

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE SEQUÊNCIAS TERMOMECÂNICAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ARBL API 5L X80

Deisiane Santos de Oliveira, deisianesantos2017@hotmail.com¹

Alisson Soares da Silva, alissonsoaressilva@live.com¹

Pablo Batista Guimarães, pabloguimaraes@recife.ifpe.edu.br¹

José Dásio de Lira Junior, josedasio@recife.ifpe.edu.br¹

Tiago de Sousa Antonino, tiagoantonino@recife.ifpe.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Av. Prof Luiz, 500, Cidade Universitária, Recife – PE

Resumo. *Sistemas dutoviários transportam petróleo e gases de acidez elevada, em severas condições ambientais e condições de uso, tornando urgente a necessidade de se projetar novos aços com alta resistência mecânica, boa tenacidade e melhor soldabilidade. Assim, surgiu o desenvolvimento dos aços ARBL, que têm sido constantemente aprimorados por meio de alterações em sua composição química e, principalmente, pelo uso de processos de manufatura avançados. Com a introdução do resfriamento acelerado após a laminação à quente, foram produzidos aços com altos níveis de resistência mecânica, mantendo a tenacidade, além de boa soldabilidade devido ao seu baixo teor de carbono, como é o caso do aço microligado para tubos API 5L X80. Este foi o aço escolhido para a realização deste trabalho, por ser um aço amplamente utilizado na fabricação de tubulações para linhas de transmissão no Brasil. Foram realizadas três sequências termomecânicas em amostras do aço API 5L X80, com a finalidade de observar as alterações nas propriedades mecânicas do material, visando sua otimização. Em seguida, foram realizados os ensaios de tração e, depois do tratamento dos dados, observou-se que houve uma melhora considerável nas propriedades mecânicas do aço API 5L X80 em relação ao aço na condição de “como recebido”.*

Palavras chave: Aço API 5L X80. Propriedades mecânicas. Rotas termomecânicas

Abstract. *Pipeline systems transport oil and gases with high acidity, in severe environmental conditions and conditions of use, making it urgent the need to design new steels with high mechanical resistance, good toughness and better weldability. Thus, ARBL steels developed, which have been constantly improved through changes in their chemical composition and, mainly, through the use of advanced manufacturing processes. With the introduction of accelerated cooling after hot rolling, steels with high levels of mechanical strength were produced, maintaining toughness, in addition to good weldability due to their low carbon content, as is the case of API 5L X80 microalloyed steel. This was the steel chosen for this work, as it is a steel widely used in the manufacture of pipes for transmission lines in Brazil. Three thermomechanical sequences were performed on samples of API 5L X80 steel, in order to observe changes in the mechanical properties of the material, aiming at its optimization. Then, tensile tests were carried out and, after processing the data, it was observed that there was a considerable improvement in the mechanical properties of API 5L X80 steel compared to steel in the “as received” condition.*

Keywords: mechanical properties, steel API 5L X80, thermomechanical routes

1. INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma demanda do transporte de petróleo e gás em maiores pressões de operação nos dutos, permitindo assim o aumento da capacidade. Devido a isto, há a necessidade da utilização de aços de alta resistência. O aumento da resistência dos aços para dutos permite uma significativa redução na espessura de parede, reduzindo, consequentemente, o peso do duto. É importante que o aumento no limite de escoamento não seja acompanhado por uma diminuição da tenacidade à fratura, uma vez que promoverá trincas induzidas por tensão, e uma diminuição da conformabilidade. Assim, alta resistência associada com uma alta tenacidade e conformabilidade são importantes exigências da indústria de dutos (Shanmugam *et al.*, 2008).

A adição de carbono ao ferro provê certas características ao material como, por exemplo, resistência à tração, compressão e flexão, tenacidade e resistência ao impacto aliada a uma maior dureza, tudo isso em um único material com

uma espessura e massa do produto final menor do que se comparado a outros que apresentam as mesmas ou somente algumas das características mencionadas, reduzindo significativamente o custo do produto final (Seidel, 2015).

