

5 Discussão

5.1. Precipitação do V e Nb

Neste trabalho usou-se o mecanismo de endurecimento por precipitação para se atingir as propriedades mecânicas especificadas para o vergalhão CA50 empregando-se aço com 0,2%C e 0,8%Mn.

Como a eficiência do endurecimento por precipitação depende da distribuição uniforme dos precipitados na liga final e do tamanho destes precipitados, foi calculado então as temperaturas de formação dos precipitados para nióbio e vanádio e para as composições químicas propostas no segundo experimento.

O Gráfico 16 apresenta as curvas de formação dos precipitados para nióbio e vanádio utilizando como aço de composição química base 0,2%C; 0,8%Mn e 100 ppm N. O banco de dados usado no ThermoCalc M foi o SSOL.

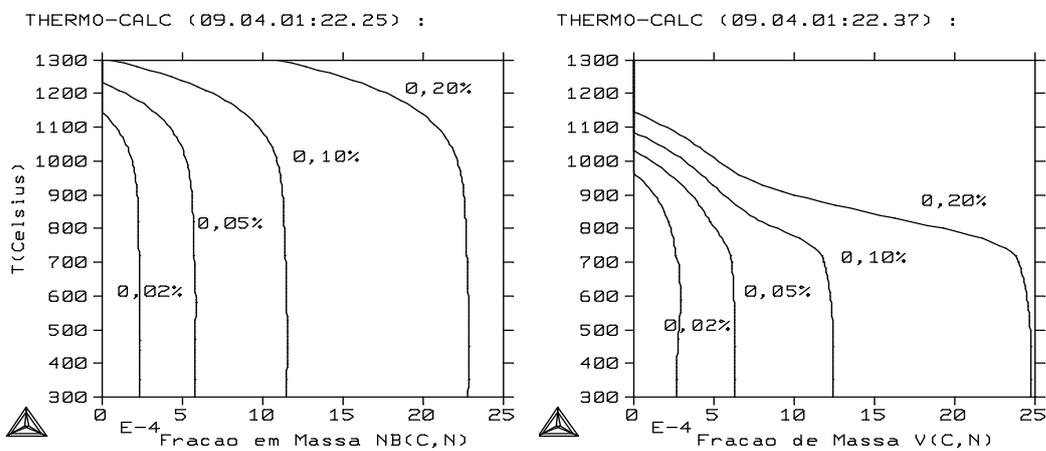


Gráfico 16: Curvas de precipitação da fase contendo Nb e V.

O Gráfico 17 apresenta o perfil de temperatura após o último conjunto de cilindros de laminação, onde pode-se observar a taxa de resfriamento nos pontos após o laminador.

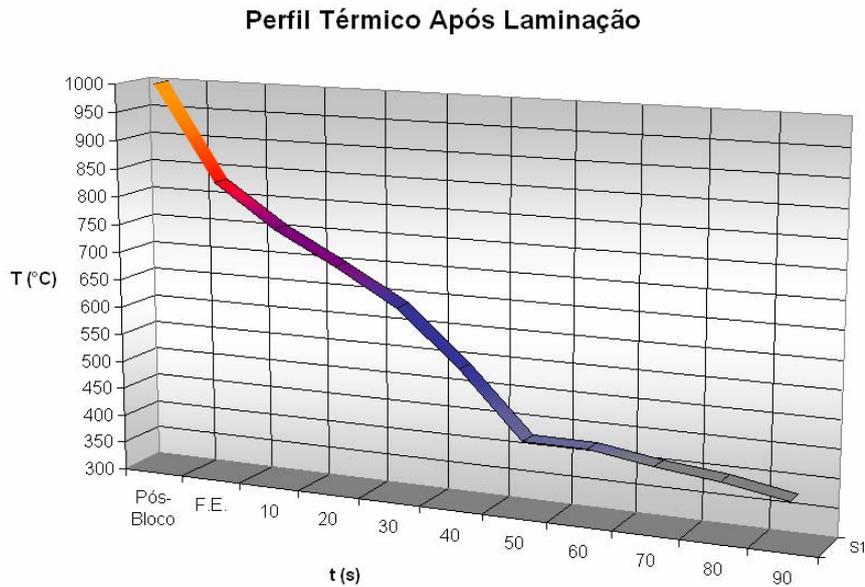


Gráfico 17: Perfil de temperatura logo após o último conjunto de cilindros de laminação.

