



CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
ENGENHARIA MECÂNICA

O AÇO API 5L X-80 NO USO EM TUBULAÇÕES

Luis Guilherme Seidel

Lajeado, setembro de 2015

Luis Guilherme Seidel

O AÇO API 5L X-80 NO USO EM TUBULAÇÕES

Trabalho apresentado na disciplina de Comportamento Mecânico dos Materiais, da UNIVATES, como parte integrante da segunda nota do semestre.

Orientador: Prof. Ricson Rocha de Souza

Lajeado, setembro de 2015

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo da granulometria dos aços com diferentes processos de fabricação.

Figura 2 - Composição química do aço X80.

Figura 3 - Processo de laminação.

Figura 4 - Esquema do grão após o processo de laminação controlada com resfriamento acelerado.

Figura 5 - Esquema das fases de laminação quanto as temperaturas

Figura 6 - Microestrutura acicular

Figura 7 - Microestrutura de ferrita poligonal com ilhas de martensita-austenita

Figura 8 - Propriedades do aço

Figura 9 - Fórmula para cálculo da dureza Vickers

Figura 10 - Impressão deixada pelo endentador Vickers

Figura 11 - Resultados do teste de dureza.

Figura 12 - Microestrutura a 18 mm da superfície

Figura 13 - Microestrutura a 1 mm da superfície

SUMÁRIO

- 1. INTRODUÇÃO**
- 2. REFERENCIAL TEÓRICO**
- 3. CONCLUSÃO**
- 4. REFERÊNCIAS**

1. INTRODUÇÃO

Os aços são os metais mais versáteis utilizados pelos seres humanos, por sua capacidade de se adequar as mais variadas aplicações desejadas. A adição de carbono ao ferro provê características ao material como a resistência à tração, compressão e flexão, uma maior resiliência, tenacidade, resistência ao impacto aliada a uma maior dureza, resistência ao desgaste e a fadiga, 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.

Com essas propriedades adicionais e um crescente aumento da produção de petróleo e gás associado a demanda energética e de matérias primas derivadas do petróleo, foi necessário o desenvolvimento de um aço que pudesse aguentar as solicitações de trabalho no fundo do oceano ou em território em condições climáticas adversas. Isso possibilitou sua utilização nas mais diversas aplicações, como em tubulações para extração de petróleo e gás natural, peças automotivas, ferramentas de alto e baixo desempenho, navios, entre outras.

Conseguir essas características, significa que teremos benefícios, como não precisar fabricar produtos com grandes dimensões para que o material aguente o trabalho a ser realizado, aumentamos os níveis de segurança e confiabilidade do produto. Assim, economizaríamos matéria prima, reduziríamos a massa final do produto, gastos adicionais com transporte, na montagem e manutenção e, até mesmo, viabilizando novos projetos que antes eram impossíveis de serem realizados.

Para que todo esse desenvolvimento fosse possível, foram avaliadas e catalogadas metodologias, além de serem realizados testes de integridade estrutural nos aços produzidos. Assim, determinaram-se requisitos que tem

o nome de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL). Dentre esses aços temos aqueles com uma estrutura ferrítica-perlítica, que contém uma adição de elementos de liga, que a complementação de um processo de laminação controlada, tem sua resistência mecânica aumentada sem que seja necessário aumentar a quantidade de carbono ou manganês, que são prejudiciais a soldabilidade e tenacidade do material.

Os aços ARBL com o uso de aditivos tem características especiais para o uso em sistemas dutoviários e são classificados segundo a *American Petroleum Institute* (API), que na norma API 5L 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, tecnologia da fabricação dos tubos, etc., sendo assim, possível, organizar, em diversas categorias ou graus, os tubos fabricados.

A partir dessa norma, foram delimitados vários tipos de aço, conforme seu limite de escoamento mínimo, que vão do API-5L-A25 até o API-5L-X100. Nesse contexto, o tema escolhido será sobre o aço API-5L-X80 utilizados em tubulações para extração de petróleo e gás, no qual serão abordadas características sobre a microestrutura, aditivos e processos de fabricação.

