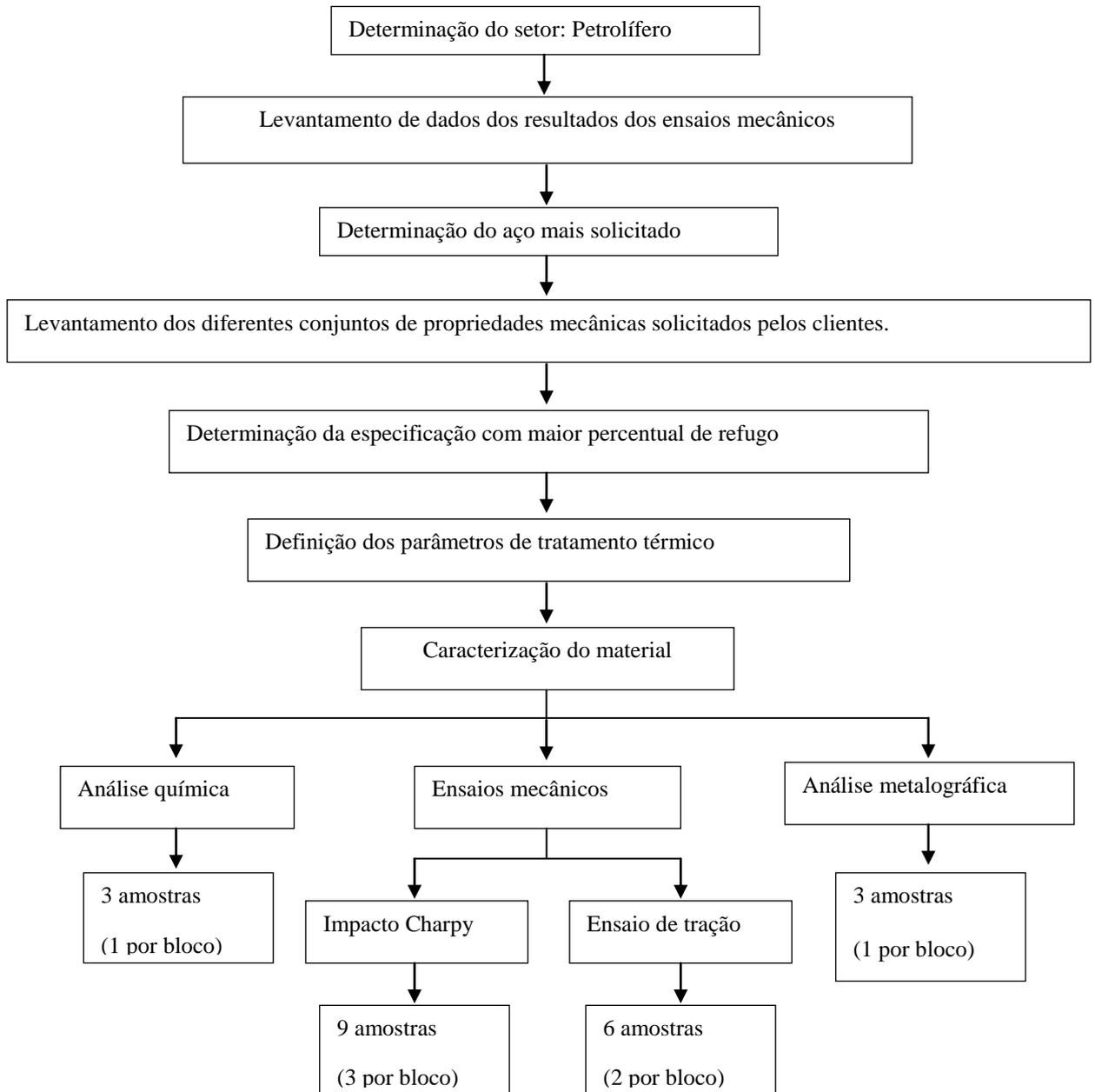


.. Fonte: Autora

6.10 Análise metalográfica

Para a análise metalográfica as amostras foram lixadas, manualmente, com lixas de granulometria 80, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, polidas com alumina de granulometria de 1 μ m e atacadas com Picral 4% (4g de ácido Picríco misturado com 96mL de etanol) a temperatura ambiente, por 15 segundos. As análises metalográficas foram realizadas ao longo de toda superfície, utilizando o microscópio óptico Olympus LG-PS2 do Laboratório AÇOFORJA Indústria de Forjados S.A, a fim de identificar e avaliar a microestrutura encontrada após o material ter sofrido diferentes tratamentos. As amostras foram analisadas e fotografadas através de microscopia óptica, com aumento de 100 e 200 vezes.

Para melhor visualização do estudo realizado a figura 21 mostra o fluxograma da metodologia.