O Gráfico 18 apresenta a fração de massa de precipitado formado e o teor de nióbio e vanádio do mesmo em relação à temperatura. Observa-se que o precipitado de nióbio forma-se a temperaturas acima de 1000°C, onde a fração total de fase precipitada está em torno de 25% do total de precipitado a ser formado. Para o cálculo a composição química definida no Thermocalc M foi 0,2%C; 0,8%Mn; 0,14%V; 0,035%Nb e 100 ppm de N.

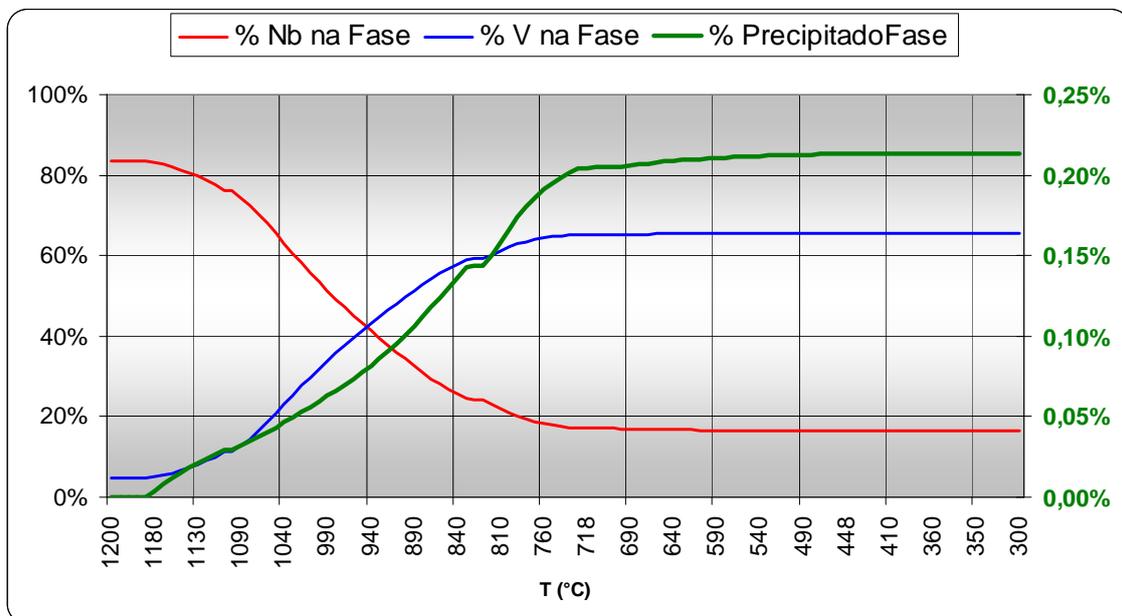


Gráfico 18: Curva de formação dos precipitados da fase contendo carbonitretos de vanádio e nióbio em relação a fração de massa da fase.

5.2. Primeiro Experimento

O primeiro experimento foi elaborado para avaliar se seria possível alcançar valores de limite de escoamento acima de 500 MPa, adicionando-se vanádio a aços com 0,20%C e 0,80%Mn que normalmente apresentam limite de escoamento em torno de 380 MPa. A referência para a quantidade de vanádio a ser adicionada está nos resultados do Gráfico 6, oriundo de ensaios de propriedades mecânicas em chapas de aço. [1] A diferença está no percentual de Manganês que no aço da referência é de 1,20 % e alcança aproximadamente 380 MPa sem vanádio ou nióbio e nos resultados históricos da usina avaliada, um aço com 0,80 %Mn, alcança os mesmos 380 MPa.

Os resultados obtidos comprovam que o uso de vanádio na ordem de 0,20% atingem de forma estável resultados de limite de escoamento acima de 500 MPa para os três diâmetros nominais produzidos.

A verificação se os requisitos de composição química para avaliar a soldabilidade garantiram a qualidade das juntas soldadas do vergalhão produzido no primeiro experimento, foi realizada na prática, através da confecção de telas e colunas, e foram mantidos os parâmetros de soldagem usuais correspondentes aos diâmetros nominais dos vergalhões utilizados.

As telas e colunas utilizam vergalhões retos produzidos em processo de laminação de barras retas com processo de têmpera superficial e leito de resfriamento, portanto, foi necessário endireitar previamente os vergalhões em rolos para fazer os mesmo produtos (telas, colunas, etc)

Não foi observada qualquer anomalia na qualidade das soldas das telas e colunas, como exemplificado na Foto 8.



