

## **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO DO RECOZIMENTO CONTÍNUO SOBRE O LIMITE DE ESCOAMENTO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA.**

P. B. P. Leão, H. F. G. de Abreu, M. J. G. da Silva

Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) - Universidade Federal do Ceará - Campus Universitário do Pici - Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Bairro Pici - CEP: 60440-554 - Fortaleza - CE.

### **RESUMO**

*Aços de alta resistência e baixa liga, são considerados importantes tecnologicamente, devido a seu baixo custo e suas propriedades características, possuindo aplicações diversificadas incluindo as indústrias automotiva, óleo e gás. Neste estudo foi analisado um aço microligado ao titânio, de classe 340 MPa. As condições iniciais das amostras eram de laminadas a frio e na forma de corpos de prova de tração. Ensaios de tração foram realizados após o recozimento do material em escala laboratorial e industrial. A microestrutura do material foi analisada para cada condição de recozimento em laboratório. As condições do tratamento, ocorreram com variação de tempo, temperatura e espessura da amostra. Por fim, a temperatura foi identificada como o parâmetro mais influente sobre o limite de escoamento e observou-se como influência, um decréscimo na dureza, no limite de escoamento e de resistência com o seu aumento e o oposto ocorre para o alongamento e tamanho de grão.*

Palavras-chave: Aço microligado, recozimento, limite de escoamento.

## INTRODUÇÃO

Devido a primeira crise do petróleo em 1973, houve uma corrida para minimizar o consumo de combustíveis nos automóveis, por meio da redução do peso dos veículos, portanto procurou-se materiais alternativos. Este foi o eventual momento em que apareceram os primeiros aços de alta resistência ou *High Strength Steel* (HSS)(1). A partir de 1989, foram desenvolvidos e incorporados a esta classe, os aço denominados *High Strength Low Alloy* (HSLA) ou aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), que são microligados aos elementos Nb, Ti e/ou V (2). No momento atual, os aços mais utilizados no setor automotivo entre os de alta resistência, são os que possuem níveis de limite de escoamento em 340/450 MPa (3).

Os aços ARBL ou HSLA são considerados um dos aços mais importantes tecnologicamente, devido a seu baixo custo e suas propriedades que são comparáveis a outros materiais, possuindo além da indústria automotiva, aplicações bem diversificadas que incluem tubulações e plataforma de perfuração de óleo e gás, vasos de pressão, placas para indústria naval e em variados projetos na construções civil. Isso tornou-se possível somente a partir do entendimento das relações entre microestrutura-propriedade que foram desenvolvidas no decorrer do último século (4).

Estes aços tem como principal característica microadições de elementos que melhoram significativamente suas propriedades mecânicas. Os principais elementos são o Nb, Ti e V e por estarem presentes em concentrações muito limitadas em cerca de 0,001-0,1%, são denominados elemento microligantes (5).

Estes elementos possuem alta afinidade pelo carbono e/ou nitrogênio e tem grande efeitos sob a microestrutura do material, os principais parâmetros que podem ser controlados ou alterados por meio dos microligantes são o tamanho e a forma dos grãos, tamanhos dos precipitados, estrutura ferrítica, densidade de discordâncias e a fração volumétrica de inclusões não-metálicas (6,7).

Os aços microligados também geram redução de custo no seu processamento, devido a eliminação de tratamentos térmicos de alto custo e as condições de processamento na laminação que possui menor uso energético(4).

Em geral, as tendências para as emissões de CO<sub>2</sub> a partir dos automóveis, está se tornando cada vez menor, por conta da introdução de novas tecnologias energeticamente eficientes, motores menores e claro veículos cada vez mais leves (8).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta em escala industrial e laboratorial a influência dos principais parâmetros de processamento de um aço microligado ao titânio sob as principais propriedade mecânicas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Escala laboratorial

Para realização dos ensaios experimentais em laboratório, as amostras foram retiradas a partir da entrada de uma linha de zincagem. Estas estavam no estado laminadas a frio e suas micrografias são ilustradas na figura 1. A composição química destas amostras é apresentada na tabela 1. Os corpos de prova foram usinados, nas medidas apresentadas na tabela 2 e de acordo com a norma NBR ISSO 6892-1.

