

**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Atividades de Pesquisa**  
**Formulário de Tramitação e Registro**

Situação: **Aprovação/Depto Coordenador**  
 Protocolo nº: **2013.1093**

Título:	Tenacidade à fratura do aço AISI/SAE- 4140 quando tratado através de têmpera e partição
Resumo:	Estudos recentes indicam que o tratamento de têmpera e partição possibilita processar aços convencionais de forma comercial e obter excelentes melhorias em suas propriedades mecânicas, como por exemplo, aumento da resistência ou aumento da ductilidade. Nesse sentido, neste projeto se propõe o estudo do comportamento do aço AISI/SAE 4140 em rotas de têmpera e revenimento convencionais e de têmpera e partição (não convencionais), se utilizando de caracterização microestrutural e , também, de caracterização mecânica, principalmente de estudos da tenacidade à fratura, através de ensaios de resistência ao impacto. De modo a explorar o ramo mercadológico junto ao setor do petróleo e gás, busca-se também atender às normas ASTM A193-A193M, A194-A194M e A320-320M, que tratam do desenvolvimento de fixadores para aplicações em altas e baixas temperaturas e em condições severas de pressão, indicando apenas tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Portanto, espera-se contribuir para o entendimento da relação entre os mecanismos microestruturais associados às transformações de fase, durante os diferentes arranjos experimentais, com o comportamento mecânico do aço AISI/SAE 4140. Se procura, também, avaliar a eficácia do tratamento não convencional (têmpera e partição) sobre o conjunto de propriedades exigidos em norma para as aplicações pretendidas.
Palavras chave: (máximo 5)	têmpera e partição; transformação martensítica; tenacidade à fratura; fixadores; austenita retida
Grande Área do conhecimento:	Engenharias
Área do conhecimento:	Transformação de Fases
Nome do Grupo de Pesquisa: (CNPq - Diretório)	Metalurgia Física e Engenharia de Superfície ( <a href="http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalhegrupo.jsp?grupo=46863038IPZBKR">http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalhegrupo.jsp?grupo=46863038IPZBKR</a> )
Está vinculado a outro projeto de pesquisa?	
Período de realização:	01/08/2013 a 30/11/2014
A atividade receberá algum aporte financeiro?:	Não
Propriedade Intelectual (o resultado do projeto é ou poderá ser protegido por):	

■ ■ ■ **Envolvidos neste projeto de pesquisa**

<b>Coordenador</b>	
Nº do SIAPE:	2047389
Nome do Coordenador:	Modesto Hurtado Ferrer
CPF do Coordenador:	21943773874
Departamento:	CAMPUS DE JOINVILLE
Centro:	CAMPUS DE JOINVILLE

Regime de trabalho:	DE
Fone de contato:	47-92807450
E-mail:	ferrer.m.h@ufsc.br
Carga horária semanal nesta atividade:	5 horas
Receberá remuneração nesta atividade de pesquisa?	Não

Você gostaria de participar do guia de fontes da UFSC?	Sim
--	-----

Outros prof. ou servidores da UFSC envolvidos?	Não
--	-----

Alunos da UFSC envolvidos?	Não
----------------------------	-----

Pessoas externas à UFSC envolvidas?	Sim
-------------------------------------	-----

**No documents found**

<p><b>Outras Considerações</b></p> <p>+++++</p> <p>Observações ad-referendum da CPE: Anexar projeto de pesquisa.</p> <p>+++++</p> <p>Este projeto vem sendo desenvolvido desde 02/2012. Até o momento envolveram-se estudantes de IC da Instituição de procedência (SOCIESC) - com duas bolsas de IC (uma PIBIT (2012) e uma PIBIC (2013)), além de 01 mestrando do programa de mestrado em Engenharia Mecânica da UNISOCIESC.</p> <p>O projeto teve aporte financeiro das empresas CISER e SOCIESC, este recurso foi alocado junto à UNISOCIESC, portanto, nesta fase de transição não haverá aporte de recursos para a UFSC.</p> <p>Neste projeto gostaria da colaboração de colegas prof. do CEM, bem como alunos da UFSC, os quais serão cadastrados assim que tiver todos os dados disponíveis.</p> <p>Os participantes externos correspondem com alunos de mestrado e de IC da instituição de onde procede o proponente.</p>
--

Nº do Processo:	2013.1093
-----------------	-----------



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC**  
**Centro de Engenharias da Mobilidade – CEM**  
**(Campus Joinville)**

**PROJETO DE PESQUISA**

**Tenacidade à fratura do aço AISI/SAE- 4140 quando tratado através  
de têmpera e partição**

Proponente: Modesto Hurtado Ferrer, Dr.