Foto 8: Detalhe da solda de um fio de 4,2 mm com aço 0,10%C em uma barra de 8 mm com aço 0,23 %C e 0,22 %V.

As soldas foram observadas no microscópio ótico e a Foto 9 apresenta as micrografias da região transversal ao fio de aço soldado no vergalhão 10V20. Não há trincas na ZTA ou regiões com vazios. Os resultados de microdureza apontam para formação de martensita em algumas regiões da ZTA, o que não compromete a junção das barras, mas reduz a ductilidade nestes pontos. Os dobramentos realizados na montagem das colunas, como o exemplo da Foto 8 garantiram a qualidade das juntas soldadas, bem como os testes práticos realizados pelos operadores como já comentado no item 3.5. Desta forma o produto foi aprovado para uso na produção de telas para colunas, fixação de estribos, treliças e telas soldadas.

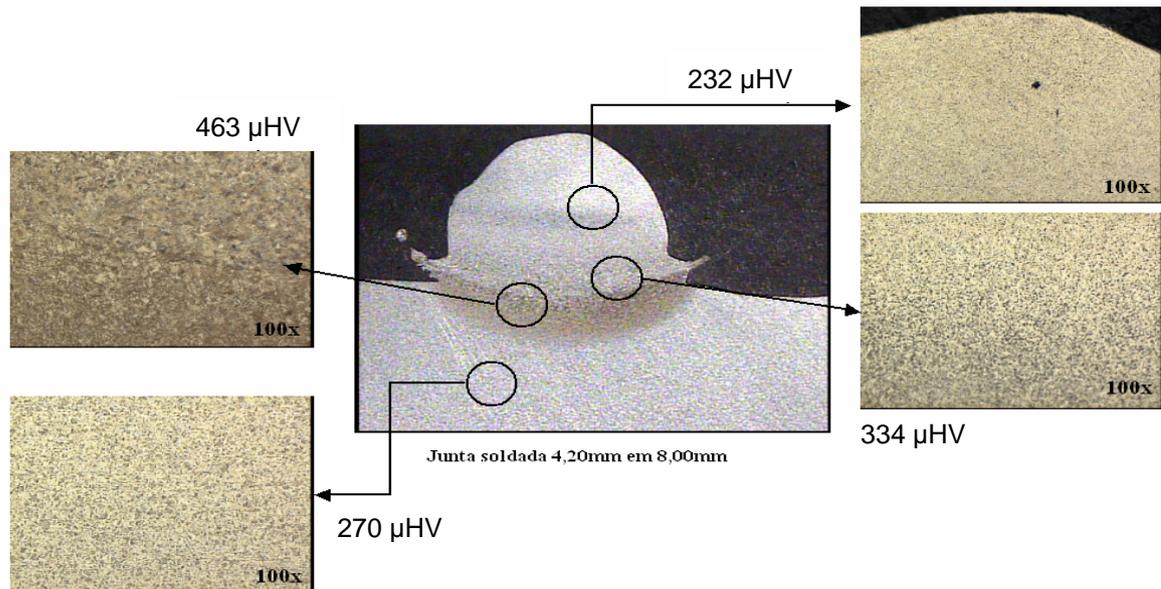


Foto 9: Região da solda no diâmetro nominal de 8,00 mm, mostrando a variação microestrutural e respectivas microdurezas.

5.3. Segundo experimento

De acordo com os resultados do primeiro experimento, um percentual aproximado de 0,16% de vanádio seria suficiente para obter valores acima de 500 MPa de limite de escoamento. Foram produzidos então duas corridas microligadas ao vanádio com 0,18 %V e 0,15%V denominadas C20V18 e C20V15 e mais uma corrida para avaliar o efeito do Nb com 0,14%V e 0,35%Nb denominado neste trabalho de C20V14Nb04. O emprego de nióbio neste segundo experimento visa substituir parte do vanádio com o objetivo de reduzir o custo adicional do aço devido ao emprego dos elementos microligantes.

Os resultados das amostras obtidas do vergalhão endireitado apresentam uma correlação maior com o limite de escoamento do que os resultados das amostras obtidas das extremidades dos rolos de vergalhão. Observa-se no Gráfico 15, uma melhor distribuição os pontos de composição química obtidos da amostragem realizada nos pontos entre as extremidades dos rolos.