Os ensaios foram compostos por simulação de recozimento contínuo em laboratório e após o tratamento de cada amostra, foram realizados testes de tração, para obtenção do limite de escoamento. Por fim, a microestrutura do material foi analisada para cada condição de recozimento, após preparação metalografica e ataque com nital 2%, com o intuito de observar a variação do tamanho de grãos.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	N	Ti	Nb	B	V
0,059	0,495	0,012	0,008	0,007	0,01	0,004	0,014	0,003	0,002	0,065	0,0046	0,033	0,003	0,0002	0,003

Tabela 1 - Composição química do aço em estudo. Fonte: LACAM-UFC

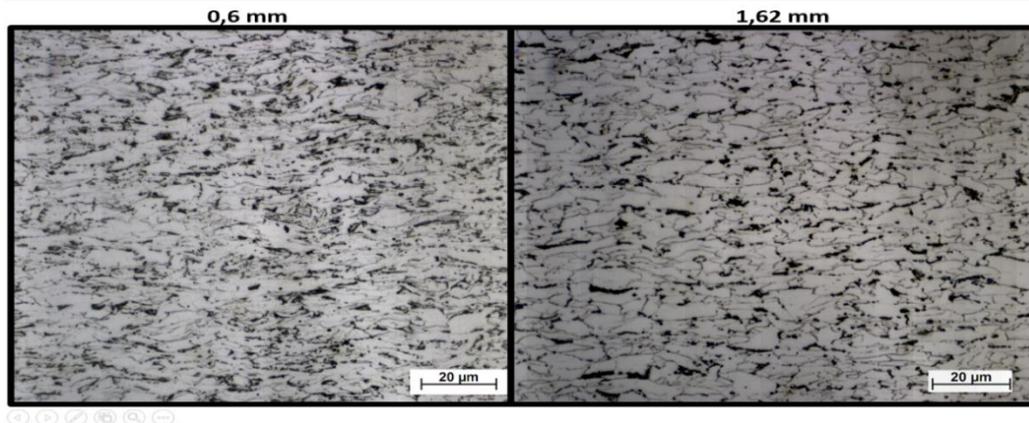


Figura 1 - Amostras laminadas a frio, com um aumento de 1000x. Fonte: Autor

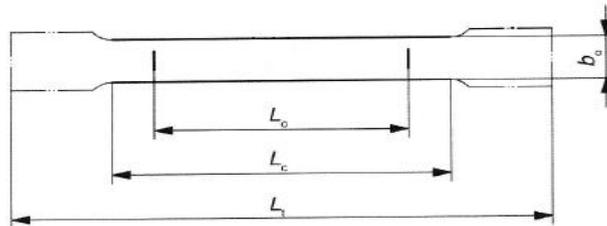


Figura 2 - Dimensões do corpo de prova. Fonte: NBR ISSO 6892-1

Tabela 2 - Medidas do corpo de prova usinado. Fonte: Autor

Dimensão	$b_0$	$L_0$	$L_c$	$L_t$
Valor (cm)	2	10	12,5	25

Os tratamentos de recozimento em escala laboratorial, ocorreram em um forno mufla, com a ajuda de um cabo de aço inox e uma espécie de presilha, que sustentavam o corpo de prova. Assim, foi possível mover a amostra no sentido vertical, realizando um pré-aquecimento acima do forno e em seguida o controle da permanência da mesma no centro do forno. O resfriamento, foi realizado por um ventilador potente, durante a saída do corpo de prova do forno. O esquema da estrutura utilizada é ilustrada na figura 3.

Os ensaios foram realizadas nas temperaturas de encharque de 720, 760, 800 e 840 °C, variando o tempo de permanência nestas em 120, 260 e 600 segundos. Cada ensaio foi realizado duas vezes e nas condições citadas para duas espessuras, gerando um total de 48 corpos de prova.