Sistemas dutoviários transportam petróleo e gases de acidez elevada, em severas condições ambientais e condições de uso como temperatura, pressão, atrito, ambientes corrosivos, entre outras. Isso tornou urgente a necessidade de se projetar novos aços com alta resistência mecânica, boa tenacidade e melhor soldabilidade. Assim, surgiu o desenvolvimento dos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) que, na sua forma original mais simples, apresentam uma microestrutura ferrítica – perlítica e possuem baixo teor de carbono (fazendo com que a soldabilidade e a tenacidade sejam melhoradas), o qual é compensado com a adição de pequenas quantidades de elementos microligantes que melhoram a resistência mecânica (Ramírez, 2008).

Dutos de transporte de petróleo e gás é uma aplicação clássica dos aços ARBL, e uma das primeiras aplicações envolveram o uso de aços com microestrutura de ferrita acicular para oleodutos localizados em regiões polares. Esta aplicação exige uma combinação de alta resistência mecânica, alta tenacidade e boa soldabilidade (ASM, 1990). Os aços ARBL também são amplamente utilizados em dutos que conduzem o petróleo do fundo do mar para as plataformas na superfície, denominados de *risers*. Segundo Silva *et al.* (2008), os aços utilizados na fabricação dos *risers* devem possuir propriedades como elevada resistência mecânica para suportar as pressões e o próprio peso, elevada resistência à corrosão para resistir ao ambiente marinho, alta resistência à fadiga para resistir aos vórtices devido ao movimento das marés, boa soldabilidade, entre outras.

A partir da década de 1970, com a introdução do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado no Brasil, houve um avanço no desenvolvimento dos aços ARBL. Combinações diversas entre temperatura e deformação durante o processo de laminação, que refinam o grão e precipitam carbonetos e nitretos dos elementos microligantes, os quais impedem a recristalização, garantem, assim, as propriedades citadas anteriormente. Com a introdução do resfriamento acelerado após a laminação à quente, foram produzidos aços com altos níveis de resistência mecânica, mantendo a tenacidade, além de boa soldabilidade devido ao seu baixo teor de carbono, como é o caso do aço microligado para tubos API 5L X80 (Ramírez, 2008; Pedrosa, 2012; Seidel, 2015).

Os aços ARBL com o uso de aditivos tem características especiais para o uso em *risers* e são classificados segundo o *American Petroleum Institute* (API), organização comercial que representa aspectos da indústria de petróleo e gás natural da América (Seidel, 2015; API, 2018). Ela apresenta a norma API 5L, *Specification for Line Pipe*, (API, 2007), onde adota requisitos que devem ser seguidos para a fabricação de tubos, como o limite de escoamento, limite de resistência, composição química, tecnologia de fabricação do aço e dos dutos, etc (API, 2007; Ramírez, 2008).

A classificação dos aços que seguem a norma API 5L é feita através das letras A, B e X, onde os dois números após as letras representam o limite de escoamento mínimo em ksi, sendo que quando precedido pela letra X, o aço apresenta uma maior resistência (Ramírez, 2008).

O aço API 5L X80 – que apresenta um limite de escoamento mínimo de 80 ksi (aproximadamente 552 MPa) – foi escolhido para a realização deste estudo, por ser um aço amplamente utilizado na fabricação de dutos para linhas de transmissão no Brasil.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de sequências termomecânicas (apresentadas no tópico 2.2) para avaliar sua influência nas propriedades mecânicas do aço ARBL API 5L X80. O estudo justifica-se pela importância ambiental e econômica que o uso dos aços provoca no país, visto os desastres que podem ocorrer quando se dá uma falha no produto como, por exemplo, o derramamento de petróleo no oceano.

2. METODOLOGIA

O material utilizado neste estudo foi retirado de um tubo de aço API 5L X80 com espessura de 19 mm e diâmetro nominal de 864 mm (34"). A composição química deste aço é dada na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química do aço API 5L X80 utilizado neste trabalho [% massa] (Autores, 2020)

C	S	N	Al	Si	P	Ti	V
0,03	0,003	0,0054	0,027	0,21	0,013	0,017	0,023
Cr	Mn	Ni	Cu	Nb	Mo	B	Ca
0,158	1,78	0,013	0,008	0,071	0,183	0,0001	0,0032

A execução deste trabalho ocorreu tanto no IFPE, *campus* Recife, quanto na UFPE. A metodologia utilizada será descrita nos tópicos a seguir.

2.1. Amostras para os tratamentos termomecânicos

As amostras utilizadas nos tratamentos termomecânicos foram fabricadas mediante duas operações de usinagem: serramento e fresamento. Utilizando uma serra de fita horizontal do IFPE, *Campus Recife*, foram cortadas as amostras na direção longitudinal do tubo (Fig. 1) que, devido à geometria, não possuíam as faces planas.