O Gráfico 14 apresenta a comparação entre limite de escoamento e o percentual de vanádio para as amostras retiradas das extremidades dos rolos logo após a laminação.

A linha de tendência que mais se ajusta aos pontos do gráfico é a logarítmica, linha vermelha.

Comparando-se o Gráfico 15 com o Gráfico 14 observa-se que devido aos pontos intermediários avaliados na amostragem do vergalhão ao longo do

processo de endireitamento, a correlação entre limite de escoamento e percentual de elementos microligantes é melhor no Gráfico 15.

Então, os dados principais para análise final deste trabalho são os apresentados no Gráfico 15.

Observa-se que para valores de %V acima de 0,10%, os resultados ultrapassam os 500 MPa de escoamento, mas somente são estáveis acima de 0,12%, que em escala industrial seria uma especificação mais realista. Como em uma produção de lotes maiores, pode haver alguma variação nos resultados, seria importante também especificar um limite mínimo de escoamento de 510 MPa para as amostras ensaiadas. Desta forma garante-se que toda a produção estará acima de 500 MPa.

No Gráfico 19 observa-se que as amostras apenas com V apresentam resultados de limite de escoamento semelhantes às amostras com mesmo percentual de %Nb+%V. Mas as amostras com 0,153% e 0,160% de %Nb+%V que têm, praticamente, apenas vanádio como elemento microligante, apresentam resultados de limite de escoamento em média 3 % maior do que as amostras com 0,154% e 0,156%, o que pode se explicar pela temperatura de laminação não solubilizar nióbio suficiente para formar precipitados mais finos durante a laminação como ocorre com o vanádio.

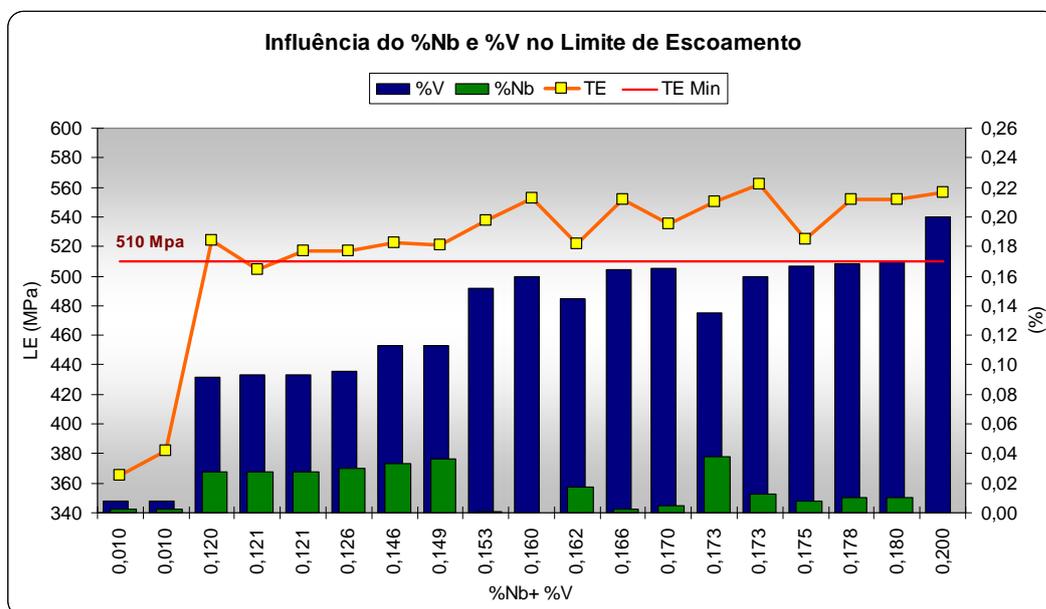


Gráfico 19: Gráfico apresentando a comparação entre %Nb + %V.

5.4. Comparação com resultados históricos

Como o resultado deste trabalho apresenta mais uma forma de produção de vergalhões laminados a quente, mas com diferenças dos processos empregados atualmente nos produtores mundiais, cabe então apresentar os

resultados dos vergalhões produzidos no processo de têmpera superficial e processo de emprego de aços C-Mn.

5.4.1. Têmpera Superficial

Para apresentar o efeito do processo de têmpera superficial, foi realizada a análise de valores históricos de propriedades mecânicas das barras laminadas na usina onde os experimentos foram realizados e comparados os resultados entre barras que passaram por processo de têmpera superficial com barras resfriadas ao ar.