Para analisar os parâmetros estabelecido nos ensaios em laboratório, foi utilizado o método de planejamento de experimentos, também conhecido como DOE (Disign Of Experiments). Através da ferramenta citada, podemos obter informações das influências das variáveis isoladas, influências com interações entre os fatores e os parâmetros mais significativos sobre a variável resposta.

Foram utilizados como fatores, três variáveis quantitativas de forma alternada no experimento. Os fatores utilizados foram os mesmos já mencionados; espessura, tempo e temperatura de encharque. Um nível igual a dois foi utilizado, colocando em evidência apenas os pontos extremos dos fatores. Por fim, foi utilizado o fatorial completo e duas replicações.



Figura 3 - Esquema do ensaio de recozimento em laboratório. Fonte: Autor

### Escala industrial

O estudo em escala industrial iniciou-se através de análises de dados históricos de produção, para observar a influência dos parâmetros do processo sobre o limite do escoamento. Como nesta etapa não foi utilizado o planejamento de experimentos, os dados foram divididos de acordo com a tabela 3, no qual os valores apresentados como referência para a conversão de valores baixo ou alto e pequeno ou grande, são as médias de todos os valores históricos para aquele determinado parâmetro.

Temperatura (°C)		Espessura (mm)		Velocidade(m/min)	
1-Baixa	Menor ou igual à 814	1-Pequena	Menor ou igual à 1,4	1-Baixa	Menor ou igual à 70
2-Alta	Maior que 814	2-Grande	Maior que 1,4	2-Alta	Maior que 70

Tabela 3 - Divisão dos dados de produção. Fonte: Autor

Para a análise das propriedades do material em escala industrial foram retiradas amostras a partir da saída da linha de zincagem, ou seja, estas foram recozidas, sofreram um pequeno passe de laminação e adquiriram uma camada de zinco.

Os testes realizados em planta industrial foram aplicados somente para a espessura de 1,62 milímetros e as seguintes temperaturas foram selecionadas: 760, 780, 790, 805, 830 e 840 °C. A cada temperatura, foram obtidos vinte e três amostras na direção de laminação, gerando no total de 138 amostras. Estas foram usinadas na forma de corpos de prova de tração, já ilustrado na figura 2 e com dimensões apresentadas na tabela 2.

Através de ensaios de tração, foram possíveis a obtenção das propriedades de limite de escoamento, alongamento e limite de resistência. Foram realizados teste de dureza e por um microscópio óptico foi medido o tamanho de grão. Nestes dois últimos, as amostras foram retiradas na forma de tiras, adquiridas na direção perpendicular de laminação, ou seja, uma tira com seu comprimento igual a largura da chapa e a largura de 4 centímetros. Estas tiras, foram igualmente divididas em cinco regiões, para se ter informações representativas da largura da chapa. No teste de dureza em cada região da tira, foram realizadas três medidas de dureza e ao fim a média das médias das cinco regiões foi calculada, para cada temperatura. Para o tamanho de grão, cada uma das cinco regiões foram submetidas a uma única medição, retirando ao fim a média de todas regiões.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Escala laboratorial

As informações dos tratamentos realizados em escala laboratorial e os respectivos valores dos limites de escoamento, obtidos através dos ensaios de tração são apresentados nas tabelas 4 e 5.

<b>Espessura 0,6 mm</b>						
	<b>120s</b>		<b>260s</b>		<b>600s</b>	
<b>720 °C</b>	586 MPa	619 MPa	569 MPa	511 MPa	511 MPa	510 MPa
<b>760 °C</b>	523 MPa	534 MPa	477 MPa	425 MPa	344 MPa	418 MPa
<b>800 °C</b>	504 MPa	492 MPa	498 MPa	447 MPa	469 MPa	370 MPa

<b>840 °C</b>	532 MPa	430 MPa	475 MPa	535 MPa	358 MPa	381 MPa
---------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Tabela 4 - Limites de escoamento para o material menos espesso. Fonte: Autor