Partindo da premissa de que houve um aumento crescente na demanda de energia, petróleo, gás e de seus derivados, como a gasolina, diesel e nafta para a fabricação de polímeros, no Brasil, na última década, também houveram um aumento significativo na fabricação dos tubos para transporte das matérias primas. Então, este estudo tem por objetivo avaliar as características dos aços, como dureza, resistência a impacto, tração, composição química, tipos de aditivos utilizados e os efeitos que provocam, o e processo de fabricação. O estudo justifica-se pela importância ambiental e econômica que o uso dos aços provoca no país, visto os desastres naturais que podem ocorrer quando se dá uma falha catastrófica, como o derramamento de petróleo no oceano, ou, ainda, a quantidade de empregos que a indústria é capaz de gerar.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A partir da década de 1970, com a introdução do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado no Brasil, em substituição à laminação convencional, foi dado um avanço no desenvolvimento dos aços ARBL. Isso proveu uma melhora de suas características, no que se diz a tenacidade do material, soldabilidade e resistência mecânica. Esses materiais são aços microligados que apresentam uma microestrutura composta por ferrita-perlita, sendo similar à de um aço baixo-carbono, porém com o advento de pequenas adições de elementos de liga, 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, garantindo, assim, as propriedades acima citadas. Conforme ilustrado no comparativo da figura 1, diferentes processos de fabricação à diferentes temperaturas e variações nos elementos de ligas podem gerar aços com diferentes granulometrias.

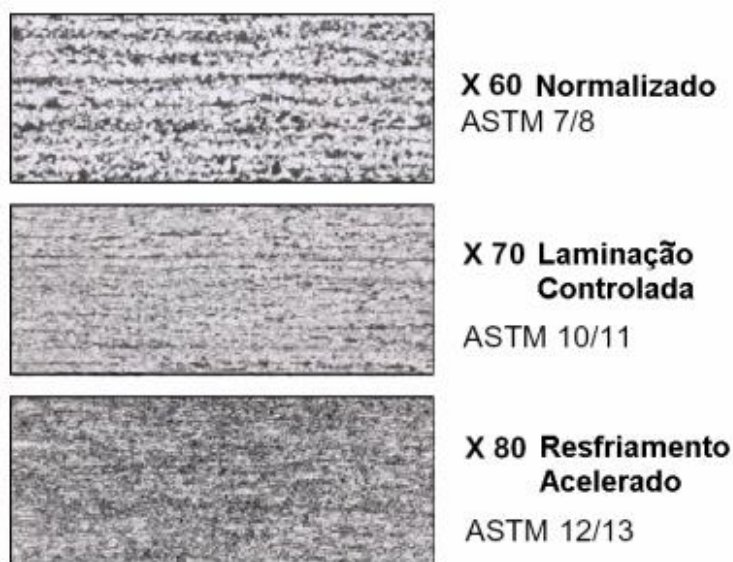


Figura 1 –

Comparativo

da granulometria dos aços com diferentes processos de fabricação.

2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Conforme a norma para a fabricação dos aços API-5L-X80, a composição química deve ser a seguinte, para que consigamos algumas das características citadas e possamos manufaturar o produto para que atinja os níveis desejados.

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V
0,04	0,17	1,75	0,019	0,04	0,032	0,01	0,073	0,005
Ti	Cr	Ni	Mo	N	B	Ca	Sb	CE(Pcm)
0,013	0,21	0,02	0,16	0,0035	0,0002	0,0014	0,01	0,156

Figura 2 - Composição química do aço X80.

2.1.1 CARBONO

O carbono é o elemento central quando falamos no aumento da resistência mecânica dos aços e reduz a suscetibilidade a trincas quando exposto ao frio, melhora a tenacidade e ductilidade, porém, também é ele quem diminui a soldabilidade do material, fator importante na fabricação de tubos, apesar de que já existem processos que não envolvam solda. Então, para que possamos ter um produto com as qualidades desejadas e equilibradas, devemos utilizar, no caso do aço X80 para tubulações que serão soldadas, uma baixa quantidade de carbono e, se utilizar de outros mecanismos para endurecimento do material.

2.1.2 NITROGÊNIO

Caso o nitrogênio (N) se apresente na forma livre no aço, pode comprometer a tenacidade do mesmo. Então, para se evitar problemas, devemos diminuir o seu

teor, combinando-o com outros elementos para formar nitretos que sejam estáveis a altas temperaturas.

2.1.3 TITÂNIO

O titânio é comumente utilizado para formar e precipitar os nitretos que são estáveis a altas temperaturas, diminuindo também o teor de N livre no aço. Além de controlar, desse modo, o tamanho do grão austenítico durante a fase inicial da laminação, as partículas de TiN, em certa concentração no aço, são capazes de melhorar a tenacidade, desde que sejam finas e bem distribuídas.

2.1.4 ALUMÍNIO

O alumínio que sobra após a solidificação do aço, que não estiver presente na forma de alumina, forma nitreto de alumínio, que possui um efeito refinador do grão.

2.1.5 NIÓBIO

É capaz de fazer com que o aço seja laminado em uma temperatura onde a recristalização e recuperação da austenita não ocorre, originando-a fina e encruada. Isso faz com que aumente o número de locais onde ocorre nucleação de grãos de ferrita, diminuindo o tamanho do grão e formando precipitados que melhoram o endurecimento por precipitação. Assim, a adição de Nb reduz o tempo de laminação e a carga aplicada no processo.