A Foto 10 apresenta a seção transversal de uma barra de vergalhão 10 mm com camada de martensita formada em processo de têmpera superficial.

O Gráfico 20 Apresenta a comparação entre ensaios de tração de uma usina brasileira de barras redondas de aço 1021 e vergalhões produzidos em processo de têmpera superficial com mesmo aço. A barra vermelha apresenta os valores de 3 desvios padrão para cima e para baixo em torno da média que é apresentada como ponto preto.

Observando o Gráfico 20 e a Foto 10 verifica-se que o processo de tratamento térmico onde as barras ainda rubras na temperatura em torno de 850°C, que são submetidas a um rápido resfriamento superficial, formam uma camada de aço temperado e um núcleo normalizado. Esta camada temperada garante o atendimento a limites mínimos de escoamento de 500 MPa (72 ksi) atendendo à norma brasileira e a todas as normas que exigem um grau 60, por exemplo.

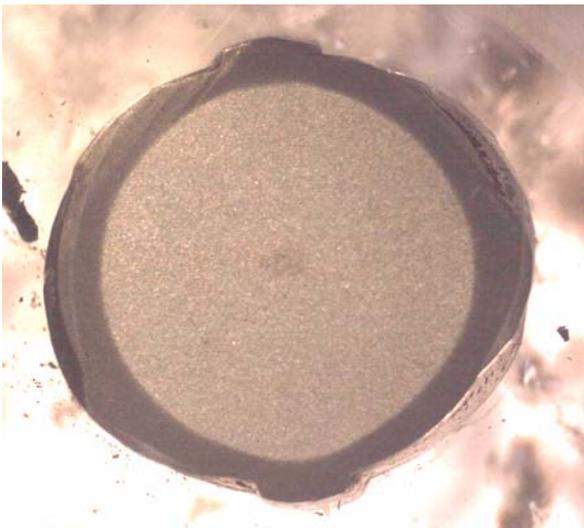


Foto 10: Seção transversal de vergalhão 10 mm com têmpera superficial. Ataque com Nital 2%.

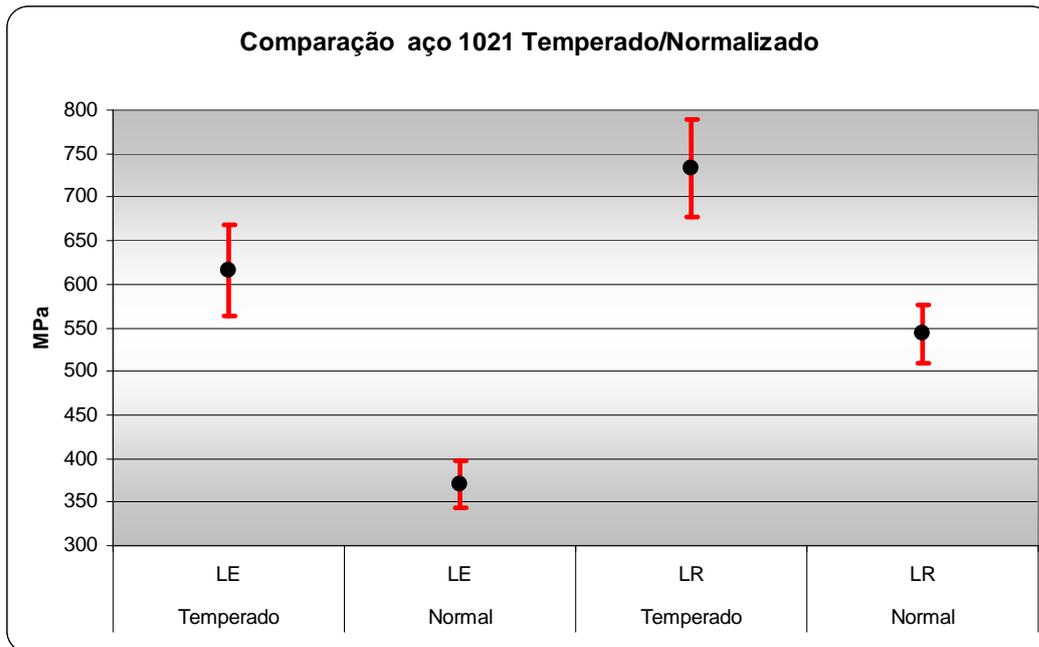


Gráfico 20: Comparação entre LE e LR de barras laminadas a quente no processo de resfriamento convencional e com têmpera superficial.