<b>Espessura 1,62 mm</b>						
	<b>120s</b>		<b>260s</b>		<b>600s</b>	
<b>720 °C</b>	644 MPa	623 MPa	410 MPa	418 MPa	391 MPa	412 MPa
<b>760 °C</b>	514 MPa	522 MPa	397 MPa	387 MPa	387 MPa	385 MPa
<b>800 °C</b>	394 MPa	395 MPa	384 MPa	389 MPa	383 MPa	381 MPa
<b>840 °C</b>	389 MPa	394 MPa	373 MPa	378 MPa	382 MPa	364 MPa

Tabela 5 - Limites de escoamento para o material mais espesso. Fonte: Autor

Os resultados microestruturais para cada condição de tempo e temperatura, são apresentados nas figuras 4 e 5. Observa-se que para as duas espessuras a temperatura de 720 °C, mesmo com o tempo de 600 segundos, os grãos recristalizados são bem pequenos e para o tempo de 120 segundos, existe pouca ou nenhuma recristalização, tendo ainda grãos alongados. Por este motivo, as microestruturas que foram modificadas parcialmente, apresentam os maiores limites de escoamento.

É visto que, o aumento da temperatura, mesmo para o menor tempo, aumenta o tamanho dos grãos recristalizados. Se compararmos as duas espessuras, podemos ver que para tempos e temperaturas elevadas, o tamanho dos grãos na amostra mais espessa são maiores se comparado com a menos espessa, isso pode ser decorrência do resfriamento das mesmas. Por fim, é confirmado que os maiores tamanhos de grãos possuem o limite de escoamento menor, devido a menor quantidade de barreiras que impedem o movimento das discordâncias, neste caso contornos de grão.

A figura 6, mostra a imagem produzida a partir de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Estas foram realizadas, para observar a morfologia dos carbonetos formados a partir de altas e baixas temperaturas. As imagens realizadas em MEV, junto as realizadas em Microscópio Óptico (MOP), mostram que em temperaturas mais baixas a tendência é a formação de glóbulos de carbonetos uniformemente distribuídos na matriz de ferrita. Já para altas temperaturas, podemos observar que não há uma grande dispersão dos precipitados apresentando uma estrutura de lamelas intercaladas, o que provavelmente venha ser perlita. Os precipitados de carbonitretos não são

possíveis de visualizar, pois são muito pequenos, sendo necessário a utilização de Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET).

A figura 7, ilustra o resultado do DOE com as interações dos fatores sob a variável resposta (Limite de Escoamento). Através da figura 7 A é identificado que o fator temperatura e tempo possuem as maiores correlações com o limite de escoamento. Isto era previsto, por conta dos mecanismos de recristalização e crescimento de grão, serem totalmente dependentes termodinamicamente destes fatores. Portanto, quanto maior a temperatura ou o tempo, mais facilmente o aço recristalizará e dependendo de quão maior estes sejam, o mesmo tenderá a ter grãos maiores gerando a queda do limite de escoamento.