Figura 1. Serra utilizada para realizar o corte do material para fabricação das amostras (Autores, 2020)

Em seguida, foi utilizado um Centro de Usinagem CNC (Fig. 2) para fresar as amostras, de modo que as mesmas apresentassem faces planas e perpendiculares, com as dimensões médias de 10x13x180 [mm] (Fig. 3).



Figura 2. Centro de Usinagem CNC utilizado para fresar o material para fabricação das amostras (Autores, 2020)



Figura 3. Amostra fabricada para utilização em tratamento termomecânico (Autores, 2020)

2.2. Tratamentos termomecânicos

Após as amostras serem fabricadas, elas foram submetidas a sequências termomecânicas com o objetivo de obter-se propriedades mecânicas com valores superiores tanto em resistência mecânica quanto em ductilidade. Assim, foram realizadas 3 rotas de tratamentos termomecânicos com etapas de aquecimento iguais e resfriamento em água, mas que envolveram diferentes taxas de deformações. As amostras foram inicialmente aquecidas a 950°C e mantidas nesta temperatura por 15 minutos, onde a temperatura foi selecionada no diagrama Fe-Fe₃C para um aço com 0,03% de carbono

e com um acréscimo de 50°C para garantir a perfeita austenitização. Para esta etapa foi utilizado um forno do tipo mufla da marca QUIMIS modelo 318 M24 (Fig. 4), localizado na UFPE. Antes da realização dos experimentos, o forno foi mantido por 2 horas à 950°C para uniformização da temperatura dentro de todo o forno.



Figura 4. Forno utilizado nos experimentos (Autores, 2020)

Nas 3 rotas termomecânicas as amostras passaram por um laminador, após o aquecimento das mesmas, realizando assim o processo de laminação à quente. Neste trabalho, a diferença entre as rotas está na deformação causada pelo laminador. A Tab. 2 define as rotas termomecânicas utilizadas neste trabalho.

Tabela 2. Rotas termomecânicas utilizadas nos experimentos (Autores, 2020)

Descrição	
Rota 1	Austenitização à 950°C durante 15 minutos, sendo seguida de deformação de 10% no laminador e, na sequência, resfriamento em água à temperatura ambiente.
Rota 2	Austenitização à 950°C durante 15 minutos, sendo seguida de deformação de 15% no laminador e, na sequência, resfriamento em água à temperatura ambiente.
Rota 3	Austenitização à 950°C durante 15 minutos, sendo seguida de deformação de 20% no laminador e, na sequência, resfriamento em água à temperatura ambiente.

A Fig. 5 apresenta a sequência dos processos utilizados para realização dos tratamentos termomecânicos, após o aquecimento do forno à 950°C.

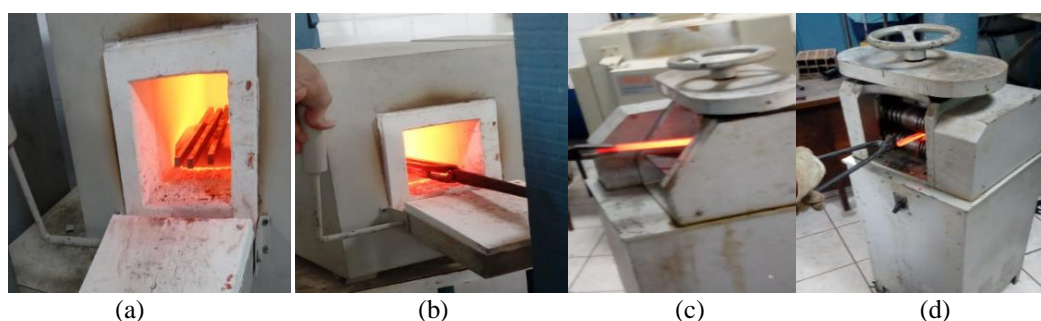


Figura 5. Sequência dos processos utilizados para realização das três rotas. (a) Amostras dentro do forno; (b) amostra sendo retirada do forno; (c) amostra entrando no laminador; (d) amostra saindo do laminador (Autores, 2020)

Após a sequência apresentada na Fig.5, cada amostra foi rapidamente colocada em um recipiente com água, realizando, assim, a têmpera.