Joinville, outubro de 2013

## RESUMO

Estudos recentes indicam que o tratamento de têmpera e partição possibilita processar aços convencionais de forma comercial e obter excelentes melhorias em suas propriedades mecânicas, como por exemplo, aumento da resistência ou aumento da ductilidade. Nesse sentido, neste projeto se propõe o estudo do comportamento do aço AISI/SAE 4140 em rotas de têmpera e revenimento convencionais e de têmpera e partição (não convencionais), se utilizando de caracterização microestrutural e, também, de caracterização mecânica, principalmente de estudos da tenacidade à fratura, através de ensaios de resistência ao impacto. De modo a explorar o ramo mercadológico junto ao setor do petróleo e gás, busca-se também atender às normas ASTM A193-A193M, A194-A194M e A320-320M, que tratam do desenvolvimento de fixadores para aplicações em altas e baixas temperaturas e em condições severas de pressão, indicando apenas tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Portanto, espera-se contribuir para o entendimento da relação entre os mecanismos microestruturais associados às transformações de fase, durante os diferentes arranjos experimentais, com o comportamento mecânico do aço AISI/SAE 4140. Se procura, também, avaliar a eficácia do tratamento não convencional (têmpera e partição) sobre o conjunto de propriedades exigidos em norma para as aplicações pretendidas.

Palavras-chaves: Tenacidade á fratura, transformação martensítica, têmpera e partição, austenita retida.

## 1- Introdução

Novas aplicações dos aços de baixa liga das famílias AISI/SAE 41XX vêm sendo estudadas como resposta às crescentes demandas da indústria do petróleo e gás, onde se busca uma combinação atraente de propriedades mecânicas, de modo a atender as especificações estabelecidas pelas normas ASTM A193-A193M, A194-A194M e A320-320M, que tratam do desenvolvimento de fixadores para aplicações em altas e baixas temperaturas e em condições severas de pressão, indicando apenas tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

A pesar dos esclarecimentos que decorrem das normas, sabe-se da dificuldade prática para a obtenção do arranjo de microestrutura que permite o comportamento exigido por elas. Face este problema, atualmente os fabricantes de fixadores procuram investigar a correlação entre as condições em que se realiza o tratamento térmico convencional (têmpera e revenimento), com a microestrutura e propriedades mecânicas resultantes no aço AISI/SAE 4140, principalmente, a caracterização experimental do comportamento dúctil-frágil em baixas temperaturas, sob condições diferentes de tratamento térmico.

Como alternativa, um novo processo de tratamento térmico, denominado têmpera e partição, foi proposto recentemente por Martins, A.R.F.A. (2007) e Speer, J.G, *et al.* (2003) com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de outra família de aços, com diferentes percentuais de C, Ni, Si, Mn, Cr e Mo, conhecidos como aços multifásicos, de alta resistência mecânica, com teores significativos de austenita retida, particularmente os utilizados em aplicações onde é necessária uma combinação atraente entre ductilidade, resistência e tenacidade.

Os estudos voltados para essa classe de aços têm objetivado o aumento da ductilidade e tenacidade, a minimização da variação das propriedades e conseqüentemente uma maior confiabilidade em serviço, através da melhoria e inovações de técnicas de refino e processamento e também através de um maior controle do processamento e inspeção.

Baseado nisso, a principal motivação para a submissão deste projeto de pesquisa é avaliar uma nova proposta de tratamento térmico, baseado nos conceitos de têmpera e partição, de modo a obter uma microestrutura controlada, constituída por martensita e austenita retida, que atenda às mesmas especificações de resistência que são estabelecidas para o modo de tratamento de têmpera e

revenimento quando o aço AISI/SAE 4140 é destinado para a fabricação de elementos de fixação.

Nesta pesquisa os esforços estarão concentrados no sentido de promover a máxima estabilização e enriquecimento de carbono da austenita, pelo fenômeno de partição deste elemento intersticial, mediante arranjo experimental onde serão variados os parâmetros de temperatura e tempo durante as etapas de têmpera e de partição. Ainda procura-se avaliar o efeito da estabilização da austenita retida sobre a cinética da transformação martensítica induzida por deformação da austenita retida.

Particularmente a caracterização microestrutural e mecânica dos aços AISI/SAE 4130 submetidos a tratamento térmico de têmpera e partição constitui um tema recente dentro do segmento onde se contextualiza esta pesquisa. Trata-se, portanto, de um assunto promissor onde o controle adequado do processamento, da microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas, não estão plenamente estabelecidos, pelo que se justifica o esforço a ser realizado neste sentido.

## **1.1- Objetivos**

### **1.1.1- Objetivo geral**

- Avaliar a tenacidade à fratura do aço AISI/SAE- 4140 em função das características microestruturais quando tratado sob diferentes arranjos experimentais de têmpera e partição.