2.1.6 VANÁDIO

Aditivo utilizado para aumento de dureza pelo método de precipitação de nitreto de vanádio na matriz da ferrita.

2.1.8 MANGANÊS

É um candidato a substituir o carbono sem prejudicar o endurecimento, além de melhorar a soldabilidade e, caso tivermos uma boa relação entre C e Mn, poderemos melhorar a tenacidade do material. Ele também possui o efeito de temperar o aço, podendo formar ferrita-bainita.

2.1.9 BORO

Utilizado para aumentar a temperabilidade do aço, pois concentra-se nos contornos de grão dificultando a nucleação da ferrita em formato poligonal, que tem menor resistência que a acicular.

2.1.10 MOLIBDÊNIO

Tende a conter a precipitação, forçando-a a ocorrer em temperaturas mais baixas o que acarreta em um maior refino dos materiais precipitados. Ele também aumenta a temperabilidade, sendo capaz de diminuir a quantidade de perlita e facilitar a produção de martensita.

2.2 LAMINAÇÃO CONTROLADA E RESFRIAMENTO ACELERADO

O principal tipo de processamento pelo qual passa o lingote de aço é a laminação, que consiste na redução da seção transversal por meio da compressão gerada pela passagem entre dois cilindros que giram em torno de si, podendo ser repetido várias vezes até que se atinja a espessura desejada. Dentro da laminação, existem a laminação a quente, na qual aquecemos o lingote previamente até a temperatura de recristalização para então laminarmos a chapa, e a laminação a frio, que trabalha em temperaturas inferiores à de recristalização. Para o processo de laminação ser executado, primeiramente devemos cortar em placas, os lingotes,

para depois resfriarmos e as mandarmos para um forno onde são reaquecidas em temperaturas próximas a 1200°C, para garantir que os elementos microligantes estejam dissolvidos, antes da laminação.

Para a produção dos aços ARBL, devemos ter um maior controle das temperaturas afim de conseguirmos atingir os objetivos da fabricação do produto. Para isso foi desenvolvido a laminação controlada com resfriamento acelerado, no qual temos a adição de elementos de liga como o Nióbio (Nb), Vanádio (V) e Titânio (Ti), com o objetivo de podermos aumentar a temperatura de recristalização do aço, logo, quando ele passar pelo processo, os grãos de austenita irão se deformar no sentido preferencial em que corre a placa, ficando alongados ou com perfil acicular, em forma de agulha, conforme detalhado na figura 2. Contudo, o tamanho do grão resultante irá depender do grau de redução da chapa - ou a distância entre os rolos da laminação - e, também da quantidade de precipitados que irão segurar os grãos naquele tamanho na temperatura em que se está trabalhando. Esse processo possibilita a transformação de uma austenita encruada em austenita-ferrita, produzindo, por fim, um aço com uma granulação fina e com elevada resistência mecânica e tenacidade.