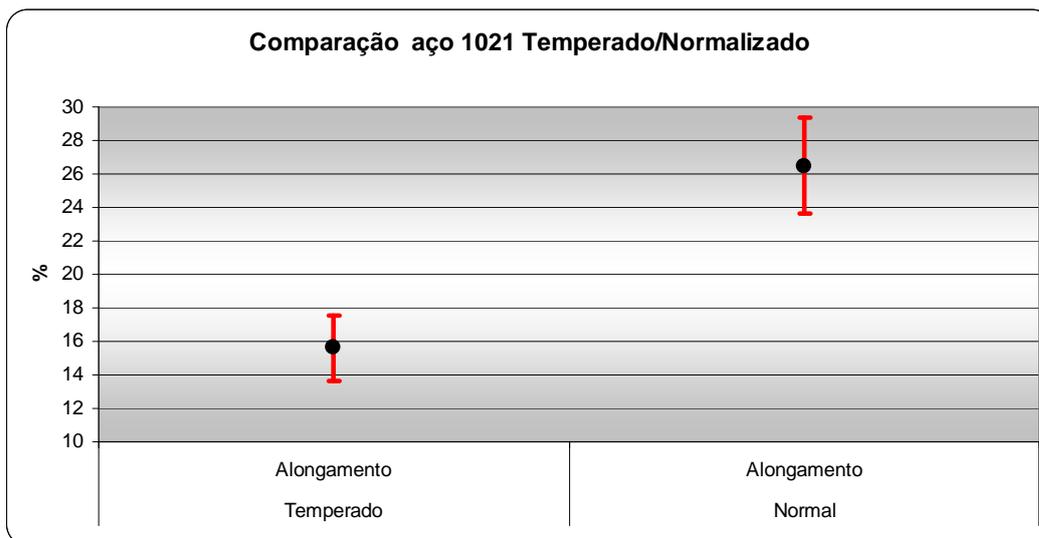


Gráfico 21: Comparação entre alongamento de barras laminadas a quente no processo de resfriamento convencional e com têmpera superficial.

O Gráfico 21 apresenta a comparação de resultados dos mesmos ensaios, e como apresentado na revisão bibliográfica, o alongamento das barras com resfriamento rápido ficou menor que o das barras resfriadas ao ar, mas ainda dentro das especificações de mínimo de 8% para a norma brasileira NBR-7480.

5.4.2. Emprego de Aço C-Mn

Para apresentar o endurecimento causado pelo emprego de aço C-Mn nos vergalhões laminados em escala industrial, foi analisado o histórico de produção de barras de vergalhão no diâmetro nominal de 10 mm. O Gráfico 22 apresenta

os resultados levantados comparando as médias de limite de escoamento de lotes produzidos entre os anos de 2006 e 2008. Mesmo havendo outras influências, como variações no resfriamento e residuais de outros elementos como cromo, níquel e vanádio, devido ao emprego de mais de 60 % de sucata na produção das corridas, é possível perceber a influência do manganês como estabilizador da austenita nos aços para vergalhão mesmo com a diferença sendo de apenas 0,15%Mn.