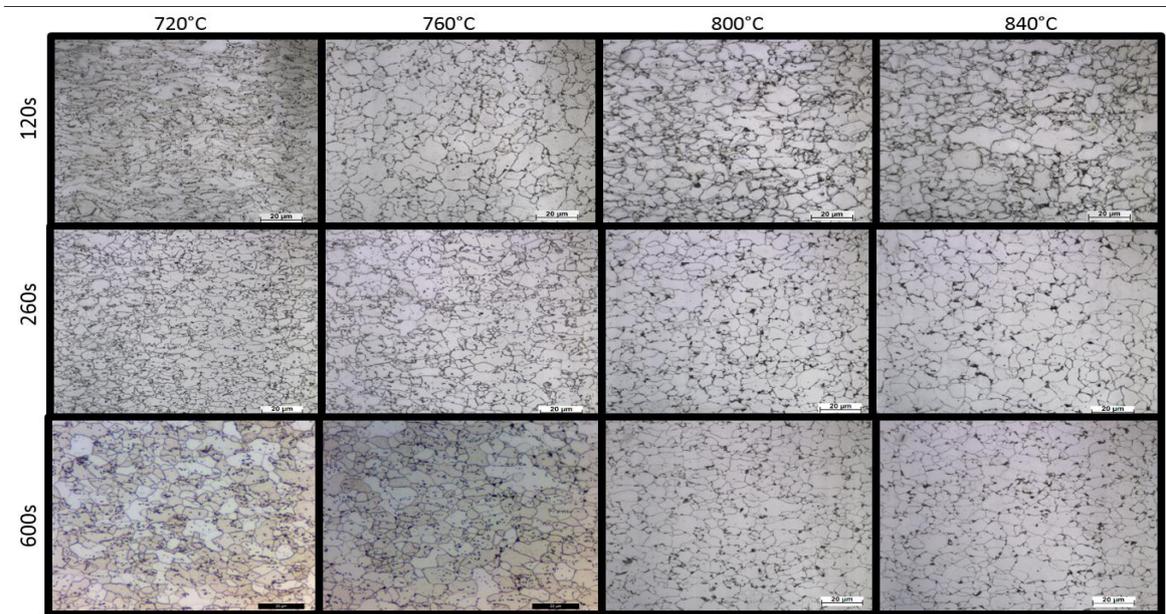
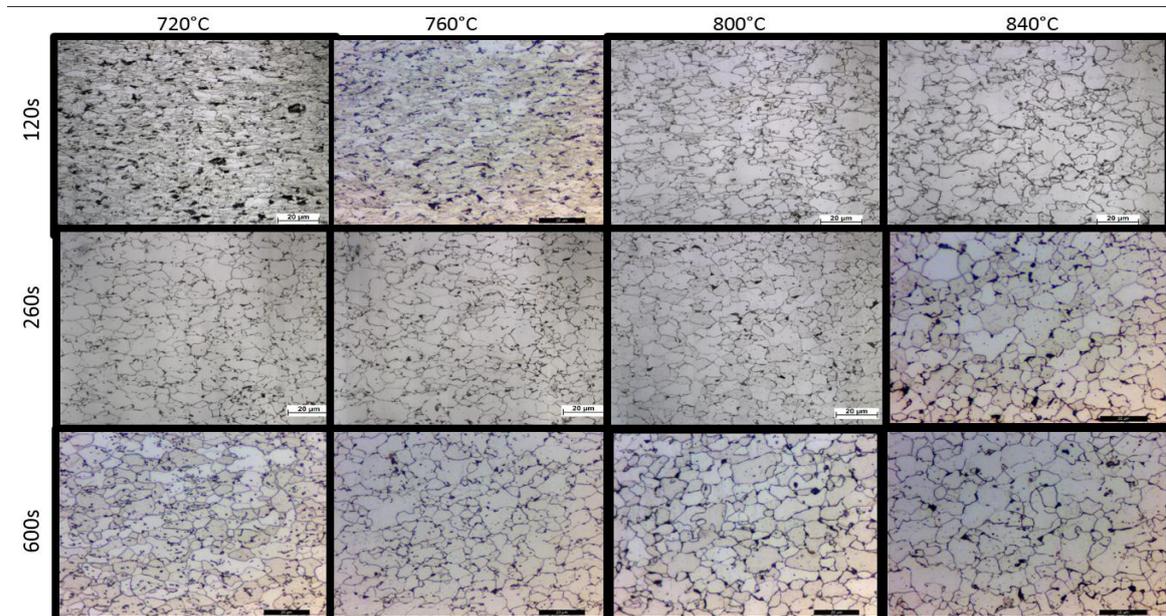


Figura 4 - Microestruturas para a espessura de 0,6 milímetros, 1000x. Fonte:



Autor

Figura 5 - Microestruturas para a espessura de 1,62 milímetros, 1000x. Fonte: Autor