### **1.1.2- Objetivos específicos**

- Estudar a influência dos parâmetros (temperatura e tempo) dos processos de tempera e de partição sobre a morfologia dos produtos da transformação de fase;
- Avaliar o efeito dos parâmetros do processo na estabilização e enriquecimento da austenita pelo fenômeno de partição de carbono;
- Avaliar a tenacidade à fratura em função dos aspectos morfológicos da transformação de fase;

- Estabelecer correlação entre a tenacidade à fratura com os arranjos microestruturais obtidos nas diferentes condições experimentais de tratamento térmico, com ênfase naqueles onde se apreciem os maiores graus de estabilização da austenita retida;
- Verificar experimentalmente a transformação martensítica induzida pela deformação da austenita retida durante os ensaios para as medidas da tenacidade à fratura e em função da temperatura do ensaio;
- Caracterização da fractografia em corpos de provas resultantes dos ensaios de resistência ao impacto, em diferentes temperaturas, nas condições experimentais onde for constatada a melhor correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas, de modo a determinar os mecanismos da fratura;
- Permitir a comparação das características mecânicas do aço AISI/SAE4140 quando tratado através de têmpera e partição com aquelas obtidas através do tratamento convencional de têmpera e partição.

## **2- Revisão Teórica**

### **2.1- Fundamentos metalúrgicos do aço AISI/SAE 4140**

Os aços da família AISI/SAE 41XX são usualmente empregados na fabricação de diversos componentes de máquinas, tais como: virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, parafusos de alta resistência, peças para equipamentos de perfuração, entre outras aplicações.

Em relação aos aços de médio teor de carbono contendo pequenas adições de elementos de liga, os aços de baixa liga correspondentes à família 41XX são modificados ao cromo e ao molibdênio, elementos que aumentam sua temperabilidade, requerendo convencionalmente de tratamento térmico que consiste em têmpera em óleo seguido de revenimento.

Apesar destes aços não apresentarem boa soldabilidade, são requisitados para aplicações em condições extremas que exigem alta resistência mecânica, associada à redução de peso do componente, para suportar maiores esforços mecânicos a fadiga, impacto, bem como resistência a desgaste.

Particularmente, os aços de baixa liga da família AISI/SAE 41XX, especialmente o 4130 e o 4140, estão entre os aços mais usados na indústria do

petróleo em aplicações de alta resistência, como em corpos pressurizados, *bonnets*, *flanges*, *hangers*, pistões de operação, *subs*, elementos de fixação, entre outras. Destacam-se, também, por atender com certa facilidade, quando tratados termicamente, os níveis de resistência requeridos pelos códigos API (*American Petroleum Institute*), por serem relativamente baratos e bastante disponíveis no mercado, (LIMA, 2006), (DUFOUR, 2002).

Quando o aço AISI/SAE 4140 é utilizado na fabricação de elementos de fixação para aplicações nas indústrias do petróleo e gás, são exigidas características específicas, estabelecidas pelas normas do próprio setor. Nesse sentido, neste trabalho se pretende o desenvolvimento da tecnologia de tratamento térmico para atender as especificações para o uso de parafusos da classe L7, estabelecidas pela norma ASTM A320/A320M, destinada a fixadores de aço-liga e aço inoxidável para uso em baixas temperaturas.

Esta norma estabelece que os parafusos da classe L7, após a usinagem das roscas, sejam austenitizados e temperados em meio líquido, sendo posteriormente submetidos a revenimento. A temperatura mínima para o revenimento que é sugerida é de 593°C. Conseqüentemente, a mínima resistência à tração exigida a estes elementos de fixação deve ser de 860 MPa, com limite de escoamento mínimo de 725 MPa, alongamento mínimo em um comprimento de 50 mm de 16 % e a dureza máxima de 321 HBW ou 35 HRC. Por outro lado, os parafusos da série L7 devem ser submetidos ao ensaio de impacto do tipo Charpy, em temperatura de -101 °C, absorvendo energia mínima de 27 J.

Sabe-se que o aço AISI/SAE 4140, após tratamento térmico de tempera e revenimento, é microconstituído por martensita e bainita, dependendo da taxa de resfriamento adotada. Neste caso o controle do processo é essencial para a obtenção de uma microestrutura que atenda aos esforços mecânicos solicitados em serviço.

O tratamento térmico normalmente adotado nos aços AISI/SAE 4140, em função do grau de exigência nas propriedades mecânicas, consiste em tempera seguido de revenido ou normalizado seguido de tempera e revenido, este último caso quando é necessário garantir elevados níveis de tenacidade.

Um novo processo, denominado têmpera e partição, foi estudado por Martins (MARTINS, 2007) e proposto por Speer, J.G. (SPEER, 2003) com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de aços de baixa liga. Após diferentes arranjos

de parâmetros nos processos de têmpera e partição, os autores obtiveram uma microestrutura multifásica, com frações significativas de austenita retida, apresentando alta resistência mecânica, obtida por ensaio de resistência à tração, sugerindo sua aplicação em componentes que requeiram combinações atraentes de resistência e tenacidade.