2.3. Fabricação de corpos de prova para o ensaio de tração

Para avaliar a influência dos tratamentos termomecânicos no comportamento mecânico do aço API 5L X80, foram realizados ensaios de tração. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram fabricados utilizando o Laboratório de Tornearia (Fig. 6) do IFPE, *Campus Recife*.



Figura 6. (a) Laboratório de Tornearia do IFPE, *Campus* Recife; (b) Corpo de prova sendo usinado no torno mecânico (Autores, 2020)

Foram fabricados 3 corpos de prova, mediante uso da proporcionalidade conforme a norma ASTM A370, para cada rota termomecânica realizada, além de 3 corpos de prova para a condição do material como recebido. Assim, 12 corpos de prova foram fabricados utilizando o torno mecânico. A Fig.7 apresenta as dimensões médias dos corpos de prova e alguns dos corpos de prova fabricados.

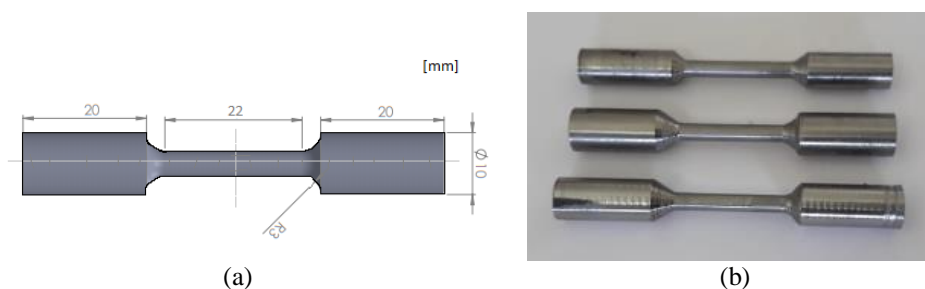


Figura 7. (a) Dimensões médias dos corpos de prova fabricados para posterior ensaio de tração; (b) 3 dos 12 corpos de prova fabricados para o ensaio de tração (Autores, 2020)

2.4. Realização do ensaio de tração

No Laboratório de Ensaios Mecânicos do IFPE - *campus* Recife, foi realizado o ensaio destrutivo de tração dos corpos de prova de cada rota termomecânica e dos corpos de prova do material como recebido, para avaliar a influência das sequências termomecânicas nas propriedades de tração (limite de escoamento, limite de resistência e ductilidade) do aço API 5L X80.

O ensaio consistiu em fixar o corpo de prova na Máquina Universal de Ensaio InterMetric IM-100 (Fig. 8), que provocou, a uma taxa constante, uma força axial de modo a aumentar comprimento do corpo de prova, reduzindo sua seção transversal até a ruptura.



Figura 8. Máquina Universal de Ensaio InterMetric IM-200 (Autores, 2020)

Os resultados dos ensaios foram registrados computacionalmente pelo próprio software do equipamento (Tesc versão 4.00), onde o gráfico “Tensão [MPa] X Deformação [mm]” é criado simultaneamente de acordo com a carga aplicada.

3. RESULTADOS

Foram realizados testes para identificação de *outliers*, utilizando o software ANALYSIS[®], versão 1.0 (Oliveira e Guimarães, 2014), que realiza o teste de Grubbs, Dixon e Chauvenet, com um nível de confiança de 95% .

Com os dados obtidos dos ensaios de tração realizados em cada corpo de prova, foram produzidos gráficos “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” (Fig. 9, 10, 11 e 12), utilizando o software ORIGIN[®], versão 5.0.

No caso do material na condição de “como recebido”, um dos corpos de prova foi desconsiderado, após a realização de testes para identificação de *outliers*.

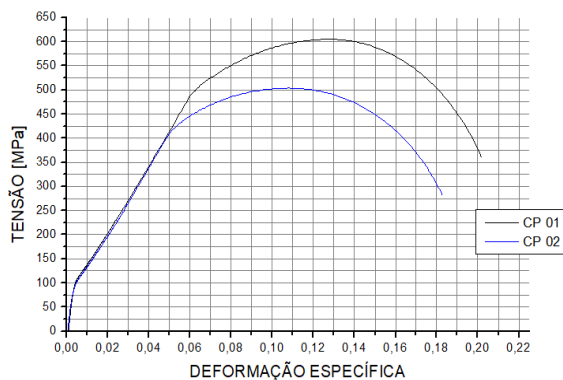


Figura 9. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material como recebido (CR) (Autores, 2020)