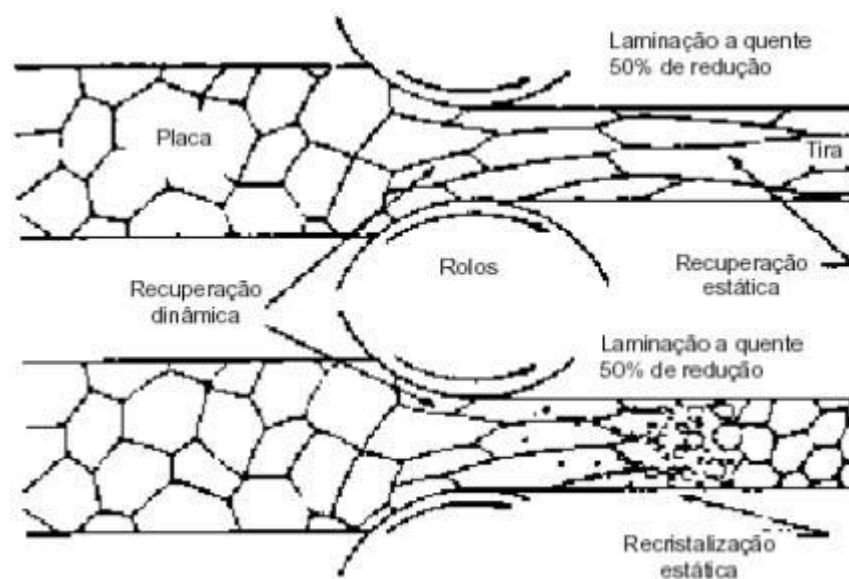


Figura 3 - Processo de laminação

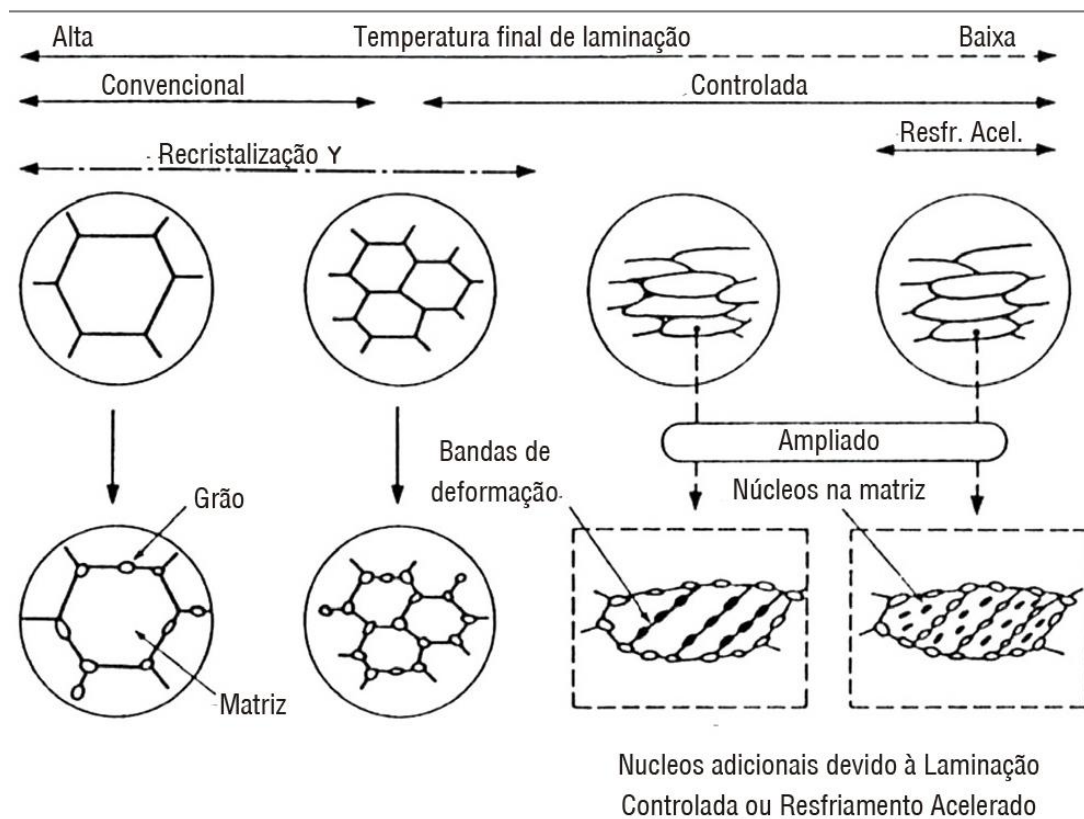


Figura 4 - Esquema do grão após o processo de laminação controlada com resfriamento acelerado.

Após sequências de laminação e recrystalização, os elementos de liga começam a surtir efeito no material, retardando o processo de recrystalização e, caso processemos o material neste estado, teremos uma nova recrystalização, porém será heterogênea e, para evitar isso, devemos ter um tempo de espera, entre uma laminação e outra, até que não haja mais recrystalização da austenita.

Só então podemos realizar uma nova laminação, em um gradiente de temperaturas que vai da região de não recrystalização da austenita e temperatura A_{r3} , que dão aos grãos um formato achatado, aumentando a área de superfície e formando novas bandas de deformação. A ferrita presente no material começa um processo de nucleação, e irá se depositar tanto nas bandas de deformação

formadas anteriormente, quanto nos novos contornos de grão, tendo como resultado uma ferrita refinada e chapas com espessuras reduzidas em torno de 75%.