O processo de têmpera e partição foi investigado em ligas do sistema Fe-C, contendo diferentes percentuais de Ni, Si, Mn, Cr e Mo. A adição desses elementos teve por finalidade suprimir a formação da bainita, através da diminuição da temperatura de início de reação ( $B_s$ ), de acordo com Ericsson (ERICSON, 1991), tornando assim possível a partição do carbono da martensita supersaturada (obtida na têmpera) para a austenita (durante o tratamento posterior, aqui denominado “tratamento de partição”). Destaque foi dado aos elementos Mn e Ni que atuam ainda como estabilizadores da austenita, uma vez que diminuem a temperatura de início de transformação, e que levam a um aumento da solubilidade do carbono, permitindo assim que a austenita se torne estável à temperatura ambiente.

Como resultado deste modo de tratamento os autores obtiveram uma significativa fração de austenita retida, considerada benéfica, devido ao fenômeno conhecido como “TRIP” (plasticidade induzida por transformação) que pode ser ocasionado durante qualquer evento que ocasione deformação plástica durante o uso destes aços. A exploração deste efeito, como um mecanismo particular de endurecimento, constitui um dos aspectos-chaves para o processamento desses materiais, uma vez a partir da fração de austenita metaestável resultante proporcionalmente pode ocorrer a transformação martensítica induzida por deformação.

A transformação martensítica induzida por deformação evita a ocorrência de deformações localizadas, aumentando assim o alongamento uniforme e a taxa de encruamento. Outro efeito extremamente benéfico da presença de austenita retida é a maior absorção de energia durante o impacto, que pode contribuir para o atendimento aos requisitos estabelecidos pelas normas para estas aplicações.

No contexto dos fundamentos para a realização desta pesquisa torna-se necessário conhecer os aspectos teóricos relacionados com a transformação martensítica em aços bem como dos princípios da metalurgia física do tratamento térmico de têmpera e partição.

### **2.1.1- Fundamentos da transformação martensítica em aços.**

Normalmente, quando o aço é aquecido em temperaturas elevadas a austenita em equilíbrio se decompõe sob resfriamento rápido em martensita, alterando as condições de equilíbrio do  $Fe\alpha$ , quando o teor de carbono atinge os correspondentes valores que a austenita de partida, excedendo o limite máximo de solubilidade desta fase em condição de equilíbrio, (BHADESHIA, 1999).

Nesses casos, a transformação martensítica segue um modelo onde a difusão é suprimida, fazendo com que os átomos de carbono não se redistribuem durante a formação de ferrita e cementita, como ocorre nas transformações com difusão, e desta forma permanecem aprisionados nas posições octaédricas de uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), produzindo a martensita como nova fase.

Uma teoria bem sucedida para explicar a morfologia da transformação martensítica é aquela que constata sua formação através de um mecanismo de cisalhamento, no qual vários átomos se movimentam cooperativamente e quase simultaneamente para efetuar a transformação, mecanismo este bem diferente do movimento de átomo por átomo através de interfaces que ocorre durante as transformações difusionais. Como resultado do cisalhamento é possível obter morfologias martensítica em ripas e placas, dependendo dos teores de carbono da liga, podendo se obter uma morfologia mista.

As ripas são agrupadas em entidades estruturais maiores, os blocos. Os detalhes microestruturais desse tipo de martensita são muito finos para serem revelados por microscopia ótica. As placas descrevem propriamente a forma das unidades de martensita que se formam em aços de alto teor de carbono (LIMA, 2006).

### **2.2- Fundamentos da Têmpera e Partição.**

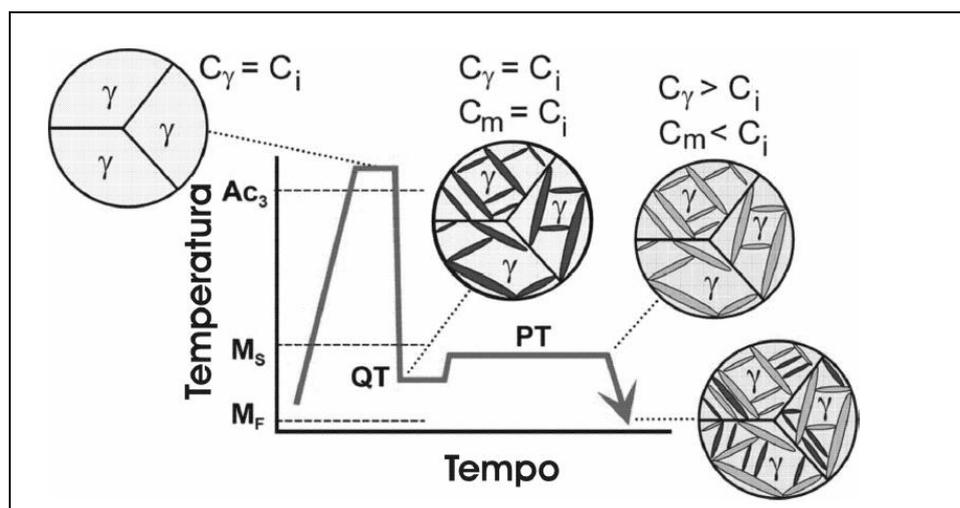
O fenômeno de difusão de carbono entre a ferrita e a austenita durante transformações difusionais em temperaturas elevadas está relativamente bem compreendido. Entretanto, particularidades relacionadas ao fenômeno de partição do carbono, durante ou após a transformação martensítica, ainda geram dúvidas e mesmo opiniões controversas (MARTINS, 2007), particularmente com respeito à formação da bainita. No caso da transformação martensítica é fato que esta ocorre