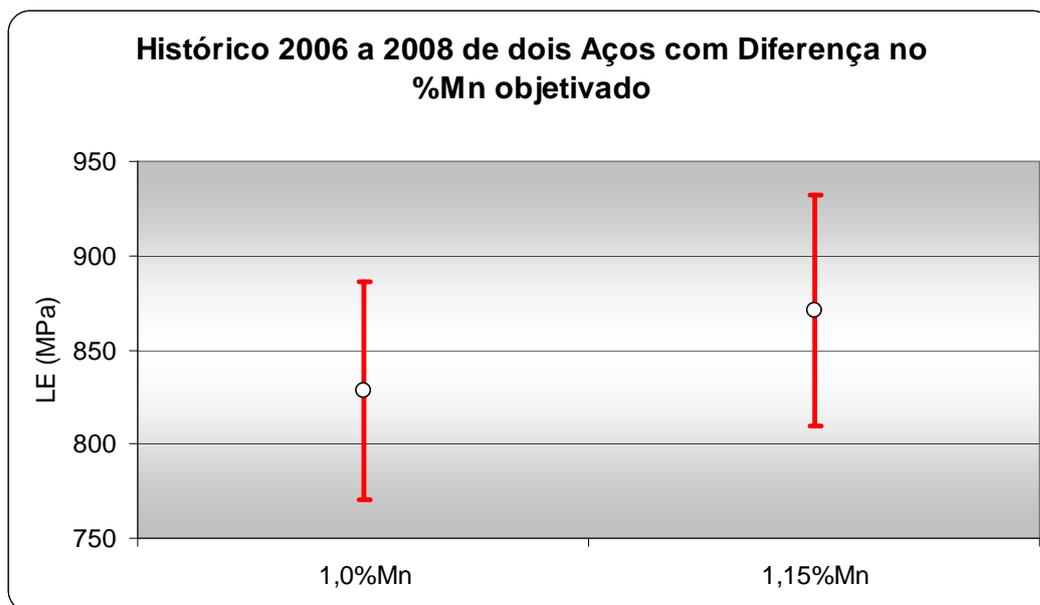


Gráfico 22: Influência do manganês em aço para vergalhão.

5.4.3. Comparação entre resultados

Para comparar os resultados deste trabalho com os aços produzidos na usina, realizou-se um levantamento histórico do ano de 2008 dos resultados obtidos durante a produção de vergalhão produzido com aço 1021 através do processo de têmpera superficial e produção de vergalhão em rolo com aço C-Mn 1545.

Os gráficos apresentam a média dos resultados com pontos brancos e barras vermelhas indicando dois desvios padrão dos resultados históricos e no caso da corrida produzida com 0,14% V e 0,035%Nb, as barras vermelhas indicam duas vezes a maior diferença entre a média e os resultados individuais das amostras ensaiadas.

Observa-se no Gráfico 24 que os resultados de LR/LE do vergalhão produzido em processo de têmpera superficial não atende às especificações de emprego em regiões sujeitas à terremotos, onde normalmente é exigido um mínimo de 1,25 para esta relação.

Observa-se no Gráfico 25 que o alongamento do vergalhão produzido com aço microligado ao V e Nb é o maior entre os três, indicando ser a melhor opção para emprego em aplicações especiais como usinas nucleares e a estruturas sujeitas a esforços dinâmicos como torres eólicas.

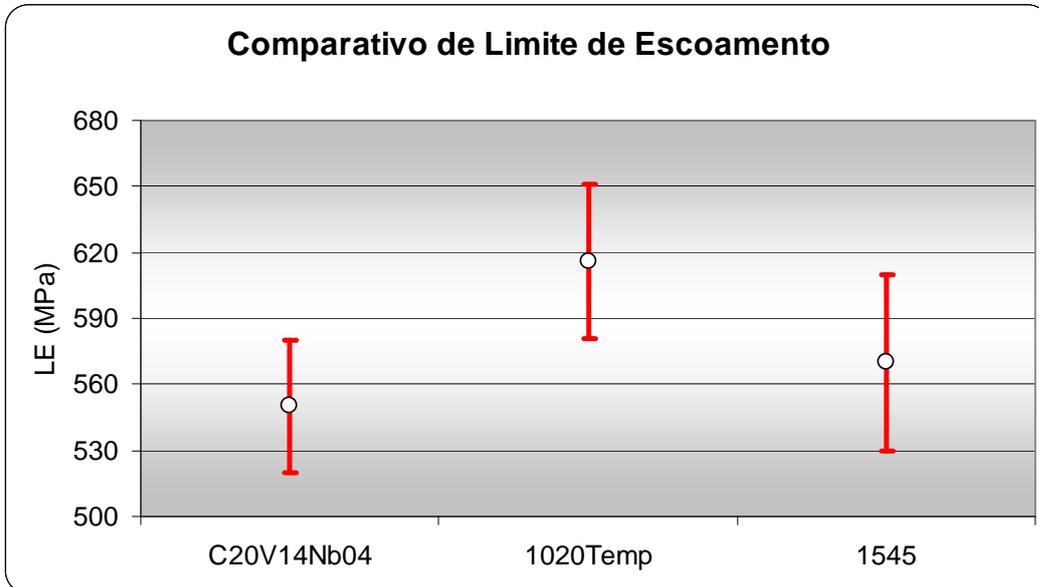


Gráfico 23: Comparativo do limite de escoamento entre o histórico de produção e resultados da corrida com 0,14%V e 0,035%Nb.