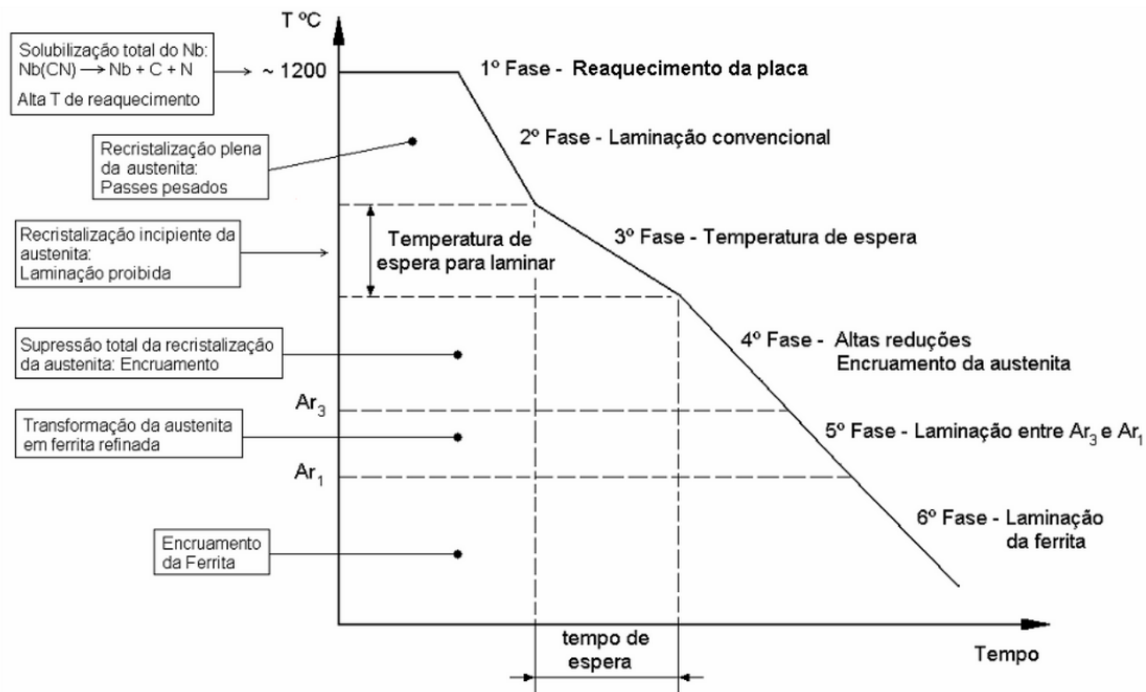


Figura 5 - Esquema das fases de laminação quanto as temperaturas

Após a laminação o produto deve ser resfriado e, para se enquadrar nas normas dos aços API-5L-X80, passa pela técnica de resfriamento acelerado, na qual tende a atingir os níveis de escoamento na ordem de 80 ksi (550Mpa). Nela o material que laminou a quente é resfriado com água ou uma mistura de ar e água sobre as chapas, onde as variáveis do processo são as temperaturas de início e final, junto à taxa de resfriamento. Ao atingir a temperatura final, o resfriamento é interrompido e a chapa é resfriada ao ar até a temperatura ambiente, evitando a formação de martensita. Assim, conseguimos refinar o tamanho do grão ferrítico, ganhamos um endurecimento por precipitação mais efetivo, entre outros.

Um exemplo dessas variáveis é apresentada abaixo, onde, na primeira imagem, é aplicado um resfriamento a uma taxa de 461°C/minuto, e isso formou

uma microestrutura com formato acicular. Já na segunda foi aplicada um resfriamento de $3^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$, produzindo uma ferrita poligonal com ilhas de martensita-austenita.