Figura 21 – Fluxograma da metodologia

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Levantamento de dados

A tabela 7 mostra o número total de corpos de prova (CP) ensaiados no período entre janeiro de 2012 e julho de 2013 do aço SAE-4130M3, bem como o número de aprovados e o número de reprovados de acordo com a especificação técnica. Como é possível visualizar, a linha VI indica a especificação técnica mais solicitada pelos clientes e é também a que apresenta o maior percentual de reprovação.

Tabela 7 - Relação dos resultados dos ensaios mecânicos de acordo com as especificações solicitadas.

| ESPECIFICADO | | | | | | | | ENSAIADOS | | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|-------------------|---------|-----------|-----|----------------|-----------|------------|-------------|
| ENSAIO DE TRAÇÃO | | | | ENSAIO DE IMPACTO | | | | CONTABILIZAÇÃO | | | |
| Conjunto de especificações | LR (MPa) | LE (MPa) | A (%) 4D | RA (%) | Sentido | Carga (J) | °C | Aprovado | Reprovado | % Aprovado | % Reprovado |
| I | >483 | >345 | >18 | >45 | - | - | - | 1 | 0 | 0,43 | 0,00 |
| II | >485 | >250 | >22 | >30 | - | - | - | 1 | 0 | 0,43 | 0,00 |
| III | >586 | >414 | >18 | >45 | - | - | - | 13 | 2 | 5,58 | 0,86 |
| IV | >590 | >415 | >18 | >35 | Trans. | - | -20 | 44 | 0 | 18,88 | 0,00 |
| V | >655 | >517 | >17 | >35 | Long. | >27 | -18 | 24 | 1 | 10,30 | 0,43 |
| VI | >690 | >552 | >18 | >35 | Long. | >27 | -18 | 69 | 26 | 29,61 | 11,16 |
| VII | >724 | >620 | >18 | >45 | Long. | >42 | -18 | 5 | 6 | 2,15 | 2,58 |
| VIII | >758 | >620 | >17 | >45 | - | - | - | 4 | 0 | 1,72 | 0,00 |
| IX | >760 | >585 | >16 | >45 | - | - | - | 13 | 0 | 5,58 | 0,00 |
| X | >860 | >725 | >16 | >35 | Long. | >27 | -18 | 16 | 8 | 6,87 | 3,43 |
| SOMA | | | | | | | | 190 | 43 | 81,55 | 18,45 |
| TOTAL | | | | | | | | 233 | | 100 | |

Fonte: Autora

Na tabela 8, são mostrados os ensaios reprovados, pode-se verificar que 100% das reprovações são atribuídas ao ensaio de tração e 8% se devem ao não atendimento às exigências do ensaio de impacto Charpy.

Tabela 8 - Resultados dos corpos de prova reprovados da especificação.

| Memória de Resultados de Ensaios Mecânicos 4130 M3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|---------------|--------------------------|----------------|------------------|-----------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------------------|----------------|------------------|-----------|---------------|----------------|
| ESPECIFICADO | | | | | | | | ENCONTRADO | | | | | | | | STATUS | |
| ENSAIO DE TRAÇÃO | | | | ENSAIO DE IMPACTO | | | | ENSAIO DE TRAÇÃO | | | | ENSAIO DE IMPACTO | | | | | |
| Sentido | RT (MPa) | LE (MPa) | AI (%) | RA (%) | Sentido | Carga (J) | °C | Sentido | RT (MPa) | LE (MPa) | AI (%) | RA (%) | Sentido | Carga (J) | °C | Tração | Impacto |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 716 | 529 | 25 | 65 | Long. | 96/106/122 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 710 | 510 | 22 | 55 | Long. | 108/114/135 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Long. | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Long. | 710 | 521 | 25 | 70 | Long. | 84/133/135 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 682 | 509 | 22 | 59 | Long. | 75/81/79 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 696 | 507 | 19 | 55 | Long. | 15/47/62 | -18 | Reprovado | Reprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 695 | 506,9 | 19,4 | 55,41 | Long. | 15/47/62 | -18 | Reprovado | Reprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 1027,2 | 702,6 | 10,8 | 21,56 | Long. | 13/13/13 | -18 | Reprovado | - |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 705,4 | 511,7 | 21 | 56,12 | Long. | 50/59/67 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 676,77 | 501,15 | 24 | 60,81 | Long. | 69/71/92 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 731,1 | 501 | 18 | 42,27 | Long. | 55/61/79 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 806,5 | 626,2 | T | 44,43 | Long. | 24/26/26 | -18 | Reprovado | - |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 679,8 | 483,1 | 18,2 | 45,92 | Long. | 63/75/84 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 808,3 | 620,3 | 15,4 | 42,63 | Long. | 25/25/17 | -18 | Reprovado | - |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 676,8 | 479,6 | 21,8 | 54,78 | Long. | 55/53/55 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 687,8 | 507,1 | 20,6 | 58,38 | Long. | 53/55/65 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 685 | 506 | 20,4 | 59,69 | Long. | 94/100/115 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 665,09 | 493,1 | 21,8 | 55,2 | Long. | 94/100/115 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 680,8 | 507,4 | 19,6 | 48,41 | Long. | 101/111/120 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 695,8 | 517,9 | 21 | 57,49 | Long. | 123/115/108 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 684,1 | 501,2 | 18 | 54,84 | Long. | - | -18 | Reprovado | - |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 691,2 | 516,3 | 22 | 56,81 | Long. | 129/141/92 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 682,5 | 536,2 | 23 | 60,87 | Long. | 72/77/88 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 723,6 | 537,9 | 19,8 | 51,22 | Long. | 88/98/114 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 692,2 | 529,7 | 25 | 60,87 | Long. | 106/87/83 | -18 | Reprovado | Aprovado |
| Trans | >690 | >552 | 4/>18 | >35 | Long. | >27 | -18 | Trans | 706,9 | 536,5 | 19 | 68,08 | Long. | 83/87/106 | -18 | Reprovado | Aprovado |