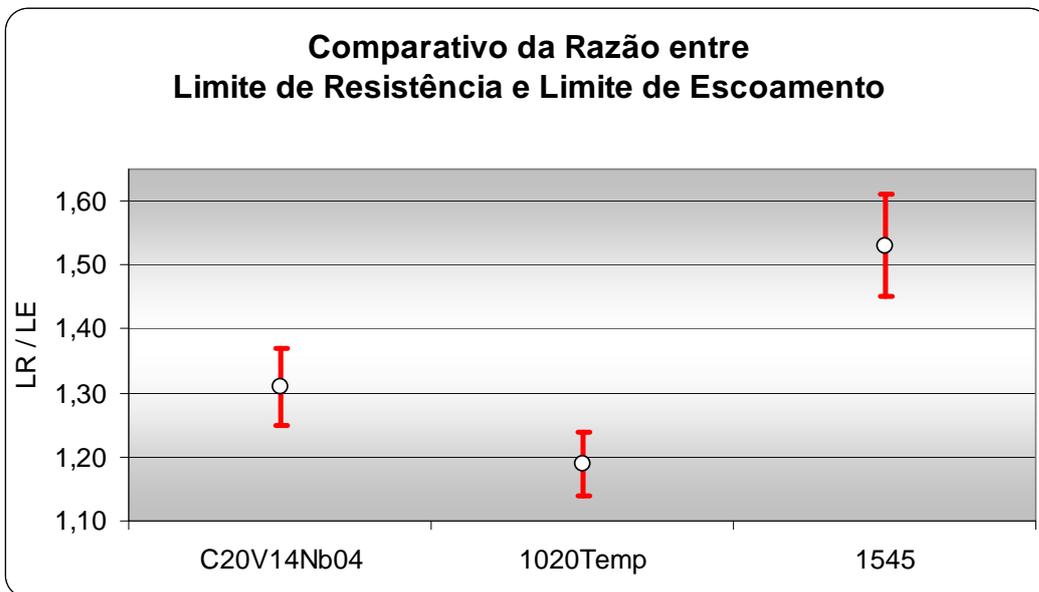


Gráfico 24: Comparativo da razão entre limite de resistência sobre limite de escoamento entre o histórico de produção e resultados da corrida com 0,14%V e 0,035%Nb.

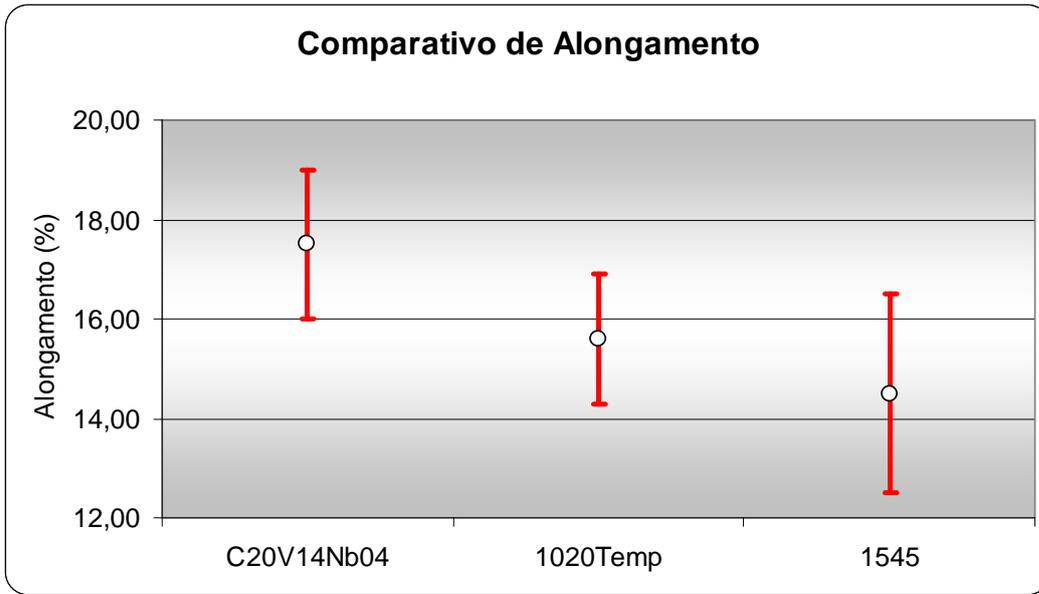


Gráfico 25: Comparativo do alongamento entre o histórico de produção e resultados da corrida com 0,14%V e 0,035%Nb.