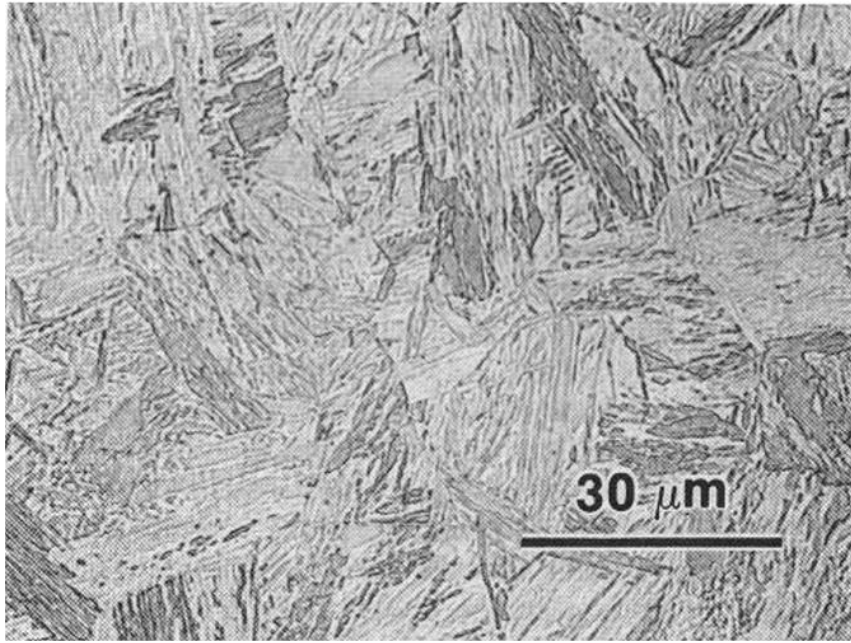


Figura 6 - Microestrutura acicular

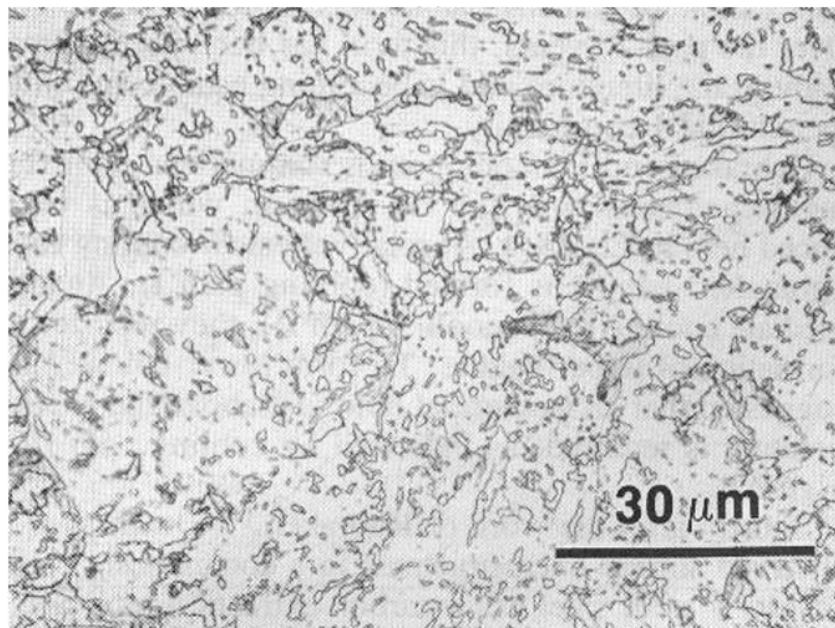


Figura 7 - Microestrutura de ferrita poligonal com ilhas de martensita-austenita

Também, na norma para os tubos produzidos com aços X80 são definidos os limites de resistência, escoamento e a absorção de energia em teste de impacto, conforme a figura abaixo.

	Processo		Propriedades Mecânicas			Microestrutura	
Condição	FT [°C]	FCT [°C]	σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	CVN _(-20°C) [J]	PF* [%]	AF** [%]
1	760	525	596	719	140	50	50
2	760	445	637	743	162	20	80

Figura 8 - Propriedades do aço, onde:

*PF: ferrita poligonal

**AF: ferrita acicular

2.3 Testes de dureza

O teste de dureza na escala Vickers, divide a carga aplicada pela área de superfície onde foi desenvolvida a endentação. Como a carga aplicada é pequena, de 1 a 100 kgf, esse teste só é capaz de medir microdurezas e tem como unidade de medida a sigla HV que significa, *Hardness Vickers*, e também pode ser calculada pela fórmula:

$$HV = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2} \cong 1,854 \frac{F}{d^2}$$

Figura 9 - Fórmula para cálculo da dureza Vickers

Onde: F é a carga aplicada e d é a média das medidas das duas diagonais. A carga é aplicada por um endentador em formato de pirâmide quadrada com 136°

entre faces. A imagem abaixo ilustra a impressão deixada na peça após a endentação:

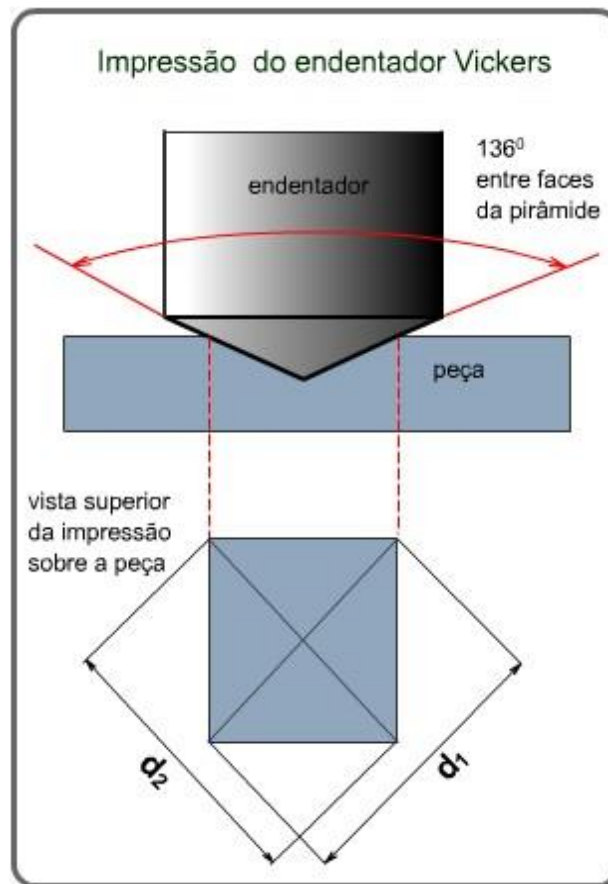


Figura 10 - Impressão deixada pelo indentador Vickers

Para a realização dos testes foi utilizada uma chapa de aço API-5L-X80 com espessura total de 19,1 mm e composição química de baixo carbono, nióbio, titânio e vanádio. Dessa chapa foram extraídas amostras longitudinais na direção da laminação, representando a parte interna dela, que variam de 1 mm a 18 mm de profundidade. As mesmas foram preparadas para os testes através de lixamentos, polimentos e atacadas com ácido nital 3%. Após a microestrutura foi analisada e caracterizada pela técnica de microscopia de varredura eletrônica e, além disso, os perfis de dureza do aço foram dados por testes de microdureza na escada Vickers.

Primeiramente o material a ser estudado foi preparado nos parâmetros citados no parágrafo acima e, então foi realizado o teste de dureza Vickers por toda a seção do material, sendo as endentações separadas por um milímetro uma das outras. Foram realizados, ao todo, dezoito endentações em cada corpo de prova, sendo nove ao total. Com os dados obtidos, foi possível a montagem da tabela abaixo, demonstrando um comparativo das durezas por corpo de prova e por milímetro assim como a média das durezas por aquela seção e, também um desvio da média e a média de dureza geral.

		PERFILES DE DUREZA									MEDIA	DESV
		A	B	C	D	E	F	G	H	I		
ESPESSURA	1	230	240	240	234	251	236	234	210	230	234	11,0
	2	206	225	233	230	237	227	227	237	234	228	9,5
	3	242	227	247	230	225	228	212	230	227	230	10,0
	4	210	232	234	219	224	213	216	226	223	222	8,1
	5	223	226	216	230	231	217	217	224	218	222	5,7
	6	243	228	237	232	230	223	210	202	215	224	13,2
	7	223	219	224	232	247	219	223	223	223	226	8,8
	8	224	232	215	235	229	227	208	204	206	220	11,8
	9	212	219	240	228	230	213	217	226	215	222	9,3
	10	224	214	224	231	236	218	220	200	213	220	10,6
	11	239	232	231	224	226	224	220	235	223	228	6,3
	12	228	216	236	221	220	214	233	210	222	222	8,6
	13	237	221	227	217	216	208	214	227	209	220	9,3
	14	228	243	223	225	229	215	223	226	227	227	7,6
	15	244	232	236	212	238	225	228	222	215	228	10,7
	16	253	244	238	233	240	239	238	246	226	240	7,6
	17	264	243	240	255	242	235	239	242	231	244	10,2
	18	251	243	245	238	238	246	238	235	234	241	5,6
Média do aço											228	

Figura 11 - Resultados do teste de dureza.

Agora, podemos observar que a média das durezas (228 HV ou 2235,996 MPa) é inferior àquela medida próximo as superfícies, como no ponto 18, que é de

241 HV (ou 2363,487 MPa) e no ponto 1 que é de 234 HV (ou 2294,838 MPa). A diferença de dureza entre as próprias superfícies pode ter ocorrido por uma possível maior granulação do aço nessa região, devido a um resfriamento mais rápido.

Nas imagens a seguir está ilustrado a diferença de granulometria entre as superfícies a 18mm e a 1mm, respectivamente, que justificam a diferenças de dureza apresentada no teste.