Fonte: Autora

7.2 Análise química

As amostras analisadas, conforme evidenciado na tabela 9, encontravam-se dentro da faixa de composição química especificada pelo fornecedor. A elevada proximidade da composição química dos diferentes blocos elimina a hipótese de que esta variável seja a provedora da variação nos resultados das propriedades mecânicas determinadas.

Tabela 9 - Resultados da Análise Química realizada nos blocos de prova revenidos a 630°C, 650°C e 660°C.

| ELEMENTOS | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | Pb | Fe | |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|------|
| Especificado | Mínimo | 0,280 | 0,150 | 0,500 | N.I | N.I | 0,800 | 0,150 | 0,350 | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | N.I | |
| Encontrado | CP | 630°C | 0,318 | 0,189 | 0,537 | 0,0173 | 0,0585 | 1,040 | 0,196 | 0,367 | 0,037 | <0,0015 | 0,0053 | 0,0026 | <0,0011 | 1,0050 | <0,003 | 97,2 |
| | | 650°C | 0,308 | 0,210 | 0,544 | 0,0138 | 0,0161 | 0,920 | 0,194 | 0,444 | 0,0460 | <0,0015 | 0,0038 | 0,0011 | <0,0010 | 0,0031 | <0,003 | 97,3 |
| | | 660°C | 0,309 | 0,208 | 0,549 | 0,0128 | 0,0145 | 0,937 | 0,194 | 0,465 | 0,0451 | <0,0015 | 0,0037 | 0,0011 | <0,0011 | 0,0030 | <0,003 | 97,2 |
| Especificado | Máximo | 0,330 | 0,350 | 0,600 | 0,025 | 0,025 | 1,100 | 0,250 | 0,500 | N.I | N.I | 0,350 | N.I | N.I | 0,035 | N.I | N.I | |

Fonte: Autora

7.3 Tratamento Térmico

Os parâmetros executados de normalização, têmpera e revenimento se encontram nas tabelas 10, 11 e 12, respectivamente.

Tabela 10 - Dados de execução do tratamento térmico de normalização.

| NORMALIZAÇÃO | Parmetro | | Padrão A | Padrão B | Padrão C |
|------------------|-----------------------------|------------------|------------|------------|------------|
| | Temperatura de Patamar (°C) | Previsto | 870 | 870 | 870 |
| | | Realizado | 870 | 870 | 870 |
| | Tempo de Encharque (h) | Previsto | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Realizado | | 2,0 | 2,0 | 2,0 | |

Fonte: Autora

Tabela 11 - Dados de execução do tratamento térmico de têmpera.

| TÊMPERA | Parmetro | | Padrão A | Padrão B | Padrão C |
|--|---|------------------|--|--|--|
| | Temperatura de Patamar (°C) | Previsto | 870 | 870 | 870 |
| | | Realizado | 870 | 870 | 870 |
| | Tempo de Encharque (h) | Previsto | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| | | Realizado | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| | Velocidade de aquecimento - Rampa (°C/h) | Previsto | Live até 600°C Acima de 600°C máximo de 80°C/h | Live até 600°C Acima de 600°C máximo de 80°C/h | Live até 600°C Acima de 600°C máximo de 80°C/h |
| | | Realizado | 60°C/h | 60°C/h | 60°C/h |
| | Meio Refrigerante | Previsto | Água | Água | Água |
| | | Realizado | Água | Água | Água |
| | Temperatura do meio antes da imersão (°C) | Previsto | <40 | <40 | <40 |
| Realizado | | 21 | 22 | 22 | |
| Temperatura do meio após imersão (°C) | Previsto | <50 | <50 | <50 | |
| | Realizado | 33 | 36 | 33 | |
| Temperatura da peça depois da Imersão (°C) | Previsto | <150 | <150 | <150 | |
| | Realizado | 45 | 47 | 44 | |

Fonte: Autora

Tabela 12 - Dados de execução do tratamento térmico de revenimento.

| REVENIMENTO | Parmetro | | Padrão A | Padrão B | Padrão C |
|------------------|--|------------------|---|---|---|
| | Temperatura de Patamar (°C) | Previsto | 630 | 650 | 660 |
| | | Realizado | 630 | 650 | 660 |
| | Tempo de Encharque (h) | Previsto | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| | | Realizado | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| | Velocidade de aquecimento - Rampa (°C/h) | Previsto | Livre até 400°C Acima de 400°C máximo de 80°C/h | Livre até 400°C Acima de 400°C máximo de 80°C/h | Livre até 400°C Acima de 400°C máximo de 80°C/h |
| Realizado | | 60°C/h | 60°C/h | 60°C/h | |

Fonte: Autora

A figura 22 mostra o forno usado para realização dos tratamentos térmicos.