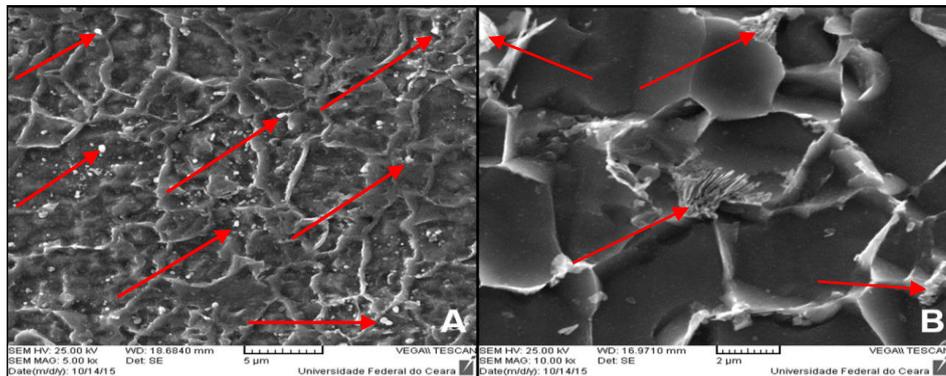


Figura 6 – A: Microestrutura recozida em 720°C e durante 260 s, 5000x.  
B: Microestrutura recozida em 800°C e durante 120 s, 10000x. Fonte: Autor

No caso da espessura, com o seu aumento há uma leve queda do limite de escoamento. Isto é causado no momento do resfriamento, já que espessuras mais grossas são mais difíceis de resfriarem, para um mesmo tempo de resfriamento e considerando também o mesmo tempo e temperatura de ensaio. Portanto, o material mais espesso permanece por mais tempo em temperaturas altas, gerando um crescimento relativamente maior dos grãos, se comparado com o material menos espesso.

Para os fatores com interações, podemos identificar na figura 7 B que o tempo e temperatura juntos possuem a maior influência no limite de escoamento. É observado, que para temperaturas mais baixas o tempo tem maior influência. Isto provavelmente ocorre pelo fato de que, na menor temperatura do ensaio (720 °C) e para o menor tempo (120s), o aço ainda possui uma microestrutura muito idêntica a laminada a frio, ou seja, não recristalizada, enquanto que no maior tempo de exposição (600s), a microestrutura apresenta-se completamente recristalizada, como retratado na figura 4 e 5. Gerando assim, uma grande variação no limite de escoamento.

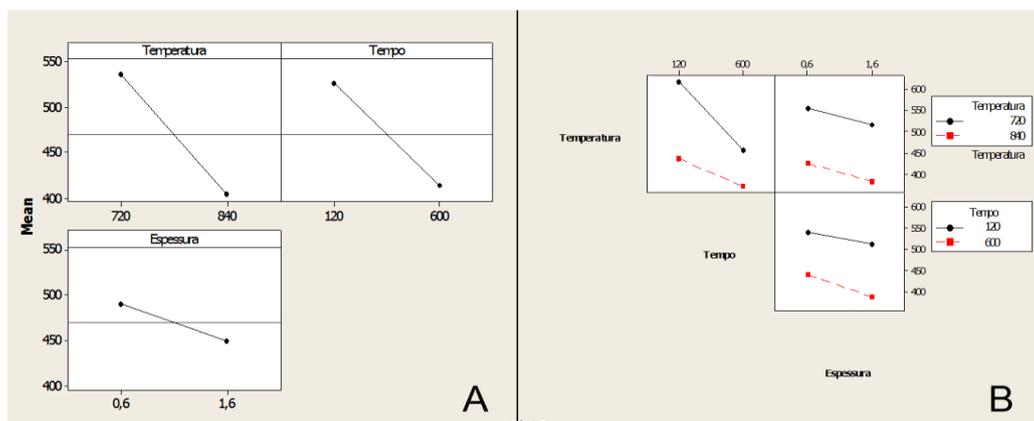


Figura 7 – A: Efeitos individuais para o limite de escoamento. B: Efeitos com interações sobre o limite de escoamento. Fonte: Minitab 16 *Statistical Software*