sem a difusão de átomos de carbono, e de outros átomos intersticiais, e que sendo assim a nova fase formada vai se encontrar supersaturada de carbono.

Nos tratamentos térmicos convencionais, a subsequente partição de carbono entre a martensita e a austenita retida é geralmente ignorada, uma vez que as temperaturas usadas são muito baixas para permitir a difusão significativa após a têmpera e principalmente devido à supersaturação ser geralmente eliminada por processos competitivos, sendo o mais comum deles a precipitação de carbonetos durante a etapa de revenido (SPEER, 2005).

O processo de têmpera e partição (Q&P) foi desenvolvido com o intuito de gerar microestruturas mistas compostas por martensita, ferrita e frações controladas de austenita retida (Speer, 2005). A seqüência de tratamentos propostos no processo de têmpera e partição, assim como as fases correspondentes, está esquematizada na **Figura 1** (MARTINS, 2007), (SPEER, 2005). Nesse processo de Q&P a supersaturação de carbono na martensita temperada é utilizada para estabilizar a austenita não transformada, o que acontece durante a etapa de partição pela migração de carbono da martensita supersaturada para a austenita retida (MARTINS, 2007), (SPEER, 2005). A difusão do carbono é possível porque a precipitação de carbonetos é suprimida pela adição de elementos de liga, como o Si.

**Figura 1.** Desenho esquemático do processo de Têmpera e Partição.  $C_i$ ,  $C_\gamma$ ,  $C_m$ , representam a concentração de carbono na liga, na austenita e na martensita respectivamente. QT representa a temperatura de têmpera e PT temperatura de partição.



Fonte: MARTINS, ( 2007), SPEER, (2005).

A supressão da precipitação de carbonetos é a grande diferença quando comparado com tratamentos térmicos convencionais como de têmpera e revenido, onde se espera que o carbono forme carbonetos durante o revenido. Por outro lado, a possibilidade de estabilizar a austenita pelo enriquecimento de carbono, durante o processo de partição, distingue o processo de *Q&P* dos tratamentos tradicionais que promovem a transformação bainítica nos aços *TRIP*.

Para tornar viável o processo de partição de carbono entre a martensita e a austenita é necessária a existência de austenita antes e depois da têmpera, (MARTINS, 2007). Isso é possível através de duas diferentes rotas de tratamento térmico. A primeira é através de uma austenitização completa do material e a segunda é através de um tratamento intercrítico com a presença de frações iniciais de ferrita/austenita. Para um dado aço, a austenita resultante de um tratamento intercrítico possui uma concentração de carbono maior que a austenita proveniente da austenitização plena, sendo assim mais estável. Neste caso a fração volumétrica de martensita produzida é controlada pelo resfriamento a uma temperatura específica entre  $M_s$  e  $M_f$  após a etapa de austenitização.

### **2.3- Comportamento Dúctil - Frágil em aços para fins estruturais**

Normalmente, os materiais apresentam uma variação de tenacidade ou de ductilidade com a variação da temperatura. Os metais e suas ligas com estrutura cristalina cúbica de faces centradas predominantes, por exemplo, cobre, alumínio, níquel e aço inoxidável austenítico, apresentam uma queda menos abrupta de tenacidade com a diminuição da temperatura do que aqueles materiais com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, por exemplo, aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos entre outras ligas do sistema Fe-C (PADILHA, 2000).

Sabe-se que a causa da transição do comportamento dos aços ferríticos de dúctil para frágil, quando a temperatura diminui, justifica-se pela mudança no modo metalúrgico da fratura mecânica, neste caso da fratura por cisalhamento para a fratura por clivagem, pela inibição dos mecanismos que normalmente promovem a deformação plástica (CALLISTER, 2012). Como uma consequência desse aumento da restrição à deformação plástica, ocasiona-se a passagem do escoamento em larga escala para o escoamento de modo restrito quando se avalia o comportamento

mecânico macroscópico do material. Isso faz com que o material sofra a fratura logo após que o limite de escoamento é atingido.