Figura 22 – Forno utilizado na realização da têmpera em laboratório.

Fonte: Autora

7.4 Ensaio de Dureza Brinell

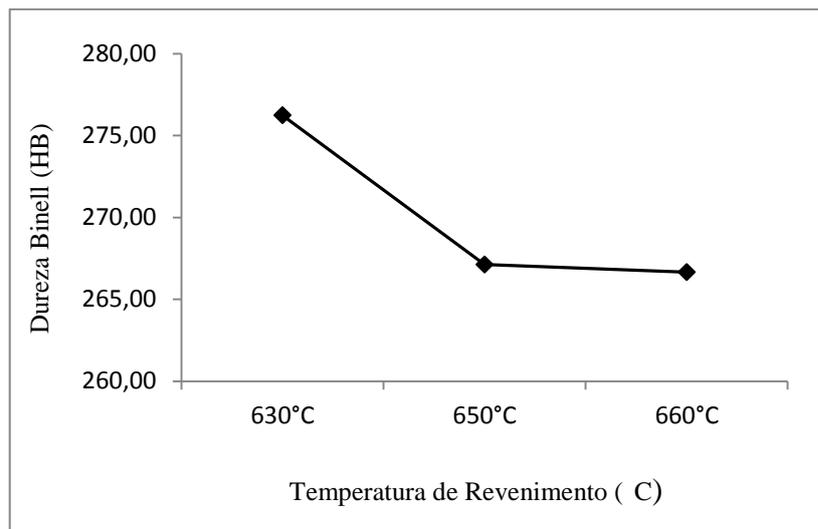
Os resultados dos ensaios de dureza Brinell dos blocos revenidos a 650°C, 660°C e 630°C estão apresentados na tabela 13 e no gráfico da figura 23. O tratamento térmico de revenimento é o fator determinante nas propriedades mecânicas do aço. A figura 23 mostra o efeito da temperatura de revenimento no comportamento das diversas propriedades.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de Dureza Brinell realizado nos blocos de prova revenidos a 630°C, 650°C e 660°C.

| ENSAIO DE DUREZA | | | | |
|------------------|----------|----------|-----------|--------|
| Especificado | | | 197 a 241 | |
| Encontrado (HB) | | | | |
| Bloco | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média |
| 630°C | 275,22 | 279,63 | 273,85 | 276,23 |
| 650°C | 269,11 | 267,61 | 264,64 | 267,12 |
| 660°C | 264,64 | 272,16 | 263,17 | 266,66 |

Fonte: Autora

Figura 23 - Gráfico comparativo dos resultados encontrados no ensaio de dureza Brinell.



Fonte: Autora

Os blocos revenidos a 630°C, 650°C, assim como os blocos ensaiados 660°C obtiveram dureza maior do que o especificado. Como os tratamentos foram realizados em escala

laboratorial, com condições de resfriamento mais controladas, é possível alegar que as têmperas foram mais eficientes resultando em durezas mais elevadas.

Segundo Lima (2006) a relação entre a dureza e o LR tem um coeficiente em média de 0,33. Apesar dos ensaios aprestarem valores fora do especificado, as peças tratadas podem ser consideradas aprovadas, pois os resultados dos ensaios de tração, que serão apresentados mais a frente, mostraram que a relação apresentou um coeficiente de 0,35 e que o LR para os diferentes tratamentos de revenimento estão de acordo com o solicitado.

| |
|--------------------------|
| DUREZA BRINELL = 0,33 LR |
|--------------------------|

De acordo com o gráfico da figura 8 (diagrama de revenimento), constata-se que com o aumento da temperatura de revenimento ocorre a diminuição do valor de dureza encontrado. Contudo, esse comportamento não pode ser visualizado nos testes realizados nos blocos revenidos de 650° e a 660°C, uma vez que os resultados foram muito próximos.