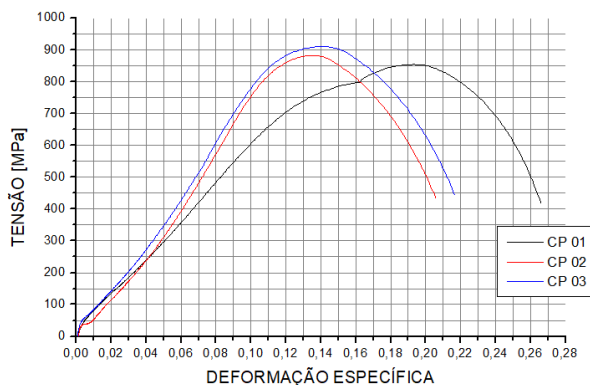


Figura 10. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 1: aquecimento → laminação - deformação de 10% → resfriamento em água (Autores, 2020)

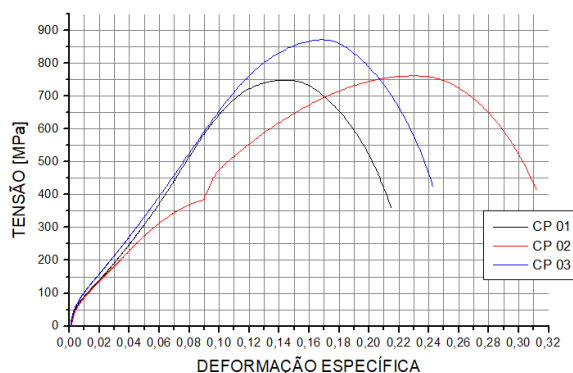


Figura 11. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 2: aquecimento → laminação - deformação de 15% → resfriamento em água (Autores, 2020)

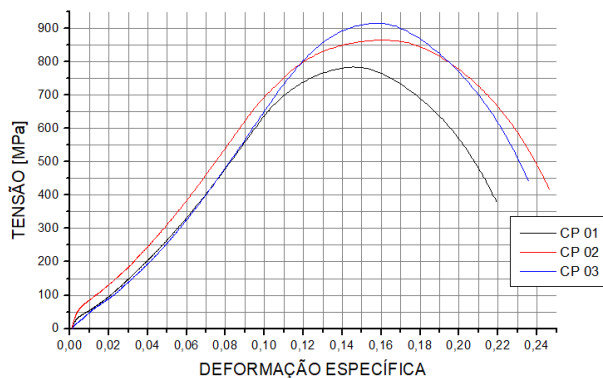


Figura 12. Gráfico “Tensão [MPa] x Deformação Específica [%]” do material após passar pela Rota 3: aquecimento → laminação - deformação de 20% → resfriamento em água (Autores, 2020)

Através do tratamento dos dados, foram determinados o limite de escoamento (σ_e), o limite de resistência (σ_r) e a deformação total (ϵ_t), a partir da média aritmética dos valores individuais destas propriedades nos corpos de prova do material como recebido e de cada uma das rotas termomecânicas, onde também foram calculados os respectivos desvios padrão ($\Delta\sigma_e$, $\Delta\sigma_r$ e $\Delta\epsilon_t$), utilizando o software ANALYSIS® (Oliveira e Guimarães, 2014). Estes resultados são apresentados nas Fig. 13, 14 e 15.

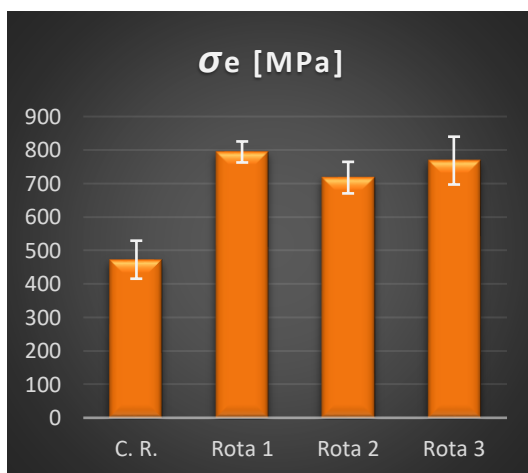


Figura 13. Limite de escoamento obtido no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão (Autores, 2020)