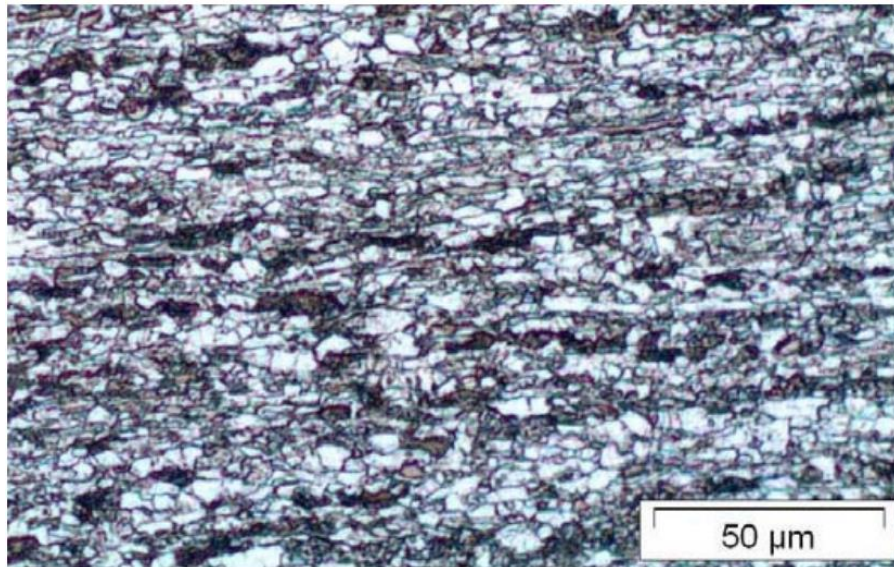


Figura 12 - Microestrutura a 18mm da superfície

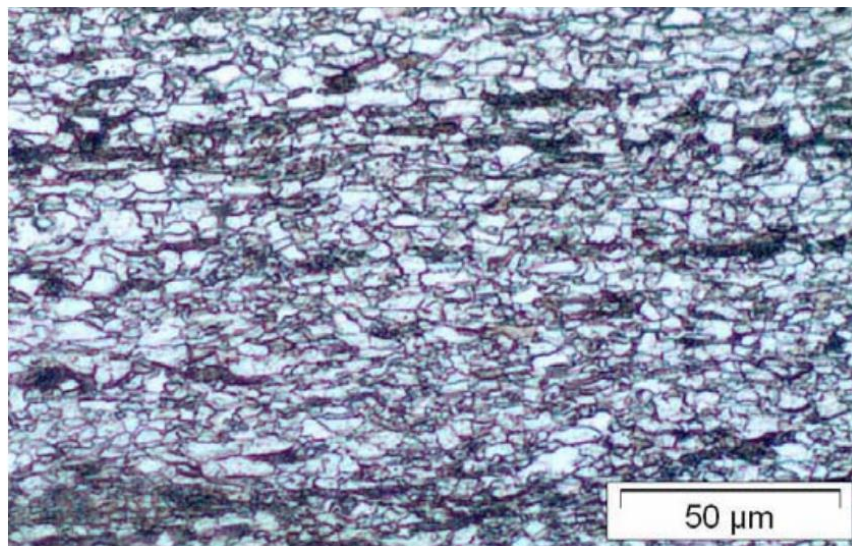


Figura 13 - Microestrutura a 1 mm da superfície

CONCLUSÃO

Assim, com todas as informações descritas, podemos perceber que as propriedades do material não dependem somente de sua composição química, mas também dos processos de fabricação que são utilizados aliados ao controle dos parâmetros de fabricação, como no caso apresentado.

Isto posto é possível que controlemos as propriedades dos materiais afim de fabricarmos o aço proposto com pequenas adições de elementos que substituirão o carbono, dando a mesma dureza proporcionada por ele, porém com a vantagem de não influenciar na capacidade de solda do aço. Além disso, é possível influenciarmos na granulometria do material simplesmente controlando a temperatura do processo de laminação e depois resfriando-o rapidamente.

REFERÊNCIAS

PLAUT, Ronald Lesley, GORNI, Antônio Augusto, NAKASHIMA, Júlio Toshio, PEREIRA, Maurício Martins, SILVEIRA, José Herbert Dolabela da. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO API X70 PRODUZIDOS ATRAVÉS DE LAMINAÇÃO CONTROLADA.** Disponível em: [http://www.gorni.eng.br/Pereira COLAM 2008.pdf](http://www.gorni.eng.br/Pereira_COLAM_2008.pdf). Acesso em: 17.09.2015.

CRUZ, Clovis Misseno da, MORILLA, José Carlos. **AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA EM OLEODUTOS E GASODUTOS.** Disponível em: <http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/download/86/52>. Acesso em: 18.09.2015.

WIKIPÉDIA. **GRAU API.** Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Grau API](https://pt.wikipedia.org/wiki/Grau_API). Acesso em: 18.09.2015.

BATISTA, Gilmar Zacca, SOUZA, Luís Felipe Guimarães de, BOTT, Ivani de S., RIOS, Paulo Rangel. **CURVAMENTO POR INDUÇÃO DE TUBO DA CLASSE API 5L X80.** Disponível em: [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=8660@1](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=8660@1). Acesso em: 20.09.2015.

SILVA , Maurício de Carvalho. **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DO AÇO API 5L X80 E DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVAS J-R PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE A FRATURA.** Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-11022005-162828/publico/mauriciocarvalhosilva.pdf>. Acesso em: 21.09.2015.

FERRO, Antônio Paulo Amâncio, GAMA, Jorge Luis Lauriano. **MODIFICAÇÕES MICROESTRUTURAIS NO AÇO API 5L GRAU X-80.** Disponível em: <http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/view/3038/2415>. Acesso em: 22.09.2015.