7.5 Ensaio de Impacto Charpy

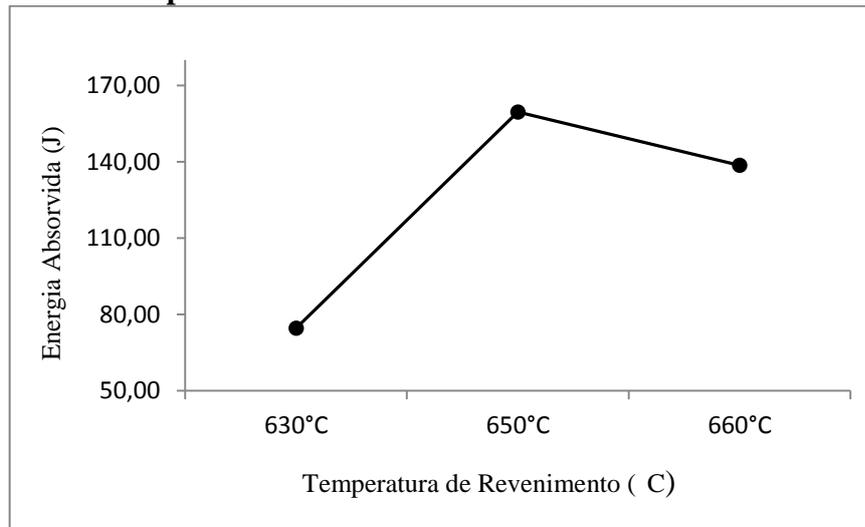
A tabela 14 e a figura 24 mostram os resultados encontrados no ensaio de impacto Charpy. Os CP revenidos a 630°C possuem os menores valores de energia absorvida de acordo com o previsto, pois há uma relação diretamente proporcional entre a temperatura de revenimento e a tenacidade do material. Os CP do bloco tratado a 660°C apresentaram os menores valores em relação aos do revenido a 650°C.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Impacto realizados nos Corpos de prova dos blocos revenidos a 630°C, 650°C e 660°C.

| ENSAIO DE IMPACTO | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Especificado | | | Média >> 27J | |
| Encontrado- Energia Absorvida (J) | | | | |
| CP | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Média |
| 630°C | 61,50 | 73,23 | 89,16 | 74,63 |
| 650°C | 155,00 | 160,88 | 162,85 | 159,58 |
| 660°C | 156,96 | 127,53 | 131,45 | 138,65 |

Fonte: Autora

Figura 24 - Gráfico comparativo dos resultados encontrados no ensaio de Impacto.



Fonte: Autora

7.6 Ensaio de Tração

Os dados encontrados com a realização do ensaio de tração estão na tabela 15.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Tração realizados nos Corpos de prova dos blocos revenidos a 630°C, 650°C e 660°C.

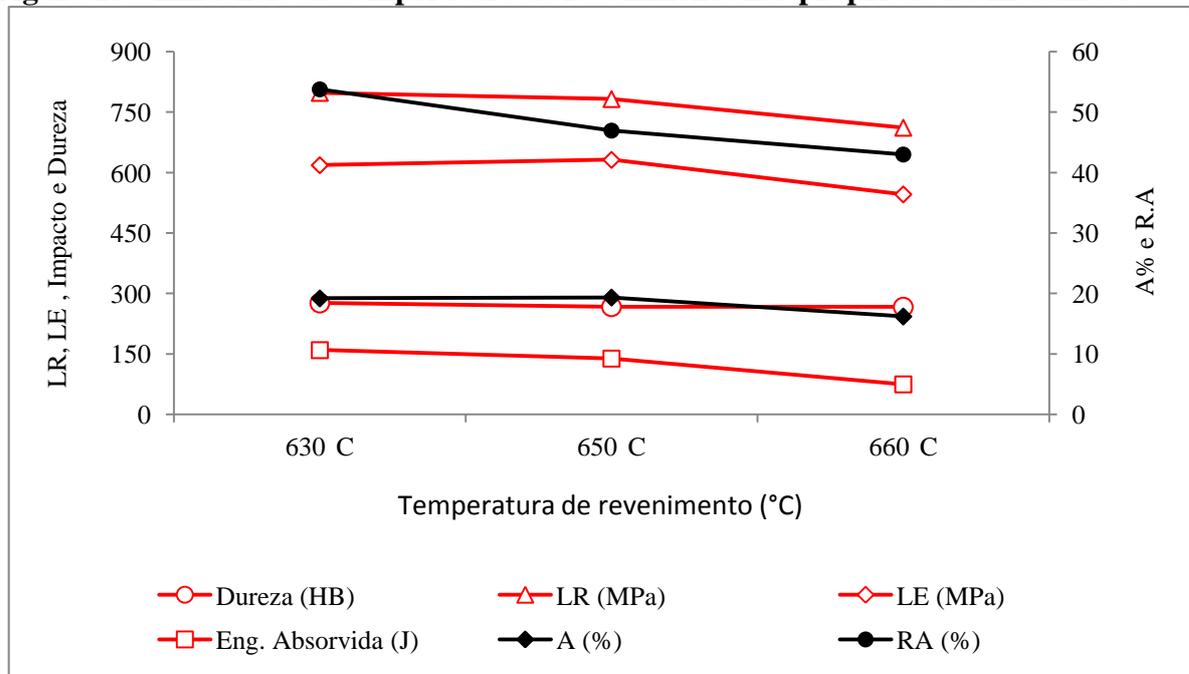
| ENSAIO DE TRAÇÃO | | | | | |
|------------------|---|----------|----------|--------|--------|
| Especificado | | LR (MPa) | LE (MPa) | A (%) | RA (%) |
| | | >>655 | >>517 | 4D>>18 | >>35 |
| Encontrado | | | | | |
| Corpo de Prova | | LR (MPa) | LE (MPa) | A (%) | RA (%) |
| 630°C | A | 788,10 | 612,30 | 19,60 | 55,56 |
| | B | 808,10 | 624,80 | 18,80 | 52,02 |
| 650°C | A | 783,90 | 635,00 | 19,79 | 46,89 |
| | B | 781,70 | 628,70 | 18,90 | 47,04 |
| 660°C | A | 705,00 | 538,40 | 17,66 | 46,82 |
| | B | 718,00 | 553,90 | 14,74 | 39,19 |