### Escala industrial

A figura 8, mostra o resultado encontrado a partir dos dados históricos de produção. Este denota que na linha de produção, a temperatura tem a maior correlação com o limite de escoamento. Novamente, o efeito do aumento da temperatura com a queda do limite de escoamento é explicado pelo crescimento dos grãos. A influência da velocidade no aumento do limite de escoamento é causada pelo tempo de permanência no forno, pois quanto menor o tempo, a chapa de aço permanecerá menos tempo exposta a temperatura de encharque dentro do forno, tendo assim, um menor crescimento de grãos. A espessura também gera diminuição da propriedade em estudo, isto ocorre por dois fatores. Primeiramente, ocorre por conta do seu processamento na linha de zincagem, pois espessuras maiores tendem a ser produzidas em velocidades menores, devido a capacidade da linha, tendendo assim a permanecer por um tempo maior no forno e conseqüentemente produzindo grãos maiores, diminuindo o limite de escoamento. A segunda causa é a mesma ocorrida nos tratamentos térmicos em laboratório, uma chapa mais grossa demora mais a resfriar resultando em grãos relativamente maiores. Assim, os resultados em escala laboratorial foram bem representativos, apontando influências idênticas ao processamento real.

Já que a temperatura foi obtida como o parâmetro de maior influência, decidiu-se realizar a análise a partir da produção, somente com a variação da temperatura. A figura 9, apresenta graficamente os valores das médias das propriedades, obtidas em escala industrial. É observado que a dureza, o limite de escoamento e o limite de resistência diminuem com o aumento da temperatura. Já o alongamento e o tamanho de grão, sofrem o efeito oposto. Porém, é visto que, em 830 °C a dureza volta a se elevar e em 840 °C o tamanho de grão e o alongamento diminuem, seguido da elevação do limite de escoamento. O principal indicio deste efeito é a redistribuição dos precipitados ricos em nióbio, gerando conseqüentemente uma leve diferença nas propriedades finais para altas temperaturas.

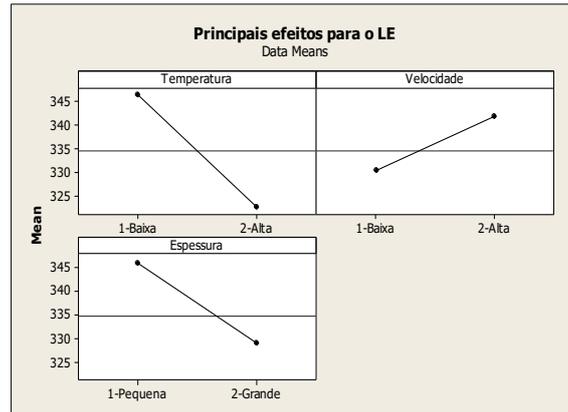


Figura 8 – Principais efeitos para o limite de escoamento, na linha de produção. Fonte: Minitab 16 *Statistical Software*