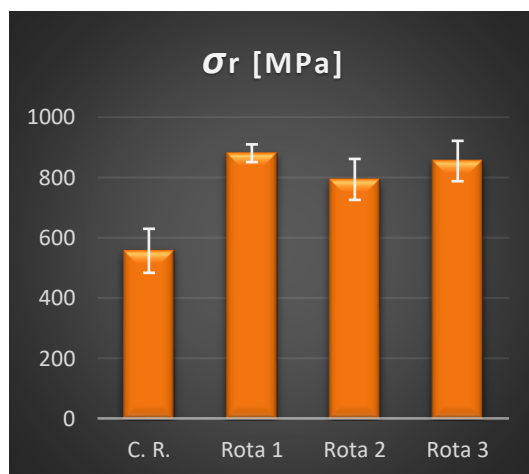


Figura 14. Limite de resistência obtido no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão (Autores, 2020)

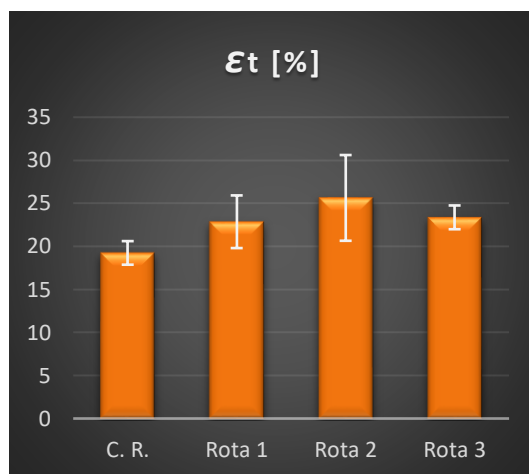


Figura 15. Deformação total obtida no material como recebido e em cada rota realizada, com seu respectivo desvio padrão (Autores, 2020)

Os valores exatos de cada propriedade mecânica, obtidos no material como recebido e após cada rota termomecânica, são apresentados na Tab. 3, onde pode-se observar que o valor do limite de escoamento do material como recebido (C.R.) não atende ao valor mínimo exigido pela norma API 5L (2007) para o aço API 5L X80, que é de 552 MPa. Entretanto, o foco deste trabalho está no comportamento mecânico proporcionado pelas sequências termomecânicas. Então, visto que todos os corpos de prova foram fabricados nas mesmas condições, é correto fazer comparações entre os valores das propriedades mecânicas obtidas.

Tabela 3. Resultados das propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração (Autores, 2020)

	σ_e [MPa]	$\Delta\sigma_e$ [MPa]	σ_r [MPa]	$\Delta\sigma_r$ [MPa]	ϵ_t [%]	$\Delta\epsilon_t$ [%]
C. R.	472,34	56,81	556,24	73,07	19,24	1,37
Rota 1	794,17	31,42	880,15	29,32	22,86	3,06
Rota 2	717,5	47,12	793,29	67,95	25,63	4,98
Rota 3	768,38	71,48	854,24	67,02	23,37	1,38

Através da Tab. 3 e das Fig. 9, 10 e 11, pode-se notar que **todas as rotas termomecânicas** proporcionaram um limite de escoamento e um limite de resistência maior em relação ao material como recebido. O mesmo comportamento aconteceu com a deformação total.

O valor do limite de escoamento obtido em cada rota termomecânica superou até mesmo o valor mínimo exigido ao aço API 5L X100, que é de, aproximadamente, 688 MPa.

Já o limite de resistência obtido em cada rota termomecânica superou o valor mínimo exigido ao aço API 5L X90, que é de 695 MPa, aproximadamente. Além disso, as rotas 1 e 3 superaram o valor mínimo de resistência exigido ao aço API 5L X100, que é em torno de 808 MPa.

A tese de Pedrosa (2012) apresenta micrografias do aço API 5L X80 após passar por sequências termomecânicas, onde uma delas é muito semelhante à rota 2 realizada no presente trabalho (aquecimento → laminação: deformação de 15% → resfriamento em água). A micrografia de Pedrosa (2012), referente a amostras que passaram por esta sequência termomecânica, revela a presença dos constituintes ferrita acicular (predominantemente), ferrita poligonal, ferrita granular, austenita retida e ilhas do constituinte MA. Assim, pode-se esperar que a melhoria das propriedades de tração apresentadas na Tab. 3 em relação ao material como recebido, tenha ocorrido por conta da formação dessas novas microestruturas – principalmente a Ferrita Acicular, que apresenta uma excelente combinação de alta resistência e boa tenacidade – após os tratamentos termomecânicos.