Fonte: Autora

As amostras tratadas a 630°C obtiveram os maiores valores para o limite de resistência. Já o limite de escoamento da mesma foi ligeiramente menor em relação aos valores encontrados na amostra revenida a 650°C. Quando comparado com os corpos de prova tratados a 660°C, as amostras revenidas a 650°C apresentaram valores maiores para todas as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração. Segundo o diagrama de revenimento do aço SAE-4130 (figura 8). Tal comportamento era esperado para o limite de resistência e para o limite de escoamento.

A figura 25 mostra um resumo de todas as propriedades mecânicas determinadas nesse trabalho.

Figura 25 - Influência da temperatura de revenimento nas propriedades mecânicas.



Fonte: Autora

O estudo proposto mostra que 100% das reprovações ocorridas são atribuídas ao ensaio de tração. Dentro dessas reprovações a maior parte deve-se ao não atendimento das especificações do LR e principalmente do LE. Os ensaios realizados em laboratório obtiveram valores dentro do especificado para as propriedades citadas.

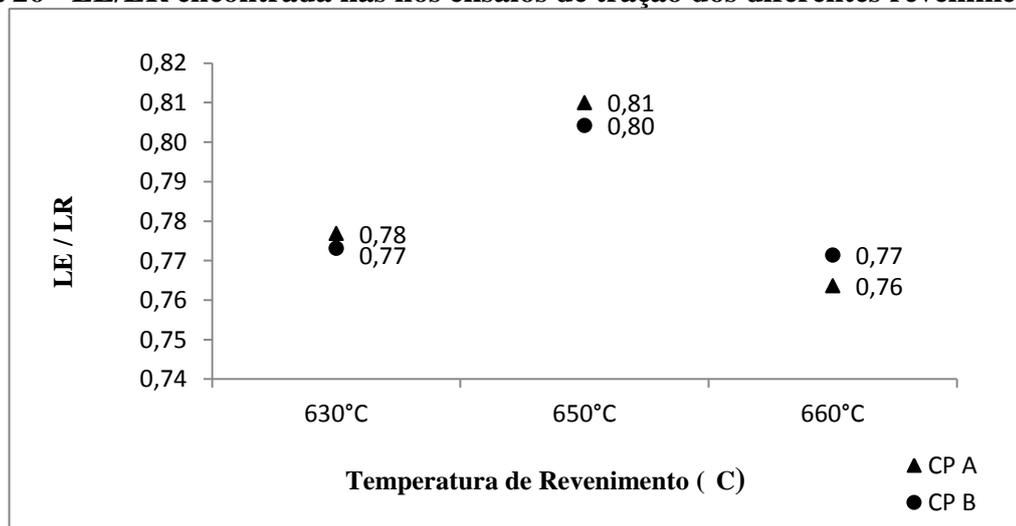
O alongamento percentual dos CP tratados a 660°C apresentaram valores menores que 18%, ou seja, inferiores ao desejado. Nesse caso, para as peças com bitola maior do que as

dimensões do bloco de prova, é necessário avaliar se a mesma deve ser, ou não, aprovada, pois o efeito massa mostra que com o aumento da bitola há aumento de alongamento percentual. O Alongamento encontrado nas amostras revenidas a 630°C e 650°C satisfazem as condições desejadas.

A redução de área apresentou valores próximos para os CP tratados a 650°C e 660°C. O tratamento realizado a 630°C obteve valores um pouco mais elevados.

A razão LE/LR é mostrada na figura 26. A eficácia da têmpera dos CP tratados a 630°C e 660°C foi menor quando comparadas com as amostras tratadas a 650°C.