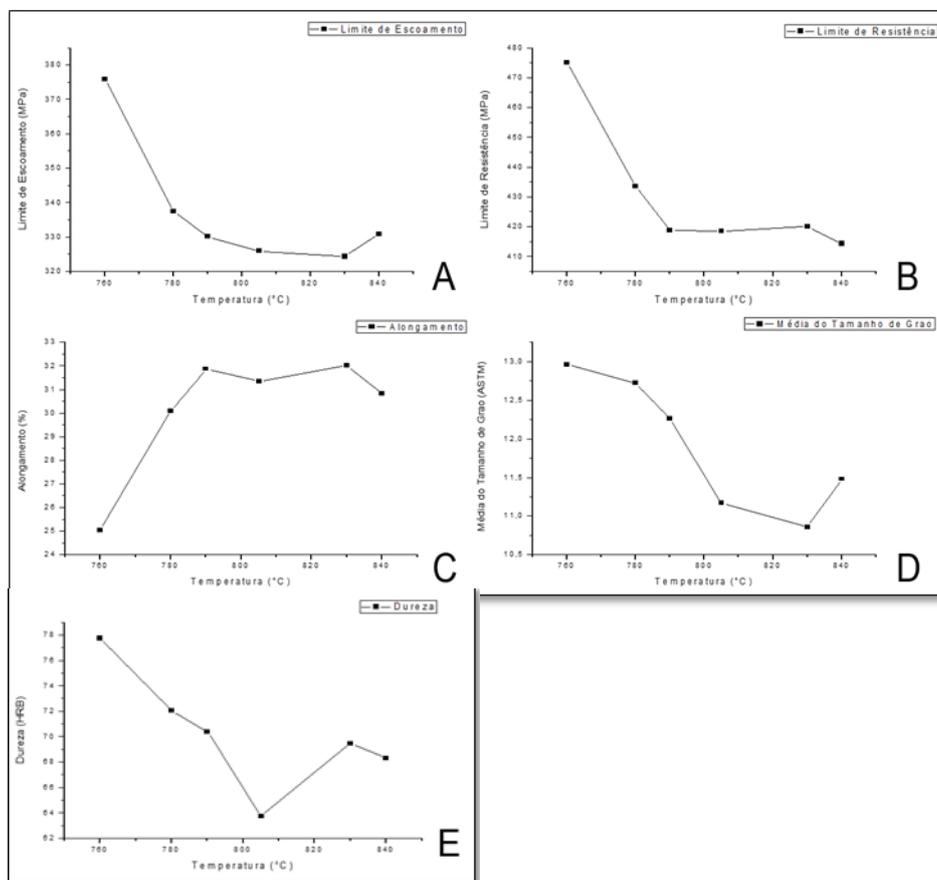


Figura 9 – A: Limite de escoamento(MPa) x Temperatura(°C). B: Limite de Resistência(MPa) x Temperatura(°C). C: Alongamento (%) x Temperatura (°C). D: Tamanho de Grão (ASTM) x Temperatura (°C). E: Dureza (HRB) x Temperatura (°C)  
Fonte: Autor

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e apresentado no presente trabalho podemos concluir que os aços microligados, possuem propriedades mecânicas essencialmente dependentes do tamanho de grão recristalizado.

Através da análise em escala industrial foi possível observar, que em altas temperaturas de encharque na linha de zincagem, podem ocorrer uma redistribuição dos precipitados ricos em nióbio, gerando novas influências nas propriedades do aço.

Por intermédio dos testes em laboratório, observou-se que para baixas temperaturas os carbonetos tem tendência a uma morfologia arredondada e finamente dispersa na matriz de ferrita. Em altas temperaturas a morfologia apresenta-se em lamelas intercaladas e menos distribuídas na matriz.

Por meio da análise estatística, foi possível afirmar que a temperatura é a variável de maior correlação com o limite de escoamento.

## REFERÊNCIAS

- (1) GORNI, Antonio Augusto. Engenharia microestrutural das chapas de aços avançados de alta resistência. Porto Alegre: 11º Conferência nacional de conformação de chapas: centro brasileiro de inovação em conformação mecânica, 2008.
- (2) LOW VOLUME VEHICLE TECHNICAL ASSOCIATION. Material composition of modern vehicle structures. 2009.
- (3) FONSECA, Fabiano Augusto Vallim *et al.* Aço bifásico processado via linha de galvanização contínua – revisão e estágio atual de produção na Usiminas/Unigal. Santos: 42º Seminário de Laminação da ABM – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2005.
- (4) PICKERING, F.B.; CAHN, R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E.J. Materials science and technology: a comprehensive treatment. 7.ed. Wiley-VCH, dez. 1991. p. 222-279.
- (5) HONEYCOMBE, R. W. K. Aços, microestruturas e propriedades. Cambridge: Fundação “Calouste Gulbenkian”, 1980.
- (6) MEYER, L. C.; STRAßBURGER, C.; SCHNEIDER, C. Effect and present application of the microalloying elements niobium, vanadium, titanium,

zirconium and boron in HSLA steels. In: HSLA Steels: Metallurgy and Applications; ASM, Metals Park. 1986. p. 29-44.

(7) MEYER, L. C.; STRAßBURGER, C.; SCHNEIDER, C. Microalloyng elements niobium, vanadium, titanium, zirconium and boron: their effects in modern automotive steels. Duilsburg, F. R. Germany – Thyssen Stahl AG, 1987.

(8) YE'S GLOBAL MINING & METALS CENTER. Global steel 2014: Planning to profit from opportunity: preparing for future demand. 2014.

(9) LEÃO, P.B.P. Adequação do limite de escoamento de aço de alta resistência micro ligado ao titânio, utilizando ferramentas da qualidade através da metodologia seis sigmas. 2016. 95 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.