Além da temperatura, os mecanismos que restringem a deformação plástica nos materiais de engenharia, que provocam seu endurecimento, favorecem a queda da sua tenacidade e ductilidade, pode-se citar: a taxa de deformação que é aplicada ao material, durante a conformação mecânica, para reduzir a seção transversal, promovendo o encruamento e, conseqüentemente, o estado de tensões interna que são geradas; a composição química da liga; a microestrutura; entre outros aspectos, (MAROPOULOS, 2004).

Para carregamento estático a região de transição ocorre a temperaturas mais baixas do que para carregamento dinâmico. Então, para estruturas sujeitas a carregamento estático, a curva de transição estática deve ser usada para prever seu comportamento em serviço, enquanto que, para estruturas sujeitas a carregamento dinâmico, usa-se a curva de transição dinâmica.

Da mesma forma, para estruturas sujeitas a taxas intermediárias de carregamento, usa-se a curva de transição intermediária. Quando as taxas reais de carregamento não são bem definidas, a curva de carregamento dinâmico é usada para prever o comportamento da estrutura em serviço. Essa prática é conservadora e explica porque muitas estruturas que apresentam baixa tenacidade ao entalhe, medida pelos ensaios de impacto, não falham, mesmo com temperaturas de serviço bem abaixo da temperatura de transição sob condições de carregamento dinâmico, (MAROPOULOS, 2004).

A presença de um entalhe (ou de outro concentrador de tensões) em um componente, que pode alterar o estado de tensões predominantes para um estado triaxial na região do entalhe, dificulta a deformação plástica e, conseqüentemente, reduz a ductilidade (ou a tenacidade) a uma determinada temperatura. A presença de um entalhe tende a aumentar a temperatura de transição dúctil-frágil, tendo, portanto, um efeito similar ao aumento da taxa de deformação.

Em relação ao efeito da microestrutura na tenacidade à fratura nos aços baixa liga com médio teor de carbono, alguns autores afirmam que microestruturas mistas, constituídas por martensita e bainita apresentam propriedades de tenacidade e resistência superiores às dos aços com estrutura convencionalmente obtida pelos procedimentos de têmpera e revenido, ou seja, unicamente constituída por

martensítica (MALAKONDAIAH, G. 1997), (BARBACKI, A., 1995), (TOMITA, Y., 1995), (TOMITA, Y., 1991).

Os autores sugerem a produção de um aço com estrutura mista constituída por martensita e bainita inferior (25%) através de um tratamento térmico modificado, que consiste em promover a transformação isotérmica de curto tempo na região de temperaturas onde predomina a bainítica, logo acima da temperatura inicial da transformação martensítica ( $M_s$ ), seguida de têmpera. Com esse tratamento registraram-se valores de energia de impacto e resistência superiores às obtidas através da prática dos tratamentos convencionais em aços AISI 4340 e 4140 e até mesmo em aços baixa liga de alto carbono (TOMITA 1995 e 1991).

Esse tratamento, também, se mostrou eficiente, em termos de melhoria das propriedades mecânicas e isotropia, quando aplicado de maneira conjugada com o decréscimo da taxa de redução durante laminação a quente. O aumento da resistência foi atribuído ao refino da subestrutura obtido na matriz martensítica e ao aumento da resistência da bainita inferior devido à maior restrição plástica da bainita pela martensita. A melhoria da tenacidade foi atribuída tanto ao efeito de aprisionamento da trinca na bainita como ao efeito de alívio de tensões da bainita bem em frente da trinca pré-existente (LIMA, B. F., 2006). Os resultados mostraram, também, que a presença de bainita superior é prejudicial uma vez que eleva a temperatura de transição do modo de fratura, independente da sua fração volumétrica.

Embora pesquisas científicas em materiais ajudem enormemente no entendimento da origem dos fenômenos, muitos problemas permanecem quando são necessários tratamentos quantitativos das variáveis associadas ao desenvolvimento e processamento dos mesmos (BHADESHIA, 1999). Por tanto, a previsão das propriedades mecânicas a partir do conhecimento das características microestruturais dos aços nem sempre é facilitada pela sinérgica das variáveis do processo.

No entanto, alguns padrões foram desenvolvidos e validados por vários pesquisadores, entre eles, a tenacidade medida através de ensaio Charpy. Embora não seja exatamente claro o quanto se espera que a tenacidade melhore, a relação qualitativa está bem estabelecida com base no vasto número de experimentos já reportados na literatura (LIMA, 2006), (BHADESHIA, 1999). Neste sentido, muitos trabalhos têm permitido o estabelecimento de correlações entre as características

microestruturais observadas, a partir do controle dos parâmetros do processo, com as propriedades mecânicas e com o comportamento dúctil-frágil dos materiais ensaiados (MAROPOULOS, 2004), (KIM, 2000), (BHADESHIA, 1999).