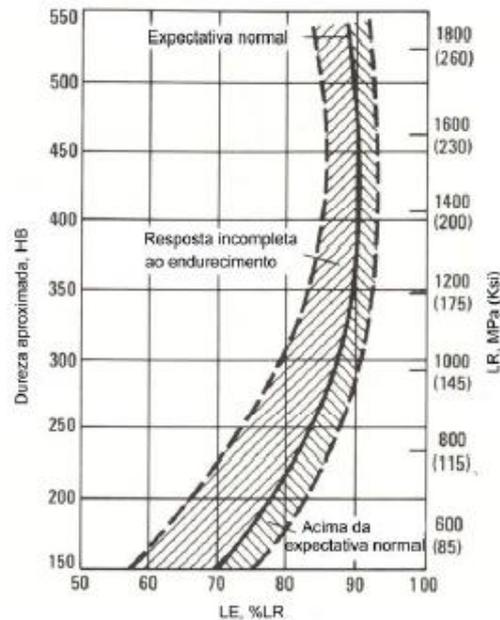
Figura 26 - LE/LR encontrada nas nos ensaios de tração dos diferentes revenimento.



Fonte: Autora

As diferentes temperaturas de revenimento não alcançaram o valor mínimo de 90% esperado para os aços martensíticos. Contudo, os mesmos foram considerados como satisfatórios, pois segundo Lima (2006), para se alcançar a faixa de dureza de 197HB a 237HB, os aços baixa liga, da família do SAE-4130, devem apresentar uma razão por volta de 0,82%. Conforme mostrado na figura 27

Figura 27 - Relação entre resistência à tração e resistência ao escoamento para aços temperados e revenidos.



Fonte: LIMA, 2006

7.2 Análises Metalográficas

Na figura 28 observa-se, em (a), as microinclusões presentes no bloco Revenido a 630°C, classificadas como 1 ½ fina (F) e 2 ½ grossa (G) de acordo com plate I-r da ASTM E45 . Em (b) observa-se a microestrutura composta de bainita e martensita revenida.

Figura 28 - Análise microestrutural do bloco revenido a 630°C.



(a)

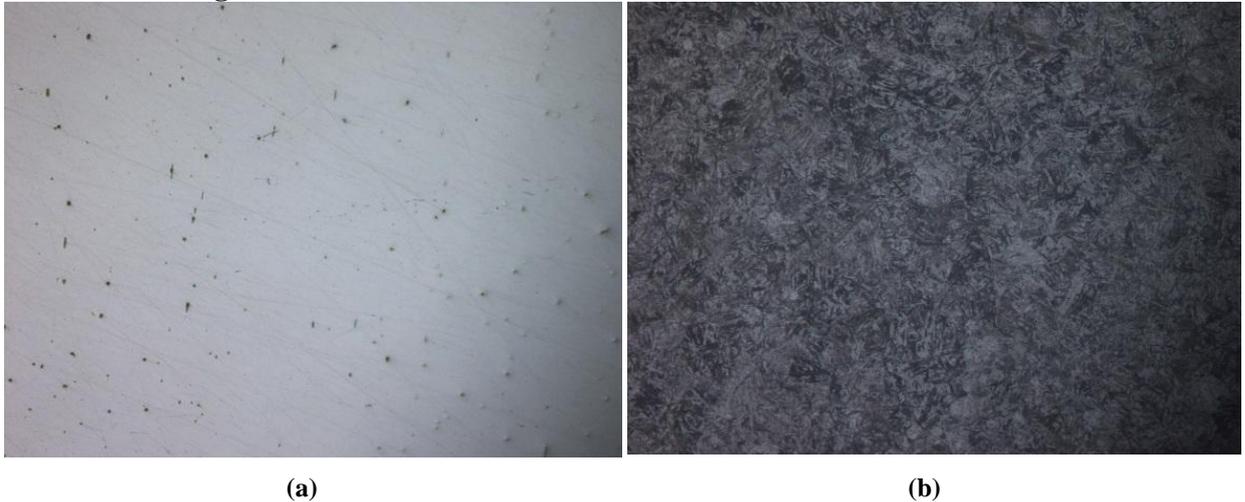
(b)

(a) Microinclusão (100x) e (b) Microestrutura (200x).

Fonte: Autora

Para o bloco Revenido a 650°C, observa-se na figura 29 (a) as microinclusões classificadas como 1½ F e 2½ G de acordo com plateI-r da ASTM E45 e em (b) observa-se a microestrutura composta de bainita e martensita revenida.