Nos tratamentos termomecânicos com resfriamento em água realizados por Castro (2012) em amostras do aço API 5L X80, observou-se que a deformação causada pelo laminador elevou consideravelmente os valores de dureza em comparação ao material como recebido, sendo crescente com o aumento da deformação. Dessa forma, é de se esperar que, assim como o limite de resistência, a dureza do aço API 5L X80 também tenha aumentado após passar pelas 3 rotas termomecânicas apresentadas na Tab. 2.

4. CONCLUSÃO

- Os resultados possibilitam concluir que a melhoria das propriedades mecânicas do aço API 5L X80 pode ser obtida por meio de sequências termomecânicas, visto que todas as rotas termomecânicas realizadas proporcionaram um limite de escoamento, um limite de resistência e uma deformação total maior em relação ao material como recebido;
- O valor das propriedades mecânicas do aço API 5L X80 após passar por cada rota termomecânica superou até mesmo o valor mínimo exigido aos aços API 5L X90 ou API 5L X100.
- Visto o que se encontra na literatura referente a tratamentos termomecânicos no aço API 5L X80, é de se esperar que, após a realização das três rotas, o aço apresente predominantemente a Ferrita Acicular, a qual apresenta uma excelente combinação de alta resistência e boa tenacidade em baixas temperaturas em soldas de aço. E, como houve um aumento significativo no limite de resistência do aço após as três rotas termomecânicas, é de se esperar que também tenha ocorrido um aumento na dureza do material

5. AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo, e à minha família, por todo apoio e incentivo dado;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPE), pelo apoio financeiro através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica de Graduação (PIBIC);

Ao Grupo de Materiais Aplicados e Simulação Computacional (GMA&SC), em especial ao meu orientador, prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino, por todas as oportunidades me dadas;

Ao IFPE, *Campus* Recife e à UFPE, pelos laboratórios e materiais cedidos para a execução deste trabalho;

Ao técnico Josiel Sobral de Souza, por todo o apoio fornecido para a utilização dos laboratórios do IFPE e à Edilson Eugenio da Silva, por toda a ajuda na fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração. Ambos foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho e;

À todos que colaboraram na execução deste trabalho, direta ou indiretamente, tanto no IFPE, *Campus* Recife, quanto na UFPE.

6. REFERÊNCIAS

API. *API Careers Overview*. 04 jan. 2018 <<https://www.api.org/>>.

API, 2007. *Specification for Line Pipe*. 44º Ed. 153 p.

ASM, 1990. *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*. 10º Ed., vol.1, p. 389-423.

Castro, R. S. de, 2012. *Aspectos Microestruturais e Cristalográficos da Ferrita Acicular Obtida Por Meio de Sequências Termomecânicas em Aço API 5L X-80*. 101 f. Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Oliveira, J. E. F. de e Guimarães, P. B., 2014. *Analysis Software para Detecção de Outliers Versão 1.0*. 12 set. 2020 <<https://sites.google.com/site/analysisoutliers/>>

Pedrosa, I. R. V., 2012. *Estudo das Transformações de Fase no Aço API 5L X80 Visando o Aumento da Tenacidade à Fratura*. 110 f. Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Ramírez, M. F. G., 2008. *Estudo da Transformação Durante o Resfriamento Contínuo e da Microestrutura do Aço Microalloyado X80 Utilizado na Construção de Tubos para Transporte de Gás Natural e Petróleo*. 158 f. Dissertação de Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.

Seidel, L. G., 2015. *O AÇO API 5L X-80 NO USO EM TUBULAÇÕES*. 04 jan. 2018 <<https://www.webartigos.com/storage/app/uploads/public/588/4ce/9b9/5884ce9b90287025260157.pdf>>.

Shanmugam, S. *et al*, 2008. *Microstructure and High Strength–Toughness Combination of a New 700MPa Nb-Microalloyed Pipeline Steel*. Elsevier. *Materials Science and Engineering A*, v.478, p. 26–37.

Silva, E. S. *et al*, 2008. *Comportamento em Fadiga de Juntas Soldadas Circunferenciais de um Aço API 5L-X80*. In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais-CBCiMat, Porto de Galinhas-PE.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.