Contudo, a correlação entre propriedades mecânicas e microestruturas em aços temperados e revenidos é muito complexa devido justamente a complexidade dos mecanismos das transformações de fase bem como das microestruturas resultantes (LI, 2003). Sabe-se que vários são os fatores que afetam o comportamento dúctil-frágil de um aço, tais como: composição química, processamento, microestrutura e fatores mecânicos. Se esses fatores operassem independentemente nos materiais, a maneira mais simples de estimar o comportamento em serviço seria a soma linear destes em cada etapa da fabricação. Todavia, a contribuição de cada um deve ser considerada de maneira combinada ao invés da simples adição.

### 3- Metodologia

O material objeto de estudo é um aço AISI/SAE 4140, fabricado pela empresa Gerdau e comercializado pela empresa DiFerro, em formato de chapa grossa com 12,4 mm de espessura, com a composição química conforme apresentada na **Tabela 1**.

Tabela 1. Composição química do aço em estudo (%p)

Aço	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
AISI/SAE 4140	0,38	0,30	1,0	1,10	0,25	0,035	0,035

Após o recozimento pleno das chapas grossas, serão confeccionados os corpos de prova com o formato de um prisma de base retangular com 12x15x15mm, a serem utilizados nos experimentos de tratamentos térmicos.

O procedimento experimental consistirá em um tratamento subcrítico de têmpera entre  $M_S$  e  $M_f$ , onde os corpos de prova serão mantidos em temperatura variável por curto tempo, seguido do tratamento da partição, na qual serão reaquecidos em banho de sais variando a temperatura (numa faixa abaixo e acima (muito próxima) de  $M_S$ ) e o tempo, de modo a promover a estabilização da austenita retida através do fenômeno de partição de carbono. Um esquema que visualiza o procedimento de trabalho que foi realizado, sobrepondo-se ao diagrama TTT-Temperatura-Tempo-Transformação do aço, é dado na **Figura 2**. Os parâmetros do experimento são detalhados na **Tabela 2**.

Figura 2. Representação esquemática do arranjo experimental do ciclo térmico de martêmpera seguida de partição.

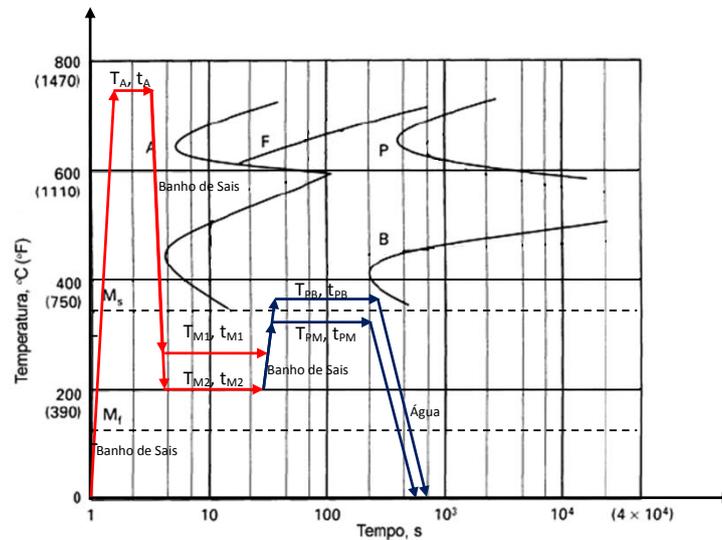


Tabela 2. Arranjo experimental proposto, referente aos ciclos térmicos de martêmpera seguido de partição.

Experimento	Austenitização				Martêmpera			Partição			
	Forno	$T_A$ (°C)	$t_A$ (s)	Resfriam.	$T_{AU}$ (°C)	$t_{AU}$ (s)	Resfriam.	Forno	$T_R$ (°C)	$t_R$ (s)	Resfriam.
1	Banho de Sais	820	300	Banho de Sais	170	15	Óleo	Banho De Sais	280	15	Ar
2						30				30	
3						45				45	
4						60				60	
5						120				120	
6					15	15					
7					30	30					
8					45	45					
9					60	60					
10					120	120					
11					15	15					
12					30	30					
13					45	45					
14					60	60					
15					120	120					
16					15	15					
17					30	30					
18					45	45					
19					60	60					
20					120	120					

A caracterização microestrutural, correspondente a cada arranjo experimental de temperatura e tempo, será realizada com o auxílio dos métodos tradicionais de metalografia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permitiram a caracterização da morfologia da transformação de fase em cada condição experimental. A caracterização com MEV será realizada junto à ArceloMittal Vega do Sul, onde pretende-se realizar a análise da fratura dos materiais a serem ensaiados por impacto Charpy.

As frações transformadas de cada um dos constituintes será determinada com auxílio de técnicas de metalografia quantitativa utilizando MO. Como complementação à caracterização com MO, será utilizada a técnica de difração de raios X com a finalidade de determinar as frações de austenita retida, em amostras previamente selecionadas, a ser feito junto ao Departamento de Engenharia de Materiais, com o apoio do Prof. Dr. Marcio Ferreira Hupalo.