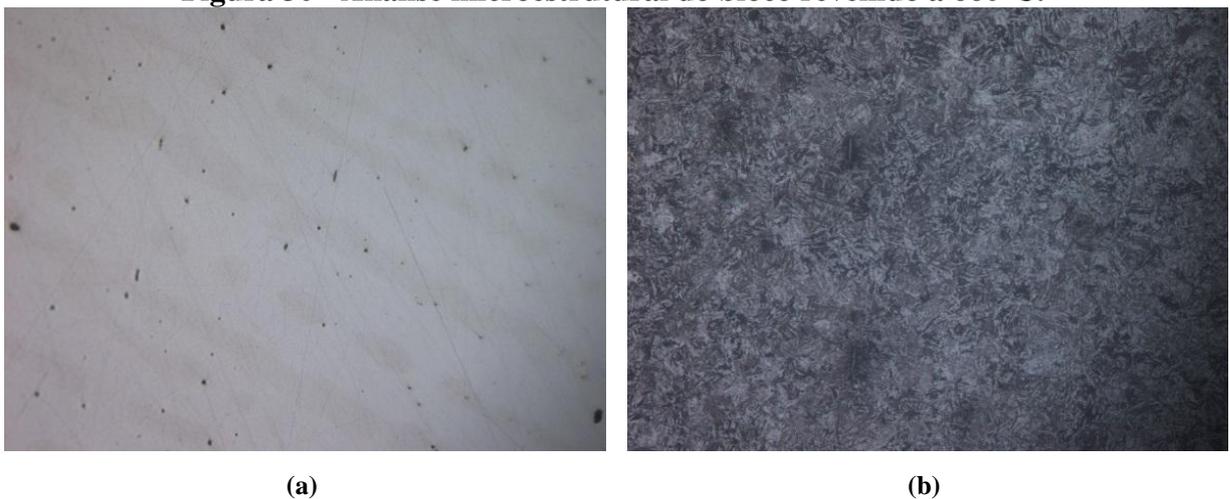
Figura 29- Análise microestrutural do bloco revenido a 650°C.



Fonte: Autora

Na figura 30 observa-se, em (a), as microinclusões presentes no bloco Revenido a 650°C, classificadas como 1½ F e 2 G de acordo com plate I-r da ASTM E45 e em (b) observa-se a microestrutura composta de bainita e martensita revenida.

Figura 30 - Análise microestrutural do bloco revenido a 660°C.



Fonte: Autora

As microestruturas dos três tipos de revenimento apresentaram microestrutura martensítica e bainítica muito semelhantes.

8 CONCLUSÃO

A composição química das amostras testadas não foi um parâmetro determinante nas propriedades mecânicas, pois as análises realizadas mostraram que as composições químicas dos diferentes blocos eram muito semelhantes.

Os tratamentos térmicos de têmpera realizados em laboratório foram mais eficientes do que aqueles realizados em fábrica, apresentando maior dureza.

De acordo com os resultados, o revenimento realizado a 660°C não se mostrou adequado, pois o CP apresentou alongamento percentual abaixo do especificado e LE muito próximos do exigido. A relação LR/LE do corpo de prova revenido a 660°C se aproximou da relação encontrada no bloco tratado a 630°C, contudo foi menor.

O tratamento térmico de revenimento realizado a 650°C foi o que obteve o melhor conjunto de propriedades mecânicas. Além disso, os corpos de prova obtiveram uma relação LR/LE mais próxima do ideal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E10 – 12**: standard test method for Brinell hardness of metallic materials
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370**: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E45 e3**: standard test methods for determining the inclusion content of steel, 2005.
- AÇOFORJA. Disponível em: <http://www.acoforja.com.br/p_produto06/nprod06.htm> Acesso em: 20 de maio 2013.
- BLAIR; Malcolm; MONROE, Raymond W. Castings or forgings? A realistic evaluation. **Engineered Castings Solution**, Spring 2000.
- BRAGA, Lincoln Ferreira. **Simulação computacional por elementos finitos do processo de forjamento em matriz fechada de rodas SAE 4140 de utilização em ponte rolante**. 2005. 110f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- BRESCIANI FILHO, Ettore. **Conformação plástica dos metais**. 6ed. São Paulo: EPUSP, 2011.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2008. 705 p., il. ISBN 978-85-216-1595-8.
- CARVALHO, Gilberto. **Determinação de defeitos em profundidade (estereoradiografia)**. 2001. 98f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmico, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1998. 599 p.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978. 3v.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p., il. ISBN 978-85-212-0449-7.
- CRUZ, Luiz Carlos. **Avaliação da capacidade do processo de fabricação em atender especificação de temperabilidade para o aço SAE 1548m**. 2005. 93f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.
- GOMES, M. **Processos de fabricação: processos de conformação mecânica, forjamento**. (notas de aulas 6 e 7). Salvador: IFBA, set. de 2008.
- LIMA, Flávia Barros. **Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41xx – uma abordagem quantitativa**. 2006. 200f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MARCOMINI, José Benedito. **Fragilização da martensita revenida no aço SAE 5160H**. 2009. 145f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2009.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Processos de Fabricação. Conformação Mecânica 1 – Generalidades, Laminação e Forjamento**. Curso Técnico de Mecânica Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

UDOMPHOL, Tapany. **Forging**. Suranaree University of Technology, 2007. Chapter 2. Disponível em: <http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/02_Forging.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2011.

VILLARES: aços para beneficiamento, 2005.

MECALUX. Disponível em : <http://www.logismarket.ind.br/metaloplan/durometro-portatil/2080771633-176R3595095-p.html?utm_expid=10005783>. Acesso em: 12 ago. 2013.