Por outro lado, será realizada a caracterização morfológica com o auxílio de medições de microdureza (HV) nos constituintes identificados. Também, serão feitos ensaios de dureza (HRC) em cada condição de trabalho, todos eles junto aos Laboratórios de Caracterização de Materiais da UNISOCIESC.

O comportamento mecânico será caracterizado mediante ensaios de tração em corpos de prova, referentes a cada condição experimental, usinados nas dimensões *subsize* de 6 mm de espessura por 25 mm de comprimento, conforme recomendado pela norma ASTM E8/E8M-9 (2009), que permitirão a determinação dos limites de escoamento e de resistência bem como o alongamento do material.

Com base em resultados experimentais, previamente obtidos, aqueles arranjos de microestrutura que apontem para uma melhor correlação entre microestrutura com as propriedades mecânicas, serão reproduzidos em corpos de prova, de modo a caracterizar a transição dúctil/frágil, com o auxílio de ensaio de impacto Charpy. Para estes ensaios serão usinados corpos de prova nas dimensões *subsize* de 55X10X5 mm conforme a norma ASTM E23-06 (2006), em condições diferentes de temperatura, utilizando nitrogênio líquido por tempo variável (para temperaturas abaixo de zero grau) e aquecimento em forno tipo mufla (para amostras acima da temperatura ambiente). Este ensaio será realizado junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, com o apoio do Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira.

#### 4- Bibliografia:

- ASTM. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steels products: A370-01, 2002.
- BHADESHIA, H. K. D. H. Neural Networks in Materials Science, ISIJ International v. 39, n. 10, pp. 966-979, 1999.
- BAKER, R., A. Primer of Oilwell Drilling – A Basic Text of Oil and Gas Drilling. 5 ed. (Revisada) Texas, Petroleum Extension Service, The University of Texas at Austin, em cooperação com International Association of Drilling Contractors, 1996.
- BARBACKI, A. “The Role of Bainite in Shaping Mechanical Properties of Steels”, Journal of Materials Processing Technology v. 53, pp. 57-63, 1995.
- DUFOUR, J.D., An Introduction to Metallurgy. 4 ed. Houston-TX, Cooper Cameron Corporation, 2002.
- ERICSSON, T. Principles of Heat Treating of Steels. In: ASM Handbook, v. 4, Heat Treating, ASM international, pp. 3-19, 1991.
- KIM, M. C., OH, Y. J., HONG, J. H. Characterization of Boundaries and Determination of Effective Grain Size In Mn-Mo-Ni Low Alloy Steel From The View of Misorientation, Scripta Materials v. 43, pp. 205-211, 2000.
- KRAUSS, G., Steels: Heat Treatment and Processing Principles. 4 ed. Ohio, ASM International, 1995.
- LI, Q. Modeling the microstructure-mechanical property relationship for a 12Cr-2W-V-Mo-Ni power plant steel, Materials Science and Engineering v. A, n. 361, pp. 385-391, 2003.
- LIMA, B. F. Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41xx – uma abordagem quantitativa. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.
- MALAKONDAIAH, G., SRINIVAS, M., RAMA RAO, P. Ultrahigh-Strength Low-Alloy Steels with Enhanced Fracture Toughness, Progress in Materials Science v. 42, pp. 209-242, 1997.
- MAROPOULOS, S., RIDLEY, N. Inclusions and Fracture Characteristics of HSLA Steel Forgings, Materials Science and Engineering v. A, n. 384, pp. 64-69, 2004.
- MARTINS, A.R.F.A. Têmpera e partição em aços contendo Ni: modelagem cinética, microestrutura e propriedades mecânicas. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro-Rj, 2007.



Usinagem dos corpos para ensaios de resistência a tração e de impacto Charpy.				x	x	x	x					
Ensaio de resistência mecânica				x	x	x						
Correlação e análise geral de resultados: envolvendo a caracterização microestrutural com MO, MEV, difração de raios X, microdureza, dureza, ensaio de resistência à tração.				x	x	x						
Aquisição de botijão de nitrogênio e adequação da infra-estrutura para a realização dos ensaios de Impacto Charpy.						x	x					
Ensaio de resistência ao impacto.							x	x	x			
Análise do modo de fratura (análise visual e com microscopia).								x	x	x		
Interpretação de resultados e obtenção das curvas de transição dúctil/frágil.									x	x	x	
Submissão de artigos científicos em congresso (ex. o Congresso da ABM e/ou revistas especializadas).			x	x			x	x			x	x
Relatório final.										x	x	x
Apresentação de trabalhos em congresso da ABM.												x

Para se obter os recursos previstos preliminarmente o proponente deste projeto deverá submeter proposta de projetos de pesquisa, através dos editais para o auxílio à pesquisa regularmente promovidos pelas agências de fomento à pesquisa FAPESP, CNPq, CAPES, entre outras, bem como buscar parcerias com empresas do ramo.